

Σχολή Εφαρμοσμένων Τεχνών και
Βιώσιμου Σχεδιασμού
Περιβαλλοντικός Σχεδιασμός Πόλεων και Κτιρίων

Διπλωματική Εργασία

«Αξιολόγηση της θερμικής άνεσης και στρατηγικές
βελτιστοποίησης στους εξωτερικούς χώρους νοσοκομείων αστικών
περιοχών με Μεσογειακό κλίμα υπό συνθήκες κλιματικής κρίσης»

«Αθανασία Βαβίτσα»

Επιβλέπουσα καθηγήτρια: «Αρετή Τσέλιου»

Πάτρα, Σεπτέμβριος 2026

© Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο, 2026

Η παρούσα Εργασία καθώς και τα αποτελέσματα αυτής, αποτελούν συνιδιοκτησία του ΕΑΠ και του φοιτητή, ο καθένας από τους οποίους έχει το δικαίωμα ανεξάρτητης χρήσης, αναπαραγωγής και αναδιανομής τους (στο σύνολο ή τμηματικά) για διδακτικούς και ερευνητικούς σκοπούς, σε κάθε περίπτωση αναφέροντας τον τίτλο και το συγγραφέα της Εργασίας καθώς και το όνομα του ΕΑΠ όπου εκπονήθηκε.

«Αξιολόγηση της θερμικής άνεσης και στρατηγικές βελτιστοποίησης στους εξωτερικούς χώρους νοσοκομείων αστικών περιοχών με Μεσογειακό κλίμα υπό συνθήκες κλιματικής κρίσης»

«Αθανασία Βαβίτσα»

Επιτροπή Επίβλεψης Διπλωματικής Εργασίας

Επιβλέπουσα Καθηγήτρια

«Αρετή Τσέλιου»

«Μέλος ΣΕΠ, ΕΑΠ»

Συνεπιβλέπουσα Καθηγήτρια

«Αναστασία Πασχαλίδου»

«Μέλος ΣΕΠ, ΕΑΠ»

Πάτρα, Σεπτέμβριος 2026

«Αθανασία Βαβίτσα», «Αξιολόγηση της θερμικής άνεσης και στρατηγικές βελτιστοποίησης στους εξωτερικούς χώρους νοσοκομείων αστικών περιοχών με Μεσογειακό κλίμα υπό συνθήκες κλιματικής κρίσης»

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες στην επιβλέπουσα καθηγήτριά μου, Δρ Αρετή Τσέλιου, για την ανάθεση του συγκεκριμένου θέματος, καθώς επίσης και για τη συνεχή καθοδήγηση και τις υποδείξεις της σε όλη τη διάρκεια της πραγματοποίησής του.

Επίσης, ευχαριστώ θερμά τη δεύτερη επιβλέπουσα, Δρ Αναστασία Πασχαλίδου, για την πολύτιμη συνδρομή της, την τεχνική υπηρεσία του Γενικού Νοσοκομείου «Αλεξάνδρα» για τη σημαντική συνεισφορά τους και το πολύτιμο υλικό που αφειδώς μου προσέφεραν, καθώς και όλους όσοι συνέβαλαν στην ολοκλήρωση αυτής της διπλωματικής εργασίας.

Ιδιαίτερα, θα ήθελα να αφιερώσω την εργασία μου στην οικογένειά μου, η οποία όλα αυτά τα χρόνια με στηρίζει σε κάθε μου βήμα και απόφαση, προσφέροντάς μου ψυχική και πρακτική υποστήριξη, υπομένοντας εμένα και τον χρόνο που δεν τους διέθεσα.

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζει τη θερμική άνεση και τη θερμική καταπόνηση στους υπαίθριους χώρους νοσοκομειακών υποδομών υπό μεσογειακές κλιματικές συνθήκες, με έμφαση στις ευάλωτες ομάδες χρηστών.

Σκοπός της εργασίας είναι η αξιολόγηση του θερμικού περιβάλλοντος στους υπαίθριους χώρους νοσοκομείων που εντάσσονται σε πυκνοδομημένες αστικές περιοχές με μεσογειακό κλίμα, υπό συνθήκες αυξανόμενης θερμικής πίεσης και κλιματικής κρίσης, καθώς και η διερεύνηση στρατηγικών μείωσης της θερμικής επιβάρυνσης και προσαρμογής στην κλιματική αλλαγή. Η ανάλυση περιλαμβάνει διακριτά προφίλ ενήλικα, ηλικιωμένου και παιδιού. Η κατηγορία των ασθενών δεν προσομοιώνεται ως ενιαίο ανθρωποκεντρικό προφίλ, λόγω της κλινικής, φυσιολογικής και λειτουργικής ετερογένειάς της.

Ως περιοχή μελέτης επιλέχθηκαν οι υπαίθριοι χώροι του Γενικού Νοσοκομείου Αθηνών «Αλεξάνδρα», το οποίο εντάσσεται σε πυκνοδομημένο τμήμα του αστικού ιστού της Αθήνας. Η μικροκλιματική προσομοίωση πραγματοποιήθηκε για θερμή θερινή ημέρα με το τρισδιάστατο αριθμητικό μοντέλο ENVI-met. Η αξιολόγηση βασίστηκε στη θερμοκρασία αέρα, στη μέση ακτινοβολούμενη θερμοκρασία T_{mrt} , στην άμεση ηλιακή ακτινοβολία και στους βιοκλιματικούς δείκτες Physiologically Equivalent Temperature (PET – Φυσιολογικά Ισοδύναμη Θερμοκρασία) και Universal Thermal Climate Index (UTCI – Καθολικός Δείκτης Θερμικού Κλίματος).

Συγκρίθηκαν το σενάριο αναφοράς S1 και το συνδυαστικό σενάριο παρέμβασης S3. Το S3 περιλαμβάνει ενίσχυση της βλάστησης, εφαρμογή σκίασης, τροποποίηση των υλικών επιφανειών και παρεμβάσεις στα δώματα. Αποτελεί δυνητικά εφαρμόσιμο σχεδιαστικό σενάριο μετριασμού της θερμικής επιβάρυνσης και προσαρμογής στην κλιματική αλλαγή και όχι κατασκευαστικά ώριμη μελέτη εφαρμογής.

Το S3 μειώνει τη θερμική επιβάρυνση κυρίως μέσω του περιορισμού της ακτινοβολιακής έκθεσης και της μέσης ακτινοβολούμενης θερμοκρασίας. Η βελτίωση είναι εντονότερη στις ζώνες όπου οι παρεμβάσεις ενισχύουν άμεσα τη σκίαση και περιορίζουν την έκθεση στην ηλιακή ακτινοβολία, ενώ η μεταβολή της θερμοκρασίας αέρα παραμένει συγκριτικά μικρότερη. Στην κοινή ώρα αναφοράς των 16:00, στο σημείο PO2 της στάθμης δώματος, η

T_{mr,t} μειώνεται κατά 22,05 K και ο UTCI κατά 6,66 K, ενώ στο σημείο PO1 της στάθμης πεζού η αντίστοιχη μείωση του UTCI είναι 6,67 K. Οι τιμές αυτές αποτελούν μεταβολές ίδιας ώρας και επιτρέπουν άμεση σύγκριση μεταξύ των δύο σημείων.

Ο υπολογισμός του PET για τα διαφορετικά προφίλ χρήστη δείχνει ότι το ίδιο μικροκλιματικό πεδίο δεν οδηγεί σε ισοδύναμη εκτίμηση της θερμικής επιβάρυνσης για τον ενήλικα, τον ηλικιωμένο και το παιδί. Η χρονική διαφοροποίηση των τιμών PET ενισχύει την ανάγκη ανθρωποκεντρικής αξιολόγησης, χωρίς να επιτρέπει από μόνη της την απόδοση των διαφορών σε συγκεκριμένο φυσιολογικό μηχανισμό.

Παρά τις βελτιώσεις, οι τιμές των βιοκλιματικών δεικτών παραμένουν κατά τις ώρες αιχμής σε πολύ υψηλές ή ακραίες κατηγορίες θερμικής επιβάρυνσης. Επομένως, το S3 δεν εξασφαλίζει πλήρη θερμική άνεση, αλλά λειτουργεί ως στρατηγική μετριασμού της έκθεσης και δημιουργίας τοπικών ζωνών θερμικής ανακούφισης.

Ο συνδυασμός σκίασης, βλάστησης, κατάλληλων υλικών επιφανειών και παρεμβάσεων στα δώματα μπορεί να συμβάλει στη μικροκλιματική αναβάθμιση των υπαίθριων νοσοκομειακών χώρων. Η αποτελεσματικότητά του εξαρτάται από τη χωρική στόχευση των παρεμβάσεων και από την εξασφάλιση συνεχών προστατευμένων διαδρομών και ζωνών αναμονής και σύντομης παραμονής. Παρότι δεν προσομοιώθηκαν διακριτά προφίλ ασθενών, συνοδών και προσωπικού, τα ευρήματα έχουν λειτουργική σημασία για την προστασία του συνόλου των χρηστών και για την ενίσχυση της κλιματικής ανθεκτικότητας των νοσοκομειακών μονάδων.

Λέξεις – Κλειδιά

θερμική άνεση, βιοκλιματικός σχεδιασμός, νοσοκομειακοί υπαίθριοι χώροι, PET (Physiologically Equivalent Temperature / Φυσιολογικά Ισοδύναμη Θερμοκρασία), UTCI, ENVI-met (λογισμικό προσομοίωσης μικροκλίματος), ευάλωτες ομάδες, μεσογειακό κλίμα

Abstract

This dissertation examines thermal comfort and heat stress in the outdoor spaces of hospital facilities under Mediterranean climatic conditions, with particular emphasis on vulnerable user groups.

The aim of the study is to assess the thermal environment of outdoor hospital spaces located in densely built-up urban areas with a Mediterranean climate, under conditions of increasing heat pressure and climate crisis, and to investigate strategies for reducing thermal stress and adapting to climate change. The analysis includes distinct profiles for an adult, an older adult, and a child. Patients are not simulated as a single human-centred profile because of their clinical, physiological, and functional heterogeneity.

The outdoor spaces of the Alexandra General Hospital of Athens were selected as the case-study area. The hospital is situated within a densely built-up part of the urban fabric of Athens. The microclimatic simulation was conducted for a hot summer day using the three-dimensional numerical model ENVI-met. The assessment was based on air temperature, mean radiant temperature (T_{mrt}), direct shortwave solar radiation, and the bioclimatic indices Physiologically Equivalent Temperature (PET) and Universal Thermal Climate Index (UTCI).

The reference scenario S1 was compared with the combined intervention scenario S3. Scenario S3 includes increased vegetation, the introduction of shading measures, modifications to surface materials, and rooftop interventions. It represents a potentially implementable design scenario for mitigating thermal stress and adapting to climate change, rather than a construction-ready implementation study.

Scenario S3 reduces thermal stress primarily by limiting radiant exposure and lowering mean radiant temperature. The improvement is more pronounced in areas where the interventions directly increase shading and reduce exposure to solar radiation, whereas the change in air temperature remains comparatively smaller. At the common reference time of 16:00, T_{mrt} at point PO2, located at roof level, decreases by 22.05 K and UTCI by 6.66 K, while at point PO1, located at pedestrian level, the corresponding reduction in UTCI is 6.67

K. These values represent same-hour changes and therefore allow a direct comparison between the two points.

The calculation of PET for the differentiated user profiles shows that the same microclimatic field does not result in equivalent estimates of thermal stress for the adult, older adult, and child. The temporal variation in PET values reinforces the need for a human-centred assessment, although it does not, by itself, allow the observed differences to be attributed to a specific physiological mechanism.

Despite the improvements, the values of the bioclimatic indices remain within very high or extreme heat-stress categories during peak hours. Scenario S3 therefore does not ensure complete thermal comfort but functions as a strategy for mitigating exposure and creating local zones of thermal relief.

The combination of shading, vegetation, appropriate surface materials, and rooftop interventions can contribute to the microclimatic improvement of outdoor hospital spaces. Its effectiveness depends on the spatial targeting of the interventions and on the provision of continuous protected routes, waiting areas, and spaces for short-term stay. Although distinct profiles for patients, accompanying persons, and staff were not simulated, the findings have practical significance for the protection of all users and for strengthening the climate resilience of hospital facilities.

Keywords

thermal comfort, bioclimatic design, outdoor hospital spaces, PET (Physiologically Equivalent Temperature), UTCI (Universal Thermal Climate Index), ENVI-met (microclimate simulation software), vulnerable groups, Mediterranean climate.

Περιεχόμενα

Περίληψη.....	v
Λέξεις – Κλειδιά	vi
Abstract	vii
Keywords	viii
Περιεχόμενα.....	ix
Κατάλογος Σχημάτων	xvi
Κατάλογος Πινάκων	xxi
Συντομογραφίες & Ακρωνύμια.....	xxiv
.....	1
Εισαγωγή.....	1
Δομή της εργασίας	5
Κεφάλαιο 1. Βιβλιογραφική ανασκόπηση	7
1.1 Κλιματική αλλαγή - κλιματική κρίση	7
1.1.1 Σενάρια εκπομπών και κλιματικές προβολές.....	11
1.1.2 Καύσωνες στην Ελλάδα - Αττική/Αθήνα	12
1.2 Αστικό μικροκλίμα και αστική θερμική νησίδα	14
1.3 Θερμική άνεση σε υπαίθριους χώρους.....	17
1.3.1 Μικροκλιματικές παράμετροι σε επίπεδο υπαίθριου χώρου	18
1.3.2 Ρόλος της ηλιακής ακτινοβολίας και της σκίασης.....	19
1.3.3 Κυκλοφορία του αέρα και φυσικός αερισμός.....	19
1.3.4 Υλικά επιφανειών και θερμοφυσικές ιδιότητες	19
1.3.5 Βλάστηση και εξατμισοδιαπνοή	20
1.4 Βιοκλιματικοί δείκτες θερμικής άνεσης.....	20
1.4.1 Physiologically Equivalent Temperature (PET)	22
1.4.2 Universal Thermal Climate Index (UTCI).....	24
1.4.3 Χρήση των βιοκλιματικών δεικτών σε αστικούς υπαίθριους χώρους	27
1.5 Υπαίθριοι χώροι νοσοκομείων ως ιδιαίτερη κατηγορία	30

1.5.1	Ρόλος, λειτουργία και θεραπευτική διάσταση των υπαίθριων χώρων νοσοκομείων.	30
1.5.2	Ευάλωτοι χρήστες, θερμικό στρες και δημόσια υγεία	32
1.5.3	Χωρικοί και λειτουργικοί περιορισμοί και ανάγκη μικροκλιματικής αξιολόγησης	34
1.6.	Παράγοντες που επηρεάζουν τη θερμική άνεση σε υπαίθριους χώρους νοσοκομείων	35
1.6.1.	Παράγοντες που σχετίζονται με τους χρήστες.....	36
1.6.2.	Μικροκλιματικοί και χωρικοί παράγοντες.....	38
1.6.3.	Δημόσια υγεία, αερογενής μετάδοση και μεταπανδημικές απαιτήσεις σχεδιασμού.....	40
1.7	Στρατηγικές βελτιστοποίησης της θερμικής άνεσης σε υπαίθριους χώρους νοσοκομείων: θεωρητικό πλαίσιο	42
1.7.1	Στρατηγικές σκίασης και διαχείρισης της ηλιακής ακτινοβολίας.....	43
1.7.2	Βελτιστοποίηση φυσικού αερισμού και ροών αέρα	44
1.7.3	Επιλογή και τροποποίηση υλικών επιφανειών.....	44
1.7.4	Ρόλος της βλάστησης και του πρασίνου	45
1.7.5	Οργανωτικές και λειτουργικές παρεμβάσεις	47
1.7.6	Ρόλος της μικροκλιματικής προσομοίωσης στη λήψη αποφάσεων.....	47
1.8	Θεσμικές και πολιτικές προσεγγίσεις για τη μείωση της θερμικής επιβάρυνσης και την προστασία της δημόσιας υγείας στις υποδομές υγείας.....	48
1.9.	Ερευνητικό κενό, ερευνητικό ερώτημα και επιδιωκόμενη συμβολή της εργασίας	54
Κεφάλαιο 2.	Μεθοδολογικό Πλαίσιο Αξιολόγησης Κλιματικής Προσαρμογής μέσω Μικροκλιματικής Προσομοίωσης.....	57
2.1	Περιοχή μελέτης και αστική ένταξη	57
2.1.1	Γεωγραφική, διοικητική και κλιματική τοποθέτηση	57
2.1.2	Χωρική, πολεοδομική και γεωμετρική τεκμηρίωση.....	59
2.1.3	Μορφολογία αστικής χαράδρας και μικροκλιματικά χαρακτηριστικά.....	63
2.1.4	Θερμική επιβάρυνση και μικροκλιματική ευπάθεια της περιοχής	65
2.2	Μεθοδολογική Προσέγγιση	67

2.2.1 Επιλογή εργαλείου προσομοίωσης	69
2.2.2 Επιλογή πεδίου και υπολογιστικού πλέγματος	70
2.2.3 Δείκτες και παράμετροι μικροκλιματικής αξιολόγησης	72
2.2.4 Ευάλωτες ομάδες και ανθρωποκεντρικά προφίλ αξιολόγησης.....	73
2.2.5 Παραδοχές γεωμετρικής αναπαράστασης και όρια ερμηνείας του μοντέλου ...	75
2.3 Κλιματικά Δεδομένα και Οριακές Συνθήκες	78
2.3.1 Επιλογή αντιπροσωπευτικής ημέρας θερμικής αιχμής	79
2.3.2 Ώρα και εύρος ανάλυσης.....	81
2.3.3 Μετεωρολογικές παράμετροι εισόδου και έλεγχος	81
2.4 Ψηφιακό μοντέλο και παραμετροποίηση.....	82
2.4.1 Υπολογιστικό πεδίο (Computational Domain)	82
2.4.2 Γεωμετρική αναπαράσταση, υλικά και βλάστηση	84
2.4.3 Ρυθμίσεις προσομοίωσης και παραγωγή αποτελεσμάτων	85
2.5 Ευάλωτες ομάδες και θερμική άνεση	86
2.5.1 Παιδιά.....	86
2.5.2 Ηλικιωμένοι	87
2.5.3 Ερμηνεία του δείκτη PET	88
2.5.4 Σύνδεση με την παρούσα μελέτη	88
2.6 Επιλογή παρεμβάσεων	89
2.6.1 Παρεμβάσεις αλλαγής υλικών επιφανειών	90
2.6.2 Παρεμβάσεις φύτευσης και σκίασης.....	91
2.6.3 Παρεμβάσεις στα δώματα με πράσινες στέγες	92
2.6.4 Λειτουργικά και τεχνικά κριτήρια επιλογής των παρεμβάσεων.....	93
2.7 Διαμόρφωση σεναρίων προσομοίωσης.....	95
2.7.1 Σενάριο αναφοράς S1.....	95
α) Χαρακτηριστικά της υφιστάμενης βλάστησης και παραμετροποίηση στο ENVI- met	96
β) Χαρακτηριστικά των υφιστάμενων υλικών επιφανειών και παραμετροποίηση στο ENVI-met 5.8.0.....	99
2.7.2 Συνδυαστικό σενάριο παρέμβασης S3: βιοκλιματική αναβάθμιση	101

α) Χαρακτηριστικά της πρόσθετης βλάστησης και παραμετροποίηση στο ENVI-met	102
β) Χαρακτηριστικά των νέων υλικών επιφανειών και παραμετροποίηση στο ENVI-met	103
γ) Χαρακτηριστικά της Παρέμβασης Δωμάτων και παραμετροποίηση στο ENVI-met	105
2.7.3 Συνοπτική συγκριτική περιγραφή των σεναρίων	107
2.8 Μέθοδος αξιολόγησης και κριτήρια συγκριτικής ανάλυσης	107
2.8.1 Δείκτες αξιολόγησης θερμικής άνεσης	108
2.8.2 Συνθετικό μεθοδολογικό πλαίσιο αξιολόγησης της θερμικής άνεσης	112
2.8.3 Χρονική ανάλυση στα σημεία PO1 και PO2	114
2.8.4 Χωρική ανάλυση και χαρτογραφική απεικόνιση	117
2.8.5 Συγκριτική αξιολόγηση σεναρίων	117
2.8.6 Κριτήρια σχεδιαστικής αποτίμησης των παρεμβάσεων	119
2.8.7 Συμπληρωματική κατακόρυφη μικροκλιματική διερεύνηση στη στάθμη δώματος (z= 15 m)	119
Κεφάλαιο 3: Αποτελέσματα προσομοιώσεων και συγκριτική αξιολόγηση σεναρίων	121
3.1 Αποτελέσματα σεναρίου αναφοράς S1	122
3.1.1 Χωρική κατανομή της δυνητικής θερμοκρασίας αέρα Ta	123
3.1.2 Μικροκλιματικοί παράγοντες: Tmrt (Mean Radiant Temperature / Μέση Ακτινοβολούμενη Θερμοκρασία) και SVF	125
3.1.3 Χωρική κατανομή του δείκτη UTCI στο σενάριο αναφοράς S1.	127
3.1.4 Χωρική κατανομή του δείκτη PET ανά προφίλ ενήλικα / ηλικιωμένου / παιδιού.	129
3.1.5 Χρονική εξέλιξη της θερμικής επιβάρυνσης στο PO1 — σενάριο αναφοράς S1	134
α) Χρονική εξέλιξη της Ta, της Tmrt και του UTCI στο PO1	134
β) Χρονική εξέλιξη του PET ανά προφίλ χρήστη στο PO1	138
γ) Συμπληρωματικότητα χωρικής και χρονικής αποτύπωσης	139

3.1.6 Χωρική και χρονική εξέλιξη της θερμικής επιβάρυνσης στο PO2 — σενάριο αναφοράς S1.....	140
α) Χωρική αποτύπωση της θερμικής επιβάρυνσης στο PO2, σε στάθμη $z \approx 15$ m (Tmrt, UTCI)	141
β) Χρονική εξέλιξη Ta, Tmrt και UTCI στο PO2	142
γ) Συγκεντρωτικός πίνακας βασικών τιμών στο PO2	143
δ) Χρονική εξέλιξη PET ανά προφίλ χρήστη στο PO2	147
ε) Συμπληρωματικότητα χωρικής και χρονικής αποτύπωσης στο PO2.....	148
στ) Σύγκριση τιμών αιχμής μεταξύ PO1 ($z = 1,40$ m) και PO2 ($z \approx 15$ m)	148
3.1.7 Σύνοψη ευρημάτων S1	150
3.2 Αποτελέσματα συνδυαστικού σεναρίου παρέμβασης S3	151
3.2.1 Χωρική κατανομή της δυνητικής θερμοκρασίας αέρα Ta, στο ύψος 1,40	151
3.2.2 Χωρική κατανομή της Tmrt και της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας στο σενάριο S3.....	153
3.2.3 Χωρική κατανομή του δείκτη UTCI στο σενάριο S3 στις 16:00, σε ύψος 1,40 m	155
3.2.4 Χωρική κατανομή του δείκτη PET στο S3 ανά προφίλ χρήστη	157
α) Χωρική κατανομή PET για το προφίλ ενήλικα, σενάριο S3.....	157
β) Χωρική κατανομή PET για το προφίλ ηλικιωμένου, σενάριο S3.....	158
γ) Χωρική κατανομή PET για το παιδικό προφίλ, σενάριο S3	158
3.2.5 Χρονική εξέλιξη της θερμικής επιβάρυνσης στο PO1 — σενάριο S3.....	160
Χρονική εξέλιξη του PET στο PO1 ανά προφίλ χρήστη — σενάριο S3	161
3.2.6 Χωρική και χρονική εξέλιξη της θερμικής επιβάρυνσης στο PO2 — σενάριο S3	163
α) Χωρική κατανομή της Ta στο PO2.....	163
β) Χωρική αποτύπωση της Tmrt στο PO2, σε στάθμη $z \approx 15$ m	163
γ) Χρονική εξέλιξη του PET στο PO2 ανά προφίλ χρήστη — σενάριο S3	168
3.2.7 Σύνοψη ευρημάτων S3	169
3.3 Συγκριτική αξιολόγηση S3–S1	170

3.3.1 Χωρική μεταβολή της T_a , της T_{mrt} και της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας μεταξύ S3 και S1 στις 16:00.....	171
α) Χωρική μεταβολή της T_a μεταξύ S3 και S1 στις 16:00	171
β) Χωρική μεταβολή της T_{mrt} μεταξύ S3 και S1 στις 16:00.....	172
γ) Χωρική μεταβολή της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας μεταξύ S3 και S1 στις 16:00.....	174
3.3.2 Χωρική μεταβολή του δείκτη UTCI μεταξύ S3 και S1 στις 16:00, σε ύψος 1,40 m.....	176
3.3.3 Χωρική μεταβολή του PET ανά προφίλ χρήστη.....	178
α) Χωρική μεταβολή του ΔPET (S3-S1) για το προφίλ ενήλικα	178
β) Χωρική κατανομή ΔPET (S3-S1) για το προφίλ ηλικιωμένου χρήστη, στις 16:00, $z = 1,40$ m	179
γ) Χωρική μεταβολή του ΔPET (S3-S1) για το παιδικό προφίλ	180
3.3.4 Χρονική σύγκριση και μεταβολή των δεικτών UTCI και PET στο PO1.....	182
α) Συγκριτική ημερήσια εξέλιξη του UTCI στα S1 και S3	182
β) Ημερήσια εξέλιξη της μεταβολής ΔUTCI	183
γ) Ημερήσια εξέλιξη της μεταβολής ΔPET στο PO1 ανά προφίλ χρήστη	184
3.3.5 Χωρική και χρονική μεταβολή της θερμικής επιβάρυνσης στο PO2 μεταξύ S3 και S1	186
α) Χωρική μεταβολή της T_a στο PO2 στις 16:00, στη στάθμη $z \approx 15$ m	186
β) Χρονική εξέλιξη των μεταβολών (ΔT_a , ΔT_{mrt} , $\Delta UTCI$ και ΔPET) στο PO2.....	187
Συγκριτική ημερήσια εξέλιξη του UTCI στα S1 και S3.....	189
γ) Συγκριτική αποτίμηση στην κοινή ώρα αναφοράς 16:00.....	189
3.3.6 Αποτελεσματικότητα της παρέμβασης για τις ευάλωτες ομάδες μέσω του δείκτη PET.....	190
3.3.7 Ποσοτική μεταβολή κατηγοριών θερμικού στρες	193
3.3.8 Συγκεντρωτική αποτίμηση των τιμών αιχμής.....	195
3.4 Σύνθεση αποτελεσμάτων	198
3.4.1 Ποιοτική λειτουργική ερμηνεία των κατηγοριών PET	198
3.4.2 Χρονική κατανομή των ωριαίων τιμών PET στα σενάρια S1 και S3	199

3.4.3 Λειτουργική αποτίμηση της στάθμης PO2	201
3.4.4 Σύνθετη χωρική αποτίμηση θερμικής προστασίας και προτεραιοτήτων παρέμβασης.....	202
Κεφάλαιο 4: Συζήτηση.....	207
4.1 Σύνοψη και ερμηνεία των βασικών ευρημάτων	207
4.2 Σύνδεση με τη διεθνή βιβλιογραφία	209
4.2.1 Σύγκριση με γενικές μελέτες αστικού μικροκλίματος.....	210
4.2.2 Νοσοκομειακές και υγειονομικές μελέτες	212
4.2.3 Ευάλωτες ομάδες	216
4.3 Περιορισμοί της μελέτης και όρια εφαρμογής του S3.....	219
4.4 Αποτίμηση της συμβολής της εργασίας.....	220
Κεφάλαιο 5. Συμπεράσματα, προτάσεις για εφαρμογή και μελλοντική έρευνα	222
5.1 Συμπεράσματα	222
5.2 Προτάσεις για εφαρμογή και κατευθύνσεις μελλοντικής έρευνας	225
5.2.1 Συνοπτικές εφαρμοστικές κατευθύνσεις.....	226
5.2.2 Συμβολή της εργασίας.....	227
5.2.3 Κατευθύνσεις μελλοντικής έρευνας.....	230
Βιβλιογραφία.....	235

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1.1.1: Παρατηρούμενες επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής στα ανθρώπινα συστήματα ανά τομέα και γεωγραφική περιοχή: α) συνολική αποτύπωση και β) εστίαση στη Μεσογειακή περιοχή. Οι χρωματικές διαβαθμίσεις αποδίδουν το επίπεδο εμπιστοσύνης ως προς τη σύνδεση των παρατηρούμενων επιπτώσεων με την κλιματική αλλαγή, ενώ τα σύμβολα δηλώνουν την κατεύθυνση των επιπτώσεων. 9

Σχήμα 1.1.2. Ενδεικτικά παραδείγματα κλιματικών αναλόγων πόλεων έως το 2050. Για κάθε εξεταζόμενη πόλη παρουσιάζεται η μεταβολή μεταξύ των σημερινών και των προβλεπόμενων μελλοντικών κλιματικών συνθηκών, καθώς και η ομοιότητα του μελλοντικού της κλίματος με το σημερινό κλίμα άλλης πόλης. 10

Σχήμα 1.2. Ενδεικτική απεικόνιση της ημερήσιας και νυχτερινής μεταβολής της θερμοκρασίας επιφάνειας σε διαφορετικές χρήσεις γης, αναδεικνύοντας τη διατήρηση της αστικής θερμικής νησίδας κατά τις νυχτερινές ώρες. 16

Σχήμα 1.4.1.1 Εξέλιξη του αριθμού ημερών έντονης θερμικής καταπόνησης και τροπικών νυχτών στην Ευρώπη για την περίοδο 1950–2023, βάσει του δείκτη UTCI.26

Σχήμα 2.1.2.1. Χωρικός εντοπισμός της περιοχής μελέτης. (α) Θέση της περιοχής μελέτης εντός της Περιφέρειας Αττικής, (β) θέση εντός του Δήμου Αθηναίων και (γ) οριοθέτηση του αστικού τετραγώνου και του υπολογιστικού πεδίου της προσομοίωσης. 60

Σχήμα 2.1.2.2 Έλεγχος υψομετρικής τεκμηρίωσης της περιοχής μελέτης. (α) Επιτόπια υψομετρικά σημεία σε δορυφορικό υπόβαθρο και (β) αντιπαραβολή των σημείων με το διαθέσιμο ψηφιακό υψομετρικό υπόβαθρο. 62

Σχήμα 2.3.1.1 Ωριαία μεταβολή της θερμοκρασίας αέρα κατά τη διάρκεια της επιλεγμένης ημέρας καύσωνα στην Αθήνα. 82

Σχήμα 2.4.2.1 Υπολογιστικό πεδίο και γεωμετρική αναπαράσταση του μοντέλου ENVI-met 5.8.0 87

Σχήμα 2.6.2.1. Περιβάλλον επιλογής και ελέγχου των φυσιολογικών και γεωμετρικών παραμέτρων τρισδιάστατου φυτικού στοιχείου στο εργαλείο SPACE του ENVI-met 5.8.0. 94

Σχήμα 2.7.2.1 Περιβάλλον επιλογής και ελέγχου υλικών εργαλείο SPACE του ENVI-met 5.8.0. 106

Σχήμα 2.8.3.1 Θέσεις των σημείων ελέγχου PO1 και PO2 στο υπολογιστικό πεδίο της προσομοίωσης. 117

Σχήμα 2.8.3.2 Ενδεικτική απεικόνιση των ωριαίων χρονοσειρών της T_a , της T_{mrt} και του PET για το προφίλ ενήλικου χρήστη στο σημείο PO1, με συντεταγμένες κάμναβου (77, 59, 3), για το σενάριο αναφοράς S1, μέσω του ENVI-met 5.8.0 Map Explorer. 118

Σχήμα 3.1.1.1 Χωρική κατανομή της T_a στο σενάριο αναφοράς S1, 25.07.2025, ώρα 16:00, $z = 1,40$ m. 126

Σχήμα 3.1.2.1 Χωρική κατανομή της μέσης ακτινοβολούμενης θερμοκρασίας T_{mrt} (Mean Radiant Temperature / Μέση Ακτινοβολούμενη Θερμοκρασία) στο σενάριο αναφοράς S1 στις 16:00, σε ύψος 1,40 m. 128

Σχήμα 3.1.2.2 Χωρική κατανομή του SVF (Sky View Factor / Συντελεστής Θέασης Ουρανού) στο σενάριο αναφοράς S1. 129

Σχήμα 3.1.2.3 Χωρική κατανομή της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας στο σενάριο αναφοράς S1, 25.07.2025, ώρα 16:00, $z = 1,40$ m. 130

Σχήμα 3.1.3.1 Χωρική κατανομή του δείκτη UTCI στο σενάριο αναφοράς S1 στις 16:00, σε ύψος 1,40 m. 131

Σχήμα 3.1.4.1 Χωρική κατανομή του δείκτη PET (Physiologically Equivalent Temperature / φυσιολογικά ισοδύναμη θερμοκρασία) για το προφίλ ενήλικα χρήστη στο σενάριο αναφοράς S1, στις 16:00, σε ύψος 1,40 m. 133

Σχήμα 3.1.4.2 Χωρική κατανομή του δείκτη PET για το προφίλ ηλικιωμένου χρήστη στο σενάριο αναφοράς S1, στις 16:00, σε ύψος 1,40 m. 134

Σχήμα 3.1.4.3 Χωρική κατανομή του δείκτη PET για το παιδικό προφίλ στο σενάριο αναφοράς S1, στις 16:00, σε ύψος 1,40 m. 136

Σχήμα 3.1.5.1 Ημερήσια εξέλιξη της T_a , της T_{mrt} και του UTCI στο σημείο PO1, στη στάθμη πεζού $z = 1,40$ m, για το σενάριο αναφοράς S1, στις 25.07.2025. 138

Σχήμα 3.1.5.2 Ημερήσια εξέλιξη του PET στο σημείο PO1 για τα προφίλ ενήλικα, ηλικιωμένου και παιδιού, στο σενάριο αναφοράς S1, στις 25.07.2025 και σε ύψος $z = 1,40$ m 142

Σχήμα 3.1.6.1 Χωρική κατανομή της T_{mrt} στο επίπεδο $z \approx 15$ m — στο σενάριο αναφοράς S1, 25.07.2025, ώρα 16:00. 144

Σχήμα 3.1.6.2 Χωρική κατανομή του UTCI στο επίπεδο $z \approx 15$ m — στο σενάριο αναφοράς S1, 25.07.2025, ώρα 16:00 145

Σχήμα 3.1.6.3 Ημερήσια εξέλιξη της T_a , της T_{mrt} και του UTCI στο σημείο PO2, στη στάθμη $z \approx 15$ m, για το σενάριο S1, 25.07.2025. 146

Σχήμα 3.1.6.4 Ημερήσια εξέλιξη του PET στο σημείο PO2 για τα προφίλ ενήλικα, ηλικιωμένου και παιδιού στο σενάριο S1, στάθμη δώματος, στις 25.07.2025 και σε ύψος $z \approx 15$ m. 152

Σχήμα 3.2.1.1 Χωρική κατανομή της T_a στο συνδυαστικό σενάριο παρέμβασης S3, 25.07.2025, ώρα 16:00, $z = 1,40$ m. 157

Σχήμα 3.2.2.1 Χωρική κατανομή της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας στο σενάριο S3, 25.07.2025, ώρα 16:00, $z = 1,40$ m. 159

Σχήμα 3.2.3.1 Χωρική κατανομή του δείκτη UTCI στο σενάριο S3, στις 16:00, σε ύψος 1,40 m. 160

Σχήμα 3.2.4.1 Χωρική κατανομή του δείκτη PET για το προφίλ ενήλικα στο συνδυαστικό σενάριο παρεμβάσεων S3, στις 25.07.2025 και ώρα 16:00, στη στάθμη πεζού $z = 1,40$ m. Χρησιμοποιείται κοινή σταθερή χρωματική κλίμακα με τα Σχήματα 3.2.4.2 και 3.2.4.3. 162

Σχήμα 3.2.4.2 Χωρική κατανομή του δείκτη PET για το προφίλ ηλικιωμένου στο συνδυαστικό σενάριο παρεμβάσεων S3, στις 25.07.2025 και ώρα 16:00, στη στάθμη πεζού $z = 1,40$ m. Χρησιμοποιείται κοινή σταθερή χρωματική κλίμακα με τα Σχήματα 3.2.4.1 και 3.2.4.3. 162

Σχήμα 3.2.4.3 Χωρική κατανομή του δείκτη PET για το παιδικό προφίλ στο συνδυαστικό σενάριο παρεμβάσεων S3, στις 25.07.2025 και ώρα 16:00, στη στάθμη πεζού $z = 1,40$ m. Χρησιμοποιείται κοινή σταθερή χρωματική κλίμακα με τα Σχήματα 3.2.4.1 και 3.2.4.2. 163

Σχήμα 3.2.5.1 Ημερήσια εξέλιξη της T_a , της T_{mrt} και του UTCI στο σημείο PO1 για το σενάριο παρέμβασης S3, 25.07.2025 165

Σχήμα 3.2.5.2 Ημερήσια εξέλιξη του δείκτη PET στο σημείο PO1 για τα προφίλ ενήλικα, ηλικιωμένου και παιδιού, σενάριο S3, ύψος 1,40 m, 25.07.2025. 166

Σχήμα 3.2.6.1 Χωρική κατανομή της Ta στο PO2 -S3 167

Σχήμα 3.2.6.2 Χωρική κατανομή της Tmrt στο PO2, σε στάθμη $z \approx 15$ m -S3 167

Σχήμα 3.2.6.3 Ημερήσια εξέλιξη της Ta, της Tmrt και του UTCI στο σημείο PO2 για το σενάριο S3, στη στάθμη $z=15$ m, 25.07.2025. 168

Σχήμα 3.2.6.4 Ημερήσια εξέλιξη του δείκτη PET στο σημείο PO2 για τα προφίλ ενήλικα, ηλικιωμένου και παιδιού, σενάριο S3, στάθμη $z=15$ m, 25.07.2025 171

Σχήμα 3.3.1.1 Χωρική μεταβολή της δυνητικής θερμοκρασίας αέρα, $\Delta Ta = Ta(S3) - Ta(S1)$, στις 16:00 της 25.07.2025, στη στάθμη πεζού ($z = 1,40$ m). Οι αρνητικές τιμές δηλώνουν μείωση της Ta στο συνδυαστικό σενάριο S3 σε σχέση με το σενάριο αναφοράς S1, ενώ οι θετικές τιμές δηλώνουν αύξηση. 175

Σχήμα 3.3.1.2 Χωρική κατανομή της μεταβολής της μέσης ακτινοβολούμενης θερμοκρασίας Tmrt (Mean Radiant Temperature / Μέση Ακτινοβολούμενη Θερμοκρασία) μεταξύ S3 και S1, στις 16:00 της 25.07.2025 και σε ύψος 1,40 m. 176

Σχήμα 3.3.1.3 Χωρική κατανομή της μεταβολής της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας, $\Delta Direct$ SW Radiation μεταξύ S3 και S1, στις 25.07.2025, ώρα 16:00, $z = 1,40$ m. 178

Σχήμα 3.3.2.1 Χωρική μεταβολή του δείκτη UTCI μεταξύ S3 και S1, $\Delta UTCI = UTCI(S3) - UTCI(S1)$, στις 16:00, σε ύψος 1,40 m. οι μπλε αποχρώσεις υποδηλώνουν μείωση του UTCI και του θερμικού στρες, ενώ οι θερμές αποχρώσεις υποδηλώνουν μικρή τοπική αύξηση. 179

Σχήμα 3.3.3.1 Χωρική κατανομή του δείκτη PET για το προφίλ ενήλικα άνδρα, όπως προκύπτει από τη σχέση $\Delta PET = PET(S3) - PET(S1)$, μεταξύ S3 και S1, στις 16:00 και σε ύψος 1,40 m. 181

Σχήμα 3.3.3.2 Χωρική μεταβολή του δείκτη PET για το προφίλ ηλικιωμένου χρήστη, $\Delta PET = PET(S3) - PET(S1)$, στις 16:00, σε ύψος 1,40 m. 182

Σχήμα 3.3.3.3 Χωρική μεταβολή του δείκτη PET για το προφίλ παιδιού $\Delta PET = PET(S3) - PET(S1)$, στις 16:00, σε ύψος 1,40 m. 183

Σχήμα 3.3.4.1 Ημερήσια εξέλιξη του δείκτη UTCI στο σημείο PO1 για τα σενάρια αναφοράς S1 και συνδυαστικής παρέμβασης S3, στις 25.07.2025 και σε ύψος $z = 1,40$ m.

Οι έγχρωμες ζώνες και οι οριζόντιες γραμμές αντιστοιχούν στις κατηγορίες θερμικού στρες της μεσογειακής κλίμακας UTCI 185

Σχήμα 3.3.4.2 Ημερήσια εξέλιξη της μεταβολής $\Delta\text{UTCI} = \text{UTCI}(\text{S3}) - \text{UTCI}(\text{S1})$ στο σημείο PO1, στις 25.07.2025 και σε ύψος $z = 1,40$ m. Οι αρνητικές τιμές δηλώνουν μείωση του θερμικού στρες στο S3. 185

Σχήμα 3.3.4.3 Ημερήσια εξέλιξη της μεταβολής $\Delta\text{PET} = \text{PET}(\text{S3}) - \text{PET}(\text{S1})$ στο σημείο PO1 για τα προφίλ ενήλικα, ηλικιωμένου και παιδιού, στις 25.07.2025 και σε ύψος $z = 1,40$ m. Οι αρνητικές τιμές δηλώνουν μείωση του PET στο σενάριο S3. 187

Σχήμα 3.3.5.1 Χωρική μεταβολή της δυνητικής θερμοκρασίας αέρα $\Delta T_a = T_a(\text{S3}) - T_a(\text{S1})$ στη στάθμη δώματος, στις 25.07.2025 και ώρα 16:00, σε ύψος $z \approx 15$ m. Οι αρνητικές τιμές δηλώνουν μείωση της T_a στο συνδυαστικό σενάριο S3. 189

Σχήμα 3.3.5.2 Ημερήσια εξέλιξη των μεταβολών ΔT_a , ΔT_{mrt} , ΔUTCI και ΔPET για τα τρία προφίλ χρήστη στο σημείο PO2, μεταξύ των σεναρίων S3 και S1, στις 25.07.2025 και σε ύψος $z \approx 15$ m. Οι μεταβολές υπολογίζονται ως $\Delta = \text{S3} - \text{S1}$ και εκφράζονται σε K· οι αρνητικές τιμές δηλώνουν μείωση. 190

Σχήμα 3.3.5.3 Ημερήσια εξέλιξη των μεταβολών UTCI στο σημείο PO2, μεταξύ των σεναρίων S3 και S1, στις 25.07.2025 και σε ύψος $z \approx 15$ m 191

Σχήμα 3.4.4.1. Συνθετικός χάρτης χωρικής ιεράρχησης παρεμβάσεων θερμικής προστασίας για το προφίλ ηλικιωμένου χρήστη, στις 25.07.2025 και ώρα 16:00, στη στάθμη πεζού $z = 1,40$ m. Πάνελ (α): πεδίο PET στο σενάριο αναφοράς S1. Πάνελ (β): πεδίο PET στο συνδυαστικό σενάριο παρεμβάσεων S3, με κοινή χρωματική κλίμακα. Πάνελ (γ): χωρική μεταβολή $\Delta\text{PET} = \text{PET}(\text{S3}) - \text{PET}(\text{S1})$, όπου οι αρνητικές τιμές δηλώνουν μείωση της θερμικής επιβάρυνσης. Πάνελ (δ): ερμηνευτικός χάρτης ζωνών προτεραιότητας παρέμβασης, βάσει των ποσοστημοριακών ορίων $Q1 = 56,1$ °C και $Q2 = 58,6$ °C της κατανομής $\text{PET}(\text{S1})$ και των κριτηρίων απόκρισης ΔPET . Το πάνελ (δ) δεν αποτελεί νέο αποτέλεσμα προσομοίωσης ENVI-met, αλλά σύνθεση των πάνελ (α)–(γ). Στις χρωματικές κλίμακες σημειώνονται τα όρια Q1 και Q2. 205

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1.4.1.1 Διεθνής κλίμακα ταξινόμησης του δείκτη Physiologically Equivalent Temperature (PET) κατά θερμική αίσθηση και επίπεδο φυσιολογικής θερμικής καταπόνησης	23
Πίνακας 1.4.2.1: Διεθνής τυποποιημένη κλίμακα ταξινόμησης των κατηγοριών θερμικού στρες βάσει του δείκτη UTCI.	25
Πίνακας 1.8.1. Συνοπτική αποτύπωση του θεσμικού και κανονιστικού πλαισίου που σχετίζεται με τη διαχείριση του θερμικού κινδύνου στις υποδομές υγείας.	52
Πίνακας 2.1.2.1 Βασικά πολεοδομικά χαρακτηριστικά του νοσοκομειακού συγκροτήματος.	60
Πίνακας 2.2.4 Προφίλ ατόμων αναφοράς για τον υπολογισμό του PET στο BIO-met.....	74
Πίνακας 2.3.1.1 Μετεωρολογικές παράμετροι εισόδου για την προσομοίωση ENVI-met 80	
Πίνακας 2.4.1.1. Ρυθμίσεις υπολογιστικού πλέγματος (computational grid) του μοντέλου ENVI-met.	83
Πίνακας 2.7.1.1 Μορφολογικά και φυσικά χαρακτηριστικά των τύπων τρισδιάστατης βλάστησης που χρησιμοποιήθηκαν για την αποτύπωση του σεναρίου αναφοράς (S1)	96
Πίνακας 2.7.1.2. Συμπληρωματικά στοιχεία χαμηλής βλάστησης που χρησιμοποιήθηκαν για την αποτύπωση του σεναρίου αναφοράς S1.	98
Πίνακας 2.7.1.3 Βασικά υλικά επιφανειών που χρησιμοποιήθηκαν για την αποτύπωση του σεναρίου αναφοράς S1 στο ENVI-met	99
Πίνακας 2.7.2.1 Συνδυαστικό σενάριο βιοκλιματικής αναβάθμισης: παρεμβάσεις, στόχος και μηχανισμός δράσης.....	104
Πίνακας 2.8.1 Βασικοί δείκτες αξιολόγησης.	108
Πίνακας 2.8.1.1: Μεσογειακή κλίμακα ταξινόμησης του δείκτη PET	110
Πίνακας 2.8.1.2: Μεσογειακή κλίμακα ταξινόμησης του δείκτη UTCI για τη θερμή περίοδο.	110
Πίνακας 3.1.5.1: Ωριαίες τιμές των T_a , T_{mrt} και UTCI και του PET ανά προφίλ χρήστη, με τις αντίστοιχες κατηγορίες θερμικής αίσθησης και θερμικού στρες, στο σημείο PO1 — σενάριο αναφοράς S1, $z = 1,40$ m.....	136

Πίνακας 3.1.6.1: Ωριαίες τιμές Ta, Tmrt, UTCI και PET για ενήλικα (male), ηλικιωμένου (old), παιδιού (child) στο σημείο PO2 για όλο το 24ωρο της προσομοίωσης — στο σενάριο αναφοράς S1, 25.07.2025, σε $z \approx 15$ m. Με κίτρινο επισημαίνεται η κοινή ώρα αιχμής της Tmrt, του UTCI και του PET στο PO2, στις 15:00.....	143
Πίνακας 3.1.6.2 Επιλεγμένες τιμές κατά την απογευματινή μετάβαση στο PO2.....	146
Πίνακας 3.1.6.3: Σύγκριση των τιμών αιχμής των Ta, Tmrt, UTCI και PET στα σημεία PO1 και PO2 για το σενάριο αναφοράς S1, στις 25.07.2025. Η διαφορά υπολογίζεται ως $PO2_{peak} - PO1_{peak}$	148
Πίνακας 3.1.7.1.: Χωρικές ελάχιστες, μέγιστες τιμές και εύρος του δείκτη PET για τα προφίλ ενήλικα, ηλικιωμένου και παιδιού στο σενάριο αναφοράς S1, στις 25.07.2025 και ώρα 16:00, στη στάθμη πεζού $z = 1,40$ m.....	150
Πίνακας 3.2.6.1: Ωριαίες τιμές Ta, Tmrt, UTCI και PET (male/old/child) με κατηγορίες θερμικής αίσθησης και θερμικού στρες στο σημείο PO2 για όλο το 24ωρο της προσομοίωσης — Σενάριο S3, 25.07.2025, σε στάθμη $z \approx 15$ m.	165
Πίνακας 3.2.6.2 έλεγχος της απότομης πτώσης PET λόγω σκίασης	169
Πίνακας 3.3.1.1 Συγκριτικές ελάχιστες και μέγιστες τιμές και εύρος της δυνητικής θερμοκρασίας αέρα (Ta) στα σενάρια S1 και S3, στις 16:00 της 25.07.2025, στη στάθμη πεζού ($z = 1,40$ m).....	171
Πίνακας 3.3.5.1. Συγκριτικές τιμές των Ta, Tmrt, UTCI και PET στο σημείο PO2 για τα σενάρια S1 και S3, στις 25.07.2025 και ώρα 16:00, σε ύψος $z \approx 15$ m. Η μεταβολή υπολογίζεται ως $\Delta = S3 - S1$	189
Πίνακας 3.3.6.1. Μέγιστη μείωση του PET στο PO1 ανά προφίλ χρήστη, $\Delta PET = PET(S3) - PET(S1)$	191
Πίνακας 3.3.7.1 Σύνοψη των μεγαλύτερων μεταβολών των δεικτών UTCI και PET μεταξύ των σεναρίων S3 και S1 στο σημείο PO1 και στο χωρικό πεδίο της στάθμης πεζού.....	194
Πίνακας 3.3.7.2. Διάρκεια υπέρβασης του ορίου «Ακραίου θερμικού στρες» βάσει UTCI ($>39,9$ °C) στα σημεία PO1 και PO2 για τα σενάρια S1 και S3.....	195
Πίνακας 3.3.8.1. Συγκεντρωτικές τιμές αιχμής των Ta, Tmrt, UTCI και PET στα σημεία PO1 και PO2 για τα σενάρια S1 και S3, στις 25.07.2025, σε ύψος $z = 1,40$ m για το PO1	

και $z \approx 15$ m για το PO2. Οι διαφορές στις τιμές αιχμών (Δpeak) υπολογίζονται ως S3peak – S1peak.....	196
Πίνακας 3.4.1.1 Ποιοτική αντιστοίχιση των κατηγοριών της μεσογειακής κλίμακας PET με τη σχετική λειτουργική καταλληλότητα του υπαίθριου χώρου. Η αντιστοίχιση χρησιμοποιείται αποκλειστικά για τη συγκριτική ερμηνεία των αποτελεσμάτων και δεν αποτελεί ιατρικό, κλινικό ή κανονιστικό όριο. Η ποσοτική διάρκεια έκθεσης αποδίδεται μέσω του αριθμού ωρών ανά κατηγορία PET στην Ενότητα 3.4.2.	198
Πίνακας 3.4.2.1. Αριθμός ωρών ανά κατηγορία της μεσογειακής κλίμακας PET για τα προφίλ ενήλικα, ηλικιωμένου και παιδιού στα σημεία PO1 και PO2, στα σενάρια S1 και S3, για την 25η Ιουλίου 2025.	200
Πίνακας 3.4.4.1. Ποσοτική σύνοψη των ζωνών προτεραιότητας παρέμβασης για το προφίλ ηλικιωμένου χρήστη, στις 25.07.2025 και ώρα 16:00, στη στάθμη πεζού $z = 1,40$ m. Τα $Q1 = 56,1$ °C και $Q2 = 58,6$ °C αντιστοιχούν στο πρώτο τεταρτημόριο και στη διάμεσο της κατανομής PET(S1) εντός του υπολογιστικού πεδίου. Όλες οι ζώνες βρίσκονται πάνω από το κατώφλι $39,1$ °C της μεσογειακής κλίμακας (Pantavou et al., 2014).	205
Πίνακας 4.2.1.1. Σύνδεση των ευρημάτων της παρούσας εργασίας με γενικές μελέτες αστικού μικροκλίματος	211
Πίνακας 4.2.2.1. Συγκριτική αποτύπωση της παρούσας εργασίας έναντι συναφών νοσοκομειακών και υγειονομικών μελετών μικροκλιματικής αξιολόγησης	214

Συντομογραφίες & Ακρωνύμια

Ελληνικοί φορείς, θεσμικό πλαίσιο και γενικές συντομογραφίες

Γ.Ν.Α.	Γενικό Νοσοκομείο Αθηνών
ΓΟΚ	Γενικός Οικοδομικός Κανονισμός
ΓΠΣ	Γενικό Πολεοδομικό Σχέδιο
ΔΕ	Διπλωματική Εργασία
ΕΑΑ	Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών
ΕΑΠ	Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο
ΕΕ	Ευρωπαϊκή Ένωση
ΕΓΣΑ '87	Ελληνικό Γεωδαιτικό Σύστημα Αναφοράς 1987
ΕΠΣ	Ειδικό Πολεοδομικό Σχέδιο / Ειδικά Πολεοδομικά Σχέδια
ΕΣΠΚΑ	Εθνική Στρατηγική για την Προσαρμογή στην Κλιματική Αλλαγή
ΚΕΝΑΚ	Κανονισμός Ενεργειακής Απόδοσης Κτιρίων
ΚΥΑ	Κοινή Υπουργική Απόφαση
ΝΟΚ	Νέος Οικοδομικός Κανονισμός
ΟΗΕ	Οργανισμός Ηνωμένων Εθνών
ΟΤΑ	Οργανισμοί Τοπικής Αυτοδιοίκησης
ΠεΣΠΚΑ	Περιφερειακό Σχέδιο Προσαρμογής στην Κλιματική Αλλαγή
ΠΟΥ	Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας
ΣΕΠ	Συνεργαζόμενο Εκπαιδευτικό Προσωπικό
ΤΠΣ	Τοπικό Πολεοδομικό Σχέδιο / Τοπικά Πολεοδομικά Σχέδια
ΥΑ	Υπουργική Απόφαση
ΥΠΕΝ	Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας
ΦΕΚ	Φύλλο Εφημερίδας της Κυβερνήσεως
ΒΑ / ΝΕ	Βορειοανατολικά / Northeast
ΒΔ	Βορειοδυτικά
ΝΑ	Νοτιοανατολικά

Διεθνείς οργανισμοί, πρότυπα και πολιτικές

AR6	Sixth Assessment Report – Έκτη Έκθεση Αξιολόγησης του IPCC
-----	--

ASHRAE	American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers
C3S	Copernicus Climate Change Service
CER	Critical Entities Resilience – Ανθεκτικότητα Κρίσιμων Οντοτήτων
COST	European Cooperation in Science and Technology
COVID-19	Coronavirus Disease 2019
DALYs	Disability-Adjusted Life Years – Έτη ζωής προσαρμοσμένα ως προς την αναπηρία
EEA	European Environment Agency – Ευρωπαϊκός Οργανισμός Περιβάλλοντος
EPBD	Energy Performance of Buildings Directive – Οδηγία για την Ενεργειακή Απόδοση των Κτιρίων
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change – Διακυβερνητική Επιτροπή για την Κλιματική Αλλαγή
ISB	International Society of Biometeorology – Διεθνής Εταιρεία Βιομετεωρολογίας
ISO	International Organization for Standardization – Διεθνής Οργανισμός Τυποποίησης
NbS	Nature-based Solutions – Λύσεις βασισμένες στη φύση
NDCs	Nationally Determined Contributions – Εθνικά Καθορισμένες Συνεισφορές
Nat-CHAMM	National Crisis and Hazard Management Mechanism – Εθνικός Μηχανισμός Διαχείρισης Κρίσεων και Αντιμετώπισης Κινδύνων
SPM	Summary for Policymakers – Σύνοψη για τους υπεύθυνους χάραξης πολιτικής
UNDRR	United Nations Office for Disaster Risk Reduction – Γραφείο του ΟΗΕ για τη Μείωση του Κινδύνου Καταστροφών
UNFCCC	United Nations Framework Convention on Climate Change – Σύμβαση-Πλαίσιο του ΟΗΕ για την Κλιματική Αλλαγή
WHO	World Health Organization – Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας
WMO	World Meteorological Organization – Παγκόσμιος Μετεωρολογικός Οργανισμός
Μοντέλα, λογισμικά, αρχεία και γεωχωρικά δεδομένα	
3D	Three-Dimensional – Τρισδιάστατο

BIO-met	Ενσωματωμένο εργαλείο του ENVI-met για τον υπολογισμό βιοκλιματικών δεικτών
CFD	Computational Fluid Dynamics – Υπολογιστική Ρευστοδυναμική
DEM	Digital Elevation Model – Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους
EDX	Αρχείο δεδομένων εξόδου του ENVI-met
ENVI-met	Environmental Microclimate Model – λογισμικό τρισδιάστατης μικροκλιματικής προσομοίωσης
EPW	EnergyPlus Weather File – αρχείο μετεωρολογικών δεδομένων EnergyPlus
EPSG	Κωδικοποίηση γεωδαιτικών συστημάτων αναφοράς και προβολικών συστημάτων
ERA5-Land	Σύνολο δεδομένων επανανάλυσης χερσαίων κλιματικών μεταβλητών
GIS	Geographic Information System – Γεωγραφικό Σύστημα Πληροφοριών
INX	Αρχείο Model Area του ENVI-met
MODIS	Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer
NetCDF	Network Common Data Form – μορφότυπος επιστημονικών δεδομένων
NOA-METEO	National Observatory of Athens – μετεωρολογικό δίκτυο του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών
QGIS	Quantum GIS – λογισμικό ανοικτού κώδικα γεωγραφικών συστημάτων πληροφοριών
QSM/L-System	Παραμετρικό σύστημα μοντελοποίησης της δομής της βλάστησης στο ENVI-met
SIMX	Αρχείο ρυθμίσεων προσομοίωσης του ENVI-met
Κλιματικά σενάρια, ταξινομήσεις και σύνολα δεδομένων	
Csa	Θερμό μεσογειακό κλίμα με ξηρό και θερμό καλοκαίρι κατά Köppen–Geiger
RCP	Representative Concentration Pathway – Αντιπροσωπευτική Διαδρομή Συγκέντρωσης
RCP4.5	Σενάριο RCP ενδιάμεσου μετριασμού
RCP8.5	Σενάριο RCP υψηλών εκπομπών
SSP	Shared Socioeconomic Pathway – Κοινή Κοινωνικοοικονομική Διαδρομή
TNn	Annual coldest temperature – ετήσια χαμηλότερη ελάχιστη θερμοκρασία

TXx Annual hottest temperature – ετήσια υψηλότερη μέγιστη θερμοκρασία

Βιοκλιματικοί δείκτες και μικροκλιματικές παράμετροι

H/W Height-to-Width ratio – λόγος ύψους προς πλάτος αστικής χαράδρας

LAD Leaf Area Density – Πυκνότητα Φυλλικής Επιφάνειας

LAI Leaf Area Index – Δείκτης Φυλλικής Επιφάνειας

LST Land Surface Temperature – Θερμοκρασία Επιφάνειας Γης

MRT Mean Radiant Temperature – Μέση Ακτινοβολούμενη Θερμοκρασία

PET Physiologically Equivalent Temperature – Φυσιολογικά Ισοδύναμη Θερμοκρασία

PMV Predicted Mean Vote – Προβλεπόμενη Μέση Ψήφος

SVF Sky View Factor – Συντελεστής Θέασης Ουρανού

SW Shortwave – βραχέος κύματος

Ta Potential Air Temperature – Δυνητική Θερμοκρασία Αέρα

Tair Air Temperature – Θερμοκρασία Αέρα

Tmrt Mean Radiant Temperature – Μέση Ακτινοβολούμενη Θερμοκρασία

TSV Thermal Sensation Vote – Ψήφος Θερμικής Αίσθησης

TPV Thermal Preference Vote – Ψήφος Θερμικής Προτίμησης

UHI Urban Heat Island – Αστική Θερμική Νησίδα

UTCI Universal Thermal Climate Index – Καθολικός Δείκτης Θερμικού Κλίματος

WBGT Wet Bulb Globe Temperature – Θερμοκρασία Υγρού Βολβού και Σφαιρικού Θερμομέτρου

Παράμετροι ποιότητας αέρα

PM10 Αιωρούμενα σωματίδια με αεροδυναμική διάμετρο έως 10 μm

PM2.5 Αιωρούμενα σωματίδια με αεροδυναμική διάμετρο έως 2,5 μm

NO₂ Διοξείδιο του αζώτου

O₃ Όζον

Σενάρια, σημεία αξιολόγησης και στατιστική σημειογραφία

S1 Σενάριο αναφοράς

S3 Συνδυαστικό σενάριο παρέμβασης / βιοκλιματικής αναβάθμισης

PO1 Σημείο ελέγχου στη στάθμη πεζού, $z = 1,40 \text{ m}$

PO2 Σημείο ελέγχου στη στάθμη δώματος, $z \approx 15 \text{ m}$

PO1peak Τιμή αιχμής στο σημείο PO1

PO2peak Τιμή αιχμής στο σημείο PO2

Q1 Πρώτο τεταρτημόριο

Q2 Δεύτερο τεταρτημόριο / διάμεσος

peak Τιμή αιχμής

Δpeak Μεταβολή της τιμής αιχμής μεταξύ S3 και S1

Μεταβολές μεταξύ των σεναρίων

ΔTa Μεταβολή της δυνητικής θερμοκρασίας αέρα: $Ta(S3) - Ta(S1)$

ΔTmrt Μεταβολή της μέσης ακτινοβολούμενης θερμοκρασίας: $Tmrt(S3) - Tmrt(S1)$

ΔPET Μεταβολή του δείκτη PET: $PET(S3) - PET(S1)$

ΔUTCI Μεταβολή του δείκτη UTCI: $UTCI(S3) - UTCI(S1)$

ΔWS Μεταβολή της ταχύτητας ανέμου μεταξύ S3 και S1

ΔDirect SW

Radiation Μεταβολή της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας βραχέος κύματος μεταξύ S3 και S1

Συμβολισμοί υπολογιστικού πλέγματος

Nx Αριθμός υπολογιστικών κελιών κατά τον άξονα x

Ny Αριθμός υπολογιστικών κελιών κατά τον άξονα y

Nz Αριθμός υπολογιστικών κελιών κατά τον κατακόρυφο άξονα z

dx Διάσταση / χωρική ανάλυση κελιού κατά τον άξονα x

dy Διάσταση / χωρική ανάλυση κελιού κατά τον άξονα y

dz Κατακόρυφη διάσταση του υπολογιστικού κελιού

dzs Ύψος υποστρώματος του χαμηλότερου κατακόρυφου κελιού

z Κατακόρυφη στάθμη / ύψος

z0 Μήκος αεροδυναμικής τραχύτητας επιφάνειας

Κωδικοί κατηγοριών PET

ΠΘ Πολύ θερμή

Θ Θερμή

ΕΘ Ελαφρώς θερμή

Ο Ουδέτερη

ΕΔ Ελαφρώς δροσερή

Δ Δροσερή

ΠΔ Πολύ δροσερή

Κωδικοί κατηγοριών UTCI

ΑΘΣ Ακραίο θερμικό στρες

ΠΙΘΣ Πολύ ισχυρό θερμικό στρες

ΙΘΣ Ισχυρό θερμικό στρες

ΜΘΣ Μέτριο θερμικό στρες

ΧΘΣ Χωρίς θερμικό στρες

ΕΨΣ Ελαφρύ ψυχρό στρες

ΜΨΣ Μέτριο ψυχρό στρες

ΙΨΣ Ισχυρό ψυχρό στρες

ΠΙΨΣ Πολύ ισχυρό ψυχρό στρες

ΑΨΣ Ακραίο ψυχρό στρες

Αξιολόγηση της θερμικής άνεσης και στρατηγικές βελτιστοποίησης στους εξωτερικούς χώρους νοσοκομείων αστικών περιοχών με Μεσογειακό κλίμα υπό συνθήκες κλιματικής κρίσης

Βαβίτσα Αθανασία¹, Τσέλιου Αρετή¹, Πασχαλίδου Αναστασία¹

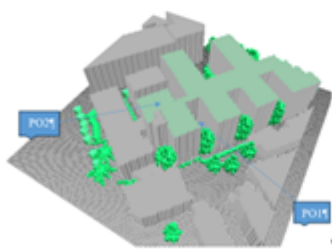
¹ Σχολή Εφαρμοσμένων Τεχνών και Βιώσιμου Σχεδιασμού, Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο, Πάτρα · ΠΜΣ «Περιβαλλοντικός Σχεδιασμός Πόλεων και Κτιρίων (ΠΣΠ)»

1. Εισαγωγή

Η κλιματική κρίση και η αστική θερμική νησίδα εντείνουν τη θερμική επιβάρυνση στα πυκνοδομημένα αστικά κέντρα της Μεσογείου. Οι υπαίθριοι χώροι νοσοκομείων εξυπηρετούν χρήστες αυξημένης θερμικής ευαισθητότητας, αλλά παραμένουν περιορισμένα διερευνημένοι στη μικροκλιματική έρευνα. Σκοπός αξιολόγηση του θερμικού περιβάλλοντος και διερεύνηση στρατηγικών μείωσης της θερμικής επιβάρυνσης στους υπαίθριους χώρους του Γ.Ν.Α. «Αλεξάνδρα».

2. Μεθοδολογία

- ENVI-met 5.8.0 — τρισδιάστατη μικροκλιματική προσομοίωση· BIO-met για PET και UTCI.
- Ημέρα καύσωνα 25.07.2025 ($T_{\max}$ 40,4 °C · $T_{\min}$ 30,9 °C).
- S1: μοντελοποιημένο σενάριο αναφοράς S3: βλάστηση + σκίαση + υλικά + δώματα.
- Προφίλ χρήστη: ενήλικας · ηλικιωμένος · παιδί. Οι ασθενείς δεν προσομοιώνονται ως ενιαίο προφίλ.
- Μεσογειακές κλίμακες PET (Pantavou et al., 2014)· UTCI (Tseliou & Tsiros, 2016).



Σχήμα 1. Θέσεις των σημείων ελέγχου PO1 (στάθμη πεζού, $z = 1,40$ m) και PO2 (στάθμη δώματος, $z = 15$ m).

Πίνακας 1. Ζώνες προτεραιότητας παρέμβασης (16:00).

Ζώνη	A	B	Γ	Δ
% πεδίου	46,2	4,3	24,5	25,0
μέση ΔPET	+0,09	-8,57	-0,33	-0,57

3. Αποτελέσματα

Στο μοντελοποιημένο σενάριο αναφοράς S1 οι αιχμές στο PO1 φτάνουν T_a 40,20 °C, T_{mrt} 71,27 °C και UTCI 48,39 °C (ΑΘΣ), με PET ενήλικα 59,48 °C και ηλικιωμένου 60,31 °C (ΠΘ)· ολόκληρο το πεδίο υπερβαίνει τους 39,1 °C. Το PO1 δέχεται άμεση ηλιακή ακτινοβολία μόνο στις 13:00–14:00. Το S3 δρα κυρίως ακτινοβολιακά, με ελάχιστη μεταβολή της T_a .

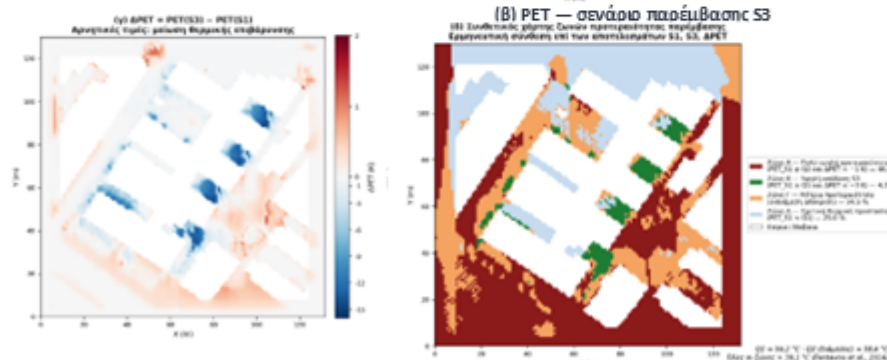
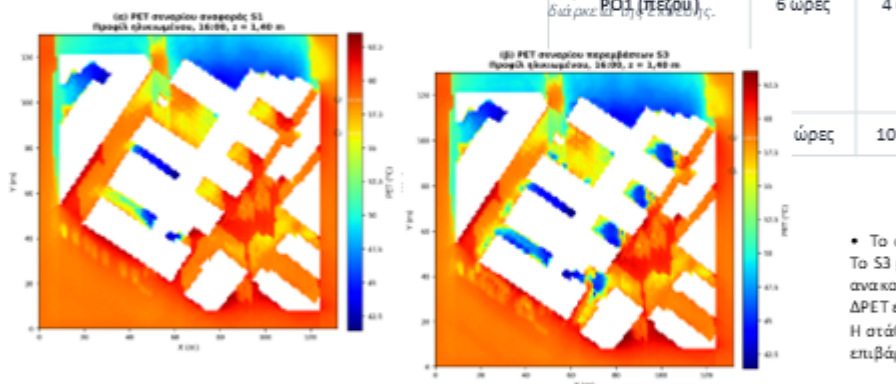
Μέγιστες μειώσεις, S3 – S1

Δ T_{mrt} — χωρικά	–40,86 K
Δ T_{mrt} — PO2	–22,05 K
ΔPET — ηλικ.	–15,36 K
ΔUTCI — PO1	–6,67 K

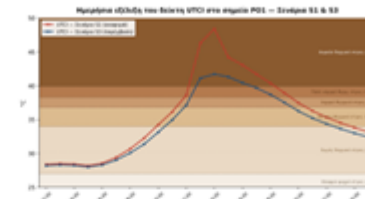
Διάρκεια «Ακράιου θερμικού στρες» (UTCI > 39,9 °C)

Σημείο	S1	S3	Δ
PO1 (πεζού)	6 ώρες	4 ώρες	–2
ώρες	10 ώρες	–1	

Μείωση UTCI στο PO1: 48,39 → 41,72 °C. Το S3 μειώνει ένταση και διάρκεια της θερμικής κρίσης.



Σχήμα 2. Συνθετικός χάρτης χωρικής παράχρησης παρεμβάσεων θερμικής προστασίας — προφίλ ηλικιωμένου, 16:00, $z = 1,40$ m. Τα (α) και (β) έχουν κοινή χρωματική κλίμακα. Το (δ) προκύπτει από σύνθεση των (α)–(γ) θάσεις των ορίων $Q1 = 56,1$ °C και $Q2 = 58,6$ °C της κατανομής PET(S1).



Σχήμα 3. Ημερήσια εξέλιξη UTCI στο PO1 — S1 έναντι S3.



Σχήμα 4. Ημερήσια εξέλιξη ΔPET στο PO1 ανά προφίλ χρήστη.

4. Συμπεράσματα

- Το όφελος είναι πρωτίστως ακτινοβολιακό: η μείωση της T_{mrt} , όχι η T_a , καθορίζει τη βελτίωση. Το S3 μειώνει ένταση και διάρκεια της έκθεσης στο PO1 (6→4 ώρες ΑΘΣ) και δημιουργεί τοπικές ζώνες ανακούφισης, χωρίς πλήρη άνεση στις ώρες αιχμής.
- ΔΡΕΤ ενήλικα και ηλικιωμένου σχεδόν ταυτίζονται· το παιδικό προφίλ αποκλίνει.
- Η στάθμη δώματος δεν είναι αυτομάτως ευνοϊκότερη· η υψηλή ακτινοβολιακή έκθεση διατηρεί την επιβάρυνση.

5. Συμβολή της εργασίας

- Συνδυασμένη χωρική και χρονική αξιολόγηση σε στάθμη πεζού και δώματος.
- PET για τρία προφίλ χρήστη + UTCI ως υποπονημένος δείκτης θερμικού στρες.
- Χάρτης προτεραιότητας από PET(S1), PET(S3) και ΔPET για στοχευμένες παρεμβάσεις.

6. Ενδεικτική βιβλιογραφία

- Pantavou, K., et al. (2014). Empirical calibration of thermal indices in an urban outdoor Mediterranean environment. *Building and Environment*, 80.
- Tseliou, A., & Tsiros, I. X. (2016). Modeling urban microclimate to ameliorate thermal sensation in outdoor spaces in Athens. *Building Simulation*, 9.
- Touli, E., Mela, A., & Tseliou, A. (2025). Nature-Based Urbanism for Senior Citizens' Outdoor Thermal Comfort in High-Density Mediterranean Cities. *Urban Science*, 9(5).
- Zhen, M., et al. (2025). Optimized design of hospital open space based on outdoor thermal comfort. *Energy and Buildings*, 337.
- Founda, D., & Santamouris, M. (2017). Synergies between Urban Heat Island and Heat Waves in Athens. *Scientific Reports*, 7.

**ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΗΣ ΘΕΡΜΙΚΗΣ
ΑΝΕΣΗΣ ΚΑΙ ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΕΣ
ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΣΤΟΥΣ
ΕΞΩΤΕΡΙΚΟΥΣ ΧΩΡΟΥΣ
ΝΟΣΟΚΟΜΕΙΩΝ
ΑΣΤΙΚΩΝ ΠΕΡΙΟΧΩΝ ΜΕ
ΜΕΣΟΓΕΙΑΚΟ ΚΛΙΜΑ ΥΠΟ
ΣΥΝΘΗΚΕΣ
ΚΛΙΜΑΤΙΚΗΣ ΚΡΙΣΗΣ**

**Βαβίτσα Αθανασία¹, Τσέλιου Αρετή²,
Πασχαλίδου Αναστασία³**

^{1,2,3} Σχολή Εφαρμοσμένων Τεχνών και Βιώσιμου

Σχεδιασμού, Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο,

Πάροδος Αριστοτέλους 18, 26335 Πάτρα

email: ¹std165377@ac.eap.gr,

²tseliou.aret@ac.eap.gr,

³paschalidou.anastasia@ac.eap.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η εργασία αξιολογεί τη θερμική επιβάρυνση στους υπαίθριους χώρους του Γενικού Νοσοκομείου Αθηνών «Αλεξάνδρα» και διερευνά στρατηγικές μικροκλιματικής βελτίωσης υπό μεσογειακές κλιματικές συνθήκες. Η προσομοίωση πραγματοποιήθηκε για θερμή θερινή ημέρα με το ENVI-met 5.8.0 και βασίστηκε στη θερμοκρασία αέρα, στη μέση ακτινοβολούμενη θερμοκρασία (T_{mr}t), στην άμεση ηλιακή ακτινοβολία και στους δείκτες PET και UTCI. Συγκρίθηκαν το μοντελοποιημένο σενάριο αναφοράς S1 και το συνδυαστικό σενάριο παρέμβασης S3, το οποίο περιλαμβάνει βλάστηση, σκίαση, τροποποίηση υλικών επιφανειών και παρεμβάσεις στα δώματα. Η κύρια αξιολόγηση πραγματοποιήθηκε στη στάθμη πεζού, με συμπληρωματική διερεύνηση στη στάθμη δώματος. Ο PET υπολογίστηκε χωριστά για τα προφίλ ενηλίκου, ηλικιωμένου και παιδιού, ενώ ο UTCI

χρησιμοποιήθηκε ως τυποποιημένος δείκτης θερμικού στρες. Τα αποτελέσματα ερμηνεύθηκαν βάσει μεσογειακά προσαρμοσμένων κλιμάκων ταξινόμησης.

Το S3 μειώνει τη θερμική επιβάρυνση κυρίως μέσω του περιορισμού της ακτινοβολιακής έκθεσης. Στις 16:00, στο σημείο PO2 της στάθμης δώματος, η T_{mr}t μειώνεται κατά 22,05 K και ο UTCI κατά 6,66 K, ενώ στο PO1 της στάθμης πεζού ο UTCI μειώνεται κατά 6,67 K. Παρά τις βελτιώσεις, κατά τις ώρες αιχμής διατηρούνται πολύ υψηλές ή ακραίες συνθήκες θερμικής επιβάρυνσης. Συνεπώς, το S3 λειτουργεί ως στρατηγική μετριασμού της έκθεσης και δημιουργίας τοπικών ζωνών θερμικής ανακούφισης. Η σύνθεση των αποτελεσμάτων σε χάρτη προτεραιοτήτων επιτρέπει τη χωρική ιεράρχηση των παρεμβάσεων σε διαδρομές κίνησης, ζώνες αναμονής και χώρους σύντομης παραμονής.

Λέξεις κλειδιά: Θερμική άνεση, βιοκλιματικός σχεδιασμός, νοσοκομειακοί υπαίθριοι χώροι, PET, UTCI, ENVI-met, ευάλωτες ομάδες, μεσογειακό κλίμα.

ABSTRACT

The study assesses thermal stress in the outdoor spaces of the Alexandra General Hospital of Athens and investigates microclimatic improvement strategies under Mediterranean climatic conditions. The simulation was conducted for a hot summer day using ENVI-met 5.8.0 and was based on air temperature, mean radiant temperature (T_{mr}t), direct solar radiation, and the PET and UTCI indices. The modelled reference scenario S1 was compared with the combined intervention scenario S3, which incorporates vegetation, shading, modifications to surface materials, and rooftop interventions. The main assessment was carried out at pedestrian level, with a supplementary investigation at roof level. PET was calculated separately for adult, older-adult, and child profiles, whereas UTCI was used as a standardized thermal-stress index. The results were interpreted using Mediterranean-adapted classification scales.

Scenario S3 reduces thermal stress primarily by limiting radiant exposure. At 16:00, T_{mrt} at roof-level point PO2 decreases by 22.05 K and UTCI by 6.66 K, while at pedestrian-level point PO1 UTCI decreases by 6.67 K. Despite these improvements, very high or extreme thermal-stress conditions persist during peak hours. Consequently, S3 functions as a strategy for mitigating exposure and creating local zones of thermal relief. The synthesis of the results into an intervention-priority map enables the spatial prioritization of measures along circulation routes, in waiting areas, and in spaces intended for short-term stay.

Keywords: thermal comfort, bioclimatic design, outdoor hospital spaces, PET, UTCI, ENVI-met, vulnerable groups, Mediterranean climate.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η κλιματική κρίση και η αστική θερμική νησίδα εντείνουν τη θερμική επιβάρυνση στα πυκνοδομημένα αστικά κέντρα της Μεσογείου. Η αύξηση της συχνότητας και της έντασης των καυσώνων μεταβάλλει τις συνθήκες χρήσης του υπαίθριου χώρου και επηρεάζει άμεσα την υγεία των εκτεθειμένων πληθυσμών.

Οι υπαίθριοι χώροι νοσοκομειακών συγκροτημάτων αποτελούν ιδιαίτερη περίπτωση. Συγκεντρώνουν χρήστες αυξημένης θερμικής ευαλωτότητας — ασθενείς, ηλικιωμένους, παιδιά, συνοδούς και προσωπικό σε βάρδιες — και ταυτόχρονα εξυπηρετούν λειτουργίες πρόσβασης, αναμονής και μετακίνησης που δεν μπορούν να

μετατεθούν χρονικά. Η θερμική τους απόδοση συνδέεται επομένως τόσο με την ποιότητα παραμονής όσο και με τη λειτουργική ανθεκτικότητα της υποδομής.

Η βιβλιογραφική επισκόπηση κατέδειξε ότι, παρά την εκτεταμένη έρευνα για τη μικροκλιματική συμπεριφορά αστικών ανοικτών χώρων, πλατειών και κατοικημένων περιοχών, οι υπαίθριοι χώροι νοσοκομείων παραμένουν συγκριτικά λιγότερο διερευνημένοι. Ιδιαίτερα περιορισμένες είναι οι εφαρμογές που συνδυάζουν χωρική και χρονική αξιολόγηση, διαφοροποιημένο υπολογισμό του PET ανά προφίλ χρήστη, συμπληρωματική χρήση του UTCI ως τυποποιημένου δείκτη θερμικού στρες και διερεύνηση τόσο στη στάθμη πεζού όσο και, συμπληρωματικά, στη στάθμη δώματος. Οι υφιστάμενες εφαρμογές σε νοσοκομειακά περιβάλλοντα σπανίως συνδυάζουν αξιολόγηση σε περισσότερες από μία στάθμες με διαφοροποίηση ανά προφίλ χρήστη και με κλίμακες βαθμονομημένες σε μεσογειακούς πληθυσμούς.

Σκοπός της εργασίας είναι η αξιολόγηση του θερμικού περιβάλλοντος στους υπαίθριους χώρους του Γενικού Νοσοκομείου

Αθηνών «Αλεξάνδρα» και η διερεύνηση στρατηγικών μείωσης της θερμικής επιβάρυνσης. Τα ερευνητικά ερωτήματα αφορούν την ένταση και τη χωρική κατανομή της θερμικής καταπόνησης στο μοντελοποιημένο σενάριο αναφοράς S1, το μέγεθος και τη χωρική στόχευση της βελτίωσης που επιφέρει ένα συνδυαστικό σενάριο παρέμβασης, καθώς και τη διαφοροποίηση της αποτίμησης ανάλογα με το προφίλ του χρήστη και τη στάθμη διερεύνησης.

2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

2.1 Περιοχή μελέτης και υπολογιστικό πεδίο

Η περιοχή μελέτης εντοπίζεται στον κεντρικό αστικό ιστό της Αθήνας, σε κλιματική ζώνη Csa κατά Köppen–Geiger. Το οικόπεδο του νοσοκομείου έχει εμβαδόν 6.445,42 m² και χαρακτηρίζεται από πυκνή δόμηση, εκτεταμένες σκληρές επιφάνειες και περιορισμένη φυτοκάλυψη.

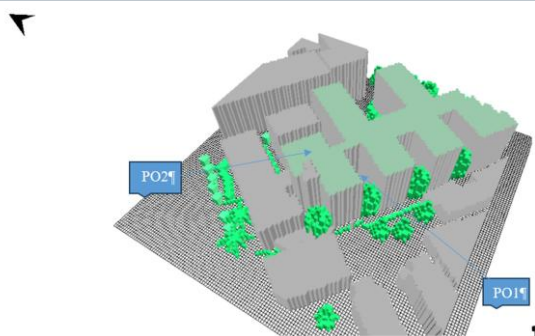
Η γεωμετρία του μοντέλου βασίστηκε σε γεωχωρικά δεδομένα στο ΕΓΣΑ '87 (EPSG:2100), τα οποία επαληθεύτηκαν με τεχνικά στοιχεία της Τεχνικής Υπηρεσίας του νοσοκομείου. Το υπολογιστικό πεδίο ορίστηκε ώστε να περιλαμβάνει το σύνολο της κεντρικής αυλής και τον άμεσο περιβάλλοντα

αστικό ιστό, λαμβάνοντας υπόψη τη γεωμετρική επίδραση των γειτονικών κτιριακών όγκων στη σκίαση, στην ακτινοβολιακή ανταλλαγή και στη ροή του αέρα. Για λόγους συγκρισιμότητας μεταξύ των σεναρίων το έδαφος θεωρήθηκε πρακτικά επίπεδο.

2.2 Σενάρια, στάθμες και προφίλ χρήστη

Συγκρίθηκαν δύο σενάρια. Το S1 αποτελεί το μοντελοποιημένο σενάριο αναφοράς, το οποίο αναπαριστά την υφιστάμενη διαμόρφωση του χώρου εντός του υπολογιστικού περιβάλλοντος και δεν ταυτίζεται με πλήρη αποτύπωση της τρέχουσας πραγματικής κατάστασης. Το S3 συνδυάζει ενίσχυση της βλάστησης, εφαρμογή σκίασης, τροποποίηση των υλικών επιφανειών και παρεμβάσεις στα δώματα, και αποτελεί δυνητικά εφαρμόσιμο σχεδιαστικό σενάριο.

Η διερεύνηση πραγματοποιήθηκε στη στάθμη πεζού και συμπληρωματική στάθμη δώματος: το σημείο PO1 στη στάθμη πεζού ($z = 1,40$ m) και το σημείο PO2 στη στάθμη δώματος ($z \approx 15$ m). Παράλληλα εξετάστηκαν τρία προφίλ χρήστη: ενήλικα, ηλικιωμένου και παιδιού, μέσω παραμετροποίησης των χαρακτηριστικών του ατόμου αναφοράς στο BIO-met.



Σχήμα 1. Θέσεις των σημείων ελέγχου PO1 και PO2 στο υπολογιστικό πεδίο της προσομοίωσης. Πηγή: ιδία επεξεργασία από το ENVI-met 5.8.0.

2.3 Δείκτες και κλίμακες αξιολόγησης

Η αξιολόγηση βασίστηκε στους δείκτες Physiologically Equivalent Temperature (PET) και Universal Thermal Climate Index (UTCI), οι οποίοι υπολογίστηκαν με το εργαλείο BIO-met από τα πεδία θερμοκρασίας αέρα, σχετικής υγρασίας, ταχύτητας ανέμου και μέσης ακτινοβολούμενης θερμοκρασίας T_{mrt} . Ο PET αξιοποιήθηκε για τη διαφοροποιημένη εξέταση των προφίλ, ενώ ο UTCI, που υπολογίζεται βάσει τυποποιημένου ατόμου αναφοράς, για τη γενική αποτίμηση του επιπέδου θερμικής καταπόνησης.

Για την ταξινόμηση των τιμών υιοθετήθηκαν μεσογειακά προσαρμοσμένες κλίμακες: για τον PET η κλίμακα των Pantanou et al. (2014) και για τον UTCI η κλίμακα των Pantanou et al. (2013), όπως εφαρμόστηκε από τους Tseliou και Tsiros (2016). Η επιλογή αυτή είναι κρίσιμη, καθώς οι αρχικές κλίμακες

έχουν βαθμονομηθεί σε ψυχρότερα κλίματα και υπερεκτιμούν τη θερμική δυσφορία σε πληθυσμούς προσαρμοσμένους στη Μεσόγειο.

Πίνακας 1. Μεσογειακή κλίμακα θερμικής αίσθησης για τον δείκτη PET (Pantanou et al., 2014) και οι συντομογραφίες των κατηγοριών.

PET (°C)	Κατηγορία θερμικής αίσθησης	Συντ.
> 39,1	Πολύ θερμή	ΠΘ
31,2 – 39,1	Θερμή	Θ
23,8 – 31,2	Ελαφρώς θερμή	ΕΘ
14,8 – 23,8	Ουδέτερη	Ο
5,2 – 14,8	Ελαφρώς δροσερή	ΕΔ
0,7 – 5,2	Δροσερή	Δ
≤ 0,7	Πολύ δροσερή	ΠΔ

Πίνακας 2. Μεσογειακή κλίμακα θερμικού στρες για τον δείκτη UTCI (Pantanou et al., 2013· Tseliou και Tsiros, 2016) — κατηγορίες της θερμής περιόδου.

UTCI (°C)	Κατηγορία θερμικού στρες	Συντ.
> 39,9	Ακραίο θερμικό στρες	ΑΘΣ
38,3 – 39,9	Πολύ ισχυρό θερμικό στρες	ΠΙΘΣ
36,8 – 38,3	Ισχυρό θερμικό στρες	ΙΘΣ
34,0 – 36,8	Μέτριο θερμικό στρες	ΜΘΣ
27,0 – 34,0	Χωρίς θερμικό στρες	ΧΘΣ
24,6 – 27,0	Ελαφρύ ψυχρό στρες	ΕΨΣ

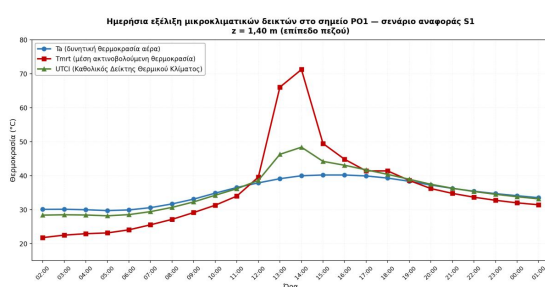
Η προσομοίωση αφορά θερμή θερινή ημέρα με μέγιστη θερμοκρασία αέρα 40,4 °C και ελάχιστη 30,9 °C. Ως κοινή ώρα αναφοράς για τη χωρική σύγκριση των σεναρίων ορίστηκαν οι 16:00.

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

3.1 Σενάριο αναφοράς S1

Στο σενάριο αναφοράς η θερμική επιβάρυνση είναι εκτεταμένη και υψηλή. Στο σημείο PO1 η θερμοκρασία αέρα κορυφώνεται στους 40,20 °C στις 15:00, ενώ η μέση ακτινοβολούμενη θερμοκρασία και ο UTCI εμφανίζουν τη μέγιστη τιμή τους στις 14:00, στους 71,27 °C και 48,39 °C αντίστοιχα. Η τελευταία τιμή αντιστοιχεί στην κατηγορία του ακραίου θερμικού στρες.

Η χρονική κατανομή δείχνει ότι το PO1 δέχεται άμεση ηλιακή ακτινοβολία μόνο κατά το διάστημα 13:00–14:00, γεγονός που εξηγεί την απότομη κορύφωση των ακτινοβολιακών μεγεθών. Κατά την ώρα αναφοράς, το σύνολο σχεδόν του υπαίθριου πεδίου υπερβαίνει το κατώφλι των 39,1 °C της μεσογειακής κλίμακας PET και εντάσσεται στην κατηγορία «πολύ θερμή».



Σχήμα 2. Ημερήσια εξέλιξη της θερμοκρασίας αέρα Ta, της μέσης ακτινοβολούμενης θερμοκρασίας Tmrt και του δείκτη UTCI στο σημείο PO1, σενάριο αναφοράς S1, z = 1,40 m.

Πίνακας 3. Τιμές αιχμής στο σημείο PO1 για το σενάριο αναφοράς S1.

Μέγεθος	Τιμή αιχμής	Ώρα
Ta	40,20 °C	15:00

Tmrt	71,27 °C	14:00
UTCI	48,39 °C	14:00
PET ενήλικα	59,48 °C	14:00
PET ηλικιωμένου	60,31 °C	14:00
PET παιδιού	57,20 °C	14:00

3.2 Μεταβολές του σεναρίου παρέμβασης S3

Το S3 μειώνει τη θερμική επιβάρυνση κυρίως μέσω του περιορισμού της ακτινοβολιακής έκθεσης. Η μέγιστη τοπική μείωση της Tmrt φτάνει τα 40,86 K, ενώ η μεταβολή της θερμοκρασίας αέρα παραμένει περιορισμένη. Η μέγιστη τοπική μείωση του PET ανέρχεται σε 15,36 K για το προφίλ του ηλικιωμένου, σε περίπου 14 K για τον ενήλικα και σε 5,04 K για το παιδί.

Πίνακας 4. Σύνοψη των μέγιστων μεταβολών μεταξύ των σεναρίων S3 και S1.

Μέγεθος	Μέγιστη μεταβολή	Πλαίσιο
ΔTmrt	-40,86 K	χωρικά, 16:00
ΔPET — ηλικιωμένος	-15,36 K	χωρικά, 16:00
ΔPET — ενήλικας	≈ -14,0 K	χωρικά, 16:00
ΔPET — παιδί	-5,04 K	χωρικά, 16:00
ΔUTCI στο PO1	-6,67 K	σημειακά
ΔTmrt στο PO2	-22,05 K	σημειακά, 16:00
ΔTa στο PO2	-0,55 K	σημειακά, 16:00

Η χαμηλή ταχύτητα ανέμου εισόδου, που αντιστοιχεί στις συνθήκες περιορισμένου αερισμού της θερμής

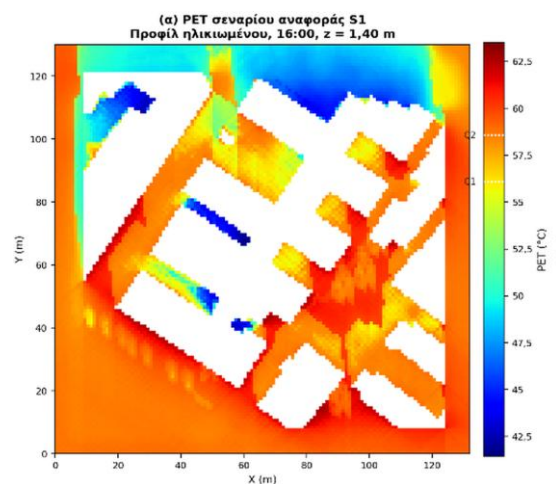
ημέρας, περιορίζει τον μηχανισμό συναγωγικής ψύξης και στα δύο σενάρια. Η μεταβολή της ταχύτητας ανέμου στα σημεία αξιολόγησης παραμένει αμελητέα, γεγονός που δείχνει ότι ο αερισμός δεν αποτελεί τον κύριο μηχανισμό της παρατηρούμενης βελτίωσης και ενισχύει την ερμηνεία του οφέλους ως πρωτίτως ακτινοβολιακού.

Ο Πίνακας 4 αποτυπώνει συνοπτικά το εύρος της απόκρισης. Η αντιπαράβολή των τιμών ΔT_{mrt} και ΔT_a στο σημείο PO2 είναι ενδεικτική του μηχανισμού: η ακτινοβολιακή συνιστώσα μεταβάλλεται κατά μία τάξη μεγέθους περισσότερο από τη θερμοκρασία αέρα.

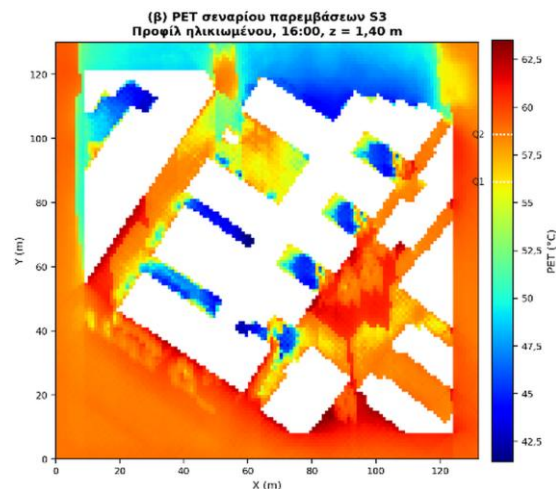
Οι μειώσεις δεν κατανέμονται ομοιόμορφα στο υπολογιστικό πεδίο, αλλά συγκεντρώνονται κοντά στις περιοχές παρέμβασης, με τη θερμική ανακούφιση να εξασθενεί βαθμιαία με την απόσταση. Το εύρος αυτό είναι άμεσα συγκρίσιμο με τα ανώτερα όρια που αναφέρουν οι Tousi et al. (2025) σε αντίστοιχο πυκνοδομημένο αθηναϊκό περιβάλλον.

Η άμεση σύγκριση των πεδίων PET μεταξύ των δύο σεναρίων, με κοινή χρωματική κλίμακα, καθιστά ορατή τη διαφοροποίηση της χωρικής κατανομής. Στο S1 η επιβάρυνση καλύπτει

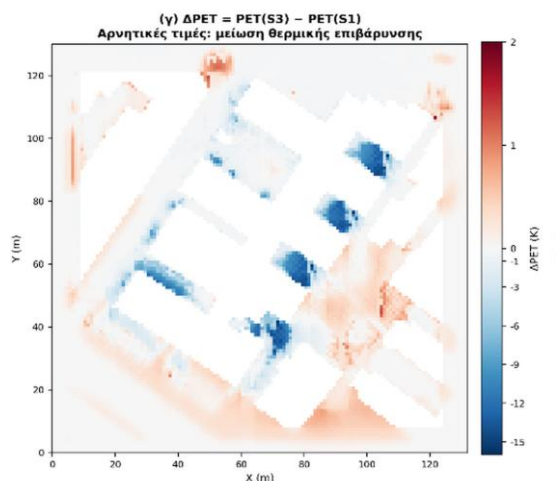
ομοιόμορφα το σύνολο του υπαίθριου χώρου, ενώ στο S3 διακρίνονται περιοχές μειωμένων τιμών που αντιστοιχούν στις θέσεις των παρεμβάσεων σκίασης και βλάστησης.



Σχήμα 3. Χωρική κατανομή του δείκτη PET για το προφίλ του ηλικομένου, σενάριο αναφοράς S1, στις 16:00, $z = 1,40$ m.

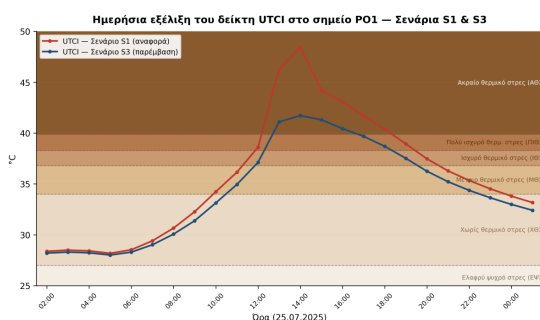


Σχήμα 4. Χωρική κατανομή του δείκτη PET για το προφίλ του ηλικομένου, σενάριο παρέμβασης S3, στις 16:00, $z = 1,40$ m, με κοινή χρωματική κλίμακα με το Σχήμα 3.



Σχήμα 5. Χωρική κατανομή της μεταβολής $\Delta PET = PET(S3) - PET(S1)$ για το προφίλ του ηλικιωμένου, στις 16:00, $z = 1,40$ m. Οι αρνητικές τιμές δηλώνουν μείωση της θερμικής επιβάρυνσης.

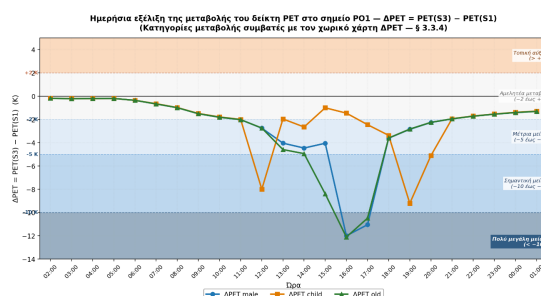
Η χρονική διάσταση της βελτίωσης αποτυπώνεται στη σύγκριση των ημερήσιων καμπυλών του UTCI στο σημείο PO1. Η μέγιστη μείωση, ίση με 6,67 K, συμπίπτει με το παράθυρο της άμεσης ηλιακής έκθεσης, ενώ κατά τις υπόλοιπες ώρες η διαφορά μεταξύ των δύο σεναρίων περιορίζεται σημαντικά. Το εύρημα αυτό επιβεβαιώνει ότι η αποτελεσματικότητα των παρεμβάσεων συνδέεται πρωτίστως με τον έλεγχο της άμεσης ακτινοβολίας και όχι με τη μεταβολή της θερμοκρασίας αέρα.



Σχήμα 6. Ημερήσια εξέλιξη του δείκτη UTCI στο σημείο PO1 για τα σενάρια S1 και S3.

3.3 Διαφοροποίηση ανά προφίλ χρήση

Ο υπολογισμός του PET για διαφορετικά προφίλ χρήστη, δείχνει ότι το ίδιο μικροκλιματικό πεδίο δεν οδηγεί σε ισοδύναμη εκτίμηση της θερμικής επιβάρυνσης. Οι χρονοσειρές ΔPET του ενήλικα και του ηλικιωμένου σχεδόν ταυτίζονται, με διαφορές μικρότερες των 0,05 K, ενώ το παιδικό προφίλ αποκλίνει συστηματικά σε επιμέρους ώρες. Το εύρημα αυτό ενισχύει την ανάγκη ανθρωποκεντρικής αξιολόγησης, ιδίως σε χώρους με σύνθετη σύνθεση χρηστών όπως οι νοσοκομειακοί.

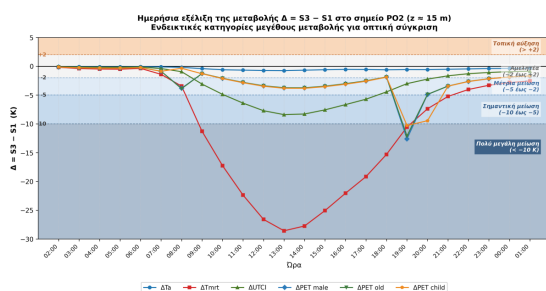


Σχήμα 7. Ημερήσια εξέλιξη της μεταβολής ΔPET στο σημείο PO1, ανά προφίλ χρήστη.

3.4 Στάθμη δώματος

Η συμπληρωματική διερεύνηση στη στάθμη δώματος δείχνει ότι η ανώτερη θέση δεν συνεπάγεται ευνοϊκότερες θερμικές συνθήκες. Θα ανέμενε κανείς σχετική βελτίωση, καθώς στη στάθμη πεζού η μέση ακτινοβολούμενη θερμοκρασία επιβαρύνεται από τη μακρόκυμη ακτινοβολία των

θερμαινόμενων σκληρών επιφανειών του εδάφους. Στο δώμα, ωστόσο, ο περιορισμός αυτής της συνιστώσας αντισταθμίζεται από την αυξημένη ηλιακή ακτινοβολία, λόγω του υψηλότερου συντελεστή θέσης ουρανού και της απουσίας πλευρικής σκίασης. Στο σημείο PO2 η μείωση της T_{mrt} μεταξύ των σεναρίων φτάνει τα 22,05 K κατά την ώρα αναφοράς, ενώ η αντίστοιχη μείωση της θερμοκρασίας αέρα περιορίζεται σε 0,55 K, γεγονός που επιβεβαιώνει τον ακτινοβολιακό χαρακτήρα του οφέλους.



Σχήμα 8. Ημερήσια εξέλιξη των μεταβολών των μικροκλιματικών μεγεθών στο σημείο PO2 της στάθμης δώματος (S3 – S1), $z \approx 15$ m.

Η διαπίστωση αυτή έχει άμεση σχεδιαστική σημασία, καθώς τα δώματα νοσοκομειακών συγκροτημάτων εξετάζονται συχνά ως δυνητικοί χώροι στάσης ή αναψυχής. Η αξιοποίησή τους προϋποθέτει αυτοτελείς παρεμβάσεις σκίασης και όχι απλή μεταφορά της χρήσης σε ανώτερη στάθμη.

3.5 Διάρκεια έκθεσης σε ακραίο θερμικό στρες

Πέρα από τις τιμές αιχμής, κρίσιμη παράμετρο για τους υπαίθριους χώρους νοσοκομείων αποτελεί η διάρκεια παραμονής σε δυσμενείς θερμικές κατηγορίες, καθώς η έκθεση συνδέεται με επαναλαμβανόμενα ή παρατεταμένα διαστήματα κίνησης, αναμονής και σύντομης παραμονής. Στο σημείο PO1 οι ώρες υπέρβασης του ορίου του «ακραίου θερμικού στρες» ($UTCI > 39,9$ °C) μειώνονται από έξι σε τέσσερις μεταξύ των σεναρίων S1 και S3, ενώ η μέγιστη τιμή του UTCI υποχωρεί από 48,39 σε 41,72 °C. Στο PO2 η έκθεση παραμένει εκτεταμένη (από έντεκα σε δέκα ώρες), λόγω της υπερυψωμένης και ακτινοβολιακά εκτεθειμένης θέσης.

Πίνακας 5. Διάρκεια υπέρβασης του ορίου «ακραίου θερμικού στρες» ($UTCI > 39,9$ °C) στα σημεία PO1 και PO2.

Σημείο	S1	S3	Δ
PO1 (στάθμη πεζού)	6 ώρες	4 ώρες	-2 ώρες
PO2 (στάθμη δώματος)	11 ώρες	10 ώρες	-1 ώρα

Το S3 μειώνει επομένως όχι μόνο την ένταση, αλλά και τη διάρκεια της θερμικής επιβάρυνσης, μετατοπίζοντας μέρος της ημερήσιας καμπύλης προς χαμηλότερες κατηγορίες. Το όφελος αυτό είναι ουσιώδες σε περιβάλλον

όπου η παραμονή στον υπαίθριο χώρο δεν είναι πάντοτε επιλογή του χρήστη.

Δ	25,0	-0,57 K	Σχετική προστασία	θερμική
---	------	------------	----------------------	---------

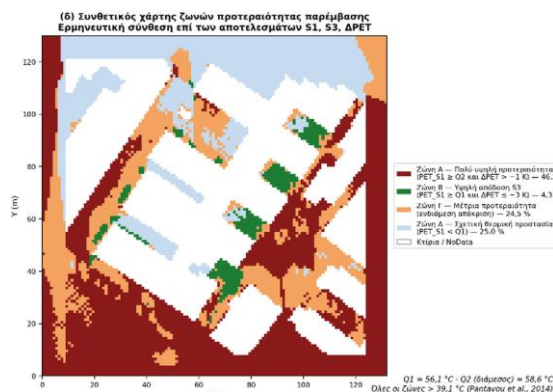
3.6 Χωρική ιεράρχηση παρεμβάσεων

Επειδή κατά την ώρα αναφοράς ολόκληρο το πεδίο εντάσσεται στην ίδια κατηγορία θερμικής αίσθησης, η οποία δεν διαφοροποιεί εσωτερικά τιμές διαφορετικής έντασης, πραγματοποιήθηκε σχετική χωρική ιεράρχηση μέσω ποσοστημοριακής ταξινόμησης της κατανομής PET(S1), με όρια $Q1 = 56,1 \text{ }^{\circ}\text{C}$ και $Q2 = 58,6 \text{ }^{\circ}\text{C}$, σε συνδυασμό με κριτήρια απόκρισης ΔPET.

Η σύνθεση αυτή αποδίδει τέσσερις ζώνες προτεραιότητας. Η ζώνη Α καταλαμβάνει το μεγαλύτερο τμήμα του πεδίου και συνδυάζει υψηλή επιβάρυνση με περιορισμένη απόκριση στις παρεμβάσεις, ενώ η ζώνη Β, αν και μικρή σε έκταση, εμφανίζει την υψηλότερη αποτελεσματικότητα του S3.

Πίνακας 6. Ζώνες προτεραιότητας παρέμβασης κατά την ώρα αναφοράς (16:00).

Ζώνη	% πεδίου	μέση ΔPET	Ερμηνεία
A	46,2	+0,09 K	Πολύ υψηλή προτεραιότητα
B	4,3	-8,57 K	Υψηλή αποτελεσματικότητα S3
Γ	24,5	-0,33 K	Ενδιάμεση προτεραιότητα



Σχήμα 9. Ερμηνευτικός χάρτης ζωνών προτεραιότητας παρέμβασης. Το σχήμα δεν αποτελεί νέο αποτέλεσμα προσομοίωσης, αλλά σύνθεση των πεδίων PET(S1), PET(S3) και ΔPET.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η μικροκλιματική αξιολόγηση των υπαίθριων χώρων του Γενικού Νοσοκομείου Αθηνών «Αλεξάνδρα» υπό συνθήκες θερμικής αιχμής οδηγεί στα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Το μικροκλιματικό όφελος του συνδυαστικού σεναρίου προκύπτει κυρίως από τη μείωση της ακτινοβολιακής επιβάρυνσης, όπως αποτυπώνεται στην πτώση της μέσης ακτινοβολούμενης θερμοκρασίας, ενώ η μεταβολή της θερμοκρασίας αέρα παραμένει μικρή.
- Οι μέγιστες τοπικές μειώσεις που τεκμηριώθηκαν τοποθετούνται στο ανώτερο εύρος της μεσογειακής βιβλιογραφίας για αντίστοιχα πυκνοδομημένα αστικά περιβάλλοντα.

- Η απόδοση των παρεμβάσεων είναι χωρικά ανομοιόμορφη. Το S3 δεν λειτουργεί ως μηχανισμός ομοιόμορφης ψύξης, αλλά δημιουργεί χωρικά εντοπισμένες μικροζώνες θερμικής ανακούφισης σε θέσεις κρίσιμες για την κίνηση, την αναμονή και τη σύντομη παραμονή — χωρίς να εξασφαλίζει συνθήκες θερμικής άνεσης κατά τις ώρες αιχμής.

- Η αποτίμηση διαφοροποιείται ανάλογα με το προφίλ του χρήστη, γεγονός που καθιστά την ανθρωποκεντρική προσέγγιση απαραίτητη σε χώρους υγειονομικής χρήσης.

- Η στάθμη δώματος δεν συνιστά ευνοϊκότερο θερμικό περιβάλλον, λόγω της αυξημένης ακτινοβολιακής έκθεσης.

Συνολικά, τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η θερμική προστασία των υπαίθριων νοσοκομειακών χώρων δεν εξαρτάται μόνο από την ποσότητα των παρεμβάσεων, αλλά κυρίως από τη χωρική στόχευσή τους και από τον έλεγχο της ακτινοβολιακής έκθεσης στις λειτουργικά κρίσιμες ζώνες. Η αποτελεσματική στρατηγική πρέπει να δίνει προτεραιότητα στη δημιουργία συνεχών σκιασμένων διαδρομών και προστατευμένων θέσεων κίνησης, αναμονής και σύντομης παραμονής. Το

συνδυαστικό σενάριο S3 μειώνει την ένταση και τη διάρκεια της θερμικής επιβάρυνσης και δημιουργεί τοπικές ζώνες θερμικής ανακούφισης, χωρίς όμως να εξασφαλίζει συνθήκες θερμικής άνεσης κατά τις ώρες αιχμής.

5. ΣΥΜΒΟΛΗ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η συμβολή της εργασίας αποτιμάται σε συνάρτηση με το ερευνητικό κενό που εντοπίστηκε στη βιβλιογραφική επισκόπηση: την περιορισμένη διαθεσιμότητα χωρικά και χρονικά αναλυτικών μικροκλιματικών αξιολογήσεων υπαίθριων νοσοκομειακών χώρων σε πυκνοδομημένα μεσογειακά περιβάλλοντα. Δεν έγκειται στη χρήση των εργαλείων ENVI-met και BIO-met καθαυτή, αλλά στον συνδυασμό των ακόλουθων στοιχείων:

- Συνδυασμός χωρικής και χρονικής μικροκλιματικής αξιολόγησης, με υπολογισμό του PET για τρία διακριτά προφίλ χρήστη και συμπληρωματική χρήση του UTCI ως τυποποιημένου δείκτη θερμικού στρες.

- Σύγκριση του σεναρίου αναφοράς S1 με το συνδυαστικό σενάριο παρέμβασης S3 και ερμηνεία των αποτελεσμάτων βάσει μεσογειακά προσαρμοσμένων κλιμάκων ταξινόμησης.

- Προσθήκη κατακόρυφης διάστασης, με κύρια αξιολόγηση στη στάθμη πεζού και συμπληρωματική διερεύνηση στη στάθμη δώματος.
- Σύνθεση των πεδίων PET(S1), PET(S3) και ΔPET σε χάρτη χωρικής ιεράρχησης παρεμβάσεων, ο οποίος μετατρέπει τα αποτελέσματα της προσομοίωσης σε εργαλείο υποστήριξης σχεδιαστικών αποφάσεων και συνδέεται με τη λειτουργική σημασία των ζωνών κίνησης, αναμονής και σύντομης παραμονής.

Στο εύρος των πηγών που εξετάστηκαν δεν εντοπίστηκε μελέτη με τον ίδιο συνδυασμό χαρακτηριστικών, χωρίς η διαπίστωση αυτή να συνιστά απόλυτο ισχυρισμό μοναδικότητας. Η προσέγγιση επιτρέπει την αποτίμηση της θερμικής επιβάρυνσης ως χωρικά και χρονικά διαφοροποιημένου φαινομένου, το οποίο επηρεάζεται και από τις παραμέτρους του εξεταζόμενου προφίλ χρήστη.

Οι περιορισμοί της εργασίας αφορούν την απουσία επιτόπιας επαλήθευσης και την εφαρμογή σε μία θερμή ημέρα αναφοράς. Οι κοινές γεωμετρικές, παραμετρικές και μετεωρολογικές συνθήκες των δύο σεναρίων ενισχύουν την αξιοπιστία της σχετικής σύγκρισης, χωρίς να

εξαλείφουν τις αβεβαιότητες του μοντέλου. Η μελλοντική έρευνα θα μπορούσε να επεκταθεί σε πολλαπλές ημέρες αναφοράς, σε επιτόπιες μετρήσεις επαλήθευσης και σε αξιολόγηση της οικονομικής βιωσιμότητας των παρεμβάσεων.

Η μεθοδολογική και εφαρμοσμένη συμβολή της εργασίας έγκειται στον συνδυασμό της χωρικής και χρονικής μικροκλιματικής αξιολόγησης, του υπολογισμού του PET για τρία διακριτά προφίλ χρήστη, της συμπληρωματικής χρήσης του UTCI ως τυποποιημένου δείκτη θερμικού στρες και της σύνθεσης των πεδίων PET(S1), PET(S3) και ΔPET σε χάρτη χωρικής ιεράρχησης παρεμβάσεων. Με τον τρόπο αυτό, τα αποτελέσματα της προσομοίωσης μετατρέπονται από απλή αποτύπωση των θερμικών συνθηκών σε προσαρμόσιμο εργαλείο υποστήριξης σχεδιαστικών αποφάσεων για υπαίθριους χώρους νοσοκομείων.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Bröde, P., Fiala, D., Błażejczyk, K., Holmér, I., Jendritzky, G., Kampmann, B., Tinz, B., & Havenith, G. (2012). Deriving the operational procedure for the Universal Thermal Climate Index (UTCI). *International Journal of Biometeorology*, 56(3), 481–494.
- Bruse, M., & Fleer, H. (1998). Simulating surface–plant–air interactions inside urban environments with a three dimensional numerical model. *Environmental Modelling & Software*, 13(3–4), 373–384.
- Höppe, P. (1999). The physiological equivalent temperature — a universal index for the biometeorological assessment of the thermal environment. *International Journal of Biometeorology*, 43(2), 71–75.
- Pantavou, K., Santamouris, M., Asimakopoulos, D., & Theoharatos, G. (2013). Outdoor thermal sensation

- of pedestrians in a Mediterranean climate and a comparison with UTCI. *Building and Environment*, 66, 82–95.
- Pantavou, K., Santamouris, M., Asimakopoulos, D., & Theoharatos, G. (2014). Empirical calibration of thermal indices in an urban outdoor Mediterranean environment. *Building and Environment*, 80, 283–292.
- Tousi, E., Mela, A., & Tseliou, A. (2025). Nature-Based Urbanism for Enhancing Senior Citizens' Outdoor Thermal Comfort in High-Density Mediterranean Cities: ENVI-met Findings. *Urban Science*, 9(5).
- Tseliou, A., Melas, E., Mela, A., Tsiros, I., & Zervas, E. (2023). The Effect of Green Roofs and Green Façades in the Pedestrian Thermal Comfort of a Mediterranean Urban Residential Area. *Atmosphere*, 14(10).
- Tseliou, A., & Tsiros, I. X. (2016). Modeling urban microclimate to ameliorate thermal sensation conditions in outdoor spaces in Athens. *Building Simulation*, 9, 251–267.

Εισαγωγή

Η κλιματική κρίση, σε συνδυασμό με τη συχνότερη εμφάνιση και την αυξανόμενη διάρκεια ακραίων θερμικών επεισοδίων, επηρεάζει άμεσα τις συνθήκες θερμικής άνεσης στα αστικά περιβάλλοντα, ιδιαίτερα στις μεσογειακές πόλεις, όπου η έντονη ηλιακή ακτινοβολία, η πυκνή δόμηση και η περιορισμένη παρουσία πρασίνου ενισχύουν σημαντικά το φαινόμενο της Αστικής Θερμικής Νησίδας (Climate Central, 2012; Santamouris, 2015).

Στην Αθήνα, η θερμική επιβάρυνση είναι ιδιαίτερα έντονη, καθώς καταγράφονται από τις υψηλότερες θερμοκρασίες στην Ευρώπη, ενώ η αύξηση της θερμικής καταπόνησης έχει άμεσες επιπτώσεις στην υγεία και την ευημερία των κατοίκων (Founda & Santamouris, 2017). Σύμφωνα με τον Παγκόσμιο Οργανισμό Υγείας, το ακραίο θερμικό επεισόδιο του 2022 στην Ευρωπαϊκή Περιφέρεια συνδέθηκε με περισσότερους από 60.000 θανάτους που σχετίζονται με τη ζέστη, ενώ εκτιμάται ότι έως το 2050 ο αριθμός αυτός ενδέχεται να υπερδιπλασιαστεί (United Nations, 2025).

Για την ποσοτική αποτίμηση της θερμικής άνεσης σε υπαίθριους χώρους, η διεθνής βιβλιογραφία αξιοποιεί βιοκλιματικούς δείκτες όπως ο Physiologically Equivalent Temperature (Φυσιολογικά Ισοδύναμη Θερμοκρασία – PET) και ο Universal Thermal Climate Index (Καθολικός Δείκτης Θερμικού Κλίματος – UTCI). Οι δείκτες αυτοί ενσωματώνουν μετεωρολογικές και φυσιολογικές παραμέτρους και χρησιμοποιούνται ευρέως για την εκτίμηση της θερμικής καταπόνησης του ανθρώπου υπό διαφορετικές περιβαλλοντικές συνθήκες.

Η διερεύνηση αυτή υποστηρίζεται από τρισδιάστατα μοντέλα μικροκλίματος, τα οποία έχουν καθιερωθεί ως βασικά εργαλεία ανάλυσης του τοπικού θερμικού περιβάλλοντος. Το λογισμικό ENVI-met (Environmental Microclimate Model, μοντέλο μικροκλίματος περιβάλλοντος) χρησιμοποιείται ευρέως για την προσομοίωση των αλληλεπιδράσεων μεταξύ αστικής γεωμετρίας, επιφανειακών υλικών και βλάστησης, επιτρέποντας την ανάλυση σύνθετων αστικών μορφών και την εκτίμηση της επίδρασης παραμέτρων όπως η φύτευση, η σκίαση και τα υλικά επιφανείας στις μικροκλιματικές συνθήκες υπαίθριων χώρων (Huttner & Bruse, 2009; Tousi, Tseliou, et al., 2024; Zhen et al., 2024).

Οι υπαίθριοι χώροι των νοσοκομείων έχουν ιδιαίτερη σημασία, καθώς λειτουργούν ως ζώνες κίνησης, αναμονής και σύντομης παραμονής, εξυπηρετώντας πολλαπλές λειτουργίες για ασθενείς, προσωπικό και επισκέπτες. Οι χώροι αυτοί χρησιμοποιούνται καθημερινά από ομάδες πληθυσμού με αυξημένη ευαισθησία στο θερμικό στρες, όπως ηλικιωμένοι και παιδιά, γεγονός που καθιστά τις μικροκλιματικές συνθήκες ιδιαίτερα κρίσιμες στο πλαίσιο της κλιματικής κρίσης (Bastin et al., 2019; Zhen et al., 2025). Σε υφιστάμενες νοσοκομειακές υποδομές, οι υπαίθριοι χώροι δεν αποτελούν μόνο χώρους κυκλοφορίας ή αναμονής, αλλά και κρίσιμο χωρικό απόθεμα για την κλιματική προσαρμογή και την επιχειρησιακή ανθεκτικότητα της εγκατάστασης. Η σταδιακή κατάληψη αρχικά ακάλυπτων χώρων από βοηθητικές ή μεταγενέστερες λειτουργικές χρήσεις μπορεί να περιορίσει τη δυνατότητα εφαρμογής παρεμβάσεων σκίασης, φύτευσης και θερμικής αποφόρτισης. Συνεπώς, η αξιολόγηση της μικροκλιματικής τους λειτουργίας συνδέεται όχι μόνο με την παρούσα χρήση τους, αλλά και με τη δυνατότητα μελλοντικής ανάκτησης και αναδιοργάνωσής τους στο πλαίσιο ενός ανθεκτικού νοσοκομειακού σχεδιασμού.

Σε πυκνοδομημένα αστικά περιβάλλοντα, όπου κυριαρχούν οι σκληρές επιφάνειες και η περιορισμένη φυτοκάλυψη (Tousi, Mela, et al., 2024), οι υπαίθριοι χώροι νοσοκομείων εμφανίζουν συχνά αυξημένη θερμική επιβάρυνση κατά τη θερινή περίοδο. Η επιβάρυνση αυτή μπορεί να εντείνει τη θερμική καταπόνηση των εύάλωτων χρηστών, ιδίως όταν η παραμονή στον χώρο είναι αναγκαστική ή λειτουργικά επιβεβλημένη. Στο πλαίσιο αυτό, η διερεύνηση των μικροκλιματικών συνθηκών και η συγκριτική αξιολόγηση εναλλακτικών σεναρίων διαμόρφωσης των χώρων αυτών αποκτούν ιδιαίτερη σημασία για την προσαρμογή των υποδομών υγείας στις μεταβαλλόμενες κλιματικές συνθήκες και την ενίσχυση της ανθεκτικότητάς τους (van Hoof et al., 2025; Zhen et al., 2024).

Παρά την εκτενή εφαρμογή των μικροκλιματικών μοντέλων σε γενικούς αστικούς χώρους, η διερεύνηση των συνθηκών θερμικής άνεσης στους υπαίθριους χώρους νοσοκομείων παραμένει περιορισμένη (Pereira et al., 2020; Yuan et al., 2022).

Το Γενικό Νοσοκομείο Αθηνών «Αλεξάνδρα», το οποίο βρίσκεται σε ιδιαίτερα πυκνοδομημένη περιοχή του Δήμου Αθηναίων, αποτελεί χαρακτηριστική περίπτωση αστικού μικροκλίματος με αυξημένες θερμικές επιβαρύνσεις. Η γειτνίασή του με βασικούς

οδικούς άξονες, η περιορισμένη σκίαση, η εκτεταμένη χρήση σκληρών υλικών και η μειωμένη παρουσία βλάστησης διαμορφώνουν συνθήκες στις οποίες οι χρήστες εκτίθενται σε υψηλά επίπεδα θερμικού στρες, ιδιαίτερα κατά τους θερινούς μήνες και σε περιόδους καύσωνα. Παράλληλα, όπως συμβαίνει συχνά σε υφιστάμενες νοσοκομειακές υποδομές, οι ανάγκες λειτουργίας του νοσοκομείου έχουν επηρεάσει διαχρονικά τη χρήση και τη διαθεσιμότητα των ελεύθερων υπαίθριων χώρων, γεγονός που καθιστά αναγκαία τη διάκριση μεταξύ της σημερινής λειτουργικής κατάστασης και του δυνητικού μικροκλιματικού ρόλου των αρχικά ακάλυπτων χώρων.

Η περίπτωση μελέτης του Γ.Ν.Α. «Αλεξάνδρα» παρουσιάζει διττή ερευνητική φύση. Αφενός, αποτελεί αστικό εξωτερικό χώρο ενταγμένο σε πυκνό αθηναϊκό περιβάλλον, όπου οι συνθήκες θερμικής άνεσης επηρεάζονται από την αστική μορφολογία, τα υλικά επιφανειών, τη βλάστηση, τη σκίαση και το φαινόμενο της αστικής θερμικής νησίδας. Για τον λόγο αυτό, η ανάλυσή του εντάσσεται στη βιβλιογραφία του αστικού μικροκλίματος και της θερμικής άνεσης σε υπαίθριους χώρους. Αφετέρου, αποτελεί υπαίθριο χώρο υποδομής υγείας, δηλαδή μέρος ενός θεραπευτικού και υποστηρικτικού περιβάλλοντος, στο οποίο κινούνται ή παραμένουν ασθενείς, συνοδοί, ηλικιωμένοι, παιδιά, επισκέπτες και προσωπικό. Επομένως, η αξιολόγηση της θερμικής άνεσης δεν περιορίζεται σε μια γενική αστικοκλιματική αποτίμηση, αλλά συνδέεται με τη λειτουργία του νοσοκομείου και τη συνολική εμπειρία των χρηστών του χώρου.

Η διάσταση αυτή αποκτά πρόσθετη σημασία λόγω του μαιευτικού και γυναικολογικού χαρακτήρα του Γ.Ν.Α. «Αλεξάνδρα». Πέρα από τους ηλικιωμένους και τα παιδιά, οι υπαίθριοι χώροι του νοσοκομείου μπορεί να χρησιμοποιούνται από ενήλικες γυναίκες, λεχωίδες, συνοδούς, καθώς και νεογνά ή βρέφη σε συνοδευόμενη μετακίνηση. Η παρούσα εργασία δεν προσομοιώνει ξεχωριστό ανθρωποκεντρικό προφίλ εγκύου, λεχωίδας ή νεογνού, ωστόσο αναγνωρίζει τη σημασία αυτών των χρηστών στο ευρύτερο πλαίσιο θερμικής ευαλωτότητας και νοσοκομειακής λειτουργίας. Η παραδοχή αυτή ενισχύει την ανάγκη προληπτικής θερμικής προστασίας των υπαίθριων χώρων, χωρίς να διευρύνει πέραν του μεθοδολογικού πλαισίου τα προφίλ χρηστών που αναλύονται ποσοτικά.

Με βάση τα παραπάνω, η παρούσα εργασία δεν εξετάζει τη θερμική άνεση ως μεμονωμένο μικροκλιματικό ζήτημα, αλλά ως παράμετρο κλιματικής ανθεκτικότητας σε κρίσιμη

υγειονομική υποδομή, με έμφαση σε ευάλωτες ομάδες χρηστών. Η αξιολόγηση των δεικτών PET (Physiologically Equivalent Temperature / Φυσιολογικά Ισοδύναμη Θερμοκρασία) και UTCI (Universal Thermal Climate Index / Καθολικός Δείκτης Θερμικού Κλίματος) αξιοποιείται όχι μόνο για την αποτύπωση της θερμικής δυσφορίας, αλλά και για τη χωρική τεκμηρίωση της έκθεσης των χρηστών σε συνθήκες θερμικής καταπόνησης. Στο πλαίσιο αυτό, οι αρχικά ακάλυπτοι χώροι αντιμετωπίζονται ως δυνητικό χωρικό απόθεμα κλιματικής προσαρμογής, του οποίου η μικροκλιματική αξία μπορεί να αξιολογηθεί μέσω σεναρίων αναφοράς και παρέμβασης. Η προσέγγιση αυτή συνδέει τη μικροκλιματική προσομοίωση με τη δημόσια υγεία, την προστασία ευάλωτων πληθυσμών και την ανάγκη αναδιοργάνωσης των αστικών υποδομών υγείας υπό συνθήκες κλιματικής κρίσης.

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η ποσοτική, χωρική και χρονική αξιολόγηση της θερμικής επιβάρυνσης στους υπαίθριους χώρους του Γ.Ν.Α. «Αλεξάνδρα» και η συγκριτική αποτίμηση της μικροκλιματικής αποτελεσματικότητας του συνδυαστικού σεναρίου βιοκλιματικής παρέμβασης S3 σε σχέση με το σενάριο αναφοράς S1. Η αξιολόγηση πραγματοποιείται κυρίως στη στάθμη πεζού, με συμπληρωματική διερεύνηση στη στάθμη δώματος, και περιλαμβάνει τον υπολογισμό του PET για τα προφίλ ενηλίκου, ηλικιωμένου και παιδιού, καθώς και τη χρήση του UTCI ως τυποποιημένου δείκτη θερμικού στρες. Το σενάριο αναφοράς S1 συγκροτεί τη βάση σύγκρισης και περιλαμβάνει τα υφιστάμενα υλικά επιφανειών, την υπάρχουσα βλάστηση και τους βασικούς κτιριακούς όγκους, υπό τη μεθοδολογική παραδοχή ανασύστασης των αρχικά ακάλυπτων χώρων ως δυνητικά ανακτήσιμων υπαίθριων χώρων. Το συνδυαστικό σενάριο βιοκλιματικής αναβάθμισης S3 ενσωματώνει αλλαγές υλικών, ενίσχυση της φύτευσης, στοιχεία σκίασης και παρεμβάσεις στα δώματα και αξιολογείται ως δυνητικά εφαρμόσιμο σχεδιαστικό σενάριο, υπό την προϋπόθεση λειτουργικής αναδιοργάνωσης και ανάκτησης των αρχικά ακάλυπτων χώρων.

Μέσω της σύγκρισης S3–S1 επιδιώκεται η ποσοτική αποτίμηση της θερμικής επιβάρυνσης, η αξιολόγηση της μικροκλιματικής αποτελεσματικότητας των προτεινόμενων παρεμβάσεων και η διατύπωση σχεδιαστικών κατευθύνσεων για τη βελτίωση των υπαίθριων χώρων νοσοκομείων σε συνθήκες κλιματικής κρίσης.

Δομή της εργασίας

Η διπλωματική εργασία διαρθρώνεται σε πέντε κεφάλαια, πέραν της Εισαγωγής.

Στην Εισαγωγή παρουσιάζονται το γενικό πλαίσιο, ο σκοπός, η σημασία και η συνολική δομή της έρευνας.

Στο Κεφάλαιο 1 αναπτύσσεται η βιβλιογραφική ανασκόπηση, με έμφαση στην κλιματική κρίση, το αστικό μικροκλίμα, τη θερμική άνεση, τους βιοκλιματικούς δείκτες και τις ιδιαιτερότητες των υπαίθριων χώρων νοσοκομείων.

Στο Κεφάλαιο 2 παρουσιάζεται το μεθοδολογικό πλαίσιο της έρευνας, η περιοχή μελέτης, τα δεδομένα εισόδου, η παραμετροποίηση του μοντέλου ENVI-met 5.8.0 (λογισμικό προσομοίωσης μικροκλίματος) και η διαμόρφωση των δύο τελικών σεναρίων προσομοίωσης. Τα σενάρια αυτά περιλαμβάνουν:

(α) το σενάριο αναφοράς S1, το οποίο λειτουργεί ως μεθοδολογική βάση σύγκρισης και περιλαμβάνει την ανασύσταση των αρχικά ακάλυπτων χώρων, και (β) το συνδυαστικό σενάριο βιοκλιματικής αναβάθμισης S3, το οποίο ενσωματώνει αλλαγές υλικών, ενίσχυση της φύτευσης, στοιχεία σκίασης και παρεμβάσεις στα δώματα. Η ανάλυση αφορά τη συνολική απόκριση του συνδυαστικού σεναρίου S3 και όχι την απομονωμένη συμβολή μίας επιμέρους παρέμβασης.

Στο Κεφάλαιο 3, παρουσιάζονται και αναλύονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για το σενάριο αναφοράς S1 και για το συνδυαστικό σενάριο παρέμβασης S3, ενώ στη συνέχεια ακολουθεί η συγκριτική αξιολόγηση των δύο σεναρίων ως προς τη θερμική άνεση, τη μικροκλιματική βελτίωση και τις επιπτώσεις σε ευάλωτες ομάδες. Συμπληρωματικά, εντάσσεται κατακόρυφη μικροκλιματική διερεύνηση στη στάθμη δώματος 15 m, χωρίς αυτή να αποτελεί νέο σενάριο προσομοίωσης.

Στο Κεφάλαιο 4 αναπτύσσεται η συζήτηση των ευρημάτων σε συνάρτηση με τη διεθνή βιβλιογραφία, τη σχετική αποτελεσματικότητα των διαφορετικών κατηγοριών παρεμβάσεων, τις σχεδιαστικές και λειτουργικές προεκτάσεις τους και τους περιορισμούς της μελέτης.

Στο Κεφάλαιο 5 συνοψίζονται τα βασικά συμπεράσματα και διατυπώνονται προτάσεις για εφαρμογή, για μελλοντική έρευνα και για τη διαμόρφωση σχεδιαστικών κατευθύνσεων για υπαίθριους χώρους νοσοκομείων.

Κύρια σημεία της εργασίας

- Μικροκλιματική προσομοίωση υψηλής χωρικής ανάλυσης (ENVI-met) στους υπαίθριους χώρους του Γ.Ν.Α. «Αλεξάνδρα», υπό συνθήκες θερινής θερμικής αιχμής.
- Αποτίμηση της θερμικής επιβάρυνσης μέσω του PET, υπολογισμένου χωριστά για τα προφίλ ενηλίκου, ηλικιωμένου και παιδιού, και συμπληρωματική χρήση του UTCI ως τυποποιημένου δείκτη θερμικού στρες, με ερμηνεία των αποτελεσμάτων βάσει μεσογειακά προσαρμοσμένων κλιμάκων ταξινόμησης.
- Σε σχέση με το S1, το συνδυαστικό σενάριο S3 επέφερε τοπικές μειώσεις του PET έως περίπου -14 K και της T_{mrt} έως $-40,86$ K, με το μεγαλύτερο όφελος στις ζώνες άμεσης σκίασης και φύτευσης.
- Η βελτίωση είναι χωρικά εστιασμένη στις ζώνες άμεσης σκίασης και βλάστησης και κορυφώνεται κατά τις απογευματινές ώρες αιχμής (15:00–18:00), με ΔPET έως περίπου -12 K για το προφίλ ηλικιωμένου στο PO1.
- Τα τρία προφίλ αποκρίνονται διαφορετικά στο ίδιο μικροκλιματικό πεδίο. Το παιδικό προφίλ συγκεντρώνει περισσότερες ώρες στην κατηγορία «πολύ θερμή» και λιγότερες ώρες στην κατηγορία «ελαφρώς θερμή», όπως ποσοτικοποιείται στην Ενότητα 3.4.2.
- Αναδεικνύεται η σημασία της σκίασης, της φύτευσης, των υλικών και των δωματίων, και διαμορφώνεται ένα προσαρμόσιμο και δυνητικά μεταβιβάσιμο χωρικό και ανθρωποκεντρικό πλαίσιο αξιολόγησης υπαίθριων νοσοκομειακών χώρων.

Κεφάλαιο 1. Βιβλιογραφική ανασκόπηση

1.1 Κλιματική αλλαγή - κλιματική κρίση

Η κλιματική αλλαγή αναφέρεται στις μακροχρόνιες μεταβολές του κλιματικού συστήματος και αφορά αλλαγές βασικών κλιματικών παραμέτρων, όπως η θερμοκρασία του αέρα, η σχετική υγρασία, η ηλιακή ακτινοβολία, η ταχύτητα του ανέμου και τα πρότυπα βροχόπτωσης. Οι μεταβολές αυτές συνδέονται με διαφοροποιήσεις στη συχνότητα, στη διάρκεια και στην ένταση των ακραίων καιρικών φαινομένων, όπως αποτυπώνεται στην Έκθεση Σύνθεσης του Έκτου Κύκλου Αξιολόγησης της Διακυβερνητικής Επιτροπής για την Κλιματική Αλλαγή. Η παρατηρούμενη αύξηση της μέσης παγκόσμιας θερμοκρασίας αποδίδεται με υψηλή επιστημονική βεβαιότητα κυρίως στις ανθρωπογενείς δραστηριότητες και, ειδικότερα, στην αύξηση των συγκεντρώσεων των αερίων του θερμοκηπίου στην ατμόσφαιρα (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2023).

Οι επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής είναι ήδη εμφανείς σε παγκόσμια κλίμακα και επηρεάζουν τόσο τα φυσικά οικοσυστήματα όσο και τα ανθρώπινα συστήματα. Σύμφωνα με την IPCC, οι επιπτώσεις αυτές χαρακτηρίζονται από αυξανόμενη ένταση και γεωγραφική έκταση, ενώ σε ορισμένες περιπτώσεις ενδέχεται να είναι μακροχρόνιες ή δύσκολα αναστρέψιμες, αυξάνοντας την επικινδυνότητα για τις κοινωνίες, τις υποδομές και την ανθρώπινη ευημερία (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2023).

Υπό το πρίσμα αυτό, ο όρος «κλιματική κρίση» χρησιμοποιείται για να αποδώσει την επείγουσα, σύνθετη και συστημική φύση των κλιματικών μεταβολών, καθώς και το γεγονός ότι, σε ορισμένα φυσικά και ανθρώπινα συστήματα, οι δυνατότητες προσαρμογής ενδέχεται να είναι περιορισμένες ακόμη και υπό την εφαρμογή μέτρων μετριασμού και προσαρμογής (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2022).

Η κλιματική αλλαγή έχει ήδη επιφέρει μετρήσιμες επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία, μεταξύ άλλων μέσω της αύξησης της συχνότητας, της έντασης και της διάρκειας των καυσώνων. Η IPCC καταγράφει συσχετίσεις μεταξύ ακραίων θερμικών φαινομένων και αυξημένης θνησιμότητας και νοσηρότητας, ιδιαίτερα σε αστικά περιβάλλοντα, όπου το φαινόμενο της αστικής θερμικής νησίδας μπορεί να ενισχύσει τη θερμική επιβάρυνση. Οι

επιπτώσεις αυτές δεν κατανέμονται ομοιόμορφα στον πληθυσμό, αλλά πλήττουν δυσανάλογα ευάλωτες ομάδες, όπως οι ηλικιωμένοι, τα μικρά παιδιά, οι ασθενείς, τα άτομα με χρόνια νοσήματα και τα άτομα με περιορισμένη κινητικότητα. (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2022).

Στις μεσογειακές περιοχές, η αυξανόμενη συχνότητα, διάρκεια και ένταση των καυσώνων συνδέεται με σημαντικούς κινδύνους για τη δημόσια υγεία, ιδιαίτερα στα αστικά περιβάλλοντα και στις ευάλωτες ομάδες του πληθυσμού (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2022; World Health Organization Regional Office for Europe, 2021). Η συνολική επιβάρυνση της υγείας μπορεί να αποτιμηθεί και μέσω συνθετικών δεικτών, όπως τα DALYs (*Disability-Adjusted Life Years* – έτη ζωής προσαρμοσμένα ως προς την αναπηρία), τα οποία συνδυάζουν τα έτη ζωής που χάνονται λόγω πρόωρης θνησιμότητας με τα έτη ζωής που διανύονται με νόσο ή αναπηρία (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2022). Η αύξηση των κλιματικά ευαίσθητων κινδύνων συνεπάγεται πρόσθετες απαιτήσεις για τα συστήματα υγείας, τους μηχανισμούς πρόληψης και την προστασία των ευάλωτων πληθυσμών, ιδίως σε αστικές περιοχές υψηλής θερμικής επιβάρυνσης (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2022; World Health Organization Regional Office for Europe, 2021).

Η ποσοτική αυτή επιβάρυνση της δημόσιας υγείας αποτυπώνεται και σε συνθετικές αξιολογήσεις των παρατηρούμενων επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής στα ανθρώπινα συστήματα, όπως παρουσιάζονται στην ακόλουθη απεικόνιση.

Η ευρύτερη αυτή επιβάρυνση της δημόσιας υγείας εντάσσεται στις παρατηρούμενες επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής στα ανθρώπινα συστήματα, οι οποίες διαφοροποιούνται ανά τομέα και γεωγραφική περιοχή, όπως παρουσιάζεται στο επόμενο Σχήμα 1.1.1

«Αθανασία Βαβίτσα», «Αξιολόγηση της θερμικής άνεσης και στρατηγικές βελτιστοποίησης στους εξωτερικούς χώρους νοσοκομείων αστικών περιοχών με Μεσογειακό κλίμα υπό συνθήκες κλιματικής κρίσης»

(α) Συνολική αποτύπωση των παρατηρούμενων επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής στα ανθρώπινα συστήματα ανά τομέα και γεωγραφική περιοχή

Ανθρώπινα συστήματα	Επιπτώσεις στην έλλειψη νερού και στην παραγωγή τροφίμων					Επιπτώσεις στην υγεία και στην ευημερία				Επιπτώσεις σε πόλεις, οικισμούς και υποδομές			
	Έλλειψη νερού	Παραγωγή καλλιεργειών	Γεωργία/κτηνοτροφία/αλιεία	Παραγωγή ζώων και κτηνοτροφία	Αλιεύματα και υδατοκαλλιέργεια	Λοιμώδη νοσήματα	Θερμική καταπόνηση, υποσιτισμός και άλλα	Ψυχική υγεία	Εκτοπισμός πληθυσμού	Πλημμύρες και ζημιές	Ζημιές από πλημμύρες σε παράκτιες περιοχές	Ζημιές σε υποδομές	Ζημιές σε βασικούς οικονομικούς τομείς
Παγκόσμιο	+	-	○	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Αφρική	+	-	○	-	-	-	-	○	-	-	-	-	-
Ασία	+	+	○	+	-	-	-	-	-	○	+	-	-
Αυστραλασία	○	-	+	-	○	○	-	+	δεν αξιολογήθηκε	○	-	-	-
Κεντρική και Νότια Αμερική	○	-	-	+	-	-	-	-	δεν αξιολογήθηκε	-	na	-	-
Ευρώπη	+	+	○	+	+	-	-	-	○	-	-	-	-
Βόρεια Αμερική	+	+	○	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-
Μικρά Νησιωτικά Κράτη	+	-	-	+	○	○	+	○	+	-	-	-	-
Αρκτική	○	+	-	+	-	-	-	-	○	-	+	-	+
Παράκτιες πόλεις	○	○	○	-	○	○	-	+	δεν αξιολογήθηκε	○	-	-	-
Μεσογειακή περιοχή	-	-	-	-	○	○	-	-	○	+	+	-	-
Ορεινές περιοχές	+	+	-	○	-	-	-	○	-	-	na	-	-

(β) Εστίαση στη Μεσογειακή περιοχή

Μεσογειακή περιοχή	Επιπτώσεις στην έλλειψη νερού και στην παραγωγή τροφίμων					Επιπτώσεις στην υγεία και στην ευημερία				Επιπτώσεις σε πόλεις, οικισμούς και υποδομές			
Μεσογειακή περιοχή	-	-	-	○	-	○	-	-	○	+	-	-	-

Επίπεδο εμπιστοσύνης ως προς τη σύνδεση με την κλιματική αλλαγή

- Υψηλό ή πολύ υψηλό
- ± Μέτριο
- Χαμηλό
- Περιορισμένη τεκμηρίωση, ανεπαρκής
- na Μη εφαρμόσιμο

Κατεύθυνση των επιπτώσεων στα ανθρώπινα συστήματα (πίνακας β)

- Αυξανόμενες δυσμενείς επιπτώσεις
- +

Σχήμα 1.1.1: Παρατηρούμενες επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής στα ανθρώπινα συστήματα ανά τομέα και γεωγραφική περιοχή: α) συνολική αποτύπωση και β) εστίαση στη Μεσογειακή περιοχή. Οι χρωματικές διαβαθμίσεις αποδίδουν το επίπεδο εμπιστοσύνης ως προς τη σύνδεση των παρατηρούμενων επιπτώσεων με την κλιματική αλλαγή, ενώ τα σύμβολα δηλώνουν την κατεύθυνση των επιπτώσεων.

Πηγή: Προσαρμογή από Intergovernmental Panel on Climate Change (2022).

Η περιοχή της Μεσογείου χαρακτηρίζεται από την IPCC ως περιοχή ιδιαίτερα αυξημένης κλιματικής ευπάθειας, δηλαδή ως κλιματικό *hotspot*, με προβλεπόμενη περαιτέρω αύξηση της συχνότητας και της έντασης των καυσώνων σε σχέση με τις σημερινές συνθήκες. Οι μεταβολές αυτές εντείνουν τις πιέσεις στα αστικά συστήματα και στις κρίσιμες υποδομές,

δημιουργώντας σημαντικές προκλήσεις για τη δημόσια υγεία, την ποιότητα ζωής και την ικανότητα προσαρμογής των πόλεων (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2022). Για τη διερεύνηση και την επικοινωνία των μελλοντικών κλιματικών μεταβολών στις πόλεις χρησιμοποιείται, μεταξύ άλλων, η μέθοδος των κλιματικών αναλόγων πόλεων (*city climate analogues*). Η μέθοδος συγκρίνει το προβλεπόμενο μελλοντικό κλίμα μιας πόλης με τις σημερινές κλιματικές συνθήκες άλλων πόλεων, αποδίδοντας με περισσότερο κατανοητό τρόπο την κατεύθυνση και το μέγεθος της αναμενόμενης μεταβολής. Οι Bastin et al., (2019), αναλύοντας 520 μεγάλες πόλεις, έδειξαν ότι σημαντικό ποσοστό των εξεταζόμενων αστικών περιοχών αναμένεται έως το 2050 να εμφανίζει κλιματικές συνθήκες περισσότερο όμοιες με εκείνες που επικρατούν σήμερα σε άλλες, συνήθως θερμότερες ή ξηρότερες, γεωγραφικές περιοχές. Ενδεικτικά παραδείγματα της μεθόδου παρουσιάζονται στο Σχήμα 1.1.2.



Σχήμα 1.1.2. Ενδεικτικά παραδείγματα κλιματικών αναλόγων πόλεων έως το 2050. Για κάθε εξεταζόμενη πόλη παρουσιάζεται η μεταβολή μεταξύ των σημερινών και των προβλεπόμενων

μελλοντικών κλιματικών συνθηκών, καθώς και η ομοιότητα του μελλοντικού της κλίματος με το σημερινό κλίμα άλλης πόλης.

Πηγή: Αναπαραγωγή από Bastin et al. (2019, Figure 3), βάσει άδειας CC BY 4.0

Η απεικόνιση των μελλοντικών κλιματικών συνθηκών μέσω αναλόγων πόλεων καθιστά περισσότερο κατανοητή την κατεύθυνση της αναμενόμενης μεταβολής, χωρίς να υποκαθιστά τις αναλυτικές κλιματικές προβολές. Για πολλές ευρωπαϊκές πόλεις, η γενική τάση αφορά μετατόπιση προς θερμότερες συνθήκες, αντίστοιχες με εκείνες που παρατηρούνται σήμερα σε νοτιότερες γεωγραφικές περιοχές. Η εξέλιξη αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική για τις μεσογειακές πόλεις, στις οποίες η ήδη αυξημένη θερινή θερμική επιβάρυνση αναμένεται να ενταθεί περαιτέρω.

Σύμφωνα με τα συνοδευτικά αποτελέσματα της ανάλυσης των Bastin et al. (2019), η Αθήνα αναμένεται έως το 2050 να παρουσιάζει κλιματικές συνθήκες περισσότερο όμοιες με εκείνες που επικρατούν σήμερα στη Φεζ του Μαρόκου. Η αντιστοίχιση αυτή αναδεικνύει τη μετάβαση προς θερμότερες συνθήκες, χωρίς να υποδηλώνει πλήρη κλιματική ή αστική εξομοίωση των δύο πόλεων.

Η κλιματική αλλαγή δεν αποτελεί πλέον μόνο μακροπρόθεσμο περιβαλλοντικό φαινόμενο, αλλά κρίση με άμεσες επιπτώσεις στα ανθρώπινα συστήματα. Η αύξηση των θερμικών άκρων και των καυσώνων καθιστά αναγκαία την ποσοτική διερεύνηση της θερμικής επικινδυνότητας στα αστικά περιβάλλοντα, ιδίως σε υποδομές που εξυπηρετούν ευάλωτους πληθυσμούς. Η κατανόηση των μελλοντικών κλιματικών εξελίξεων αποτελεί, επομένως, κρίσιμο θεωρητικό υπόβαθρο για τη χωρική αξιολόγηση της θερμικής έκθεσης, για τον σχεδιασμό της αστικής ανάπτυξης και για την ενίσχυση της ικανότητας προσαρμογής των αστικών συστημάτων.

1.1.1 Σενάρια εκπομπών και κλιματικές προβολές

Οι μελλοντικές κλιματικές εξελίξεις προσεγγίζονται μέσω σεναρίων, όπως οι Αντιπροσωπευτικές Διαδρομές Συγκέντρωσης (Representative Concentration Pathways – RCP) και τα Σενάρια Κοινών Κοινωνικοοικονομικών Διαδρομών (Shared Socioeconomic Pathways – SSP). Τα RCP περιγράφουν εναλλακτικές τροχιές συγκέντρωσης αερίων του θερμοκηπίου και το αντίστοιχο επίπεδο ακτινοβολιακής εξαναγκασμένης θέρμανσης έως το 2100, ενώ τα SSP ενσωματώνουν κοινωνικοοικονομικές εξελίξεις (πληθυσμιακή

αύξηση, ενεργειακή μετάβαση, τεχνολογική ανάπτυξη) που επηρεάζουν τόσο τις εκπομπές όσο και την ικανότητα προσαρμογής. Το σενάριο RCP4.5 προσομοιώνει μια πορεία μερικού μετριασμού των εκπομπών, με σταδιακή σταθεροποίηση της θέρμανσης, ενώ το RCP8.5 αποτυπώνει συνθήκες υψηλών εκπομπών και εντονότερης αύξησης της θερμοκρασίας. Για τη Μεσόγειο, οι προβολές συγκλίνουν σε αύξηση της μέσης θερμοκρασίας, μεγαλύτερη διάρκεια καυσώνων και ενίσχυση των θερμικών άκρων, γεγονός που συνεπάγεται αυξημένο θερμικό φορτίο στα αστικά περιβάλλοντα.

1.1.2 Καύσωνες στην Ελλάδα - Αττική/Αθήνα

Στην Ελλάδα, και ειδικότερα στην Αττική, οι καύσωνες αποτελούν έναν από τους σημαντικότερους κλιματικούς κινδύνους της θερινής περιόδου.

Η αυξητική τάση των καυσώνων στην Ελλάδα έχει επιβεβαιωθεί και από μακροχρόνια ανάλυση για την περίοδο 1950–2020. Οι Galanaki et al. (2023), αξιοποιώντας δεδομένα ERA5-Land, έδειξαν ότι η Ελλάδα παρουσίαζε κατά μέσο όρο περίπου 0,7 επεισόδια καύσωνα ανά θερινή περίοδο για το σύνολο της περιόδου 1950–2020, ενώ μετά το 1990 η τιμή αυτή αυξήθηκε κατά 80%. Ο μέσος αριθμός επεισοδίων καυσώνων είναι περίπου 1,1 και 1,3 ανά θερινή περίοδο αντίστοιχα στις δεκαετίες του 2000 και 2010.

Η ίδια μελέτη αναφέρει συγκεκριμένα για την Αθήνα, συνολική αύξηση της συχνότητας, της διάρκειας, της έντασης των καυσώνων και των ημερών με υψηλά επίπεδα δυσφορίας οδηγώντας σε καλοκαίρια μεγαλύτερη διάρκειας με εντεινόμενη θερμική επιβάρυνση (Galanaki et al., 2022).

Η Αθήνα έχει ήδη βιώσει ακραία θερμικά επεισόδια με σημαντικές επιπτώσεις στη δημόσια υγεία. Ο καύσωνας του Ιουλίου 1987 αποτελεί χαρακτηριστικό ιστορικό παράδειγμα, καθώς συνδέθηκε με πολύ υψηλά επίπεδα θερμικής καταπόνησης και σημαντική αύξηση της θνησιμότητας. Η επίδραση του συγκεκριμένου επεισοδίου έχει αναλυθεί τόσο από επιδημιολογική σκοπιά όσο και από τη σκοπιά της ανθρώπινης βιομετεωρολογίας, με έμφαση στη δυσμενή συνδυαστική επίδραση υψηλής θερμοκρασίας και επιβαρυνμένων περιβαλλοντικών συνθηκών στην Αθήνα με σοβαρές επιπτώσεις στην υγεία (Katsouyanni et al., 1988; Matzarakis & Mayer, 1991).

Πιο πρόσφατα, οι καύσωνες του Ιουλίου 2023 και του Ιουλίου 2024 ανέδειξαν τη σημασία της διάρκειας των θερμών επεισοδίων. Σύμφωνα με τις καταγραφές του δικτύου

αυτόματων μετεωρολογικών σταθμών του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών / meteo.gr, ο καύσωνας του Ιουλίου 2023 διήρκεσε 15 ημέρες και αποτέλεσε, έως τότε, τον μεγαλύτερο σε διάρκεια καταγεγραμμένο καύσωνα στη χώρα. Το 2024 καταγράφηκε ακόμη μεγαλύτερο επεισόδιο, διάρκειας 16 ημερών, γεγονός που δείχνει ότι τα παρατεταμένα θερμά επεισόδια τείνουν να αποτελούν επαναλαμβανόμενη συνθήκη θερμικής πίεσης για τις ελληνικές πόλεις (Λαγουβάρδος et al., 2023, 2024)

Ιδιαίτερη σημασία για την Αθήνα έχει και η επιμονή υψηλών ελάχιστων θερμοκρασιών κατά τη διάρκεια της νύχτας. Κατά τον καύσωνα του Ιουλίου 2024, το Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών / meteo.gr κατέγραψε ότι αρκετές περιοχές μεγάλων αστικών κέντρων δεν υποχωρούσαν κάτω από τους 27°C για πολλά 24ωρα, με το λεκανοπέδιο της Αττικής να συγκεντρώνει το μεγαλύτερο πρόβλημα ως προς τις υψηλές νυχτερινές θερμοκρασίες. Η συνθήκη αυτή είναι κρίσιμη, καθώς περιορίζει τη δυνατότητα νυχτερινής θερμικής ανάκαμψης του πληθυσμού και εντείνει τη σωρευτική θερμική επιβάρυνση κατά τη διάρκεια παρατεταμένων καυσώνων (Κύρος & Λαγουβάρδος, 2024).

Για την παρούσα εργασία, τα παραπάνω δεδομένα συγκροτούν το κλιματικό υπόβαθρο της μελέτης περίπτωσης. Το Γ.Ν.Α. «Αλεξάνδρα» βρίσκεται σε κεντρική και πυκνοδομημένη περιοχή της Αθήνας και εξυπηρετεί καθημερινά χρήστες με διαφορετικό βαθμό θερμικής ευαλωτότητας, όπως ασθενείς, ηλικιωμένους, παιδιά, συνοδούς και προσωπικό. Επομένως, η μελέτη των καυσώνων στην Αττική/Αθήνα τεκμηριώνει την ανάγκη διερεύνησης της θερμικής έκθεσης σε επίπεδο υπαίθριου νοσοκομειακού χώρου. Η ανάγκη αυτή συνδέεται και με τις διεθνείς κατευθύνσεις για την εκπόνηση σχεδίων δράσης για την υγεία έναντι της ζέστης (Heat–Health Action Plans / Σχέδια Δράσης για την Υγεία και τη Ζέστη), τα οποία δίνουν έμφαση στην πρόληψη, την έγκαιρη προειδοποίηση και την προστασία ευάλωτων πληθυσμών κατά τη διάρκεια ακραίων θερμικών επεισοδίων (World Health Organization Regional Office for Europe, 2021) .

Η επόμενη ενότητα εστιάζει στον τρόπο με τον οποίο το αστικό μικροκλίμα και η αστική θερμική νησίδα τροποποιούν περαιτέρω τις θερμικές συνθήκες σε τοπική κλίμακα.

Υπό αυτή την έννοια, οι καύσωνες δεν αντιμετωπίζονται μόνο ως κλιματικά ή μετεωρολογικά επεισόδια, αλλά και ως κίνδυνοι δημόσιας υγείας και πολιτικής προστασίας, των οποίων η διαχείριση απαιτεί πρόληψη, ετοιμότητα και μείωση της

έκθεσης ευάλωτων πληθυσμών, σε συμφωνία με τις αρχές του Πλαισίου Sendai για τη Μείωση του Κινδύνου Καταστροφών (United Nations Office for Disaster Risk Reduction, 2015).

1.2 Αστικό μικροκλίμα και αστική θερμική νησίδα

Η αύξηση της θερμοκρασίας και η ενίσχυση των ακραίων θερμικών φαινομένων στις πόλεις καθιστούν αναγκαία τη μελέτη του αστικού μικροκλίματος, δηλαδή των τοπικών κλιματικών συνθηκών που διαμορφώνονται στο επίπεδο της γειτονιάς ή ακόμη και του υπαίθριου χώρου μεταξύ κτιρίων. Το αστικό μικροκλίμα επηρεάζεται από πλήθος παραγόντων που σχετίζονται με τη μορφολογία και τη λειτουργία του δομημένου περιβάλλοντος, όπως η πυκνότητα δόμησης, η γεωμετρία των αστικών φαραγγίων (urban canyons), τα υλικά των επιφανειών, η παρουσία βλάστησης, καθώς και οι τοπικές συνθήκες ακτινοβολίας και αερισμού. Οι παράγοντες αυτοί μπορούν να τροποποιήσουν σημαντικά τις θερμικές συνθήκες σε σχέση με το ευρύτερο κλίμα της περιοχής, οδηγώντας συχνά στην εμφάνιση του φαινομένου της αστικής θερμικής νησίδας (Urban Heat Island – UHI), κατά το οποίο οι αστικές περιοχές παρουσιάζουν υψηλότερες θερμοκρασίες σε σχέση με τις περιαστικές ή αγροτικές περιοχές. (Oke, 1995; Santamouris, 2015)

Η ταχεία αστικοποίηση συνιστά μία από τις σημαντικότερες δημογραφικές και χωρικές μεταβολές του 21ου αιώνα. Σύμφωνα με τις πλέον πρόσφατες εκτιμήσεις των Ηνωμένων Εθνών, περισσότερο από το 55 % του παγκόσμιου πληθυσμού κατοικεί σήμερα σε αστικές περιοχές, ενώ το ποσοστό αυτό προβλέπεται να προσεγγίσει το 68 % έως το 2050, ως αποτέλεσμα της πληθυσμιακής αύξησης, της μετανάστευσης από αγροτικές σε αστικές περιοχές και της συνεχούς αστικής επέκτασης (United Nations, 2025). Παράλληλα, η δημιουργία ανθεκτικών και βιώσιμων πόλεων έχει αναδειχθεί σε κεντρική προτεραιότητα της διεθνούς αναπτυξιακής πολιτικής, όπως αποτυπώνεται στον Στόχο 11 των Στόχων Βιώσιμης Ανάπτυξης του ΟΗΕ (United Nations, 2015).

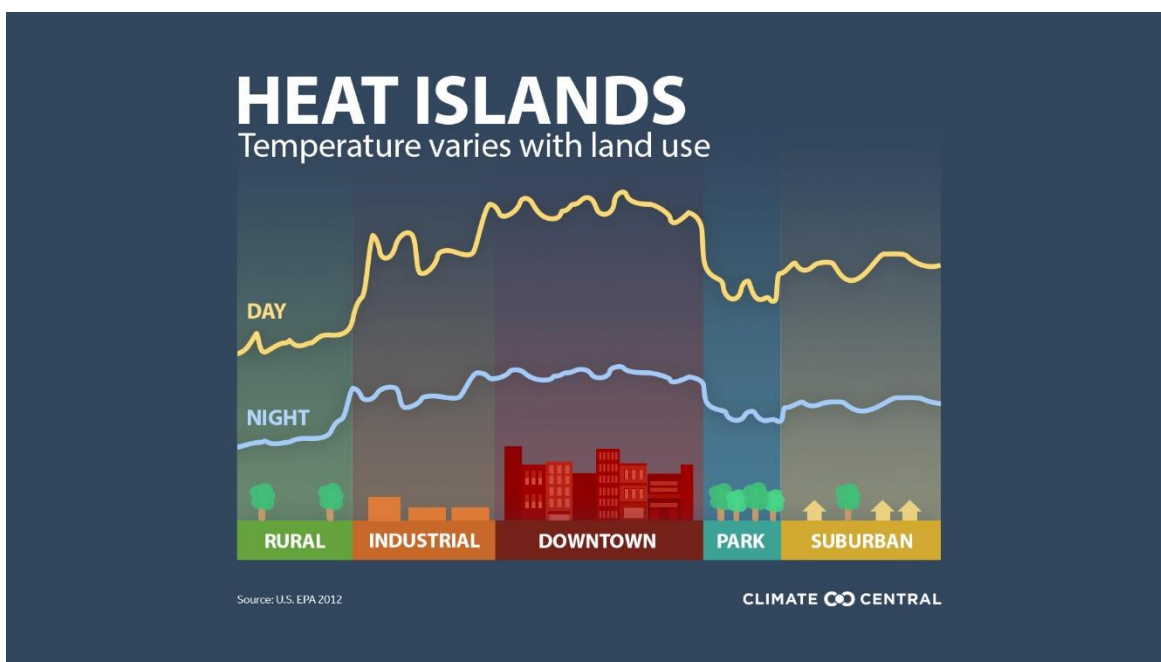
Οι περιβαλλοντικές συνθήκες του αστικού χώρου επηρεάζουν άμεσα την ποιότητα ζωής, τη δημόσια υγεία και τη λειτουργικότητα των ανθρώπινων οικισμών· γι' αυτό η συστηματική αξιολόγησή τους είναι αναγκαία.

Οι συνθήκες αυτές επηρεάζονται από την αστική μορφολογία, τη γεωμετρία των κτιρίων και των υπαίθριων χώρων, τα υλικά των επιφανειών, τη βλάστηση και τις ανθρωπογενείς δραστηριότητες (Oke, 1995; Santamouris & Asimakopoulos, 1996).

Η χωρική ετερογένεια του αστικού μικροκλίματος εκδηλώνεται σε πολύ μικρές αποστάσεις, μέσω διαφοροποιήσεων στη σκίαση, στον αερισμό και στις θερμοφυσικές ιδιότητες των επιφανειών, οι οποίες μεταβάλλουν τις τοπικές συνθήκες θερμοκρασίας, ροής αέρα και ακτινοβολίας (Oke, 1995; Spagnolo & de Dear, 2003).

Ένα από τα πλέον χαρακτηριστικά φαινόμενα που συνδέονται με το αστικό μικροκλίμα είναι η αστική θερμική νησίδα (Urban Heat Island - UHI), η οποία περιγράφει τη συστηματικά υψηλότερη θερμοκρασία που παρατηρείται στις αστικές περιοχές σε σύγκριση με τις περιαστικές και αγροτικές ζώνες. Το φαινόμενο αυτό αποδίδεται κυρίως στη συγκέντρωση δομικών υλικών υψηλής θερμικής χωρητικότητας, στη μειωμένη παρουσία βλάστησης και εξατμισοδιαπνοής, καθώς και στη γεωμετρία των αστικών «χαραδρών», η οποία περιορίζει τον φυσικό αερισμό και τη νυχτερινή αποβολή θερμότητας (Oke, 1995). Η αστική θερμική νησίδα αποτελεί δομικό χαρακτηριστικό των σύγχρονων πόλεων, με έντονη χωρική και χρονική μεταβλητότητα και σημαντικές επιπτώσεις στη θερμική καταπόνηση του αστικού πληθυσμού, ιδιαίτερα κατά τη διάρκεια ακραίων θερμικών επεισοδίων και καυσώνων (Founda & Santamouris, 2017; Santamouris, 2015). Η αστική θερμική νησίδα δεν αποτελεί φαινόμενο περιορισμένο στις ώρες της ημέρας, αλλά διατηρείται συχνά και κατά τη διάρκεια της νύχτας, λόγω της αποθήκευσης και της σταδιακής επανεκπομπής θερμότητας από τα δομικά υλικά του αστικού ιστού. Η διατήρηση της αστικής θερμικής νησίδας κατά τις νυχτερινές ώρες έχει τεκμηριωθεί εκτενώς στη διεθνή επιστημονική βιβλιογραφία, τόσο σε κλασικές μελέτες αστικού κλίματος (Oke, 1995) όσο και σε σύγχρονες εκθέσεις αξιολόγησης της κλιματικής αλλαγής (Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2022).

Η χρονική αυτή διάσταση του φαινομένου αποτυπώνεται ενδεικτικά στο Σχήμα 1.2, το οποίο παρουσιάζει τη διαφοροποίηση της θερμοκρασίας επιφάνειας μεταξύ αστικών και μη αστικών χρήσεων γης κατά τη διάρκεια της ημέρας και της νύχτας.



Σχήμα 1.2. Ενδεικτική απεικόνιση της ημερήσιας και νυχτερινής μεταβολής της θερμοκρασίας επιφάνειας σε διαφορετικές χρήσεις γης, αναδεικνύοντας τη διατήρηση της αστικής θερμικής νησίδας κατά τις νυχτερινές ώρες.

Πηγή: προσαρμογή από U.S. Environmental Protection Agency, 2012 (Climate Central, 2012)

Η επιμονή των υψηλότερων θερμοκρασιών κατά τις νυχτερινές ώρες μειώνει τη δυνατότητα θερμικής ανάκαμψης και μπορεί να εντείνει τη συνολική θερμική επιβάρυνση σε περιόδους καύσωνα, ιδίως σε πυκνοδομημένα αστικά περιβάλλοντα (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2022).

Η διαμόρφωση του αστικού μικροκλίματος χαρακτηρίζεται από έντονη χωρική ετερογένεια, ακόμη και σε πολύ μικρές αποστάσεις, γεγονός που καθιστά περιορισμένη την αξιολόγηση των συνθηκών αποκλειστικά βάσει μετεωρολογικών δεδομένων ευρείας κλίμακας. Παράμετροι όπως η θερμοκρασία του αέρα, η ταχύτητα και η κατεύθυνση του ανέμου, η σχετική υγρασία και η μέση θερμοκρασία ακτινοβολίας μεταβάλλονται δυναμικά σε συνάρτηση με τη γεωμετρία, τη σκίαση και τη χρήση του χώρου, επηρεάζοντας τη θερμική κατάσταση των υπαίθριων αστικών χώρων (Spagnolo & de Dear, 2003). Για τον λόγο αυτό, η αξιολόγηση των μικροκλιματικών συνθηκών δεν είναι επαρκής όταν στηρίζεται αποκλειστικά σε δεδομένα ευρείας κλίμακας, αλλά συχνά προϋποθέτει εργαλεία υψηλής χωρικής ανάλυσης, ικανά να αποτυπώσουν τις

αλληλεπιδράσεις μεταξύ δομημένου περιβάλλοντος, επιφανειών και βλάστησης (Tsoka et al., 2018) .

Στη σύγχρονη βιβλιογραφία, η ανάλυση του αστικού μικροκλίματος σε χωρική κλίμακα υπαίθριου χώρου βασίζεται σε σημαντικό βαθμό στη χρήση υπολογιστικών μεθόδων ρευστοδυναμικής (CFD), οι οποίες επιτρέπουν την αριθμητική προσομοίωση της ροής του αέρα, της θερμικής συμπεριφοράς των επιφανειών και των μηχανισμών ανταλλαγής ενέργειας στο δομημένο περιβάλλον (Toparlar et al., 2017).

Για την αριθμητική αποτύπωση αυτών των διεργασιών έχουν αναπτυχθεί ολοκληρωμένα μοντέλα μικροκλίματος, τα οποία συνδυάζουν ατμοσφαιρικές διεργασίες, ροή και ανταλλαγές ενέργειας. Τέτοιες προσεγγίσεις χρησιμοποιούνται για την αποτύπωση της χωρικής μεταβλητότητας των μικροκλιματικών παραμέτρων και για την αξιολόγηση των θερμικών συνθηκών σε υπαίθριους αστικούς χώρους, υπό την προϋπόθεση της ορθής παραμετροποίησης και της κριτικής ερμηνείας των αποτελεσμάτων.

Οι εφαρμογές αυτές αξιοποιούνται στη διεθνή βιβλιογραφία για την αποτύπωση της χωρικής μεταβλητότητας των μικροκλιματικών παραμέτρων και την αξιολόγηση της ανθρώπινης θερμικής έκθεσης (Toparlar et al., 2017; Tsoka et al., 2018).

Κατά συνέπεια, η διερεύνηση του αστικού μικροκλίματος αποκτά πρακτική σημασία στον βαθμό που αποτυπώνεται ως εμπειρία θερμικής άνεσης ή θερμικής καταπόνησης για τον άνθρωπο, καθιστώντας αναγκαία τη μετάβαση στο πλαίσιο της θερμικής άνεσης σε υπαίθριους χώρους.

1.3 Θερμική άνεση σε υπαίθριους χώρους

Η θερμική άνεση ορίζεται ως η υποκειμενική κατάσταση κατά την οποία ένα άτομο αισθάνεται θερμικά ικανοποιημένο από το περιβάλλον στο οποίο εκτίθεται και δεν επιθυμεί μεταβολή των θερμικών συνθηκών του περιβάλλοντος. Η έννοια αυτή διατυπώθηκε αρχικά στο πλαίσιο της θεωρίας της θερμικής ισορροπίας του ανθρώπινου οργανισμού και αποτέλεσε τη βάση για την ανάπτυξη διεθνών προτύπων αξιολόγησης της θερμικής άνεσης, κυρίως σε εσωτερικά περιβάλλοντα (ASHRAE, 2023; Fanger, 1970; International Organization for Standardization, 2005).

Στα εσωτερικά περιβάλλοντα, η θερμική άνεση αξιολογείται υπό σχετικά σταθερές και ελεγχόμενες συνθήκες μέσω μηχανικών συστημάτων θέρμανσης, ψύξης και αερισμού. Αντίθετα, στους υπαίθριους χώρους, η θερμική άνεση δεν διαμορφώνεται υπό σταθερές ή ελεγχόμενες συνθήκες, αλλά προκύπτει από τη συνεχή και δυναμική αλληλεπίδραση μεταβαλλόμενων μικροκλιματικών παραμέτρων, χωρικών χαρακτηριστικών και ανθρώπινων παραγόντων. Σε αστικά περιβάλλοντα, η θερμική εμπειρία επηρεάζεται άμεσα από την ηλιακή ακτινοβολία και τη μέση θερμοκρασία ακτινοβολίας, την ένταση και κατεύθυνση του ανέμου, καθώς και από τη γεωμετρική διάρθρωση του χώρου, τα υλικά των επιφανειών και την παρουσία βλάστησης (Oke, 1995; Santamouris & Asimakopoulos, 1996).

Οι παράμετροι αυτές παρουσιάζουν σημαντικές μεταβολές στον χώρο και στον χρόνο, καθιστώντας τη θερμική άνεση σε υπαίθριους χώρους ιδιαίτερα ευαίσθητη σε τοπικές διαφοροποιήσεις του αστικού μικροκλίματος. Σε επίπεδο ανθρώπινης κλίμακας, ακόμη και μικρές διαφοροποιήσεις στη σκίαση, στον φυσικό αερισμό ή στις θερμοφυσικές ιδιότητες των δομικών επιφανειών μπορούν να οδηγήσουν σε αισθητές μεταβολές της θερμικής εμπειρίας των χρηστών (Oke, 1995; Spagnolo & de Dear, 2003).

Υπό συνθήκες κλιματικής κρίσης, η θερμική άνεση στους υπαίθριους χώρους αποκτά αυξημένη βαρύτητα, επειδή οι συχνότεροι και εντονότεροι καύσωνες επιτείνουν τη θερμική δυσφορία στις πόλεις. Η βιβλιογραφία αναδεικνύει ότι οι επιπτώσεις αυτές δεν εκδηλώνονται ομοιόμορφα στον πληθυσμό, αλλά διαφοροποιούνται ανάλογα με την ηλικία, την κατάσταση υγείας και το επίπεδο δραστηριότητας, πλήττοντας δυσανάλογα ευάλωτες ομάδες, όπως ηλικιωμένους, ασθενείς και άτομα με περιορισμένη κινητικότητα (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2022; Tousi, Tseliou, et al., 2024).

Η κατανόηση των παραγόντων που διαμορφώνουν τη θερμική άνεση είναι κρίσιμη τόσο για την αποτίμηση των υφιστάμενων συνθηκών όσο και για τον ανασχεδιασμό υπαίθριων χώρων αυξημένων λειτουργικών απαιτήσεων.

1.3.1 Μικροκλιματικές παράμετροι σε επίπεδο υπαίθριου χώρου

Η θερμική άνεση στους αστικούς υπαίθριους χώρους διαμορφώνεται από το σύνολο των μικροκλιματικών παραμέτρων που δρουν σε επίπεδο ανθρώπινης κλίμακας. Παράμετροι όπως η θερμοκρασία του αέρα, η σχετική υγρασία, η ταχύτητα και η κατεύθυνση του

ανέμου, καθώς και η μέση θερμοκρασία ακτινοβολίας παρουσιάζουν έντονη χωρική και χρονική μεταβλητότητα σε κλίμακα υπαίθριου χώρου. Η μεταβλητότητα αυτή επηρεάζεται άμεσα από τη γεωμετρία του χώρου, τη διάταξη των κτιριακών όγκων, τη σκίαση και τις θερμοφυσικές ιδιότητες των επιφανειών, οδηγώντας σε σημαντικές διαφοροποιήσεις των συνθηκών θερμικής άνεσης ακόμη και σε μικρές αποστάσεις εντός του ίδιου αστικού υπαίθριου χώρου (Oke, 1995; Santamouris & Asimakopoulos, 1996).

1.3.2 Ρόλος της ηλιακής ακτινοβολίας και της σκίασης

Η ηλιακή ακτινοβολία και η μέση θερμοκρασία ακτινοβολίας αναγνωρίζονται ως από τους σημαντικότερους παράγοντες θερμικής καταπόνησης σε υπαίθριους χώρους. Σε αστικούς υπαίθριους χώρους αυξημένων λειτουργικών απαιτήσεων, όπου η δυνατότητα επιλογής θέσεων παραμονής είναι συχνά περιορισμένη, η απουσία επαρκούς σκίασης μπορεί να οδηγήσει σε συνθήκες έντονου θερμικού στρες, ιδιαίτερα κατά τους θερινούς μήνες. Η χωρική οργάνωση της σκίασης, είτε μέσω δομικών στοιχείων είτε μέσω φυσικών μέσων, αποτελεί καθοριστικό παράγοντα βελτίωσης της θερμικής άνεσης (Tseliou & Tsiros, 2016; Tsoka et al., 2018).

1.3.3 Κυκλοφορία του αέρα και φυσικός αερισμός

Η κυκλοφορία του αέρα συνδέεται με τη θερμική αίσθηση μέσω μηχανισμών συναγωγής και εξάτμισης και αποτελεί κρίσιμο παράγοντα μείωσης της θερμικής καταπόνησης. Η γεωμετρία των αστικών υπαίθριων χώρων, οι κλειστές αυλές, οι στενοί διάδρομοι κίνησης και οι διαμορφώσεις τύπου «αστικής χαράδρας» μπορούν να περιορίσουν ουσιαστικά τον φυσικό αερισμό. Ως αποτέλεσμα, παρατηρείται συσσώρευση θερμότητας και επιδείνωση των μικροκλιματικών συνθηκών, ιδιαίτερα σε περιόδους χαμηλής ταχύτητας ανέμου και αυξημένων θερμοκρασιών (Oke, 1995; Toparlar et al., 2017).

1.3.4 Υλικά επιφανειών και θερμοφυσικές ιδιότητες

Η επιλογή και η έκταση των υλικών επιφανειών επηρεάζουν καθοριστικά τη θερμική συμπεριφορά των αστικών υπαίθριων χώρων. Η εκτεταμένη χρήση σκληρών επιφανειών με υψηλή θερμική χωρητικότητα και χαμηλή ηλιακή ανακλαστικότητα, χαρακτηριστική σε πολλούς υφιστάμενους αστικούς υπαίθριους χώρους, συμβάλλει στην αποθήκευση και επανεκπομπή θερμότητας. Η πρακτική αυτή εντείνει τις τοπικές επιπτώσεις της αστικής

θερμικής νησίδας και αυξάνει τη θερμική καταπόνηση των χρηστών, καθιστώντας την επιλογή υλικών κρίσιμο παράγοντα στον βιοκλιματικό σχεδιασμό υπαίθριων χώρων (Santamouris, 2015; Tsoka et al., 2018).

1.3.5 Βλάστηση και εξατμισοδιαπνοή

Η παρουσία βλάστησης συμβάλλει στη βελτίωση των μικροκλιματικών συνθηκών μέσω μηχανισμών σκίασης, εξατμισοδιαπνοής και μείωσης της θερμοκρασίας των επιφανειών. Στους αστικούς υπαίθριους χώρους, ωστόσο, η εφαρμογή πρασίνου συχνά περιορίζεται από λειτουργικές, υγειονομικές και χωρικές απαιτήσεις. Η ανάγκη διατήρησης της προσβασιμότητας, της ασφάλειας και της αδιάλειπτης λειτουργίας καθιστά απαραίτητη τη στοχευμένη και τεκμηριωμένη επιλογή φυτεύσεων, ώστε να επιτυγχάνεται μικροκλιματικό όφελος χωρίς να διακυβεύονται οι λειτουργικές απαιτήσεις του αστικού χώρου (Tseliou & Tsiros, 2016; World Health Organization, 2020).

Η πολυπαραγοντική και δυναμική φύση της θερμικής άνεσης στους υπαίθριους χώρους, σε συνδυασμό με τη χωρική και χρονική μεταβλητότητα των μικροκλιματικών παραμέτρων, καθιστά αναγκαία την ποσοτική της προσέγγιση μέσω ολοκληρωμένων βιοκλιματικών δεικτών, οι οποίοι συνδυάζουν τις περιβαλλοντικές συνθήκες με τη φυσιολογική απόκριση του ανθρώπινου οργανισμού.

1.4 Βιοκλιματικοί δείκτες θερμικής άνεσης

Για τον ποσοτικό χαρακτηρισμό της θερμικής άνεσης και της θερμικής καταπόνησης σε υπαίθριους χώρους χρησιμοποιούνται βιοκλιματικοί δείκτες, οι οποίοι αποτυπώνουν τη σύνθετη θερμική αλληλεπίδραση μεταξύ ανθρώπου και περιβάλλοντος. Δεδομένης της πολυπαραγοντικής φύσης της θερμικής άνεσης, η εκτίμησή της δεν μπορεί να βασιστεί αποκλειστικά σε μεμονωμένες μετεωρολογικές μεταβλητές, όπως η θερμοκρασία του αέρα, αλλά απαιτεί ολοκληρωμένες προσεγγίσεις που συνδυάζουν κλιματικά και φυσιολογικά δεδομένα (Spagnolo & de Dear, 2003).

Για την ολοκληρωμένη αποτίμηση της ανθρώπινης θερμικής καταπόνησης έχουν αναπτυχθεί βιοκλιματικοί δείκτες που συνδυάζουν μετεωρολογικές και ανθρωποκεντρικές παραμέτρους. Με τον τρόπο αυτό, αποτυπώνεται η συνολική θερμική καταπόνηση που βιώνει ο άνθρωπος σε πραγματικές συνθήκες υπαίθριου χώρου, όπου οι μικροκλιματικές

μεταβολές είναι έντονες και χωρικά ανομοιογενείς (Oke, 1995; Santamouris & Asimakopoulos, 1996).

Στη σύγχρονη έρευνα υπαίθριων αστικών χώρων, δείκτες όπως ο Physiologically Equivalent Temperature (PET) και ο Universal Thermal Climate Index (UTCI) χρησιμοποιούνται εκτενώς ως εργαλεία αξιολόγησης, καθώς επιτρέπουν τη σύνδεση των μικροκλιματικών συνθηκών με τη φυσιολογική απόκριση του ανθρώπινου οργανισμού και τη συγκρίσιμη αξιολόγηση της θερμικής καταπόνησης σε διαφορετικά περιβάλλοντα και πληθυσμιακές ομάδες. Η ερμηνεία των τιμών τους επηρεάζεται από διαφοροποιήσεις στη θερμορυθμιστική ικανότητα, στη μεταβολική δραστηριότητα και στα χαρακτηριστικά ευαισθησίας των χρηστών, γεγονός που καθιστά ιδιαίτερα σημαντική τη συνεκτίμηση της πληθυσμιακής ομάδας αναφοράς. Οι δείκτες αυτοί έχουν αναπτυχθεί ώστε να καλύψουν το κενό μεταξύ των κλασικών προτύπων θερμικής άνεσης που αφορούν εσωτερικούς χώρους και των ιδιαίτερα μεταβαλλόμενων συνθηκών που χαρακτηρίζουν τους υπαίθριους χώρους (Spagnolo & de Dear, 2003; Tousi, Mela, et al., 2024).

Η εφαρμογή των βιοκλιματικών δεικτών θερμικής άνεσης σε υπαίθριους χώρους προϋποθέτει τη λεπτομερή αποτύπωση των μικροκλιματικών συνθηκών σε υψηλή χωρική ανάλυση. Για τον σκοπό αυτό, οι δείκτες αυτοί συνδυάζονται συχνά με μικροκλιματικά μοντέλα και εργαλεία προσομοίωσης, τα οποία επιτρέπουν την εκτίμηση των χωρικών μεταβολών της θερμικής καταπόνησης και τη διερεύνηση εναλλακτικών σεναρίων σχεδιασμού σε επίπεδο υπαίθριου χώρου (Tsoka et al., 2018).

Μελέτες που συνδυάζουν μικροκλιματική προσομοίωση και εμπειρικά δεδομένα πεδίου αναδεικνύουν τη σημασία της σκίασης, της βλάστησης, των υλικών επιφανειών και της χωρικής διάταξης στη διαμόρφωση της θερμικής εμπειρίας των χρηστών. Στο πλαίσιο αυτό, οι βιοκλιματικοί δείκτες λειτουργούν όχι μόνο ως εργαλεία αξιολόγησης, αλλά και ως μέσα υποστήριξης σχεδιαστικών παρεμβάσεων με στόχο τη μείωση της θερμικής επιβάρυνσης στον αστικό χώρο (Tseliou & Tsiros, 2016; Tsoka et al., 2018).

Παρά τη μεθοδολογική τους αξία, οι βιοκλιματικοί δείκτες θερμικής άνεσης παρουσιάζουν αβεβαιότητες που σχετίζονται με παραδοχές ως προς τη συμπεριφορά των χρηστών, τη μεταβολική δραστηριότητα, την ενδυμασία και τις τοπικές μικροκλιματικές συνθήκες. Επιπλέον, τα αποτελέσματά τους εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από την ποιότητα και τη

χωρική ανάλυση των δεδομένων εισόδου, γεγονός που καθιστά αναγκαία την κριτική ερμηνεία τους, ιδιαίτερα όταν αξιοποιούνται για τη λήψη σχεδιαστικών αποφάσεων σε σύνθετα αστικά περιβάλλοντα (Toparlar et al., 2017; Tsoka et al., 2018).

Στο πλαίσιο της κλιματικής κρίσης και της αυξανόμενης συχνότητας ακραίων θερμικών επεισοδίων, οι βιοκλιματικοί δείκτες αποκτούν ιδιαίτερη σημασία ως εργαλεία ποσοτικής αξιολόγησης της θερμικής καταπόνησης, ιδίως σε υπαίθριους αστικούς χώρους με αυξημένη έκθεση σε θερμικό στρες και περιορισμένες δυνατότητες προσαρμογής (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2022; Tousi, Tseliou, et al., 2024).

Οι δείκτες PET και UTCI χρησιμοποιούνται ευρέως ως βασικά εργαλεία ποσοτικής αποτίμησης της θερμικής κατάστασης σε υπαίθριους αστικούς χώρους, με έμφαση τόσο στη θερμική αίσθηση όσο και στη φυσιολογική θερμική καταπόνηση, ιδιαίτερα σε συνθήκες αυξημένου θερμικού στρες.

Δίνεται έμφαση στους δείκτες PET και UTCI, καθώς προσφέρουν συμπληρωματική αποτύπωση της αντιληπτής θερμικής άνεσης και της φυσιολογικής θερμικής καταπόνησης.

Στην παρούσα εργασία, οι πρωτότυπες κλίμακες χρησιμοποιούνται ως θεωρητικό πλαίσιο αναφοράς, ενώ η τελική ταξινόμηση των αποτελεσμάτων πραγματοποιείται με τις μεσογειακά προσαρμοσμένες κλίμακες που παρουσιάζονται στην Ενότητα 2.8.1.

1.4.1 Physiologically Equivalent Temperature (PET)

Ο δείκτης Physiologically Equivalent Temperature (PET) αποτελεί έναν από τους πλέον διαδεδομένους βιοκλιματικούς δείκτες για την αξιολόγηση της θερμικής άνεσης σε υπαίθριους χώρους. Ο PET βασίζεται στο ενεργειακό ισοζύγιο του ανθρώπινου οργανισμού και εκφράζει τη θερμική καταπόνηση ως ισοδύναμη θερμοκρασία αέρα σε ένα υποθετικό εσωτερικό περιβάλλον αναφοράς, υπό τυποποιημένες συνθήκες (Höppe, 1999a).

Βασικό πλεονέκτημα του PET αποτελεί η έκφρασή του σε βαθμούς Κελσίου, γεγονός που διευκολύνει την ερμηνεία και τη σύγκριση αποτελεσμάτων μεταξύ διαφορετικών μελετών. Ο δείκτης έχει χρησιμοποιηθεί συστηματικά στη διεθνή βιβλιογραφία για την αξιολόγηση της θερμικής άνεσης σε αστικούς υπαίθριους χώρους, καθώς επιτρέπει τη σύνδεση των μικροκλιματικών συνθηκών με την ανθρώπινη θερμική αίσθηση και την εκτίμηση της

θερμικής καταπόνησης σε διαφορετικά σενάρια σχεδιασμού (Spagnolo & de Dear, 2003; Tsoka et al., 2018).

Η διεθνώς χρησιμοποιούμενη κλίμακα ταξινόμησης του PET, η οποία προέκυψε από την αντιστοίχιση των τιμών του δείκτη με την κλίμακα Predicted Mean Vote (PMV, Προβλεπόμενη Μέση Ψήφος), διακρίνει κατηγορίες θερμικής αίσθησης και αντίστοιχα επίπεδα φυσιολογικής θερμικής καταπόνησης. Η κλίμακα παρουσιάζεται στον Πίνακα 1.4.1.1 ως θεωρητικό πλαίσιο αναφοράς (Höppe, 1999b; Matzarakis et al., 1999)

Πίνακας 1.4.1.1 Διεθνής κλίμακα ταξινόμησης του δείκτη Physiologically Equivalent Temperature (PET) κατά θερμική αίσθηση και επίπεδο φυσιολογικής θερμικής καταπόνησης

Τιμή PET (°C)	Θερμική αίσθηση	Επίπεδο φυσιολογικής θερμικής καταπόνησης
PET < 4	Πολύ ψυχρή	Ακραίο ψυχρό στρες
4 ≤ PET < 8	Ψυχρή	Ισχυρό ψυχρό στρες
8 ≤ PET < 13	Δροσερή	Μέτριο ψυχρό στρες
13 ≤ PET < 18	Ελαφρώς δροσερή	Ήπιο ψυχρό στρες
18 ≤ PET < 23	Άνετη	Χωρίς θερμικό στρες
23 ≤ PET < 29	Ελαφρώς θερμή	Ήπιο θερμικό στρες
29 ≤ PET < 35	Θερμή	Μέτριο θερμικό στρες
35 ≤ PET ≤ 41	Πολύ θερμή	Ισχυρό θερμικό στρες
PET > 41	Εξαιρετικά θερμή	Ακραίο θερμικό στρες

Πηγή: Προσαρμογή και ελληνική απόδοση βάσει Höppe (1999) και Matzarakis et al. (1999, 2010).

Σημείωση: Ο πίνακας παρατίθεται ως θεωρητικό πλαίσιο αναφοράς. Για την ταξινόμηση και την ερμηνεία των αποτελεσμάτων της παρούσας εργασίας εφαρμόζεται η μεσογειακά προσαρμοσμένη κλίμακα PET του Πίνακα 2.8.1.1.

Ωστόσο, ο PET βασίζεται σε συγκεκριμένες παραδοχές σχετικά με τη μεταβολική δραστηριότητα και την ενδυμασία, οι οποίες ενδέχεται να μην αποτυπώνουν πλήρως τη διαφοροποίηση των πραγματικών χρηστών σε σύνθετα αστικά περιβάλλοντα. Για τον λόγο αυτό, η εφαρμογή του απαιτεί προσεκτική επιλογή των παραμέτρων εισόδου και κριτική ερμηνεία των αποτελεσμάτων.

Η χρησιμότητα του PET γίνεται ιδιαίτερα εμφανής όταν ο δείκτης χαρτογραφείται χωρικά σε επίπεδο υπαίθριου χώρου, όπου η ακτινοβολία, η σκίαση και ο άνεμος μεταβάλλονται σημαντικά σε μικρές αποστάσεις.

1.4.2 Universal Thermal Climate Index (UTCI)

Ο Universal Thermal Climate Index (UTCI) αναπτύχθηκε από διεθνή διεπιστημονική ομάδα ειδικών, στο πλαίσιο συνεργασίας της International Society of Biometeorology (ISB), του World Meteorological Organization (WMO) και του ευρωπαϊκού ερευνητικού δικτύου COST Action 730. Στόχος ήταν η δημιουργία ενός εναρμονισμένου δείκτη θερμικής καταπόνησης, κατάλληλου για τη συγκρίσιμη αξιολόγηση των θερμικών συνθηκών σε διαφορετικά κλιματικά και γεωγραφικά περιβάλλοντα. (Błażejczyk et al., 2013; Bröde et al., 2012; Jendritzky et al., 2012).

Ο UTCI ορίζεται ως η ισοδύναμη θερμοκρασία αέρα ενός υποθετικού περιβάλλοντος αναφοράς. Η θερμοκρασία αυτή προκαλεί την ίδια φυσιολογική απόκριση του ανθρώπινου οργανισμού με εκείνη που προκαλούν οι πραγματικές συνθήκες έκθεσης. Το περιβάλλον αναφοράς χαρακτηρίζεται από τυποποιημένες συνθήκες ακτινοβολίας, υγρασίας και ανέμου, ενώ η σύγκριση βασίζεται στη συνολική θερμορυθμιστική απόκριση του ανθρώπινου σώματος (Błażejczyk et al., 2013; Bröde et al., 2012).

Ο δείκτης βασίζεται σε προηγμένο πολυτμηματικό μοντέλο ανθρώπινης θερμορύθμισης, το οποίο προσομοιώνει τη δυναμική αλληλεπίδραση μεταξύ του περιβάλλοντος και του ανθρώπινου οργανισμού. Για τον υπολογισμό του λαμβάνονται υπόψη η θερμοκρασία του αέρα, η σχετική υγρασία, η ταχύτητα του ανέμου και η μέση ακτινοβολούμενη θερμοκρασία, καθώς και η φυσιολογική απόκριση του σώματος υπό μεταβαλλόμενες συνθήκες έκθεσης (Bröde et al., 2012)

Σε αντίθεση με δείκτες που βασίζονται σε στατικές παραδοχές, ο UTCI έχει σχεδιαστεί ώστε να καλύπτει ευρύ φάσμα θερμικών συνθηκών, από ψυχρό έως έντονα θερμό περιβάλλον, επιτρέποντας τη συστηματική ταξινόμηση των επιπέδων θερμικής καταπόνησης και τη συγκρίσιμη αξιολόγηση διαφορετικών κλιματικών και μικροκλιματικών πλαισίων. Για τον λόγο αυτό, ο UTCI έχει υιοθετηθεί ευρέως στη διεθνή βιβλιογραφία ως δείκτης αναφοράς για τη μελέτη των επιπτώσεων της κλιματικής

αλλαγής, των καυσώνων και των ακραίων θερμικών επεισοδίων στον αστικό χώρο (Toparlar et al., 2017).

Η διεθνής κλίμακα του UTCI ταξινομεί τις τιμές του δείκτη σε διακριτές κατηγορίες θερμικού στρες, βάσει της προβλεπόμενης φυσιολογικής απόκρισης του ανθρώπινου οργανισμού στις εξεταζόμενες συνθήκες. Η κλίμακα παρουσιάζεται στον Πίνακα 1.4.2.1 ως θεωρητικό πλαίσιο αναφοράς (Błazejczyk et al., 2013; Bröde et al., 2012; Jendritzky et al., 2012).

Πίνακας 1.4.2.1: Διεθνής τυποποιημένη κλίμακα ταξινόμησης των κατηγοριών θερμικού στρες βάσει του δείκτη UTCI.

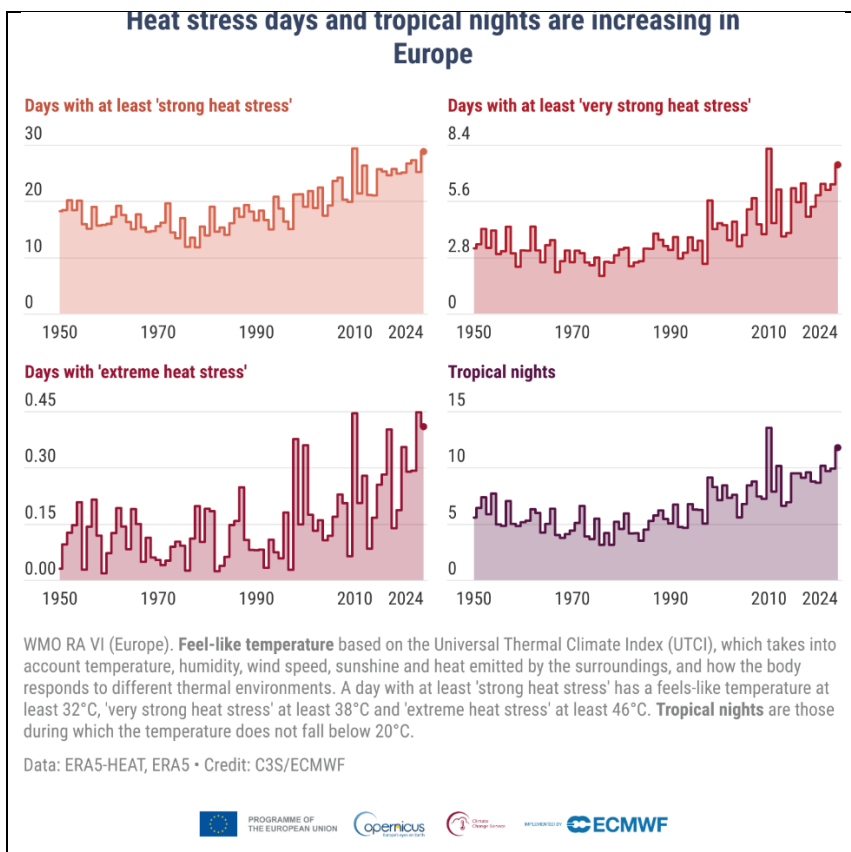
Τιμή UTCI (°C)	Κατηγορία θερμικού στρες
$UTCI > 46$	Ακραίο θερμικό στρες
$38 < UTCI \leq 46$	Πολύ ισχυρό θερμικό στρες
$32 < UTCI \leq 38$	Ισχυρό θερμικό στρες
$26 < UTCI \leq 32$	Μέτριο θερμικό στρες
$9 \leq UTCI \leq 26$	Χωρίς θερμικό στρες
$0 \leq UTCI < 9$	Ηπιο ψυχρό στρες
$-13 \leq UTCI < 0$	Μέτριο ψυχρό στρες
$-27 \leq UTCI < -13$	Ισχυρό ψυχρό στρες
$-40 \leq UTCI < -27$	Πολύ ισχυρό ψυχρό στρες
$UTCI < -40$	Ακραίο ψυχρό στρες

Πηγή: Προσαρμογή και ελληνική απόδοση βάσει Bröde et al. (2012) και Jendritzky et al. (2012).

Σημείωση: Ο πίνακας παρατίθεται ως θεωρητικό υπόβαθρο. Η ερμηνεία των αποτελεσμάτων της παρούσας εργασίας βασίζεται στη μεσογειακή προσαρμοσμένη κλίμακα UTCI του Πίνακα 2.8.1.2

Η αυξανόμενη σημασία του UTCI ως δείκτη θερμικής καταπόνησης αποτυπώνεται και σε μακροχρόνιες κλιματικές αναλύσεις σε ευρωπαϊκή κλίμακα. Πρόσφατα κλιματικά δεδομένα σε ευρωπαϊκό επίπεδο καταδεικνύουν σαφή αύξηση τόσο των ημερών έντονης

θερμικής καταπόνησης όσο και των τροπικών νυχτών τις τελευταίες δεκαετίες, γεγονός που υπογραμμίζει τη χρησιμότητα του δείκτη για την αποτίμηση των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής στο θερμικό περιβάλλον.



Σχήμα 1.4.1.1 Εξέλιξη του αριθμού ημερών έντονης θερμικής καταπόνησης και τροπικών νυχτών στην Ευρώπη για την περίοδο 1950–2023, βάσει του δείκτη UTCI.

Πηγή: (Copernicus Climate Change Service (C3S), 2024)

Ωστόσο, η εφαρμογή του UTCI παρουσιάζει αυξημένες απαιτήσεις ως προς την ποιότητα και τη χωρική ανάλυση των δεδομένων εισόδου, ιδίως όσον αφορά τη μέση θερμοκρασία ακτινοβολίας, παράμετρος που επηρεάζει καθοριστικά τη θερμική επιβάρυνση σε υπαίθριους χώρους. Ως εκ τούτου, η αξιόπιστη χρήση του δείκτη συνδέεται άμεσα με την αξιοποίηση μικροκλιματικών μοντέλων υψηλής χωρικής ανάλυσης, τα οποία μπορούν να αποτυπώσουν με επάρκεια τις χωρικές διαφοροποιήσεις της ακτινοβολίας, του ανέμου και της σκίασης σε επίπεδο πεζού.

Η εφαρμογή δεικτών όπως ο UTCI και ο PET σε αστικούς υπαίθριους χώρους δεν περιορίζεται στον υπολογισμό μεμονωμένων τιμών θερμικής καταπόνησης, αλλά

συνδέεται με τη χωρική ανάλυση του μικροκλίματος και τη διερεύνηση της θερμικής εμπειρίας των χρηστών σε πραγματικές συνθήκες έκθεσης.

Η εφαρμοσιμότητα του UTCI σε μεσογειακά αστικά περιβάλλοντα έχει τεκμηριωθεί και σε πρόσφατη μελέτη στην Αθήνα, όπου οι Tseliou et al. (2023) χρησιμοποίησαν το ENVI-met για την αξιολόγηση της επίδρασης πράσινων δωματών και πράσινων όψεων στη θερμική άνεση πεζού. Η αξιολόγηση βασίστηκε στη θερμοκρασία αέρα και στη μεσογειακή προσαρμοσμένη κλίμακα θερμοκού στρες του UTCI, γεγονός που ενισχύει την καταλληλότητα του δείκτη για εφαρμογές μικροκλιματικής προσομοίωσης σε πυκνοδομημένα μεσογειακά περιβάλλοντα.

Ο συνδυασμός βιοκλιματικών δεικτών με μοντέλα υψηλής χωρικής ανάλυσης, όπως το ENVI-met, αποτελεί βασικό εργαλείο ποσοτικής αξιολόγησης και υποστήριξης του περιβαλλοντικού σχεδιασμού.

1.4.3 Χρήση των βιοκλιματικών δεικτών σε αστικούς υπαίθριους χώρους

Η αξιολόγηση της θερμικής άνεσης και της θερμικής καταπόνησης στους αστικούς υπαίθριους χώρους αποτελεί σύνθετο εγχείρημα, καθώς οι μικροκλιματικές συνθήκες παρουσιάζουν έντονη χωρική και χρονική μεταβλητότητα. Η θερμική έκθεση των χρηστών επηρεάζεται από την ηλιακή και θερμική ακτινοβολία, τη σκίαση, τη θερμοκρασία και την υγρασία του αέρα, την ταχύτητα του ανέμου, τα υλικά των επιφανειών και τη γεωμετρία του δομημένου περιβάλλοντος. Για τον λόγο αυτό, οι βιοκλιματικοί δείκτες έχουν καθιερωθεί ως βασικά εργαλεία ποσοτικής αποτίμησης της θερμικής κατάστασης σε επίπεδο ανθρώπινης κλίμακας.

Στη σύγχρονη έρευνα των αστικών υπαίθριων χώρων χρησιμοποιούνται ευρέως οι δείκτες Physiologically Equivalent Temperature (PET – Φυσιολογικά Ισοδύναμη Θερμοκρασία) και Universal Thermal Climate Index (UTCI – Καθολικός Δείκτης Θερμικού Κλίματος), είτε μεμονωμένα είτε συμπληρωματικά. Οι δύο δείκτες βασίζονται σε θερμοφυσιολογικές προσεγγίσεις και συνδυάζουν τις βασικές μικροκλιματικές παραμέτρους που καθορίζουν τη θερμική ανταλλαγή μεταξύ ανθρώπου και περιβάλλοντος. Ωστόσο, διαφέρουν ως προς το υποκείμενο μοντέλο, τις παραδοχές και τον τρόπο ταξινόμησης της θερμικής επιβάρυνσης και, επομένως, οι αριθμητικές τιμές τους δεν πρέπει να θεωρούνται

ισοδύναμες ή άμεσα συγκρίσιμες μεταξύ τους (Bröde et al., 2012; Spagnolo & de Dear, 2003; Toparlar et al., 2017).

Ο PET εκφράζεται σε βαθμούς Κελσίου και αντιστοιχεί στη θερμοκρασία αέρα ενός τυποποιημένου εσωτερικού περιβάλλοντος, στο οποίο το ανθρώπινο σώμα θα παρουσίαζε το ίδιο θερμικό ισοζύγιο με εκείνο που διαμορφώνεται στις πραγματικές εξωτερικές συνθήκες. Η έκφρασή του σε °C διευκολύνει την ερμηνεία και την επικοινωνία των αποτελεσμάτων, χωρίς αυτό να σημαίνει ότι οι τιμές του ταυτίζονται ή συγκρίνονται άμεσα με τη μετρούμενη θερμοκρασία αέρα. Ο δείκτης επηρεάζεται σημαντικά από τη μέση ακτινοβολούμενη θερμοκρασία, τη σκίαση και τη χωρική διαμόρφωση του περιβάλλοντος και μπορεί, ανάλογα με το χρησιμοποιούμενο υπολογιστικό εργαλείο και την παραμετροποίησή του, να εφαρμοστεί σε διαφοροποιημένα ανθρωποκεντρικά προφίλ. Ο UTCI αποτελεί επίσης δείκτη ισοδύναμης θερμοκρασίας, αλλά βασίζεται στη δυναμική φυσιολογική απόκριση ενός τυποποιημένου ανθρώπινου οργανισμού σε διαφορετικούς συνδυασμούς θερμοκρασίας αέρα, υγρασίας, ανέμου και ακτινοβολιακής έκθεσης. Χρησιμοποιείται για την τυποποιημένη ταξινόμηση του θερμικού στρες και τη συγκριτική αξιολόγηση διαφορετικών κλιματικών και μικροκλιματικών περιβαλλόντων, ιδιαίτερα υπό συνθήκες έντονης ή ακραίας θερμικής επιβάρυνσης (Bröde et al., 2012). Σε αντίθεση με εφαρμογές του PET που επιτρέπουν την εισαγωγή διαφοροποιημένων χαρακτηριστικών χρήστη, ο UTCI βασίζεται σε προκαθορισμένο πρότυπο αναφοράς και δεν διαφοροποιείται ανά ατομικό προφίλ.

Η συμπληρωματική χρήση των δύο δεικτών μπορεί να προσφέρει πληρέστερη εικόνα της θερμικής κατάστασης των αστικών υπαίθριων χώρων. Ο PET μπορεί να αναδείξει χωρικές διαφοροποιήσεις και διαφορές μεταξύ παραμετροποιημένων προφίλ χρηστών, ενώ ο UTCI παρέχει μια τυποποιημένη εκτίμηση του επιπέδου θερμικού στρες. Η συνεξέτασή τους δεν αποσκοπεί στην άμεση αριθμητική σύγκριση των τιμών τους, αλλά στη διασταύρωση των χωρικών και χρονικών προτύπων που αναδεικνύει κάθε δείκτης και στη συνεκτικότερη ερμηνεία της θερμικής επιβάρυνσης (Tsoka et al., 2018).

Η εφαρμογή των βιοκλιματικών δεικτών υποστηρίζεται από μικροκλιματικά μοντέλα υψηλής χωρικής ανάλυσης, τα οποία αποτυπώνουν τις διαφοροποιήσεις των μικροκλιματικών παραμέτρων σε επίπεδο πεζού. Η ενσωμάτωση των PET και UTCI σε

εργαλεία προσομοίωσης επιτρέπει τη χαρτογράφηση της θερμικής καταπόνησης, τη σύγκριση εναλλακτικών σεναρίων σχεδιασμού και τη διερεύνηση της αποτελεσματικότητας παρεμβάσεων, όπως η σκίαση, η ενίσχυση της βλάστησης και η τροποποίηση των υλικών των επιφανειών (Toparlar et al., 2017; Tsoka et al., 2018).

Η επιλογή του κατάλληλου δείκτη απαιτεί κριτική αξιολόγηση, επειδή δεν είναι όλοι οι δείκτες θερμικής άνεσης και θερμικής καταπόνησης εξίσου κατάλληλοι για εφαρμογές μικροκλιματικής προσομοίωσης υψηλής χωρικής ανάλυσης. Οι Fischereit και Schlünzen (2018) διαπίστωσαν ότι μόνο περιορισμένος αριθμός δεικτών ανταποκρίνεται στα απαιτούμενα κριτήρια εφαρμογής σε υπαίθρια αστικά περιβάλλοντα και σε αριθμητικά μοντέλα με ρητή επίλυση των κτιρίων και των λοιπών εμποδίων. Το εύρημα αυτό υπογραμμίζει ότι η επιλογή των δεικτών αποτελεί κρίσιμη μεθοδολογική απόφαση, η οποία επηρεάζει την ερμηνεία τόσο του θερμικού περιβάλλοντος όσο και της αποτελεσματικότητας των εξεταζόμενων παρεμβάσεων.

Πέρα από τους δείκτες PET και UTCI, στη διεθνή πρακτική χρησιμοποιείται και ο δείκτης Wet Bulb Globe Temperature (WBGT – Θερμοκρασία Υγρού Βολβού και Σφαιρικού Θερμομέτρου), κυρίως για την αρχική εκτίμηση της θερμικής καταπόνησης σε εργασιακά, αθλητικά και επιχειρησιακά περιβάλλοντα, σύμφωνα με το πρότυπο ISO 7243:2017. Ο WBGT δεν εφαρμόζεται στην παρούσα αξιολόγηση, η οποία βασίζεται στους δείκτες PET και UTCI και στη μέση ακτινοβολούμενη θερμοκρασία T_{mrt} , αλλά αναφέρεται ως δυνητικά συμπληρωματικό εργαλείο για μελλοντικές επιτόπιες μετρήσεις.

Στην παρούσα εργασία, ο PET υπολογίζεται χωριστά για τα προφίλ ενήλικα, ηλικιωμένου και παιδιού, προκειμένου να διερευνηθεί η διαφοροποίηση της εκτιμώμενης θερμικής επιβάρυνσης μεταξύ των ομάδων χρηστών. Ο UTCI χρησιμοποιείται συμπληρωματικά ως τυποποιημένος δείκτης θερμικού στρες για τη συγκριτική αξιολόγηση των μικροκλιματικών συνθηκών και των σεναρίων προσομοίωσης. Οι δύο δείκτες συνεξετάζονται χωρίς να θεωρούνται αριθμητικά ισοδύναμοι.

Με βάση τα παραπάνω, η συνδυαστική εφαρμογή βιοκλιματικών δεικτών και μικροκλιματικής προσομοίωσης υψηλής χωρικής ανάλυσης αποτελεί κατάλληλη και επιστημονικά τεκμηριωμένη προσέγγιση για την ποσοτική αξιολόγηση της θερμικής άνεσης και της θερμικής καταπόνησης στους αστικούς υπαίθριους χώρους. Παρότι οι

δείκτες PET και UTCI έχουν εφαρμοστεί εκτενώς σε διαφορετικές κατηγορίες δημόσιων και ημιδημόσιων χώρων, η εφαρμογή τους στους υπαίθριους χώρους νοσοκομείων παρουσιάζει ιδιαίτερες απαιτήσεις, λόγω της αυξημένης ευαλωτότητας των χρηστών, των λειτουργικών περιορισμών και της ανάγκης διατήρησης ασφαλών συνθηκών κίνησης και παραμονής. Οι ιδιαιτερότητες αυτές εξετάζονται στην επόμενη ενότητα, ενώ στο Κεφάλαιο 2 παρουσιάζεται η μεθοδολογία εφαρμογής των επιλεγμένων δεικτών και της μικροκλιματικής προσομοίωσης στην περίπτωση μελέτης.

1.5 Υπαίθριοι χώροι νοσοκομείων ως ιδιαίτερη κατηγορία

Η αναμενόμενη αύξηση της έντασης και συχνότητας των καυσώνων στη Μεσόγειο, σε συνδυασμό με το φαινόμενο της αστικής θερμικής νησίδας, εντείνει τη θερμική επικινδυνότητα σε πυκνοδομημένες περιοχές όπως η Αθήνα. Στο πλαίσιο αυτό, οι υπαίθριοι χώροι νοσοκομείων αποτελούν κρίσιμα μικροπεριβάλλοντα έκθεσης ευάλωτων χρηστών και απαιτούν τεκμηριωμένη αξιολόγηση και παρεμβάσεις (Vanos, 2015; World Health Organization, 2020).

Οι υπαίθριοι χώροι των νοσοκομείων διαφοροποιούνται από άλλες κατηγορίες αστικών υπαίθριων χώρων ως προς τον τρόπο λειτουργίας, τις ομάδες χρηστών και τις απαιτήσεις ασφάλειας και υποστήριξης που εξυπηρετούν. Δεν μπορούν, επομένως, να αντιμετωπίζονται ως γενικοί αστικοί χώροι αναψυχής, αλλά ως λειτουργικά κρίσιμα τμήματα υποδομών υγείας, στα οποία η θερμική άνεση και η περιβαλλοντική ποιότητα αποκτούν αυξημένη σημασία.

1.5.1 Ρόλος, λειτουργία και θεραπευτική διάσταση των υπαίθριων χώρων νοσοκομείων.

Οι υπαίθριοι χώροι των νοσοκομείων συνιστούν κρίσιμο λειτουργικό τμήμα των υποδομών υγείας και εντάσσονται στο συνολικό θεραπευτικό και οργανωτικό περιβάλλον των υγειονομικών μονάδων. Η λειτουργία τους δεν περιορίζεται στην απλή κυκλοφορία ή στη σύντομη παραμονή, αλλά περιλαμβάνει χώρους εισόδου και αναμονής, διαδρομές μετακίνησης ασθενών και προσωπικού, ζώνες σύντομης παραμονής επισκεπτών και συνοδών, καθώς και χώρους ανάπαυσης και αποφόρτισης του ιατρονοσηλευτικού προσωπικού.

Σε αντίθεση με άλλες κατηγορίες αστικών υπαίθριων χώρων, η χρήση τους χαρακτηρίζεται συχνά από λειτουργική αναγκαιότητα και από περιορισμένες δυνατότητες επιλογής εναλλακτικών διαδρομών ή θέσεων παραμονής. Παράλληλα, η αυξανόμενη συχνότητα και ένταση των ακραίων θερμικών συνθηκών μπορεί να επηρεάσει τη λειτουργική ανθεκτικότητα των νοσοκομειακών εγκαταστάσεων και να αυξήσει την ανάγκη για ασφαλείς, προστατευμένους και μικροκλιματικά κατάλληλους χώρους κίνησης, αναμονής και προσωρινής παραμονής (World Health Organization, 2020).

Η διεθνής βιβλιογραφία για τον σχεδιασμό και τη λειτουργία των περιβαλλόντων υγείας αναγνωρίζει τους υπαίθριους χώρους των νοσοκομείων ως ουσιώδες στοιχείο του θεραπευτικού περιβάλλοντος. Η οπτική ή φυσική επαφή με φυσικά στοιχεία και κατάλληλα σχεδιασμένους υπαίθριους χώρους έχει συσχετιστεί με τη μείωση του άγχους, την υποστήριξη της ψυχολογικής ευεξίας και τη βελτίωση της συνολικής εμπειρίας ασθενών, συνοδών και προσωπικού (Cooper Marcus & Barnes, 1999; Ulrich et al., 2008). Στο ευρύτερο θεωρητικό πλαίσιο των *therapeutic landscapes* (θεραπευτικών τοπίων), οι ειδικά σχεδιασμένοι υπαίθριοι χώροι των νοσοκομείων μπορούν να λειτουργήσουν ως *healing gardens* (θεραπευτικοί κήποι), στον βαθμό που υποστηρίζουν την ψυχολογική αποφόρτιση, τη μείωση του στρες, την αίσθηση ασφάλειας και τη δυνατότητα σύντομης ανάπαυσης ασθενών, συνοδών και προσωπικού.

Η θεμελιώδης μελέτη του Ulrich (1984) έδειξε ότι ασθενείς με οπτική επαφή με φυσικό περιβάλλον από το νοσοκομειακό τους δωμάτιο παρουσίασαν μικρότερη διάρκεια μετεγχειρητικής νοσηλείας και έλαβαν λιγότερα ισχυρά αναλγητικά σε σύγκριση με ασθενείς των οποίων τα δωμάτια είχαν θέα προς κτισμένο τοίχο. Το εύρημα αυτό δεν αφορά άμεσα τη χρήση υπαίθριων χώρων, αλλά αποτέλεσε σημαντική πρόωμη ένδειξη για τη δυνητική συμβολή της επαφής με τη φύση στο περιβάλλον περίθαλψης.

Μεταγενέστερες μελέτες για τους θεραπευτικούς κήπους υποστηρίζουν ότι η ένταξη κατάλληλα σχεδιασμένων πράσινων υπαίθριων χώρων σε νοσοκομειακά περιβάλλοντα μπορεί να λειτουργήσει υποστηρικτικά για τους ασθενείς, τις οικογένειες, τους επισκέπτες και το προσωπικό. Συστηματική θεωρητική και σχεδιαστική τεκμηρίωση παρέχει το έργο των Cooper Marcus και Sachs (2014), το οποίο συγκροτεί ένα πλαίσιο *evidence-based*

design (τεκμηριωμένου σχεδιασμού) για θεραπευτικούς κήπους και αναζωογονητικούς υπαίθριους χώρους σε υποδομές υγείας.

Πρόσφατες ανασκοπήσεις καταγράφουν ενδείξεις ότι οι κατάλληλα σχεδιασμένοι και λειτουργικά ενταγμένοι θεραπευτικοί κήποι μπορούν να υποστηρίξουν τη μείωση του στρες, τη βελτίωση της διάθεσης και την ευεξία ασθενών, επισκεπτών και προσωπικού. Παράλληλα, επισημαίνουν την ανάγκη σαφέστερου θεωρητικού ορισμού, κατάλληλης σχεδιαστικής ενσωμάτωσης και περαιτέρω αξιολόγησης της ποιότητας των διαθέσιμων εμπειρικών δεδομένων (Carroll et al., 2024; Nieberler-Walker et al., 2023).

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, η έννοια του θεραπευτικού τοπίου δεν χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση ψυχολογικών ή κλινικών εκβάσεων, αλλά ως θεωρητικό υπόβαθρο που εξηγεί γιατί η θερμική ποιότητα των υπαίθριων χώρων των νοσοκομείων έχει ιδιαίτερη σημασία. Ένας υπαίθριος χώρος μπορεί να υποστηρίξει λειτουργίες ανάπαυσης, αναμονής ή αποφόρτισης μόνο εφόσον οι μικροκλιματικές συνθήκες επιτρέπουν την ασφαλή και ανεκτή χρήση του κατά τη θερινή περίοδο.

1.5.2 Ευάλωτοι χρήστες, θερμικό στρες και δημόσια υγεία

Ιδιαίτερο χαρακτηριστικό των υπαίθριων χώρων των νοσοκομείων αποτελεί η σύνθεση των χρηστών τους. Οι χώροι αυτοί χρησιμοποιούνται τόσο από ομάδες με αυξημένη βιολογική, κλινική ή λειτουργική ευαλωτότητα, όπως ασθενείς, ηλικιωμένοι, παιδιά και άτομα με περιορισμένη κινητικότητα, όσο και από συνοδούς, επισκέπτες και προσωπικό. Το ιατρονοσηλευτικό και λοιπό προσωπικό εκτίθεται, επιπλέον, επαναλαμβανόμενα στις ίδιες μικροκλιματικές συνθήκες στο πλαίσιο της καθημερινής εργασίας του.

Η ευαλωτότητα των χρηστών δεν οφείλεται μόνο σε βιολογικούς ή κλινικούς παράγοντες, αλλά και στον τρόπο χρήσης των χώρων. Σε αντίθεση με άλλους αστικούς υπαίθριους χώρους, η παρουσία στο νοσοκομείο είναι συχνά αναγκαία, καθώς συνδέεται με την πρόσβαση, την αναμονή, τη μετάβαση, τη συνοδεία ασθενών ή την εργασία. Η περιορισμένη δυνατότητα επιλογής θέσης, διαδρομής ή χρόνου παραμονής μπορεί να αυξήσει τη διάρκεια και την ένταση της θερμικής έκθεσης, ιδίως κατά τη διάρκεια ακραίων θερμικών επεισοδίων. Η συνθήκη αυτή διαφοροποιεί ουσιαστικά τους υπαίθριους χώρους των νοσοκομείων από τους συμβατικούς δημόσιους χώρους ελεύθερης ή προαιρετικής

χρήσης (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2022; World Health Organization, 2020).

Για την ορθή ερμηνεία της θερμικής έκθεσης υιοθετείται στην παρούσα εργασία η διάκριση μεταξύ θερμικού στρες και θερμικής καταπόνησης. Το θερμικό στρες αναφέρεται στο συνολικό θερμικό φορτίο που επιβάλλουν οι περιβαλλοντικές συνθήκες στον ανθρώπινο οργανισμό, ενώ η θερμική καταπόνηση αφορά τη φυσιολογική απόκριση του οργανισμού σε αυτό το φορτίο. Οι δύο έννοιες δεν ταυτίζονται, καθώς παρόμοιες συνθήκες έκθεσης μπορούν να προκαλέσουν διαφορετική θερμοφυσιολογική απόκριση ανάλογα με την ηλικία, τη θερμορυθμιστική ικανότητα, τη δραστηριότητα, την ενδυμασία, την κατάσταση υγείας και τη δυνατότητα συμπεριφορικής προσαρμογής του χρήστη.

Για τον λόγο αυτό, η αξιολόγηση της θερμικής κατάστασης στους υπαίθριους χώρους των νοσοκομείων δεν μπορεί να βασίζεται αποκλειστικά σε μεμονωμένες μετεωρολογικές παραμέτρους, όπως η θερμοκρασία του αέρα. Απαιτεί τη χρήση βιοκλιματικών δεικτών που συνδυάζουν τις βασικές μικροκλιματικές συνθήκες με παραμέτρους ανθρώπινης θερμορύθμισης και παρέχουν μοντελοποιημένη εκτίμηση της θερμικής επιβάρυνσης (Bröde et al., 2012; Höppe, 1999b).

Οι υποδομές υγείας αναγνωρίζονται διεθνώς ως κρίσιμα στοιχεία κοινωνικής και λειτουργικής ανθεκτικότητας απέναντι στην κλιματική κρίση. Η αύξηση της συχνότητας, της έντασης και της διάρκειας των καυσώνων επηρεάζει τόσο τη ζήτηση υπηρεσιών υγείας όσο και την επιχειρησιακή λειτουργία των νοσοκομειακών εγκαταστάσεων (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2022). Υπό αυτές τις συνθήκες, οι υπαίθριοι χώροι των νοσοκομείων εξακολουθούν να εξυπηρετούν λειτουργίες υποδοχής, αναμονής, πρόσβασης, μετάβασης και προσωρινής παραμονής, ακόμη και κατά τη διάρκεια επεισοδίων αυξημένης θερμικής επιβάρυνσης.

Επομένως, η θερμική ποιότητα των χώρων αυτών δεν αποτελεί μόνο ζήτημα περιβαλλοντικής άνεσης, αλλά και παράμετρο προστασίας της δημόσιας υγείας και διατήρησης της λειτουργικής επάρκειας των υποδομών υγείας. Η σημασία της είναι ιδιαίτερα αυξημένη για τους ηλικιωμένους, τα παιδιά, τους ασθενείς, τα άτομα με περιορισμένη κινητικότητα και τους συνοδούς τους, οι οποίοι μπορεί να διαθέτουν

μειωμένη δυνατότητα φυσιολογικής ή συμπεριφορικής προσαρμογής στις υψηλές θερμοκρασίες (Vanos, 2015; World Health Organization, 2018).

Ζητήματα θερμικής άνεσης και διαφοροποίησης των απαιτήσεων μεταξύ επιμέρους ομάδων χρηστών έχουν διερευνηθεί συστηματικότερα στους εσωτερικούς χώρους νοσοκομείων (Khodakarami & Nasrollahi, 2012). Αντίθετα, οι μικροκλιματικές συνθήκες και η θερμική έκθεση στους υπαίθριους χώρους νοσοκομειακών εγκαταστάσεων έχουν εξεταστεί λιγότερο συστηματικά, ιδίως ως προς τη διαφοροποίηση μεταξύ ευάλωτων ομάδων χρηστών και την αποτελεσματικότητα σχεδιαστικών παρεμβάσεων (Pereira et al., 2020; Yuan et al., 2022). Το κενό αυτό προσδιορίζει το ειδικό πεδίο στο οποίο εντάσσεται η παρούσα εργασία.

1.5.3 Χωρικοί και λειτουργικοί περιορισμοί και ανάγκη μικροκλιματικής αξιολόγησης

Οι υπαίθριοι χώροι των νοσοκομείων υπόκεινται σε σημαντικούς λειτουργικούς και χωρικούς περιορισμούς, καθώς η διαμόρφωσή τους καθορίζεται από απαιτήσεις πρόσβασης ασθενοφόρων, διακίνησης φορείων, υγειονομικής ασφάλειας και αδιάλειπτης λειτουργίας των εγκαταστάσεων. Σε πολλά υφιστάμενα νοσοκομεία, ιδίως σε πυκνοδομημένα αστικά περιβάλλοντα, παρατηρούνται εκτεταμένες σκληρές επιφάνειες, περιορισμένη βλάστηση και ανεπαρκής σκίαση, συνθήκες που εντείνουν τις επιπτώσεις της αστικής θερμικής νησίδας και αυξάνουν το θερμικό φορτίο των χρηστών (Pereira et al., 2020; Skoog et al., 2005; Zhen et al., 2024).

Οι περιορισμοί αυτοί μειώνουν το εύρος των εφικτών παρεμβάσεων βελτίωσης του μικροκλίματος και καθιστούν αναγκαία την προσεκτική αξιολόγηση και ιεράρχηση παθητικών στρατηγικών προσαρμοσμένων στο νοσοκομειακό περιβάλλον. Η σκίαση, η φύτευση, η επιλογή υλικών επιφανείας, η αναδιοργάνωση διαδρομών και η αξιοποίηση διαθέσιμων ακάλυπτων ή υπερυψωμένων χώρων πρέπει να εξετάζονται όχι μόνο με κριτήρια αισθητικής ή γενικής περιβαλλοντικής βελτίωσης, αλλά με βάση τη λειτουργική τους συμβατότητα, την ασφάλεια, τη δυνατότητα εφαρμογής και το μετρήσιμο μικροκλιματικό τους αποτέλεσμα.

Οι λειτουργικοί περιορισμοί και η ευαλωτότητα των χρηστών απαιτούν εξειδικευμένη μικροκλιματική αξιολόγηση των υπαίθριων χώρων νοσοκομείων.

1.6. Παράγοντες που επηρεάζουν τη θερμική άνεση σε υπαίθριους χώρους νοσοκομείων

Η αξιολόγηση της θερμικής άνεσης στους υπαίθριους χώρους νοσοκομείων απαιτεί ολοκληρωμένη προσέγγιση, καθώς δεν καθορίζεται από έναν μεμονωμένο παράγοντα, αλλά προκύπτει από τη σύνθετη αλληλεπίδραση μικροκλιματικών, χωρικών και ανθρωποκεντρικών παραμέτρων σε επίπεδο ανθρώπινης κλίμακας. Η περιορισμένη δυνατότητα χωρικής ή συμπεριφορικής προσαρμογής πολλών χρηστών, οι λειτουργικά καθορισμένες διαδρομές και η συχνά αναγκαία παραμονή στους χώρους αυτούς αυξάνουν τη σημασία των τοπικών μικροκλιματικών συνθηκών για τη θερμική άνεση, τη θερμική καταπόνηση και την ασφάλεια των (Lenzholzer et al., 2018; Nikolopoulou & Steemers, 2003).

Η ιδιαιτερότητα των νοσοκομειακών περιβαλλόντων έχει αναδειχθεί και στη σχετική βιβλιογραφία. Οι υπαίθριοι χώροι των υγειονομικών εγκαταστάσεων χαρακτηρίζονται από αυξημένες λειτουργικές απαιτήσεις, περιορισμένη χωρική ευελιξία και έντονη ετερογένεια χρηστών, γεγονός που καθιστά αναγκαία την τεκμηριωμένη και ποσοτική προσέγγιση της θερμικής τους κατάστασης (Pereira et al., 2020). Παράλληλα, η συνεχής και συχνά ανελαστική κίνηση ασθενών, συνοδών και προσωπικού περιορίζει τη δυνατότητα αποφυγής δυσμενών μικροκλιματικών συνθηκών, ιδίως κατά τη διάρκεια ακραίων θερμικών επεισοδίων (World Health Organization, 2020).

Μελέτες μικροκλιματικής αξιολόγησης σε αστικούς υπαίθριους χώρους καταδεικνύουν ότι τοπικές διαφοροποιήσεις στη σκίαση, στη μέση ακτινοβολούμενη θερμοκρασία, στην ταχύτητα του ανέμου και στις θερμοφυσικές ιδιότητες των επιφανειών μπορούν να προκαλέσουν ουσιαστικές μεταβολές στη θερμική αίσθηση και στην εκτιμώμενη θερμική καταπόνηση σε επίπεδο ανθρώπινης κλίμακας. Η επίδραση αυτή αποκτά ιδιαίτερη σημασία στους υπαίθριους χώρους νοσοκομείων, όπου οι δυνατότητες μετακίνησης, επιλογής θέσης ή χρονικής προσαρμογής μπορεί να είναι περιορισμένες (Toparlar et al., 2017; Tsoka et al., 2018).

Σε συνέχεια της Ενότητας 1.5, όπου τεκμηριώνονται οι ιδιαιτερότητες των υπαίθριων χώρων νοσοκομείων ως ειδικής κατηγορίας αστικού χώρου, η παρούσα ενότητα εξετάζει τους επιμέρους παράγοντες και τους μηχανισμούς μέσω των οποίων το μικροκλίμα, η

χωρική διαμόρφωση και τα χαρακτηριστικά των χρηστών επηρεάζουν τη θερμική άνεση και τη θερμική καταπόνηση.

Ειδικότερα, η θερμική κατάσταση στους υπαίθριους χώρους νοσοκομείων επηρεάζεται από: (α) τις τοπικές μικροκλιματικές παραμέτρους, όπως η θερμοκρασία και η σχετική υγρασία του αέρα, η ταχύτητα του ανέμου, η ηλιακή ακτινοβολία και η μέση ακτινοβολούμενη θερμοκρασία (β) τα γεωμετρικά και μορφολογικά χαρακτηριστικά του χώρου, όπως ο προσανατολισμός, ο βαθμός περίκλεισης και ο λόγος ύψους προς πλάτος (γ) τα υλικά των επιφανειών, τη βλάστηση και τη σκίαση και (δ) τα φυσιολογικά, λειτουργικά και συμπεριφορικά χαρακτηριστικά των χρηστών. Οι παράγοντες αυτοί αναπτύσσονται στις ακόλουθες υποενότητες και συγκροτούν το θεωρητικό υπόβαθρο για τη μεθοδολογική αξιολόγηση μέσω των δεικτών PET και UTCI στο Κεφάλαιο 2.

1.6.1. Παράγοντες που σχετίζονται με τους χρήστες

Η θερμική άνεση στους υπαίθριους χώρους νοσοκομείων επηρεάζεται καθοριστικά από τα χαρακτηριστικά των χρηστών, όπως η ηλικία, η κατάσταση υγείας, η κινητικότητα, η μεταβολική δραστηριότητα και η ενδυμασία. Οι παράμετροι αυτές επηρεάζουν τόσο την παραγωγή και την ανταλλαγή θερμότητας του ανθρώπινου σώματος όσο και τη δυνατότητα φυσιολογικής και συμπεριφορικής προσαρμογής στις περιβαλλοντικές συνθήκες. Στο νοσοκομειακό περιβάλλον αποκτούν ιδιαίτερη σημασία, καθώς οι χρήστες δεν αποτελούν ομοιογενή πληθυσμό, αλλά περιλαμβάνουν άτομα με διαφορετικό επίπεδο φυσιολογικής αντοχής, λειτουργικής αυτονομίας και δυνατότητας αποφυγής δυσμενών συνθηκών. Κατά συνέπεια, η αξιολόγηση της θερμικής κατάστασης δεν μπορεί να βασίζεται αποκλειστικά στις γενικές περιβαλλοντικές συνθήκες, αλλά οφείλει να συνεκτιμά τη διαφοροποιημένη απόκριση των επιμέρους ομάδων χρηστών στο ίδιο μικροκλιματικό πεδίο (Bröde et al., 2012; Höppe, 1999b).

Οι ασθενείς, οι ηλικιωμένοι και τα άτομα με χρόνιες παθήσεις ή περιορισμένη κινητικότητα μπορεί να εμφανίζουν μειωμένη θερμορυθμιστική ικανότητα ή περιορισμένη δυνατότητα προσαρμογής σε συνθήκες αυξημένου θερμικού φορτίου. Ως αποτέλεσμα, μικροκλιματικές συνθήκες που ενδέχεται να είναι ανεκτές για τον γενικό πληθυσμό μπορούν να προκαλέσουν μεγαλύτερη θερμική καταπόνηση σε ευάλωτες ομάδες. Η διεθνής βιβλιογραφία αναγνωρίζει τους ηλικιωμένους και τα άτομα με

προϋπάρχοντα νοσήματα ως ομάδες αυξημένου κινδύνου κατά τη διάρκεια ακραίων θερμικών επεισοδίων, λόγω της μειωμένης θερμορυθμιστικής ικανότητας, της αυξημένης ευαισθησίας στην αφυδάτωση και της συχνής συνύπαρξης καρδιαγγειακών, αναπνευστικών ή άλλων χρόνιων παθήσεων (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2023).

Ιδιαίτερη σημασία παρουσιάζουν επίσης τα παιδιά και οι ηλικιωμένοι στα αστικά περιβάλλοντα. Η συστηματική ανασκόπηση των Nazish et al., (2024) καταγράφει ενδείξεις ότι η έκθεση σε υψηλές θερμοκρασίες συνδέεται με αυξημένους κινδύνους για ευάλωτες ηλικιακές ομάδες και ότι η παρουσία αστικού πρασίνου μπορεί, υπό συγκεκριμένες συνθήκες, να συμβάλει στον περιορισμό ορισμένων επιπτώσεων της ζέστης στην υγεία. Μεταξύ των μελετών που εξετάζονται αναφέρονται επιβαρύνσεις της αναπνευστικής υγείας μικρών παιδιών κατά τη διάρκεια υψηλών θερμοκρασιών και πιθανή μετριαστική επίδραση του αστικού πρασίνου στη θερμοσχετιζόμενη θνησιμότητα ηλικιωμένων. Παρότι τα ευρήματα αυτά δεν αφορούν αποκλειστικά νοσοκομειακούς υπαίθριους χώρους, υπογραμμίζουν τη σημασία της σκίασης, της βλάστησης και της μείωσης της θερμικής έκθεσης σε χώρους που χρησιμοποιούνται από ευάλωτους πληθυσμούς.

Στην περίπτωση του Γ.Ν.Α. «Αλεξάνδρα», η σύνθεση των χρηστών επηρεάζεται επιπλέον από τον μαιευτικό και γυναικολογικό χαρακτήρα της νοσοκομειακής λειτουργίας. Στους χώρους εισόδου, αναμονής και κίνησης μπορεί να βρίσκονται έγκυες γυναίκες, λεχωίδες, συνοδοί, καθώς και νεογνά ή βρέφη κατά τη συνοδευόμενη μετακίνησή τους. Οι ομάδες αυτές δεν προσομοιώνονται ως διακριτά βιομετεωρολογικά προφίλ στην παρούσα εργασία, λόγω των περιορισμών της παραμετροποίησης και της ετερογένειας των φυσιολογικών και κλινικών χαρακτηριστικών τους. Για τον ίδιο λόγο, η κατηγορία των ασθενών δεν αντιμετωπίζεται ως ενιαίο ανθρωποκεντρικό προφίλ. Ωστόσο, η παρουσία των συγκεκριμένων χρηστών ενισχύει τη σημασία της προληπτικής θερμικής προστασίας στους υπαίθριους χώρους του νοσοκομείου, ιδίως κατά τη διάρκεια ακραίων θερμικών επεισοδίων.

Η ανάγκη ειδικής διερεύνησης των ηλικιωμένων σε μεσογειακά αστικά περιβάλλοντα αναδεικνύεται και από τη μελέτη των Tousi et al. (2025), η οποία εξέτασε τη θερμική

άνεση ηλικιωμένων σε πυκνοδομημένο αστικό περιβάλλον της Αθήνας με τη χρήση προσομοιώσεων ENVI-met και του δείκτη Physiologically Equivalent Temperature (PET). Η μελέτη έδειξε ότι λύσεις βασισμένες στη φύση (*nature-based solutions* – NbS), όπως η ώριμη δένδροφύτευση και η παρουσία υδάτινων στοιχείων, μπορούν να συμβάλουν στη μείωση της θερμικής επιβάρυνσης. Η προσέγγιση αυτή υποστηρίζει τη μεθοδολογική επιλογή της παρούσας εργασίας να εξετάσει διακριτά το προφίλ ηλικιωμένου χρήστη, χωρίς ωστόσο να θεωρεί ότι το προφίλ αυτό αντιπροσωπεύει το σύνολο της ετερογενούς ηλικιωμένης πληθυσμιακής ομάδας.

Παράλληλα, το ιατρονοσηλευτικό και λοιπό προσωπικό εκτίθεται επανειλημμένα στους υπαίθριους χώρους κατά την εκτέλεση λειτουργικών καθηκόντων, όπως οι μετακινήσεις μεταξύ κτιρίων, η συνοδεία ασθενών και οι σύντομες στάσεις ή αναμονές κατά τη διάρκεια της εργάσιμης ημέρας. Αν και το προσωπικό δεν εντάσσεται κατ' ανάγκη στις περισσότερες ευάλωτες ομάδες, η συχνότητα και η επαναληπτικότητα της έκθεσης μπορεί να αυξήσουν τη συνολική ημερήσια θερμική έκθεση και να συμβάλουν στην κόπωση και στη θερμική δυσφορία. Η ενδεχόμενη επίδραση στην εργασιακή απόδοση δεν αξιολογείται στην παρούσα εργασία και θα απαιτούσε ειδική διερεύνηση.

Επομένως, η αξιολόγηση της θερμικής άνεσης στους υπαίθριους χώρους νοσοκομείων πρέπει να συνεκτιμά όχι μόνο τις μικροκλιματικές συνθήκες, αλλά και τη διαφοροποιημένη ευαισθησία, τη διάρκεια και τη συχνότητα έκθεσης, τη δυνατότητα μετακίνησης και τους περιορισμούς προσαρμογής των επιμέρους κατηγοριών χρηστών. Στην παρούσα εργασία, η διαφοροποίηση αυτή διερευνάται μέσω διακριτά παραμετροποιημένων προφίλ ενήλικα, ηλικιωμένου και παιδιού για τον υπολογισμό του PET, ενώ ο UTCI χρησιμοποιείται ως τυποποιημένος δείκτης χωρίς διαφοροποίηση ανά προφίλ χρήστη. Με τον τρόπο αυτό, η θερμική άνεση προσεγγίζεται ως ζήτημα περιβαλλοντικής ποιότητας, προστασίας της υγείας και λειτουργικής καταλληλότητας του νοσοκομειακού υπαίθριου χώρου.

1.6.2. Μικροκλιματικοί και χωρικοί παράγοντες

Η θερμική κατάσταση στους υπαίθριους χώρους νοσοκομείων διαμορφώνεται από τη συνδυαστική επίδραση της θερμοκρασίας και της σχετικής υγρασίας του αέρα, της ταχύτητας και της κατεύθυνσης του ανέμου, της ηλιακής και θερμικής ακτινοβολίας,

καθώς και της χωρικής διαμόρφωσης του δομημένου περιβάλλοντος. Οι παράμετροι αυτές παρουσιάζουν έντονη χωρική και χρονική μεταβλητότητα και μπορούν να δημιουργήσουν σημαντικά διαφορετικές συνθήκες θερμικής έκθεσης ακόμη και σε μικρές αποστάσεις μέσα στον ίδιο υπαίθριο χώρο.

Ιδιαίτερα σημαντική παράμετρο αποτελεί η μέση ακτινοβολούμενη θερμοκρασία (T_{mrt}), η οποία εκφράζει τη συνολική επίδραση του ακτινοβολιακού περιβάλλοντος στον ανθρώπινο οργανισμό. Στον υπολογισμό της συνεκτιμώνται η άμεση και η διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία βραχέος κύματος, καθώς και η ακτινοβολία μακρού κύματος που εκπέμπεται από τον ουράνιο θόλο, τα κτίρια, το έδαφος και τις λοιπές επιφάνειες του περιβάλλοντος. Για τον λόγο αυτό, η T_{mrt} αποτελεί μία από τις πλέον καθοριστικές μεταβλητές για την αξιολόγηση της θερμικής άνεσης και της θερμικής καταπόνησης σε υπαίθριους χώρους (Matzarakis et al., 2010).

Η γεωμετρία και η μορφολογία του χώρου επηρεάζουν άμεσα τόσο το ακτινοβολιακό πεδίο όσο και τις συνθήκες φυσικού αερισμού. Ο λόγος ύψους προς πλάτος της αστικής χαράδρας, ο προσανατολισμός, ο βαθμός περίκλεισης, ο συντελεστής θέασης ουρανού, η διάταξη των κτιριακών όγκων και η παρουσία στενών διαδρομών ή εσωτερικών αυλών καθορίζουν τη διάρκεια της ηλιακής έκθεσης, την κατανομή της σκίασης και τη δυνατότητα διέλευσης του ανέμου. Σε πυκνοδομημένα νοσοκομειακά συγκροτήματα, οι παράγοντες αυτοί μπορούν να δημιουργήσουν ζώνες αυξημένης ακτινοβολιακής επιβάρυνσης ή περιορισμένου αερισμού, οι οποίες επηρεάζουν ιδιαίτερα τους χρήστες με μειωμένη δυνατότητα μετακίνησης ή επιλογής εναλλακτικής διαδρομής.

Παράλληλα, τα υλικά των επιφανειών επηρεάζουν την απορρόφηση, την αποθήκευση και την επανεκπομπή της θερμότητας. Επιφάνειες με χαμηλή ανακλαστικότητα και υψηλή θερμική αποθηκευτική ικανότητα μπορούν να αυξήσουν τις επιφανειακές θερμοκρασίες και την ακτινοβολιακή επιβάρυνση, ενώ η βλάστηση συμβάλλει στη σκίαση, στην εξατμισοδιαπνοή και στη μείωση της θερμοκρασίας των επιφανειών. Ωστόσο, η διάταξη και η πυκνότητα της βλάστησης πρέπει να αξιολογούνται σε συνδυασμό με τις συνθήκες αερισμού, καθώς η υπερβολικά πυκνή φύτευση μπορεί τοπικά να περιορίσει τη ροή του αέρα.

Η άμεση ηλιακή ακτινοβολία (*Direct SW Radiation*) αποτελεί κρίσιμη παράμετρο της μικροκλιματικής αξιολόγησης, καθώς επηρεάζει άμεσα την T_{mrt} και, μέσω αυτής, τις υπολογιζόμενες τιμές των δεικτών PET και UTCI. Η έντασή της διαφοροποιείται ανάλογα με την ώρα, τη θέση, τον προσανατολισμό, τη γεωμετρία του χώρου και τη σκίαση από κτίρια, κατασκευές ή βλάστηση. Η χωρική χαρτογράφησης της επιτρέπει την αναγνώριση των ζωνών μεγαλύτερης ακτινοβολιακής έκθεσης και υποστηρίζει την ερμηνεία της αποτελεσματικότητας των παρεμβάσεων σκίασης.

Συνεπώς, η αξιολόγηση των μικροκλιματικών και χωρικών παραγόντων δεν πρέπει να βασίζεται σε μία μόνο μεταβλητή, αλλά στη συνεξέταση της θερμοκρασίας του αέρα, της T_{mrt} , της ακτινοβολίας, του ανέμου, της γεωμετρίας, των υλικών και της βλάστησης. Η ολοκληρωμένη αυτή προσέγγιση αποτελεί τη βάση για την ερμηνεία των χωρικών διαφοροποιήσεων των δεικτών PET και UTCI και για την αξιολόγηση των σεναρίων παρέμβασης που αναπτύσσονται στο Κεφάλαιο 2.

1.6.3. Δημόσια υγεία, αερογενής μετάδοση και μεταπανδημικές απαιτήσεις σχεδιασμού

Η σημασία των μικροκλιματικών συνθηκών στους υπαίθριους χώρους των νοσοκομείων ενισχύθηκε περαιτέρω στο πλαίσιο της δημόσιας υγείας και της πρόληψης υγειονομικών κινδύνων. Η εμπειρία της πανδημίας COVID-19 ανέδειξε τη δυνητική χρησιμότητα των ανοικτών και ημιυπαίθριων χώρων για λειτουργίες αναμονής, μετάβασης και προσωρινής παραμονής, όταν αυτές μπορούν να πραγματοποιούνται με ασφάλεια και χωρίς να παρεμποδίζεται η νοσοκομειακή λειτουργία. Σε σύγκριση με ανεπαρκώς αεριζόμενους κλειστούς χώρους, η αυξημένη αραίωση και διασπορά των εκπνεόμενων αερολυμάτων σε ανοικτά περιβάλλοντα μπορεί να περιορίσει τη συσσώρευσή τους, χωρίς ωστόσο να εξαλείφει τον κίνδυνο μετάδοσης σε συνθήκες συνωστισμού, εγγύτητας ή παρατεταμένης έκθεσης (Allen & Marr, 2020; Morawska & Cao, 2020).

Η διάσταση αυτή εντάσσεται σε μια πολυκριτηριακή προσέγγιση σχεδιασμού των υπαίθριων χώρων υγείας, στην οποία οι απαιτήσεις θερμικής άνεσης, λειτουργικής ασφάλειας και περιορισμού της έκθεσης σε αερογενείς κινδύνους πρέπει να συνεξετάζονται. Η κίνηση και η ανανέωση του αέρα αποτελούν κρίσιμες παραμέτρους για την αραίωση και τη διασπορά αερομεταφερόμενων σωματιδίων, ιδίως σε ημιυπαίθριους ή

μερικώς περικλειστούς χώρους. Ωστόσο, η αποτελεσματικότητα της ατμοσφαιρικής διασποράς εξαρτάται από τη γεωμετρία, τον βαθμό περικλεισης, τη διάταξη των εμποδίων, την κατεύθυνση του ανέμου και τον τρόπο χρήσης του χώρου και δεν μπορεί να συναχθεί μόνο από τη μέση ταχύτητα του αέρα (Allen & Marr, 2020; Morawska & Cao, 2020).

Πέρα από τη μετάδοση αναπνευστικών παθογόνων, η ποιότητα του εξωτερικού αέρα αποτελεί διακριτή και κρίσιμη διάσταση της αστικής περιβαλλοντικής έκθεσης. Για την Αθήνα, οι (Kassomenos et al., 2013) διερεύνησαν τις επιπτώσεις της έκθεσης σε αιωρούμενα σωματίδια PM₁₀ και όζον O₃ στη δημόσια υγεία. Παράλληλα, οι Paschalidou et al., 2015, έδειξαν ότι τα επεισόδια υψηλών συγκεντρώσεων PM₁₀ σε μεσογειακό αστικό περιβάλλον μπορούν να επηρεάζονται τόσο από τοπικές συνθήκες διασποράς και πηγές εκπομπής όσο και από μεταφορά ατμοσφαιρικών ρύπων μεγαλύτερης κλίμακας. Τα ευρήματα αυτά καταδεικνύουν ότι η θερμική άνεση, η ατμοσφαιρική ρύπανση και η έκθεση σε αερογενείς βιολογικούς παράγοντες αποτελούν αλληλεπιδρώσες αλλά εννοιολογικά και μεθοδολογικά διακριτές διαστάσεις της περιβαλλοντικής ποιότητας.

Στους υπαίθριους χώρους νοσοκομείων, ο μικροκλιματικός σχεδιασμός καλείται, συνεπώς, να συνδυάζει τη θερμική προστασία με την επαρκή κίνηση του αέρα και την αποφυγή ζωνών έντονης στασιμότητας. Η σκίαση μειώνει την άμεση ηλιακή έκθεση και τη μέση ακτινοβολούμενη θερμοκρασία, ενώ η βλάστηση και οι κατασκευές σκίασης μπορούν να μεταβάλουν το τοπικό πεδίο ροής. Για τον λόγο αυτό, η χωρική τους διάταξη πρέπει να αξιολογείται σε συνδυασμό με τις συνθήκες αερισμού και όχι ως ανεξάρτητη σχεδιαστική παράμετρος.

Η επίδραση της κίνησης του αέρα στη θερμική άνεση είναι επίσης συνθηκοεξαρτώμενη. Σε θερμά περιβάλλοντα, η αύξηση της ταχύτητας του αέρα μπορεί να ενισχύσει τη συναγωγική και εξατμιστική αποβολή θερμότητας και να βελτιώσει τη θερμική αίσθηση. Σε άλλες συνθήκες, όμως, η υπερβολική έκθεση στον άνεμο μπορεί να προκαλέσει δυσφορία ή να δυσχεράνει τη χρήση του χώρου από ευάλωτους χρήστες. Επομένως, ο σχεδιασμός δεν πρέπει να επιδιώκει απλώς τη μέγιστη ταχύτητα του ανέμου, αλλά κατάλληλες συνθήκες ροής σε συνάρτηση με την ακτινοβολιακή έκθεση, τη θερμοκρασία και την υγρασία του αέρα, τη δραστηριότητα και τα χαρακτηριστικά των χρηστών (Lenzholzer et al., 2018; Nikolopoulou & Steemers, 2003).

Το γεγονός αυτό αναδεικνύει την ανάγκη ισορροπημένου και πολυκριτηριακού μικροκλιματικού σχεδιασμού, καθώς οι παράμετροι της σκίασης, της ακτινοβολίας, της θερμοκρασίας, της υγρασίας και της ροής του αέρα δρουν ταυτόχρονα και ενδέχεται να παρουσιάζουν συνέργειες ή ανταγωνιστικές επιδράσεις. Κατά συνέπεια, η αξιολόγηση είναι ανεπαρκής όταν περιορίζεται σε μεμονωμένες μετεωρολογικές μεταβλητές, χωρίς συνεκτίμηση της συνδυασμένης επίδρασής τους στη θερμική ισορροπία του ανθρώπινου σώματος (Bröde et al., 2012; Höppe, 1999b; Matzarakis et al., 2010).

Η παρούσα εργασία δεν προσομοιώνει τη διασπορά ατμοσφαιρικών ρύπων ή βιοαερολυμάτων και δεν πραγματοποιεί εκτίμηση του κινδύνου μετάδοσης λοιμωδών νοσημάτων. Η αναφορά στις παραμέτρους αυτές οριοθετεί το ευρύτερο πλαίσιο δημόσιας υγείας και υπογραμμίζει ότι η θερμική βελτιστοποίηση των υπαίθριων νοσοκομειακών χώρων πρέπει να επιδιώκεται χωρίς να παραβλέπονται οι απαιτήσεις αερισμού, ποιότητας του αέρα και λειτουργικής ασφάλειας.

1.7 Στρατηγικές βελτιστοποίησης της θερμικής άνεσης σε υπαίθριους χώρους νοσοκομείων: θεωρητικό πλαίσιο

Με βάση την ανάλυση των μικροκλιματικών και χωρικών παραγόντων, καθώς και των παραμέτρων που σχετίζονται με τους χρήστες, καθίσταται σαφές ότι η αντιμετώπιση της θερμικής καταπόνησης στους υπαίθριους χώρους νοσοκομείων δεν μπορεί να βασιστεί σε μεμονωμένες παρεμβάσεις. Αντίθετα, απαιτεί συνδυασμένες και χωρικά στοχευμένες στρατηγικές σχεδιασμού, οι οποίες συνεκτιμούν τη μικροκλιματική αποτελεσματικότητα, τη λειτουργική συμβατότητα, την ασφάλεια, την υγιεινή, την προσβασιμότητα και την αδιάλειπτη λειτουργία των νοσοκομειακών εγκαταστάσεων.

Η σχετική βιβλιογραφία για τα νοσοκομειακά περιβάλλοντα υπογραμμίζει ότι η βελτίωση των συνθηκών θερμικής άνεσης προϋποθέτει τη συνδυαστική θεώρηση της μικροκλιματικής αποτελεσματικότητας και της λειτουργικής και υγειονομικής συμβατότητας. Οι προτεινόμενες παρεμβάσεις πρέπει, επομένως, να είναι όχι μόνο περιβαλλοντικά αποτελεσματικές, αλλά και εφαρμόσιμες, ασφαλείς και συμβατές με τις ιδιαίτερες απαιτήσεις λειτουργίας των υγειονομικών εγκαταστάσεων (Pereira et al., 2020).

Στην παρούσα ενότητα εξετάζονται στρατηγικές βιοκλιματικού και κλιματικά ανθεκτικού σχεδιασμού που έχουν τεκμηριωθεί στη διεθνή βιβλιογραφία για αστικούς υπαίθριους χώρους. Οι στρατηγικές αυτές αξιολογούνται κριτικά ως προς τη δυνατότητα εφαρμογής τους στους υπαίθριους χώρους νοσοκομείων. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στη διάκριση μεταξύ παρεμβάσεων που μπορούν να ενταχθούν λειτουργικά σε νοσοκομειακά περιβάλλοντα και παρεμβάσεων οι οποίες, παρότι παρουσιάζουν τεκμηριωμένα μικροκλιματικά οφέλη, ενδέχεται να μην είναι κατάλληλες λόγω περιορισμών ασφάλειας, υγιεινής, προσβασιμότητας, συντήρησης ή αδιάλειπτης λειτουργίας.

Οι στρατηγικές που παρουσιάζονται δεν αντιμετωπίζονται ως προκαθορισμένες ή κατασκευαστικά ώριμες λύσεις, αλλά ως θεωρητικό πλαίσιο αξιολόγησης και προκαταρκτικής ιεράρχησης των παρεμβάσεων. Το πλαίσιο αυτό υποστηρίζει την επιλογή των μέτρων που εντάσσονται στα σενάρια προσομοίωσης και διευκολύνει τη σύνδεση μεταξύ της βιβλιογραφικής τεκμηρίωσης, των λειτουργικών απαιτήσεων του νοσοκομείου και της μικροκλιματικής αξιολόγησης που αναπτύσσεται στο Κεφάλαιο 2.

Η προσέγγιση αυτή ευθυγραμμίζεται με τη βιβλιογραφία του αστικού μικροκλίματος, η οποία αναδεικνύει τη σημασία συνδυαστικών και χωρικά προσαρμοσμένων παρεμβάσεων για τη μείωση της θερμικής επιβάρυνσης σε σύνθετα αστικά περιβάλλοντα (Pereira et al., 2020· World Health Organization, 2020· Intergovernmental Panel on Climate Change, 2022). Στα νοσοκομειακά περιβάλλοντα, οι παρεμβάσεις πρέπει επιπλέον να είναι λειτουργικά και υγειονομικά συμβατές και να υποστηρίζουν την κλιματική ανθεκτικότητα των εγκαταστάσεων (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2022; Organization, 2020; Pereira et al., 2020).

1.7.1 Στρατηγικές σκίασης και διαχείρισης της ηλιακής ακτινοβολίας

Η μείωση της έκθεσης στην άμεση και ανακλώμενη ηλιακή ακτινοβολία αποτελεί βασικό άξονα βελτίωσης της θερμικής άνεσης σε υπαίθριους χώρους νοσοκομείων. Στρατηγικές σκίασης που εφαρμόζονται σε επίπεδο διαδρομών μετακίνησης, εισόδων και χώρων αναμονής μπορούν να μειώσουν σημαντικά τη μέση θερμοκρασία ακτινοβολίας και τη θερμική καταπόνηση των χρηστών. Τα οφέλη των παρεμβάσεων σκίασης είναι ιδιαίτερα σημαντικά για ομάδες χρηστών με περιορισμένη δυνατότητα θερμικής και συμπεριφορικής προσαρμογής, όπως ασθενείς με μειωμένη κινητικότητα ή αυξημένη

ευαλωτότητα στο θερμικό στρες, καθώς και για συνοδούς και νοσοκομειακό προσωπικό κατά τη διάρκεια σύντομων στάσεων ή μετακινήσεων στους υπαίθριους χώρους.

Εφαρμόσιμες στρατηγικές περιλαμβάνουν τη χρήση σταθερών ή ημιμόνιμων σκιαστικών κατασκευών, τη χωρική ενσωμάτωση σκίασης στον αρχιτεκτονικό σχεδιασμό και την αξιοποίηση φυτικής σκίασης. Αντίθετα, κινητά ή προσωρινά σκίαστρα μεγάλης κλίμακας, αν και αποτελεσματικά σε άλλους αστικούς χώρους, παρουσιάζουν περιορισμένη εφαρμοσιμότητα σε νοσοκομειακά περιβάλλοντα λόγω κινδύνων παρεμπόδισης της κυκλοφορίας ασθενοφόρων και των απαιτήσεων ασφάλειας (Santamouris, 2015; Tseliou & Tsiros, 2016; Tsoka et al., 2018).

1.7.2 Βελτιστοποίηση φυσικού αερισμού και ροών αέρα

Η ενίσχυση της κυκλοφορίας του αέρα αποτελεί κρίσιμο μηχανισμό μείωσης της θερμικής καταπόνησης μέσω συναγωγής και εξάτμισης (Oke, 1995). Στους υπαίθριους χώρους νοσοκομείων, η βελτιστοποίηση του φυσικού αερισμού μπορεί να γίνει κυρίως μέσω χωρικών παρεμβάσεων, όπως η αποφυγή εγκλωβισμένων αυλών, η επαρκής διάσταση διαδρομών και η προσαρμογή της διάταξης των κτιριακών όγκων (Toparlar et al., 2017). (Αντίθετα, παρεμβάσεις που βασίζονται σε μηχανικά συστήματα ενίσχυσης του αερισμού στους υπαίθριους χώρους, παρότι εφαρμόζονται σε άλλες αστικές συνθήκες, δεν θεωρούνται κατάλληλες ως μόνιμες ή εκτεταμένες παρεμβάσεις για νοσοκομειακά περιβάλλοντα λόγω θορύβου, αυξημένων απαιτήσεων συντήρησης και πιθανών υγειονομικών κινδύνων (Allen & Marr, 2020; Morawska & Cao, 2020).

1.7.3 Επιλογή και τροποποίηση υλικών επιφανειών

Η επιλογή και τροποποίηση των υλικών επιφανειών αποτελεί βασική στρατηγική περιορισμού της θερμικής αποθήκευσης και της επανεκπομπής θερμότητας στον αστικό χώρο. Υλικά με αυξημένη ηλιακή ανακλαστικότητα, μειωμένη θερμική χωρητικότητα ή/και μεγαλύτερη διαπερατότητα μπορούν να συμβάλουν στη μείωση της θερμοκρασίας των επιφανειών και, υπό κατάλληλες συνθήκες, στη βελτίωση του τοπικού μικροκλίματος. Η χρήση ψυχρών υλικών έχει αναγνωριστεί στη βιβλιογραφία ως μέτρο μετριασμού της αστικής θερμικής νησίδας, ιδιαίτερα όταν συνδυάζεται με σκίαση και βλάστηση (Akbari et al., 2001; Santamouris, 2013).

Ωστόσο, η βιοκλιματική αποτελεσματικότητα των υλικών επιφανειών δεν εξαρτάται μόνο από τις θερμοφυσικές τους ιδιότητες, όπως η ανακλαστικότητα, η εκπομπικότητα ή η θερμική αδράνεια. Σε υπαίθριους χώρους, η θερμική εμπειρία του χρήστη επηρεάζεται επίσης από τη μέση ακτινοβολούμενη θερμοκρασία T_{mrt} (Mean Radiant Temperature / Μέση Ακτινοβολούμενη Θερμοκρασία), τη σκίαση, τη γεωμετρία του χώρου και την ανακλώμενη ακτινοβολία. Για τον λόγο αυτό, υλικά με πολύ υψηλή ανακλαστικότητα, αν και μπορούν να μειώσουν τη θερμοκρασία επιφανείας, ενδέχεται σε ορισμένες περιπτώσεις να αυξήσουν τη θάμβωση ή την ανακλώμενη ακτινοβολία προς τον χρήστη, εφόσον δεν συνδυάζονται με κατάλληλη σκίαση.

Σε υπαίθριους χώρους νοσοκομείων, η επιλογή υλικών πρέπει επιπλέον να λαμβάνει υπόψη λειτουργικά κριτήρια, όπως η αντιολισθηρότητα, η ανθεκτικότητα, η δυνατότητα καθαρισμού και συντήρησης, η οπτική άνεση και η ενδεικτικά ανεκτή χρήση από ασθενείς, ηλικιωμένους, παιδιά, συνοδούς και προσωπικό. Επομένως, η τροποποίηση των υλικών επιφανειών δεν πρέπει να αντιμετωπίζεται ως αυτόνομη παρέμβαση, αλλά ως μέρος ολοκληρωμένης στρατηγικής βιοκλιματικού σχεδιασμού, σε συνέργεια με τη σκίαση, τη βλάστηση και τη λειτουργική οργάνωση του υπαίθριου χώρου.

Οι στρατηγικές που βασίζονται σε πολύ υψηλό albedo ή έντονα ανακλαστικές επιφάνειες, αν και είναι αποτελεσματικές σε επίπεδο μείωσης θερμοκρασίας επιφανειών, μπορεί να προκαλέσουν θάμβωση και να επηρεάσουν αρνητικά την ασφάλεια ασθενών και προσωπικού, γεγονός που περιορίζει τη χρήση τους σε νοσοκομειακά περιβάλλοντα (Santamouris, 2015; Tsoka et al., 2018).

1.7.4 Ρόλος της βλάστησης και του πρασίνου

Η ενσωμάτωση βλάστησης συμβάλλει ουσιαστικά στη βελτίωση του μικροκλίματος μέσω σκίασης, εξατμισοδιαπνοής και μείωσης της θερμοκρασίας των επιφανειών, αποτελώντας βασική κατηγορία λύσεων βασισμένων στη φύση (Nature-based Solutions / λύσεις βασισμένες στη φύση) για τη μείωση της αστικής θερμικής επιβάρυνσης (Cohen-Shacham et al., 2016; Soltanifard & Amani-Beni, 2025; Wei et al., 2025). Σε πυκνοδομημένα αστικά περιβάλλοντα, όπου ο διαθέσιμος οριζόντιος υπαίθριος χώρος είναι περιορισμένος, οι πράσινες στέγες και οι πράσινες όψεις μπορούν να λειτουργήσουν ως συμπληρωματικές στρατηγικές ενίσχυσης του αστικού πρασίνου, χωρίς να απαιτούν πρόσθετη ελεύθερη

επιφάνεια στο επίπεδο του εδάφους. Οι Tseliou et al. (2023), εξετάζοντας με ENVI-met πυκνοδομημένη περιοχή της Αθήνας, ανέδειξαν ότι ο συνδυασμός πράσινων δωματών και πράσινων όψεων μπορεί να συμβάλει στη βελτίωση των θερμικών συνθηκών στο επίπεδο του πεζού, ιδίως κατά τις θερμότερες ώρες της ημέρας.

Η σημασία των παρεμβάσεων πρασίνου ενισχύεται και από πρόσφατες εφαρμογές σε μεσογειακά αστικά περιβάλλοντα με έμφαση σε εύαλωτες ομάδες. Ειδικότερα, οι Tousi et al. (2025), αξιοποιώντας προσομοιώσεις ENVI-met σε πυκνοδομημένη περιοχή της Αθήνας, έδειξαν ότι οι nature-based solutions (λύσεις βασισμένες στη φύση), όπως η φύτευση ώριμων δέντρων και η ενσωμάτωση υδάτινων στοιχείων, μπορούν να μειώσουν σημαντικά τις τιμές PET (Physiologically Equivalent Temperature / Φυσιολογικά Ισοδύναμη Θερμοκρασία) και να βελτιώσουν τη θερμική άνεση ηλικιωμένων κατά τη διάρκεια ακραίων θερμικών συνθηκών. Η βιβλιογραφική αυτή τεκμηρίωση είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για την παρούσα εργασία, καθώς τεκμηριώνει τη σημασία της βλάστησης ως στρατηγικής προστασίας εύαλωτων χρηστών σε συνθήκες αυξημένου θερμικού στρες.

Στους υπαίθριους χώρους νοσοκομείων, ωστόσο, η εφαρμογή παρεμβάσεων πρασίνου πρέπει να προσαρμόζεται στους ειδικούς λειτουργικούς και υγειονομικούς περιορισμούς του χώρου. Εφαρμόσιμες θεωρούνται κυρίως στρατηγικές που βασίζονται σε επιλεγμένη δενδροφύτευση, φυτεύσεις χαμηλών απαιτήσεων συντήρησης, φυτεμένα δώματα και φυτικά στοιχεία που δεν υποβαθμίζουν την προσβασιμότητα, την ασφάλεια και την αδιάλειπτη λειτουργία των εγκαταστάσεων. Η επιλογή των φυτικών ειδών σε νοσοκομειακούς υπαίθριους χώρους πρέπει να γίνεται με κριτήρια χαμηλής αλλεργιογόνου δράσης, περιορισμένων εκπομπών πτητικών οργανικών ενώσεων και συμβατότητας με τις απαιτήσεις αερισμού, υγιεινής, συντήρησης και ασφαλούς κυκλοφορίας ασθενών, προσωπικού και επισκεπτών.

Η ενσωμάτωση δέντρων και αστικής βλάστησης δεν συμβάλλει μόνο στη μικροκλιματική βελτίωση μέσω σκίασης και εξατμισοδιαπνοής, αλλά παράγει και πρόσθετα περιβαλλοντικά και κοινωνικά οφέλη, όπως η ενίσχυση της βιοποικιλότητας, η συγκράτηση αιωρούμενων σωματιδίων και η βελτίωση της ποιότητας του υπαίθριου περιβάλλοντος. Αντίθετα, υδάτινα στοιχεία και εκτεταμένες φυτεύσεις υψηλής πυκνότητας, παρότι μπορεί να είναι αποτελεσματικά σε γενικούς αστικούς χώρους,

παρουσιάζουν περιορισμένη εφαρμοσιμότητα σε νοσοκομειακά περιβάλλοντα λόγω αυξημένων απαιτήσεων συντήρησης, πιθανών υγειονομικών κινδύνων και ανάγκης διατήρησης ασφαλών, καθαρών και ανεμπόδιστων διαδρομών κίνησης) (Tseliou & Tsiros, 2016; World Health Organization, 2020).

1.7.5 Οργανωτικές και λειτουργικές παρεμβάσεις

Πέραν των χωρικών και υλικών παρεμβάσεων, η θερμική άνεση μπορεί να υποστηριχθεί μέσω οργανωτικών μέτρων, όπως η χωροθέτηση χώρων αναμονής σε ευνοϊκότερες μικροκλιματικές θέσεις και η διαχείριση ροών κίνησης σε περιόδους αυξημένου θερμικού στρες.

Ωστόσο, στρατηγικές που βασίζονται σε αλλαγές ωραρίων ή μετατόπιση δραστηριοτήτων δεν θεωρούνται λειτουργικά ρεαλιστικές σε περιβάλλοντα υγείας, όπου η λειτουργία καθορίζεται από ιατρικές και υγειονομικές ανάγκες (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2022; World Health Organization, 2020).

Υπό το πρίσμα αυτό, η αξιολόγηση και επιλογή στρατηγικών βελτιστοποίησης οφείλει να λαμβάνει υπόψη πρωτίστως τις ανάγκες των πλέον ευάλωτων χρηστών, καθώς η θερμική καταπόνηση ενδέχεται να εκδηλώνεται δυσανάλογα σε πληθυσμούς με μειωμένη προσαρμοστική ικανότητα, ακόμη και όταν οι συνθήκες κρίνονται ανεκτές για τον γενικό πληθυσμό (van Hoof et al., 2025).

1.7.6 Ρόλος της μικροκλιματικής προσομοίωσης στη λήψη αποφάσεων

Η αξιολόγηση και ιεράρχηση των παραπάνω στρατηγικών προϋποθέτει εργαλεία υψηλής χωρικής ανάλυσης, ικανά να αποτυπώσουν τις μικροκλιματικές διαφοροποιήσεις σε επίπεδο ανθρώπινης κλίμακας. Η χρήση μικροκλιματικών μοντέλων, σε συνδυασμό με δείκτες θερμικής άνεσης και καταπόνησης όπως οι PET και UTCI, επιτρέπει τη συγκριτική αξιολόγηση εναλλακτικών σεναρίων και τη τεκμηριωμένη επιλογή παρεμβάσεων (Toparlar et al., 2017; Tsoka et al., 2018)

Η προσέγγιση αυτή έχει εφαρμοστεί επιτυχώς και σε υπαίθριους χώρους νοσοκομείων, όπου η μικροκλιματική προσομοίωση σε συνδυασμό με δείκτες θερμικής άνεσης αξιοποιήθηκε για τη συγκριτική αξιολόγηση και βελτιστοποίηση εναλλακτικών σχεδιαστικών σεναρίων, λαμβάνοντας υπόψη τους αυξημένους λειτουργικούς και υγειονομικούς περιορισμούς των εγκαταστάσεων υγείας (Zhen et al., 2025)

Οι στρατηγικές που παρουσιάστηκαν στο παρόν κεφάλαιο συγκροτούν το θεωρητικό πλαίσιο βελτιστοποίησης της θερμικής άνεσης σε υπαίθριους χώρους νοσοκομείων και επιλέγονται με γνώμονα τη συμβατότητά τους με τις λειτουργικές, υγειονομικές και χωρικές απαιτήσεις των νοσοκομειακών εγκαταστάσεων. Η αναφορά σε στρατηγικές που δεν θεωρούνται εφαρμόσιμες σε τέτοια περιβάλλοντα γίνεται αποκλειστικά σε κριτικό επίπεδο, με σκοπό την τεκμηρίωση των περιορισμών και τη σαφή οριοθέτηση του πεδίου των κατάλληλων παρεμβάσεων. Στο επόμενο κεφάλαιο, το πλαίσιο αυτό εφαρμόζεται στην περιοχή μελέτης του Γενικού Νοσοκομείου «Αλεξάνδρα» στην Αθήνα, λαμβάνοντας υπόψη τα ιδιαίτερα χωρικά, λειτουργικά και μικροκλιματικά χαρακτηριστικά του νοσοκομειακού συγκροτήματος.

Παρότι οι στρατηγικές αυτές εδράζονται σε τεχνικά και μικροκλιματικά κριτήρια, η εφαρμογή τους σε υποδομές υγείας συνδέεται άμεσα με πλαίσια διαχείρισης κινδύνου, ανθεκτικότητας και προσαρμογής στη ζέστη. Για τον λόγο αυτό, στη συνέχεια εξετάζεται συνοπτικά το θεσμικό και πολιτικό πλαίσιο που διαμορφώνει τις κατευθύνσεις προσαρμογής των υποδομών υγείας, με έμφαση στο κενό μεταξύ γενικών κατευθύνσεων και εφαρμοσμένων εργαλείων αξιολόγησης.

1.8 Θεσμικές και πολιτικές προσεγγίσεις για τη μείωση της θερμικής επιβάρυνσης και την προστασία της δημόσιας υγείας στις υποδομές υγείας

Μετά την εξέταση των στρατηγικών βιοκλιματικού σχεδιασμού, κρίνεται σκόπιμη η συνοπτική παρουσίαση των θεσμικών και πολιτικών προσεγγίσεων που διαμορφώνουν το ευρύτερο πλαίσιο προσαρμογής των υποδομών υγείας στην κλιματική αλλαγή και στην αύξηση της θερμικής επιβάρυνσης. Η θεσμική αυτή διάσταση δεν υποκαθιστά τη μικροκλιματική αξιολόγηση, αλλά αποσαφηνίζει το πλαίσιο εντός του οποίου μπορούν να ενταχθούν οι σχεδιαστικές, χωρικές και λειτουργικές παρεμβάσεις.

Η κλιματική κρίση και η αυξανόμενη συχνότητα, διάρκεια και ένταση των καυσώνων έχουν οδηγήσει στη διεθνή αναγνώριση των ακραίων θερμικών επεισοδίων ως σημαντικού κινδύνου για τη δημόσια υγεία, την πολιτική προστασία και τη λειτουργία των κρίσιμων υποδομών. Η έκθεση του πληθυσμού στους καύσωνες αναμένεται να αυξηθεί περαιτέρω, ενώ οι επιπτώσεις εκδηλώνονται εντονότερα στους ηλικιωμένους, στους ασθενείς, στα

παιδιά και σε άλλες ομάδες με περιορισμένη δυνατότητα φυσιολογικής ή συμπεριφορικής προσαρμογής (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2022, 2023; World Health Organization Regional Office for Europe, 2021).

Ιδιαίτερη σημασία αποδίδεται στις υποδομές υγείας, οι οποίες καλούνται να διατηρούν τη λειτουργική και επιχειρησιακή τους επάρκεια ακόμη και υπό συνθήκες αυξημένου περιβαλλοντικού στρες. Η ανθεκτικότητά τους αφορά τόσο τη συνέχιση της παροχής κρίσιμων υπηρεσιών όσο και την προσαρμογή των εγκαταστάσεων, των υπαίθριων χώρων και των λειτουργιών τους στις μεταβαλλόμενες κλιματικές συνθήκες. Η ανάγκη αυτή αποκτά πρόσθετη βαρύτητα επειδή οι υγειονομικές μονάδες εξυπηρετούν καθημερινά πληθυσμούς με διαφορετικά επίπεδα θερμικής ευαλωτότητας, ενώ τα ίδια τα συστήματα υγείας μπορεί να δέχονται αυξημένη πίεση κατά τη διάρκεια ακραίων θερμικών επεισοδίων (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2022; World Health Organization, 2020).

Σε ευρωπαϊκό επίπεδο, η Στρατηγική της Ευρωπαϊκής Ένωσης για την Προσαρμογή στην Κλιματική Αλλαγή προωθεί την ταχύτερη, συστημικότερη και καλύτερα τεκμηριωμένη προσαρμογή, με έμφαση στις πόλεις, στις κρίσιμες υποδομές και στην ενσωμάτωση της κλιματικής ανθεκτικότητας στον σχεδιασμό και στις δημόσιες πολιτικές. Παράλληλα, οι πολιτικές δημόσιας υγείας αναδεικνύουν την ανάγκη ανάπτυξης σχεδίων δράσης για την υγεία έναντι της ζέστης, συστημάτων έγκαιρης προειδοποίησης, διατομεακής συνεργασίας και στοχευμένης προστασίας των ευάλωτων πληθυσμών (Commission, 2021; World Health Organization, 2018; World Health Organization Regional Office for Europe, 2021). Στην Ελλάδα, η προσαρμογή στην κλιματική αλλαγή οργανώνεται μέσω δύο αλληλοσυμπληρούμενων κατευθύνσεων. Η πρώτη αφορά τον εθνικό, περιφερειακό και επιχειρησιακό προγραμματισμό και εκφράζεται μέσω της Εθνικής Στρατηγικής για την Προσαρμογή στην Κλιματική Αλλαγή (ΕΣΠΚΑ), των Περιφερειακών Σχεδίων Προσαρμογής στην Κλιματική Αλλαγή (ΠεΣΠΚΑ) και του Εθνικού Μηχανισμού Διαχείρισης Κρίσεων και Αντιμετώπισης Κινδύνων του ν. 4662/2020. Η ΕΣΠΚΑ καθορίζει τους γενικούς στόχους, τις κατευθυντήριες αρχές και τα μέσα υλοποίησης της εθνικής πολιτικής προσαρμογής, ενώ τα ΠεΣΠΚΑ εξειδικεύουν τις σχετικές κατευθύνσεις σε περιφερειακό επίπεδο, ανάλογα με τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά, τους κινδύνους και τις

ευπάθειες κάθε Περιφέρειας (Νόμος 4662/2020: Εθνικός Μηχανισμός Διαχείρισης Κρίσεων Και Αντιμετώπισης Κρίσεων, 2020; Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας, 2016).

Η δεύτερη κατεύθυνση αφορά τη χωρική και πολεοδομική εξειδίκευση της προσαρμογής μέσω των Τοπικών Πολεοδομικών Σχεδίων (ΤΠΣ), των Ειδικών Πολεοδομικών Σχεδίων (ΕΠΣ), των σχετικών τεχνικών προδιαγραφών και των νέων Πολεοδομικών Προτύπων. Ο ν. 4759/2020, σε συνδυασμό με το ευρύτερο πλαίσιο χωρικού σχεδιασμού, παρέχει τη δυνατότητα ενσωμάτωσης ζητημάτων κλιματικής προσαρμογής, πρόληψης φυσικών κινδύνων, πράσινων υποδομών και περιβαλλοντικής ανθεκτικότητας στον πολεοδομικό σχεδιασμό.

Η ΥΑ ΥΠΕΝ/ΔΝΕΠ/32892/1414, η οποία δημοσιεύθηκε στο ΦΕΚ 200/Δ/2024, αναθεωρεί τα πολεοδομικά σταθερότυπα και εγκρίνει νέα Πολεοδομικά Πρότυπα που εφαρμόζονται κατά την εκπόνηση των ΤΠΣ και ΕΠΣ. Τα εργαλεία αυτά μπορούν να υποστηρίξουν την αξιολόγηση της επάρκειας των κοινόχρηστων χώρων, της αστικής βλάστησης, της χωρητικότητας και άλλων παραμέτρων περιβαλλοντικής ποιότητας. Δεν καθορίζουν, ωστόσο, ειδικά δεσμευτικά όρια θερμικής άνεσης για υπαίθριους χώρους νοσοκομείων ούτε επιβάλλουν τη χρήση βιοκλιματικών δεικτών. Η ένταξη δεικτών όπως ο PET και ο UTCI αποτελεί επομένως δυνατότητα επιστημονικής και μελλοντικής κανονιστικής εξειδίκευσης και όχι ισχύουσα αυτοτελή νομική απαίτηση.

Σημαντική εξέλιξη αποτελεί η Οδηγία (ΕΕ) 2022/2557 για την ανθεκτικότητα των κρίσιμων οντοτήτων, η οποία περιλαμβάνει τον τομέα της υγείας μεταξύ των τομέων που καλύπτει. Η Οδηγία προβλέπει τη διενέργεια εκτιμήσεων κινδύνου, τον προσδιορισμό συγκεκριμένων κρίσιμων οντοτήτων και τη λήψη κατάλληλων τεχνικών, οργανωτικών και επιχειρησιακών μέτρων ανθεκτικότητας. Δεν χαρακτηρίζει αυτομάτως κάθε νοσοκομείο ως κρίσιμη οντότητα, καθώς ο προσδιορισμός πραγματοποιείται βάσει συγκεκριμένων κριτηρίων και της σημασίας των βασικών υπηρεσιών που παρέχονται.

Η Οδηγία ενσωματώθηκε στο ελληνικό δίκαιο με τον ν. 5236/2025 (ΦΕΚ Α' 175/10.10.2025), ο οποίος θεσπίζει το εθνικό πλαίσιο προσδιορισμού κρίσιμων οντοτήτων, εκτίμησης κινδύνων, εποπτείας και λήψης μέτρων ανθεκτικότητας. Για τους φορείς του τομέα της υγείας που θα προσδιοριστούν ως κρίσιμες οντότητες, η

συνεκτίμηση φυσικών και κλιματικών κινδύνων ενισχύει την ανάγκη διατήρησης της επιχειρησιακής συνέχειας και της ασφαλούς λειτουργίας κατά τη διάρκεια ακραίων θερμικών επεισοδίων.

Παράλληλα, ο Κανονισμός (ΕΕ) 2024/1991 για την Αποκατάσταση της Φύσης προβλέπει ότι έως το 2030 τα κράτη μέλη πρέπει να εξασφαλίσουν μηδενική καθαρή απώλεια, σε εθνικό επίπεδο, της συνολικής έκτασης αστικού πρασίνου και της αστικής δενδροκάλυψης στις αστικές οικοσυστημικές περιοχές, σε σύγκριση με το 2024. Μετά το 2030 επιδιώκεται αυξητική τάση του αστικού πρασίνου και της δενδροκάλυψης έως την επίτευξη ικανοποιητικών επιπέδων. Οι προβλέψεις αυτές ενισχύουν τη θεσμική σημασία της αστικής βλάστησης και των πράσινων υποδομών, χωρίς να καθορίζουν απευθείας συγκεκριμένα ελάχιστα ποσοστά φύτευσης για κάθε ΤΠΣ ή νοσοκομειακή εγκατάσταση (Regulation (EU) 2024/1991 of the European Parliament and of the Council of 24 June 2024 on Nature Restoration (Nature Restoration Law), 2024).

Η αναθεωρημένη Οδηγία (ΕΕ) 2024/1275 για την ενεργειακή απόδοση των κτιρίων συνδέει την ενεργειακή αναβάθμιση με την ποιότητα του εσωτερικού περιβάλλοντος, την αποφυγή της θερινής υπερθέρμανσης, τη σκίαση, τη θερμική ικανότητα των κατασκευών και την εφαρμογή τεχνικών παθητικής ψύξης. Αναγνωρίζει επίσης ότι οι σχετικές παρεμβάσεις μπορούν να επηρεάσουν το μικροκλίμα γύρω από τα κτίρια και το φαινόμενο της αστικής θερμικής νησίδας. Η σχέση της Οδηγίας με τους υπαίθριους χώρους των νοσοκομείων είναι κυρίως έμμεση και αφορά τη συνεκτική αντιμετώπιση του κτιριακού κελύφους, των δωματίων, των συστημάτων σκίασης και του άμεσου περιβάλλοντος των κτιρίων (Directive (EU) 2024/1275 of the European Parliament and of the Council of 24 April 2024 on the Energy Performance of Buildings (Recast) (EPBD), 2024).

Οι παραπάνω πολιτικές και κανονιστικές εξελίξεις συγκλίνουν προς την ανάγκη μετάβασης από γενικές στρατηγικές κατευθύνσεις σε χωρικά και τεχνικά εξειδικευμένα εργαλεία εφαρμογής. Η χρήση λύσεων βασισμένων στη φύση, πράσινων υποδομών, σκίασης και κατάλληλων υλικών μπορεί να συμβάλει στη μείωση της αστικής θερμικής επιβάρυνσης, υπό την προϋπόθεση ότι οι παρεμβάσεις προσαρμόζονται στις τοπικές μικροκλιματικές, λειτουργικές και κοινωνικές συνθήκες (Soltanifard & Amani-Beni, 2025).

Η υφιστάμενη επιστημονική και τεχνική τεκμηρίωση επικεντρώνεται, ωστόσο, κυρίως στους εσωτερικούς χώρους των εγκαταστάσεων υγείας ή σε γενικές κατηγορίες αστικών υπαίθριων χώρων. Η συστηματική εφαρμογή βιοκλιματικών δεικτών σε υπαίθριους χώρους νοσοκομείων παραμένει λιγότερο ανεπτυγμένη, παρότι οι χώροι αυτοί εξυπηρετούν αναγκαίες λειτουργίες πρόσβασης, αναμονής, μετάβασης και προσωρινής παραμονής.

Πίνακας 1.8.1. Συνοπτική αποτύπωση του θεσμικού και κανονιστικού πλαισίου που σχετίζεται με τη διαχείριση του θερμικού κινδύνου στις υποδομές υγείας.

Νομοθετικό ή θεσμικό κείμενο	Βασικό αντικείμενο ή ρύθμιση	Σχέση με τον σχεδιασμό υποδομών υγείας
Διεθνές επίπεδο		
Πλαίσιο Sendai 2015–2030 (UNDRR, 2015)	Μείωση του κινδύνου καταστροφών και ενσωμάτωση της εκτίμησης κινδύνων στον σχεδιασμό	Θεμελιώνει την ανάγκη πρόληψης και ενίσχυσης της ανθεκτικότητας των κρίσιμων υποδομών
Συμφωνία των Παρισίων – UNFCCC (2015)	Εθνικές δεσμεύσεις μετριασμού και προσαρμογής μέσω των εθνικά καθορισμένων συνεισφορών	Γενική κατεύθυνση ενίσχυσης της κλιματικής προσαρμογής και ανθεκτικότητας
Ευρωπαϊκό επίπεδο		
Ευρωπαϊκή Στρατηγική Προσαρμογής (European Commission, 2021)	Συστηματική, ταχύτερη και καλύτερα τεκμηριωμένη προσαρμογή· ενίσχυση της ανθεκτικότητας πόλεων και υποδομών	Κατεύθυνση για ενσωμάτωση της κλιματικής και θερμικής προσαρμογής στον χωρικό σχεδιασμό
Οδηγία (ΕΕ) 2022/2557 – CER	Προσδιορισμός κρίσιμων οντοτήτων, εκτίμηση κινδύνων και λήψη μέτρων ανθεκτικότητας	Δυνατότητα προσδιορισμού φορέων του τομέα υγείας ως κρίσιμων οντοτήτων βάσει των προβλεπόμενων κριτηρίων
Κανονισμός (ΕΕ) 2024/1991 για την Αποκατάσταση της Φύσης	Μηδενική καθαρή απώλεια αστικού πρασίνου και δενδροκάλυψης έως το 2030 και αυξητική τάση στη συνέχεια	Ενισχύει τη θεσμική σημασία της αστικής βλάστησης και των πράσινων υποδομών
Οδηγία (ΕΕ) 2024/1275 – EPBD	Ενεργειακή απόδοση, κτίρια μηδενικών εκπομπών, αποφυγή υπερθέρμανσης και ποιότητα εσωτερικού περιβάλλοντος	Εμμεση σύνδεση με τη σκίαση, την παθητική ψύξη, τα δώματα και το μικροκλίμα γύρω από τα κτίρια
Εθνικό επίπεδο		
ΕΣΠΚΑ (2016) και ΠεΣΠΚΑ	Εθνικές και περιφερειακές κατευθύνσεις προσαρμογής ανά τομέα και περιοχή	Θεσμικό υπόβαθρο για την προστασία της δημόσιας υγείας και την κλιματική ανθεκτικότητα των υποδομών
N. 4662/2020	Εθνικός Μηχανισμός Διαχείρισης Κρίσεων και Αντιμετώπισης Κινδύνων	Πλαίσιο εθνικού, περιφερειακού και τοπικού επιχειρησιακού σχεδιασμού πολιτικής προστασίας
N. 4759/2020 και πλαίσιο ΤΠΣ/ΕΠΣ	Εκσυγχρονισμός του χωρικού και πολεοδομικού σχεδιασμού	Δυνατότητα ενσωμάτωσης μέτρων κλιματικής προσαρμογής, πρόληψης κινδύνων και πράσινων υποδομών

Νομοθετικό ή θεσμικό κείμενο	Βασικό αντικείμενο ή ρύθμιση	Σχέση με τον σχεδιασμό υποδομών υγείας
ΦΕΚ 200/Δ/2024 – Πολεοδομικά Πρότυπα	Πρότυπα και δείκτες για τη σύνταξη πολεοδομικών μελετών	Παρέχει εργαλεία αξιολόγησης κοινόχρηστων χώρων και αστικού πρασίνου· είναι δυνατή η μελλοντική εξειδίκευση με κριτήρια θερμικού κινδύνου
KENAK	Ενεργειακή απόδοση και περιβαλλοντικές απαιτήσεις των κτιρίων	Δεν καθορίζει ειδικές απαιτήσεις θερμικής άνεσης για τους υπαίθριους χώρους νοσοκομείων
N. 5236/2025	Ενσωμάτωση της Οδηγίας CER και εθνικό πλαίσιο προσδιορισμού και ανθεκτικότητας κρίσιμων οντοτήτων	Εφαρμόζεται στους φορείς του τομέα υγείας που προσδιορίζονται ως κρίσιμες οντότητες

Πηγή: Ιδία επεξεργασία βάσει UNDRR (2015), UNFCCC (2015), European Commission (2021), Οδηγίας (ΕΕ) 2022/2557, Κανονισμού (ΕΕ) 2024/1991, Οδηγίας (ΕΕ) 2024/1275, ΕΣΠΚΑ (2016), ν. 4662/2020, ν. 4759/2020, ν. 5236/2025 και ΦΕΚ 200/Δ/2024 και του πίνακα 28, των Expertise Franse 24EL02.(Expertise France, 2025)

Η μετάβαση από τις στρατηγικές κατευθύνσεις σε εφαρμόσιμα εργαλεία αξιολόγησης αποτελεί κρίσιμο ζητούμενο για την αποτελεσματικότητα των μέτρων προσαρμογής. Η χρήση βιοκλιματικών δεικτών, όπως ο PET και ο UTCI, σε συνδυασμό με μικροκλιματική προσομοίωση υψηλής χωρικής ανάλυσης, μπορεί να υποστηρίξει τη σύνδεση μεταξύ θεσμικού σχεδιασμού, χωρικής ιεράρχησης και αξιολόγησης συγκεκριμένων παρεμβάσεων. Οι δείκτες αυτοί δεν αποτελούν σήμερα γενικευμένη θεσμική απαίτηση, αλλά μπορούν να λειτουργήσουν ως τεχνικά εργαλεία τεκμηρίωσης των σχεδιαστικών επιλογών.

Η παρούσα ενότητα λειτουργεί, επομένως, ως θεωρητική γέφυρα μεταξύ της ανάλυσης του αστικού μικροκλίματος, της θερμικής άνεσης και των βιοκλιματικών δεικτών και της εφαρμοσμένης διερεύνησης στη μελέτη περίπτωσης του Γ.Ν.Α. «Αλεξάνδρα». Παρά τη σταδιακή ενίσχυση του θεσμικού πλαισίου για την κλιματική προσαρμογή και την ανθεκτικότητα των υποδομών υγείας, η μετάφραση των γενικών κατευθύνσεων σε εξειδικευμένα και ποσοτικά εργαλεία αξιολόγησης των υπαίθριων νοσοκομειακών χώρων παραμένει ζητούμενο. Το ερευνητικό αυτό κενό και η ειδικότερη συμβολή της εργασίας παρουσιάζονται στην Ενότητα 1.9.

1.9. Ερευνητικό κενό, ερευνητικό ερώτημα και επιδιωκόμενη συμβολή της εργασίας

Από την ανάλυση του θεωρητικού πλαισίου προκύπτει ότι η θερμική άνεση και η θερμική καταπόνηση στους υπαίθριους χώρους νοσοκομείων διαμορφώνονται από τη σύνθετη αλληλεπίδραση μικροκλιματικών παραμέτρων, χωρικών χαρακτηριστικών και παραγόντων που σχετίζονται με τους χρήστες. Οι αλληλεπιδράσεις αυτές αποκτούν αυξημένη σημασία υπό συνθήκες κλιματικής κρίσης, ιδίως για πληθυσμιακές ομάδες με αυξημένη φυσιολογική, κλινική ή λειτουργική ευαλωτότητα.

Η διεθνής βιβλιογραφία έχει εξετάσει εκτενώς το φαινόμενο της αστικής θερμικής νησίδας και την επίδραση της αστικής μορφολογίας, των υλικών, της βλάστησης, της σκίασης και της κίνησης του αέρα στο αστικό μικροκλίμα και στη θερμική άνεση των χρηστών (Founda & Santamouris, 2017; Oke, 1995; Santamouris, 2015). Παράλληλα, έχουν πραγματοποιηθεί πολυάριθμες μικροκλιματικές μελέτες σε πλατείες, πάρκα, πεζοδρόμους και αστικά φαράγγια. Ωστόσο, η αντίστοιχη ποσοτική και χωρικά αναλυτική διερεύνηση των υπαίθριων χώρων νοσοκομειακών εγκαταστάσεων παραμένει λιγότερο ανεπτυγμένη, ιδιαίτερα σε πυκνοδομημένα αστικά περιβάλλοντα με μεσογειακό κλίμα.

Οι υπαίθριοι χώροι των νοσοκομείων παρουσιάζουν ιδιαίτερες λειτουργικές και πληθυσμιακές απαιτήσεις, καθώς εξυπηρετούν λειτουργίες πρόσβασης, κίνησης, αναμονής και προσωρινής παραμονής και χρησιμοποιούνται από ασθενείς, ηλικιωμένους, παιδιά, συνοδούς, επισκέπτες και προσωπικό. Η θερμική τους ποιότητα συνδέεται, επομένως, όχι μόνο με την περιβαλλοντική άνεση, αλλά και με την προστασία της δημόσιας υγείας και τη λειτουργική ανθεκτικότητα των υγειονομικών εγκαταστάσεων.

Παρότι η σχέση μεταξύ θερμικής έκθεσης και επιπτώσεων στη δημόσια υγεία έχει τεκμηριωθεί εκτενώς, λιγότερο συστηματικά έχει διερευνηθεί η χωρική και χρονική κατανομή της θερμικής επιβάρυνσης στους υπαίθριους χώρους νοσοκομείων, καθώς και η συγκριτική απόκριση εναλλακτικών σεναρίων βιοκλιματικής παρέμβασης σε πραγματικά αστικά νοσοκομειακά περιβάλλοντα. Περιορισμένη παραμένει επίσης η συνδυαστική αξιολόγηση διαφορετικών προφίλ χρηστών υπό το ίδιο μικροκλιματικό πεδίο και η συμπληρωματική διερεύνηση της θερμικής επιβάρυνσης σε διαφορετικές κατακόρυφες στάθμες του νοσοκομειακού συγκροτήματος.

Οι βιοκλιματικοί δείκτες PET και UTCI χρησιμοποιούνται ευρέως για την αξιολόγηση των θερμικών συνθηκών σε υπαίθριους χώρους (Jendritzky et al., 2012; Matzarakis et al., 1999). Ωστόσο, σε πολλές εφαρμογές η ευαλωτότητα των χρηστών προσεγγίζεται κυρίως θεωρητικά ή επιδημιολογικά και δεν ενσωματώνεται ρητά στη μικροκλιματική αξιολόγηση μέσω διακριτής παραμετροποίησης των χαρακτηριστικών τους. Ειδικότερα, η συγκριτική εφαρμογή του PET σε προφίλ ενηλίκου, ηλικιωμένου και παιδιού υπό τις ίδιες μικροκλιματικές συνθήκες παραμένει περιορισμένη στις μελέτες υπαίθριων χώρων νοσοκομείων.

Το ερευνητικό κενό εντοπίζεται στην περιορισμένη διαθεσιμότητα χωρικά και χρονικά αναλυτικών μικροκλιματικών αξιολογήσεων υπαίθριων νοσοκομειακών χώρων σε πυκνοδομημένα μεσογειακά περιβάλλοντα, οι οποίες να συνδυάζουν τη σύγκριση σεναρίου αναφοράς και συνδυαστικού σεναρίου παρέμβασης, τη συνεξέταση μικροκλιματικών παραμέτρων και βιοκλιματικών δεικτών, τη διαφοροποιημένη αξιολόγηση επιλεγμένων προφίλ χρηστών μέσω του PET, τη συμπληρωματική χρήση του UTCI ως τυποποιημένου δείκτη θερμικού στρες, την κύρια χωρική και χρονική ανάλυση στη στάθμη πεζού και τη συμπληρωματική διερεύνηση στη στάθμη δώματος.

Το κύριο ερευνητικό ερώτημα της εργασίας διατυπώνεται ως εξής:

Σε ποιον βαθμό το συνδυαστικό σενάριο βιοκλιματικής παρέμβασης S3 μειώνει τη θερμική επιβάρυνση στους υπαίθριους χώρους του Γ.Ν.Α. «Αλεξάνδρα» σε σχέση με το σενάριο αναφοράς S1, όπως αυτή αποτιμάται μέσω της θερμοκρασίας αέρα (T_a), της μέσης ακτινοβολούμενης θερμοκρασίας (T_{mrt}) και των βιοκλιματικών δεικτών PET και UTCI;

Συμπληρωματικά διερευνάται:

Πώς διαφοροποιείται η υπολογιζόμενη θερμική επιβάρυνση μεταξύ των προφίλ ενηλίκου, ηλικιωμένου και παιδιού, όπως αποτυπώνεται μέσω του PET, στη στάθμη πεζού και, συμπληρωματικά, στη στάθμη δώματος;

Η εργασία επιδιώκει ειδικότερα να συμβάλει:

1. Στη χωρικά και χρονικά αναλυτική αξιολόγηση της θερμικής επιβάρυνσης σε υπαίθριο νοσοκομειακό περιβάλλον πυκνοδομημένης μεσογειακής πόλης, μέσω

- της σύγκρισης του σεναρίου αναφοράς S1 με το συνδυαστικό σενάριο παρέμβασης S3.
2. Στη διαφοροποιημένη ανθρωποκεντρική αξιολόγηση, μέσω του υπολογισμού του PET για τα προφίλ ενηλίκου, ηλικιωμένου και παιδιού υπό τις ίδιες μικροκλιματικές συνθήκες και της συμπληρωματικής χρήσης του UTCI ως τυποποιημένου δείκτη θερμικού στρες.
 3. Στη διεύρυνση της χωρικής αποτίμησης, μέσω της κύριας διερεύνησης στη στάθμη πεζού, της συμπληρωματικής σύγκρισης με τη στάθμη δώματος και της αναγνώρισης ζωνών διαφορετικής θερμικής επιβάρυνσης και αποτελεσματικότητας των παρεμβάσεων.
 4. Στη διαμόρφωση ενός προσαρμόσιμου μεθοδολογικού πλαισίου, το οποίο μπορεί να υποστηρίξει αντίστοιχες αξιολογήσεις υπαίθριων χώρων υγειονομικών εγκαταστάσεων, με την απαιτούμενη προσαρμογή στις τοπικές κλιματικές, μορφολογικές και λειτουργικές συνθήκες.

Με τον τρόπο αυτό, η εργασία επιδιώκει να συνδέσει τη θεωρητική τεκμηρίωση της υπαίθριας θερμικής άνεσης με τη μικροκλιματική προσομοίωση, τη διαφοροποιημένη αξιολόγηση των χρηστών και τις λειτουργικές απαιτήσεις των υποδομών υγείας. Η μεθοδολογική προσέγγιση παρουσιάζεται αναλυτικά στο Κεφάλαιο 2, ενώ η πραγματική συμβολή της εργασίας και τα όρια εφαρμογής της αποτιμώνται στην Ενότητα 5.2.2.

Κεφάλαιο 2. Μεθοδολογικό Πλαίσιο Αξιολόγησης Κλιματικής Προσαρμογής μέσω Μικροκλιματικής Προσομοίωσης

2.1 Περιοχή μελέτης και αστική ένταξη

Η περιοχή μελέτης αφορά τους υπαίθριους χώρους του Γενικού Νοσοκομείου Αθηνών «Αλεξάνδρα», το οποίο εντάσσεται σε πυκνοδομημένο τμήμα του κεντρικού αστικού ιστού της Αθήνας. Η επιλογή της περιοχής τεκμηριώνεται από τη συνύπαρξη υψηλής αστικής πυκνότητας, περιορισμένων διαθέσιμων υπαίθριων χώρων, αυξημένης κυκλοφοριακής και θερμικής επιβάρυνσης, καθώς και καθημερινής χρήσης από πληθυσμιακές ομάδες με διαφορετικό βαθμό θερμικής ευαλωτότητας.

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζονται η γεωγραφική, διοικητική και κλιματική τοποθέτηση της περιοχής μελέτης, καθώς και η χωρική, πολεοδομική και γεωμετρική τεκμηρίωση που αποτέλεσε τη βάση για τη διαμόρφωση του υπολογιστικού πεδίου και τη μικροκλιματική προσομοίωση. Η τεκμηρίωση βασίζεται σε γεωχωρικά δεδομένα, σε διαθέσιμα τεχνικά στοιχεία του Γ.Ν.Α. «Αλεξάνδρα» και σε υποστηρικτικά στοιχεία ευρύτερης πολεοδομικής ένταξης από την Πλατφόρμα Συμμετοχής του ΥΠΕΝ για το υπό εκπόνηση Τοπικό Πολεοδομικό Σχέδιο (ΤΠΣ) του Δήμου Αθηναίων. Τα στοιχεία του ΤΠΣ αξιοποιούνται αποκλειστικά επικουρικά, ως πλαίσιο κατανόησης της ευρύτερης χωρικής οργάνωσης (αναλυτικά στην §2.1.2).

2.1.1 Γεωγραφική, διοικητική και κλιματική τοποθέτηση

Η περιοχή μελέτης βρίσκεται εντός του Δήμου Αθηναίων, στην Περιφέρεια Αττικής και ειδικότερα στην Περιφερειακή Ενότητα Κεντρικού Τομέα Αθηνών. Το νοσοκομειακό συγκρότημα του Γ.Ν.Α. «Αλεξάνδρα» χωροθετείται σε κεντρικό τμήμα του πολεοδομικού συγκροτήματος της Αθήνας, πλησίον κύριων οδικών αξόνων, αστικών λειτουργιών και κοινόχρηστων χώρων μητροπολιτικής σημασίας. Η γεωγραφική του θέση αντιστοιχεί περίπου σε 37,98° Βόρειο Πλάτος και 23,76° Ανατολικό Μήκος.

Σύμφωνα με τα στοιχεία της Πλατφόρμας Συμμετοχής του ΥΠΕΝ για το υπό εκπόνηση ΤΠΣ του Δήμου Αθηναίων, ο Δήμος αποτελεί τον κεντρικό αστικό δήμο της πρωτεύουσας

και χαρακτηρίζεται από έντονη αστική και πολεοδομική πυκνότητα. Τα στοιχεία αυτά αξιοποιούνται στην παρούσα εργασία ως γενικό πλαίσιο χωρικής ένταξης της περιοχής μελέτης (Γενική Γραμματεία Χωρικού Σχεδιασμού και Αστικού Περιβάλλοντος, 2024).

Ως προς τα κλιματικά χαρακτηριστικά, η Αθήνα υπάγεται, σύμφωνα με την ταξινόμηση Köppen–Geiger, στην κλιματική ζώνη Csa, η οποία χαρακτηρίζεται από θερμά και ξηρά καλοκαίρια και ήπιους, υγρούς χειμώνες (Peel et al., 2007). Οι κλιματικές αυτές συνθήκες ευνοούν την εμφάνιση περιόδων έντονης θερινής θερμικής επιβάρυνσης, ιδιαίτερα σε πυκνοδομημένα αστικά περιβάλλοντα με υψηλό ποσοστό αδιαπέρατων επιφανειών.

Η επιλογή της συγκεκριμένης περιοχής παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον για τη διερεύνηση του αστικού μικροκλίματος, καθώς συνδυάζει χαρακτηριστικά πυκνού αστικού ιστού, αυξημένης κυκλοφοριακής επιβάρυνσης, υψηλής αναλογίας σκληρών επιφανειών και περιορισμένης φυτοκάλυψης. Παράλληλα, η νοσοκομειακή λειτουργία συνεπάγεται καθημερινή παρουσία ασθενών, επισκεπτών, συνοδών και εργαζομένων, μεταξύ των οποίων περιλαμβάνονται άτομα με αυξημένη ευαισθησία στις θερμικές συνθήκες, όπως ηλικιωμένοι, παιδιά και άτομα με επιβαρυνόμενη υγεία. Η μοντελοποίηση των ανθρωποκεντρικών προφίλ τεκμηριώνεται στις ενότητες 2.2.4 και 2.5.4

Λόγω της ιστορικής και λειτουργικής ταυτότητας του Γ.Ν.Α. «Αλεξάνδρα», το οποίο έχει μαιευτικό και γυναικολογικό χαρακτήρα, αναγνωρίζεται επίσης η πιθανή παρουσία εγκύων, λεχώνων και βρεφών σε συνοδευόμενη μετακίνηση στους υπαίθριους χώρους του νοσοκομείου. Οι ομάδες αυτές δεν προσομοιώνονται ως διακριτά ανθρωποκεντρικά προφίλ στην παρούσα εργασία, ωστόσο λαμβάνονται υπόψη στο ευρύτερο πλαίσιο της θερμικής ευαλωτότητας και της ειδικής λειτουργίας του νοσοκομειακού περιβάλλοντος.

Η ευρύτερη μητροπολιτική Αθήνα έχει τεκμηριωθεί ως ζώνη έντονης αστικής θερμικής νησίδας (Urban Heat Island – UHI / Αστική Θερμική Νησίδα), με σημαντικές θερμικές διαφοροποιήσεις μεταξύ κεντρικών και περιφερειακών περιοχών, ιδιαίτερα κατά τη διάρκεια θερινών καυσώνων (Founda & Santamouris, 2017; Santamouris, 2015). Η ένταξη του νοσοκομείου στον κεντρικό αστικό πυρήνα, σε συνδυασμό με τη λειτουργία του ως νοσοκομειακής υποδομής με αυξημένες λειτουργικές απαιτήσεις, καθιστά ιδιαίτερα σημαντική τη μικροκλιματική διερεύνηση των υπαίθριων χώρων του υπό συνθήκες αυξανόμενης θερμικής επιβάρυνσης.

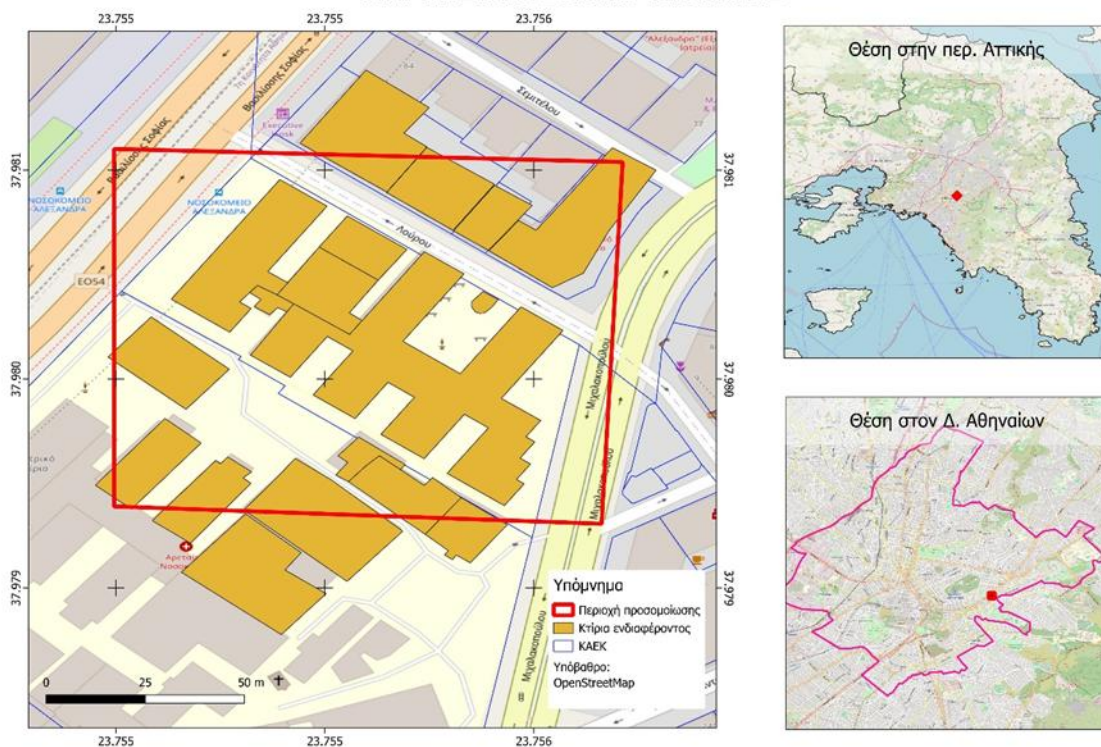
2.1.2 Χωρική, πολεοδομική και γεωμετρική τεκμηρίωση

Η χωρική τεκμηρίωση της περιοχής μελέτης πραγματοποιήθηκε με συνδυασμό γεωχωρικών δεδομένων ανοικτής πρόσβασης, επεξεργασίας σε περιβάλλον QGIS (Geographic Information System / Γεωγραφικό Σύστημα Πληροφοριών) και επικουρικού ελέγχου βάσει τεχνικών στοιχείων της Τεχνικής Υπηρεσίας του Γ.Ν.Α. «Αλεξάνδρα». Τα δεδομένα OpenStreetMap αποτέλεσαν τη βασική πηγή για τον χωρικό εντοπισμό της περιοχής μελέτης, την αναγνώριση του αστικού τετραγώνου, την αποτύπωση των βασικών κτιριακών όγκων και την οριοθέτηση του υπολογιστικού πεδίου (computational domain / υπολογιστικό πεδίο) της προσομοίωσης.

Τα πρωτογενή τεχνικά σχέδια της Τεχνικής Υπηρεσίας του νοσοκομείου δεν αποτέλεσαν τη βασική χαρτογραφική πηγή, αλλά χρησιμοποιήθηκαν επικουρικά, ως μέσο επαλήθευσης και ελέγχου της γεωμετρικής ακρίβειας των γεωχωρικών δεδομένων ανοικτής πρόσβασης. Ειδικότερα, αξιοποιήθηκαν διαθέσιμα τεχνικά στοιχεία, όπως το τοπογραφικό διάγραμμα και το διάγραμμα δόμησης, για την επιβεβαίωση των ορίων του οικοπέδου, των οδικών μετώπων, των βασικών κτιριακών όγκων και των κύριων πολεοδομικών χαρακτηριστικών, χωρίς την αυτούσια αναπαραγωγή των σχεδίων.

Συμπληρωματικά, τα στοιχεία του υπό εκπόνηση ΤΠΣ του Δήμου Αθηναίων, όπως παρουσιάζονται στην Πλατφόρμα Συμμετοχής του ΥΠΕΝ, αξιοποιούνται ως ευρύτερο πλαίσιο χωρικής και πολεοδομικής τεκμηρίωσης. Η προστιθέμενη αξία τους έγκειται στη σύνδεση του νοσοκομειακού συγκροτήματος με τα χαρακτηριστικά του κεντρικού αστικού ιστού της Αθήνας, όπως η πυκνή δόμηση, η περιορισμένη διαθεσιμότητα ελεύθερων χώρων, η κατανομή χρήσεων γης, η παρουσία αστικού πρασίνου και η ανάγκη ενσωμάτωσης κατευθύνσεων κλιματικής προσαρμογής στον χωρικό σχεδιασμό. Δεδομένου ότι το ΤΠΣ βρίσκεται σε στάδιο εκπόνησης και δεν αποτελεί ακόμη εγκεκριμένο θεσμικό κείμενο, τα στοιχεία του χρησιμοποιούνται μόνο επικουρικά και όχι ως δεσμευτικές ρυθμίσεις χρήσεων γης ή όρων δόμησης (Γενική Γραμματεία Χωρικού Σχεδιασμού και Αστικού Περιβάλλοντος, 2024).

ΧΑΡΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ



Σχήμα 2.1.2.1. Χωρικός εντοπισμός της περιοχής μελέτης. (α) Θέση της περιοχής μελέτης εντός της Περιφέρειας Αττικής, (β) θέση εντός του Δήμου Αθηναίων και (γ) οριοθέτηση του αστικού τετραγώνου και του υπολογιστικού πεδίου της προσομοίωσης.

Πηγή: Ιδία επεξεργασία σε περιβάλλον QGIS με δεδομένα OpenStreetMap και επικουρικό έλεγχο βάσει τεχνικών σχεδίων της Τεχνικής Υπηρεσίας του Γ.Ν.Α. «Αλεξάνδρα».

Η λειτουργική και πολεοδομική ταυτότητα του χώρου τεκμηριώνεται από τα στοιχεία του διαγράμματος δόμησης του νοσοκομειακού συγκροτήματος. Από τα στοιχεία αυτά προκύπτει ότι η κύρια χρήση αφορά εγκαταστάσεις υγείας και συναφείς δραστηριότητες, γεγονός που καθορίζει τη χωρική οργάνωση του συγκροτήματος και τη λειτουργία των υπαίθριων χώρων ως ζωνών κυκλοφορίας, αναμονής, σύντομης παραμονής και υποστηρικτικής χρήσης. Παράλληλα, οι ισχύοντες όροι δόμησης, όπως ο συντελεστής δόμησης, η κάλυψη και το μέγιστο επιτρεπόμενο ύψος, συμβάλλουν στη διαμόρφωση πυκνού και πολυώροφου κτιριακού συνόλου, με εκτεταμένες σκληρές επιφάνειες και περιορισμένη φυτοκάλυψη.

Πίνακας 2.1.2.1 Βασικά πολεοδομικά χαρακτηριστικά του νοσοκομειακού συγκροτήματος.

Εμβαδό οικοπέδου	6.445,42 τ.μ.
Θεσμικό πλαίσιο	Ρυμοτομία: ΦΕΚ 208Α/1956, Όροι δόμησης: ΓΟΚ 1973, ΦΕΚ 312Δ/1978, ΝΟΚ 2012, ΓΠΣ: ΦΕΚ 80Δ/1988
Κατηγορία κτιρίου	Ειδικό κτίριο (νοσοκομείο)
Κύρια χρήση	Εγκαταστάσεις υγείας -νοσοκομεία/κλινικές (ΦΕΚ 213Δ/1968)
Συντελεστής Δόμησης (Σ.Δ)	3,6 (ΦΕΚ 312Δ/1978)
Μέγιστη κάλυψη	60%
Μέγιστο ύψος	32 μ (ΝΟΚ)
Συντελεστής όγκου	19,80 (ειδικό κτίριο: 5,5 × Σ.Δ.)
Επιτρεπόμενη Δόμηση	23.203,51 τ.μ.
Επιτρεπόμενη κάλυψη	3.867,25 τ.μ.
Επιτρεπόμενος όγκος	127.619,32 κ.μ.

Πηγή: Ιδία επεξεργασία βάσει στοιχείων της Τεχνικής Υπηρεσίας του Γ.Ν.Α. «Αλεξάνδρα».

Με δεδομένη τη μέγιστη επιτρεπόμενη κάλυψη 60%, τουλάχιστον το 40% του οικοπέδου αποτελεί υποχρεωτικό ακάλυπτο χώρο. Σύμφωνα με τον ΝΟΚ (ν. 4067/2012, άρθρο 17, όπως ισχύει), τμήμα του υποχρεωτικού ακάλυπτου πρέπει να διατηρείται φυτεμένο και υδατοπερατό. Το θεσμικό αυτό πλαίσιο ενισχύει τη λογική της παρούσας εργασίας για ανάκτηση και βιοκλιματική αναβάθμιση των ακάλυπτων υπαίθριων χώρων.

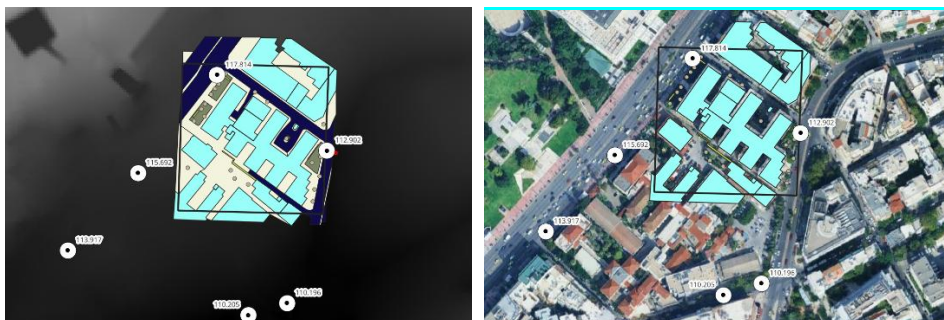
Επιπλέον, ο ΝΟΚ (ν. 4067/2012, όπως ισχύει) προβλέπει τη φύτευση των ακάλυπτων (άρθρο 17) και τη δημιουργία φυτεμένων δωμάτων (άρθρο 18), στοιχείο που συνδέει τις προτεινόμενες παρεμβάσεις του σεναρίου S3 με το ισχύον κανονιστικό πλαίσιο.

Το οικόπεδο εντάσσεται σε ζώνη κεντρικών αστικών λειτουργιών και το νοσοκομείο κατατάσσεται ως ειδικό κτίριο. Το ισχύον δεσμευτικό πλαίσιο ορίζεται από το ΓΠΣ (ΦΕΚ 80Δ/1988) και τα σχετικά διατάγματα χρήσεων.

Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω η περιοχή, εντάσσεται σε συνεχόμενο και πυκνό αστικό ιστό, με πολυώροφα κτίρια και υψηλό ποσοστό αδιαπέρατων επιφανειών, όπως ασφαλτος και σκυρόδεμα. Βρίσκεται σε άμεση γειτνίαση με κύριους οδικούς άξονες, όπως η Λεωφόρος Βασιλίσσης Σοφίας και η οδός Μιχαλακοπούλου, οι οποίοι χαρακτηρίζονται

από αυξημένο κυκλοφοριακό φόρτο και έντονη ανθρωπογενή δραστηριότητα (κυκλοφορία οχημάτων, εκπομπές ανθρωπογενούς θερμότητας, εμπορική και πεζή κίνηση). Οι συνθήκες αυτές αποτελούν σημαντικό χωρικό υπόβαθρο για τη διερεύνηση της θερμικής επιβάρυνσης σε επίπεδο υπαίθριου νοσοκομειακού χώρου.

Για την τεκμηρίωση της γενικής μορφολογίας της περιοχής πραγματοποιήθηκε επικουρικός έλεγχος υψομετρικών δεδομένων με επιτόπιες τοπογραφικές μετρήσεις, οι οποίες συγκρίθηκαν με τα διαθέσιμα υψομετρικά δεδομένα. Ο έλεγχος έδειξε περιορισμένες αποκλίσεις και ανέδειξε ήπιες αλλά σαφείς υψομετρικές διαφοροποιήσεις στο ευρύτερο οικοδομικό τετράγωνο. Ενδεικτικά, κατά μήκος της οδού Λούρου και μεταξύ των αξόνων της Λεωφόρου Βασιλίσσης Σοφίας και της οδού Μιχαλακοπούλου καταγράφεται υψομετρική μεταβολή της τάξης περίπου των 5 m, ενώ διαγώνια, από τη συμβολή Βασιλίσσης Σοφίας και Λούρου προς την περιοχή Μιχαλακοπούλου και Παπαδιαμαντοπούλου, η υψομετρική διαφορά προσεγγίζει τα 7 m. Τα στοιχεία αυτά αξιοποιήθηκαν για την κατανόηση της γενικής μορφολογίας του χώρου και τον έλεγχο της γεωμετρικής τεκμηρίωσης.



Σχήμα 2.1.2.2 Έλεγχος υψομετρικής τεκμηρίωσης της περιοχής μελέτης. (α) Επιτόπια υψομετρικά σημεία σε δορυφορικό υπόβαθρο και (β) αντιπαραβολή των σημείων με το διαθέσιμο ψηφιακό υψομετρικό υπόβαθρο.

Πηγή: Ιδία επεξεργασία βάσει επιτόπιων τοπογραφικών μετρήσεων και διαθέσιμων υψομετρικών δεδομένων.

Σύμφωνα με τα στοιχεία του ΤΠΣ, ο Δήμος Αθηναίων έχει κατά βάση πεδινό χαρακτήρα, με μέσο υψόμετρο περίπου 70 m και ήπιο γεωμορφολογικό ανάγλυφο. Το γενικό αυτό χαρακτηριστικό ενισχύει την παραδοχή ότι οι υψομετρικές διαφοροποιήσεις στην περιοχή μελέτης είναι υπαρκτές αλλά ήπιες.

Οπότε στο υπολογιστικό μοντέλο ENVI-met η περιοχή αποδόθηκε χωρίς μεταβαλλόμενο ψηφιακό μοντέλο εδάφους (DEM – Digital Elevation Model / Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους), καθώς η ανάλυση εστιάζει κυρίως στη συγκριτική επίδραση της αστικής γεωμετρίας, των υλικών επιφανειών, της βλάστησης και των παρεμβάσεων στα δώματα. Η παραδοχή αυτή αναφέρεται στους περιορισμούς της μεθοδολογίας (§4.3) και θεωρείται αποδεκτή για τους σκοπούς της παρούσας εργασίας, δεδομένου ότι η μικροκλιματική αξιολόγηση πραγματοποιείται σε περιορισμένη χωρική κλίμακα και σε επίπεδο υπαίθριου νοσοκομειακού χώρου. Επίσης σύμφωνα με τα στοιχεία του ΤΠΣ, ο Δήμος Αθηναίων έχει κατά βάση πεδινό χαρακτήρα, με μέσο υψόμετρο περίπου 70 m και ήπιο γεωμορφολογικό ανάγλυφο. Το γενικό αυτό χαρακτηριστικό ενισχύει την παραδοχή ότι οι υψομετρικές διαφοροποιήσεις στην περιοχή μελέτης είναι υπαρκτές αλλά ήπιες.

2.1.3 Μορφολογία αστικής χαράδρας και μικροκλιματικά χαρακτηριστικά

Το αστικό τετράγωνο στο οποίο εντάσσεται το νοσοκομειακό συγκρότημα χαρακτηρίζεται από συνεχή δόμηση και πολυώροφα κτίρια, τα οποία διαμορφώνουν υπαίθριους χώρους που περιβάλλονται από υψηλά κτιριακά μέτωπα, με αποτέλεσμα κατά θέσεις περιορισμένο άνοιγμα προς τον ουράνιο θόλο και χαρακτηριστικά αστικής χαράδρας (urban canyon / αστική χαράδρα).

Ο κεντρικός εσωτερικός υπαίθριος χώρος, στην περιοχή της εισόδου από την οδό Λούρου, περιβάλλεται από κτιριακά μέτωπα μεταβλητού ύψους, περίπου 19–24 m, ενώ το πλάτος του χώρου στην οδό Λούρου ανέρχεται περίπου στα 10 m. Η σχέση αυτή οδηγεί σε λόγο ύψους προς πλάτος (H/W ratio / λόγος ύψους προς πλάτος) της τάξης του 1,9–2,4.

Η γεωμετρία των αστικών χαραδρών, όπως προκύπτει για τους βασικούς οδικούς άξονες της περιοχής μελέτης, επηρεάζει την πρόσπτωση της ηλιακής ακτινοβολίας, τη σκίαση, τη ροή του αέρα και, συνολικά, τη διαμόρφωση του τοπικού μικροκλίματος.

Για τη Λεωφόρο Βασιλίσσης Σοφίας, με ενδεικτικό πλάτος περίπου 40 m και ύψος κτιρίων περίπου 26 m, ο H/W διαμορφώνεται περίπου σε 0,65, υποδηλώνοντας ένα σχετικά ανοικτό αστικό περιβάλλον. Για την οδό Μιχαλακοπούλου, με πλάτος περίπου 21 m, ο H/W ανέρχεται περίπου σε 1,2, αντιπροσωπεύοντας μια ενδιάμεση μορφή αστικής χαράδρας. Αντίθετα, η οδός Λούρου, που οριοθετεί τον προαναφερθέντα κεντρικό

υπαίθριο χώρο, εμφανίζει τον υψηλότερο λόγο, με H/W που προσεγγίζει ή υπερβαίνει το 2,0, χαρακτηριστικό στενής ή βαθιάς αστικής χαράδρας.

Οι παραπάνω τιμές του H/W έχουν ενδεικτικό χαρακτήρα και προκύπτουν από τη συσχέτιση των επικρατούντων πλατών οδών και των αντίστοιχων κτιριακών υψών στην περιοχή μελέτης. Δεν αποδίδουν απόλυτη γεωμετρική ομοιομορφία κατά μήκος κάθε άξονα, αλλά χρησιμοποιούνται ως μορφολογικός δείκτης για την ερμηνεία διαφοροποιήσεων στη σκίαση, στην ακτινοβολιακή έκθεση και στον αερισμό.

Σύμφωνα με τους Erell et al. (2014), η αύξηση του H/W μπορεί, υπό συνθήκες έντονης ηλιακής ακτινοβολίας, να μειώσει την ακτινοβολιακή επιβάρυνση των πεζών λόγω της αυξημένης σκίασης που παρέχουν τα κάθετα κτιριακά μέτωπα. Ωστόσο, η επίδραση αυτή δεν είναι μονοσήμαντη, καθώς η αυξημένη περίκλειση μπορεί ταυτόχρονα να περιορίσει τον αερισμό και τη νυχτερινή απώλεια θερμότητας. Επομένως, η γεωμετρία της οδού Λούρου, με H/W που προσεγγίζει ή υπερβαίνει το 2,0, ερμηνεύεται ως μορφολογική συνθήκη αυξημένης σκίασης, αλλά και πιθανής τοπικής μείωσης του αερισμού, στοιχείο που αξιοποιείται στη μεθοδολογική τεκμηρίωση της μικροκλιματικής διερεύνησης.

Οι παραπάνω γεωμετρικές αναλογίες συνδέονται με περιορισμένη ορατότητα προς τον ουράνιο θόλο και, κατά συνέπεια, με χαμηλότερες τιμές του συντελεστή θέασης ουρανού (Sky View Factor – SVF / συντελεστής θέασης ουρανού). Η μείωση του SVF επηρεάζει την ακτινοβολιακή ανταλλαγή, καθώς κατά τη διάρκεια της ημέρας μπορεί να ενισχύσει τη σκίαση και να περιορίσει την άμεση ηλιακή έκθεση, ενώ κατά τις απογευματινές και νυχτερινές ώρες μπορεί να μειώσει την απώλεια θερμότητας προς τον ουράνιο θόλο, περιορίζοντας τη νυχτερινή θερμική αποφόρτιση του χώρου (Oke, 1995). Για τον λόγο αυτό, ο SVF εξετάζεται ως σημαντική μορφολογική παράμετρος για την κατανόηση των τοπικών μικροκλιματικών διαφοροποιήσεων.

Ο άξονας της χαράδρας της οδού Λούρου ακολουθεί κατά κύριο λόγο διεύθυνση βορειοδυτικά–νοτιοανατολικά (ΒΔ–ΝΑ), γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε ασύμμετρη ημερήσια κατανομή της ηλιακής ακτινοβολίας. Οι αντικριστές όψεις εκτίθενται σε διαφορετικά ακτινοβολιακά φορτία κατά τη διάρκεια της ημέρας, ενώ κατά τη θερινή περίοδο η υψηλή ηλιακή γωνία μπορεί να επιτρέπει μεσημβρινή έκθεση τμημάτων του δαπέδου, σε συνδυασμό με εναλλασσόμενα μοτίβα σκίασης.

Πέραν της ακτινοβολίας, η γεωμετρία της χαράδρας επηρεάζει και τη ροή του αέρα (airflow / ροή αέρα). Στην εξεταζόμενη περίπτωση, η επικρατούσα διεύθυνση ανέμου λαμβάνεται ως προερχόμενη από βορειοανατολικά (ΒΑ), γεγονός που συνεπάγεται πλάγια έως σχεδόν εγκάρσια πρόσπτωση ως προς τον άξονα ΒΔ–ΝΑ της οδού Λούρου. Η συνθήκη αυτή μπορεί να συμβάλει στη δημιουργία σύνθετων πεδίων ροής, με τοπικούς στροβιλισμούς (vortices / δίνες), επιταχύνσεις ή περιοχές μειωμένου αερισμού στο εσωτερικό του χώρου.

Η συνδυασμένη επίδραση της ηλιακής ακτινοβολίας, της αστικής γεωμετρίας και της ροής του αέρα μπορεί να οδηγήσει σε χωρικές διαφοροποιήσεις των μικροκλιματικών συνθηκών ακόμη και σε μικρές αποστάσεις. Το στοιχείο αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό για την αξιολόγηση υπαίθριων χώρων που χρησιμοποιούνται από διαφορετικές ομάδες χρηστών, καθώς διαφοροποιήσεις στη σκίαση, στον αερισμό και στην ακτινοβολιακή έκθεση είναι δυνατόν να επηρεάσουν τη θερμική εμπειρία.

Με βάση τα παραπάνω, η γεωμετρία της αστικής χαράδρας, ο SVF, η ηλιακή ακτινοβολία και η ροή του αέρα αποτελούν βασικές παραμέτρους που λαμβάνονται υπόψη στη μικροκλιματική διερεύνηση της περιοχής μελέτης. Οι παράμετροι αυτές συνδέονται με τη μέση ακτινοβολούμενη θερμοκρασία T_{mrt} (Mean Radiant Temperature / Μέση Ακτινοβολούμενη Θερμοκρασία) και με τους δείκτες θερμικής άνεσης PET και UTCI, χωρίς όμως τα τελικά αποτελέσματα να προδικάζονται στο παρόν στάδιο της ανάλυσης.

Η παραπάνω μορφολογική τεκμηρίωση λειτουργεί ως βάση για τη διαμόρφωση και ερμηνεία των προσομοιώσεων ENVI-met 5.8.0 που παρουσιάζονται στα επόμενα κεφάλαια. Μέσω της προσομοίωσης διερευνάται κατά πόσο οι τοπικές γεωμετρικές και μικροκλιματικές συνθήκες επηρεάζουν τη χωρική κατανομή της θερμικής επιβάρυνσης στο σενάριο αναφοράς S1 και στο συνδυαστικό σενάριο παρέμβασης S3.

2.1.4 Θερμική επιβάρυνση και μικροκλιματική ευπάθεια της περιοχής

Η σχετική βιβλιογραφία για την Αθήνα έχει δείξει ότι η θερμική επιβάρυνση παρουσιάζει έντονη χωρική διαφοροποίηση, ιδίως κατά τη διάρκεια θερμών επεισοδίων. Η χαρτογράφηση επικινδυνότητας και κινδύνου καύσωνα για τον Ιούνιο του 2007 στην ευρύτερη περιοχή της Αθήνας αναδεικνύει ότι ο αστικός θερμικός κίνδυνος δεν αποτελεί ενιαίο φαινόμενο, αλλά διαφοροποιείται ανάλογα με τη χωρική δομή, τις χρήσεις γης και

τα χαρακτηριστικά του αστικού περιβάλλοντος (Keramitsoglou et al., 2013). Η διαπίστωση αυτή τεκμηριώνει την ανάγκη μικροκλιματικής διερεύνησης σε επίπεδο υπαίθριου χώρου και ειδικότερα σε υποδομές υγείας υψηλής λειτουργικής ευαισθησίας, όπως το Γ.Ν.Α. «Αλεξάνδρα».

Όπως αναφέρθηκε στην υποενότητα 2.1.1, η μητροπολιτική περιοχή της Αθήνας έχει τεκμηριωθεί ως ζώνη έντονης αστικής θερμικής νησίδας, με σημαντικές διαφοροποιήσεις μεταξύ κεντρικών και περιφερειακών περιοχών, ιδιαίτερα κατά τη θερινή περίοδο. Η θερμική αυτή επιβάρυνση συνδέεται με παράγοντες όπως η πυκνή δόμηση, η αυξημένη παρουσία αδιαπέρατων επιφανειών, η περιορισμένη φυτοκάλυψη και τα μορφολογικά χαρακτηριστικά του αστικού ιστού.

Δορυφορικές παρατηρήσεις θερμοκρασίας επιφάνειας εδάφους (Land Surface Temperature – LST / Θερμοκρασία Επιφάνειας Εδάφους), βασισμένες σε δεδομένα θερμικών καναλιών του αισθητήρα MODIS, καταδεικνύουν ότι ο πυκνοδομημένος αστικός πυρήνας της Αθήνας εμφανίζει συστηματικά υψηλότερες επιφανειακές θερμοκρασίες σε σύγκριση με περιφερειακές και ημιφυσικές ζώνες, ιδιαίτερα σε περιοχές με υψηλή αναλογία αδιαπέρατων επιφανειών και περιορισμένη φυτοκάλυψη (Keramitsoglou et al., 2011). Παρότι η LST δεν ταυτίζεται με τη θερμοκρασία αέρα (T_a – Potential Air Temperature / Δυναμική Θερμοκρασία Αέρα), χρησιμοποιείται ευρέως ως δείκτης της χωρικής κατανομής της θερμικής επιβάρυνσης σε αστική κλίμακα. Για τον λόγο αυτό, η ένταξη της περιοχής μελέτης στον πυκνοδομημένο αστικό ιστό καθιστά σκόπιμη τη διερεύνηση των τοπικών μικροκλιματικών συνθηκών υπό συνθήκες θερινής αιχμής.

Σε θεσμικό επίπεδο, το Περιφερειακό Σχέδιο Προσαρμογής στην Κλιματική Αλλαγή (ΠεΣΠΚΑ) της Περιφέρειας Αττικής (Περιφέρεια Αττικής, 2022) αναγνωρίζει την Αθήνα ως περιοχή αυξημένης κλιματικής ευπάθειας λόγω της εντεινόμενης συχνότητας και διάρκειας των καυσώνων, επισημαίνοντας την ανάγκη προσαρμογής κρίσιμων αστικών υποδομών, συμπεριλαμβανομένων των υποδομών υγείας.

Η τεκμηριωμένη θερμική ευπάθεια της μητροπολιτικής Αθήνας, σε συνδυασμό με τη λειτουργία της περιοχής μελέτης ως υποδομής υγείας υψηλής λειτουργικής ευαισθησίας, καθιστά αναγκαία τη διερεύνηση του υπαίθριου χώρου υπό συνθήκες αυξημένης θερμικής επιβάρυνσης. Υπό το πρίσμα αυτό, η ανάλυση εστιάζει στη σχέση μεταξύ αστικής

μορφολογίας, ακτινοβολιακού ισοζυγίου και θερμικής εμπειρίας, με ιδιαίτερη έμφαση στη φυσιολογική διάσταση της θερμικής καταπόνησης.

Η αστική μορφολογία μπορεί να επηρεάζει τη θερμική εμπειρία κυρίως μέσω της τροποποίησης του ακτινοβολιακού ισοζυγίου και της μέσης ακτινοβολούμενης θερμοκρασίας T_{mrt} . Παράμετροι όπως ο H/W , ο SVF, ο προσανατολισμός, η σκίαση, η φυτοκάλυψη και τα υλικά επιφανείας δεν λειτουργούν μεμονωμένα, αλλά συνδιαμορφώνουν τις συνθήκες ηλιακής πρόσπτωσης, ανακλάσεων, σκίασης και θερμικής αποθήκευσης.

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, η σχέση αυτή αξιοποιείται ως εννοιολογικό πλαίσιο για την ερμηνεία των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων ENVI-met 5.8.0. Το ENVI-met επιτρέπει τη μικροκλιματική διερεύνηση της αλληλεπίδρασης μεταξύ αστικής γεωμετρίας, επιφανειακών υλικών, βλάστησης και ακτινοβολιακών διεργασιών, αποδίδοντας μεγέθη όπως η θερμοκρασία αέρα, η μέση ακτινοβολούμενη θερμοκρασία και οι δείκτες θερμικής άνεσης PET και UTCI. Με τον τρόπο αυτό, η αστική μορφολογία δεν αντιμετωπίζεται ως μεμονωμένος παράγοντας, αλλά ως μέρος ενός σύνθετου μικροκλιματικού συστήματος, του οποίου οι επιπτώσεις αξιολογούνται συγκριτικά στα σενάρια S1 και S3 και στα σημεία ανάλυσης PO1 και PO2 (ορίζονται στην Ενότητα 2.8.2).

2.2 Μεθοδολογική Προσέγγιση

Η μεθοδολογική επιλογή της μικροκλιματικής προσομοίωσης συνδέεται με την ανάγκη χωρικής τεκμηρίωσης της θερμικής έκθεσης σε επίπεδο ανθρώπινης κλίμακας στους υπαίθριους χώρους του Γ.Ν.Α. «Αλεξάνδρα». Οι χάρτες PET, UTCI, T_{mrt} και θερμοκρασίας αέρα δεν αντιμετωπίζονται μόνο ως απεικονίσεις μικροκλιματικών μεταβλητών, αλλά ως εργαλεία εντοπισμού ζωνών αυξημένης θερμικής προτεραιότητας. Η ανάλυση εστιάζει σε δύο αντιπροσωπευτικά σημεία ελέγχου —το PO1 στη στάθμη του πεζού ($z = 1,40$ m) και το PO2 στη στάθμη του δώματος ($z \approx 15$ m)— ώστε να αποτυπωθεί τόσο η οριζόντια όσο και η κατακόρυφη διάσταση της θερμικής επιβάρυνσης.

Η επιλογή του σημείου PO2 στη στάθμη του δώματος ($z \approx 15$ m) συνδέεται με την υφιστάμενη περιορισμένη χρήση της συγκεκριμένης στάθμης και με τη διερεύνηση της δυνητικής μελλοντικής αξιοποίησής της ως χώρου χρήσης, υπό κατάλληλες λειτουργικές,

τεχνικές και μικροκλιματικές προϋποθέσεις. Σήμερα, τμήμα του δώματος αξιοποιείται μέσω στεγασμένου διαδρόμου ελαφράς κατασκευής με υαλοστάσια, ο οποίος λειτουργεί ως σύνδεση μεταξύ δύο κτιριακών ενότητων στην ίδια στάθμη ορόφου. Σημειώνεται ότι η υφιστάμενη κατασκευή δεν αποτυπώνεται στο μοντέλο προσομοίωσης. Η ανάλυση του PO2 αφορά τη μικροκλιματική απόκριση της στάθμης του δώματος και τη δυνητική επίδραση των πράσινων δωματίων, ανεξάρτητα από την τρέχουσα κατασκευαστική διαμόρφωση. Με τον τρόπο αυτό, η σύγκριση S3–S1 επιτρέπει την αξιολόγηση του βαθμού στον οποίο οι προτεινόμενες παρεμβάσεις μειώνουν τη θερμική έκθεση των χρηστών και ενισχύουν τη λειτουργική ανθεκτικότητα του υπαίθριου νοσοκομειακού χώρου.

Η παρούσα εργασία βασίζεται σε μια προσέγγιση scenario-based bioclimatic evaluation (αξιολόγηση βάσει σεναρίων βιοκλιματικού σχεδιασμού), με στόχο τη διερεύνηση της θερμικής συμπεριφοράς των υπαίθριων χώρων του νοσοκομείου υπό διαφορετικές συνθήκες διαμόρφωσης και παρέμβασης. Με βάση την παραπάνω λογική, διαμορφώνονται δύο σενάρια προσομοίωσης: (α) η κατάσταση υπό προϋποθέσεις της ενότητας 2.2.5, η οποία λειτουργεί ως σενάριο αναφοράς και χαρακτηρίζεται ως S1, και (β) το συνδυαστικό σενάριο βιοκλιματικής αναβάθμισης (S3), το οποίο ενσωματώνει αλλαγές υλικών επιφανειών, ενίσχυση της φύτευσης, προσθήκη στοιχείων σκίασης και παρεμβάσεις στα δώματα. Η αναλυτική περιγραφή των σεναρίων παρουσιάζεται στην Ενότητα 2.7.

Σημειώνεται ότι η αρίθμηση των σεναρίων (S1, S3) ακολουθεί τον αρχικό ερευνητικό σχεδιασμό.

Η επιλογή της παραπάνω δομής βασίζεται στην παραδοχή ότι οι βιοκλιματικές παρεμβάσεις μπορούν να λειτουργήσουν τόσο μεμονωμένα όσο και συνεργιστικά (synergistic effects / συνεργιστικές επιδράσεις). Στην παρούσα εργασία αξιοποιείται η συνεργιστική τους δράση μέσω του συνδυαστικού σεναρίου, επηρεάζοντας το θερμικό ισοζύγιο, τη μέση ακτινοβολούμενη θερμοκρασία και, τελικά, τη θερμική άνεση των χρηστών. Η προσέγγιση αυτή θεωρείται ιδιαίτερα κατάλληλη για χώρους υγείας, όπου οι χρήστες –και ιδιαίτερα οι ευάλωτες ομάδες– εκτίθενται στο συνολικό θερμικό περιβάλλον, ενώ παράλληλα είναι αναγκαία η τεκμηριωμένη αξιολόγηση των παρεμβάσεων ως προς

την αποτελεσματικότητα και την εφαρμοσιμότητά τους. Για τον λόγο αυτό, η αξιολόγηση βασίζεται στους δείκτες θερμικής άνεσης PET και UTCI για τη γενική αποτίμηση του μικροκλίματος του χώρου, με εφαρμογή των μεσογειακών κλιμάκων ταξινόμησης (Pantavou et al., 2014; Tseliou & Tsiros, 2016) ενώ για τη διερεύνηση της διαφοροποιημένης θερμικής επιβάρυνσης των ευάλωτων ομάδων χρησιμοποιείται αποκλειστικά ο δείκτης PET μέσω του εργαλείου Simulate Thermal Comfort (BIO-met), με τρία ανθρωποκεντρικά προφίλ αναφοράς (ενήλικας, ηλικιωμένος, παιδί).

Η μελέτη εστιάζει στην αξιολόγηση της μικροκλιματικής απόκρισης του αστικού χώρου υπό συνθήκες θερινής αιχμής, με ημέρα αναφοράς την 25η Ιουλίου 2025, και όχι στην πρόγνωση μετεωρολογικών φαινομένων σε μακροκλιματική κλίμακα, ακολουθώντας συγκριτική λογική μεταξύ των δύο τελικών σεναρίων, με στόχο την ποσοτική αποτίμηση της θερμικής επιβάρυνσης και τη διερεύνηση της αποτελεσματικότητας της προτεινόμενης συνδυαστικής στρατηγικής προσαρμογής. Η κεντρική ερευνητική υπόθεση είναι ότι στοχευμένες παρεμβάσεις, όπως η τροποποίηση των υλικών επιφανειών, η ενίσχυση της φύτευσης και της σκίασης, η εφαρμογή πράσινων στεγών και ο συνδυασμός των παραπάνω στρατηγικών, δύνανται να μειώσουν τη μέση ακτινοβολούμενη θερμοκρασία T_{mrt} και να βελτιώσουν τους δείκτες θερμικής άνεσης κατά τις ώρες θερινής αιχμής.

Η μεθοδολογική αυτή διάρθρωση ανταποκρίνεται στη λογική της αστικής κλιματικής προσαρμογής, με έμφαση στη μείωση της έκθεσης ευάλωτων ομάδων σε συνθήκες θερμικής αιχμής, και επιτρέπει την τεκμηριωμένη αξιολόγηση της συνεργιστικής επίδρασης των συνδυασμένων παρεμβάσεων σε σχέση με το σενάριο αναφοράς.

2.2.1 Επιλογή εργαλείου προσομοίωσης

Για την προσομοίωση των μικροκλιματικών συνθηκών χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό ENVI-met 5.8.0, ένα τρισδιάστατο αριθμητικό και ντετερμινιστικό μοντέλο μικροκλίματος, το οποίο επιλύει συζευγμένα τις εξισώσεις ροής αέρα, μεταφοράς θερμότητας, ακτινοβολιακής ανταλλαγής και αλληλεπίδρασης εδάφους–βλάστησης σε μικροκλιματική κλίμακα (Bruse & Fleer, 1998). Ως ντετερμινιστικό μοντέλο, για ίδιες αρχικές και οριακές συνθήκες, ίδια γεωμετρία και ίδιες παραμέτρους εισόδου παράγει αναπαραγώγιμα αποτελέσματα. Η ιδιότητα αυτή το καθιστά κατάλληλο για τη συγκριτική αξιολόγηση εναλλακτικών σεναρίων σχεδιασμού, όπως η σύγκριση των S1 και S3 στην

παρούσα εργασία. Ωστόσο, τα αποτελέσματά του εξαρτώνται από την ακρίβεια των δεδομένων εισόδου και πρέπει να ερμηνεύονται ως τεκμηριωμένη μικροκλιματική προσομοίωση και όχι ως απόλυτη πρόβλεψη των πραγματικών συνθηκών.

Το μοντέλο έχει αξιολογηθεί εκτενώς σε αστικά περιβάλλοντα μεσογειακών και ευρωπαϊκών πόλεων και θεωρείται κατάλληλο για την ανάλυση της επίδρασης μορφολογικών παραμέτρων, όπως ο H/W, ο SVF και η σκίαση, στη θερμική άνεση υπαίθριων χώρων (Toparlar et al., 2017; Tsoka et al., 2018). Η επιλογή του ENVI-met βασίζεται ειδικότερα στην ικανότητά του να προσομοιώνει με υψηλή χωρική και χρονική ανάλυση τη μέση ακτινοβολούμενη θερμοκρασία T_{mrt} , η οποία αποτελεί κρίσιμη μεταβλητή για τον υπολογισμό δεικτών θερμικής άνεσης, όπως ο PET και ο UTCI. Παράλληλα, το λογισμικό επιτρέπει τη δυναμική προσομοίωση της αλληλεπίδρασης μεταξύ αστικών επιφανειών, βλάστησης και ατμόσφαιρας, καθιστώντας το ιδιαίτερα κατάλληλο για την αξιολόγηση βιοκλιματικών παρεμβάσεων σε σύνθετα αστικά περιβάλλοντα.

Ο υπολογισμός των δεικτών θερμικής άνεσης (PET, UTCI) πραγματοποιήθηκε μέσω της μονάδας μετα-επεξεργασίας BIO-met. Η χαρτογραφική απόδοση και η εξαγωγή των χωρικών αποτελεσμάτων έγιναν με το εργαλείο Leonardo του ENVI-met, το οποίο αντλούσε τα δεδομένα από τα αρχεία εξόδου του ENVI-met για τις βασικές μικροκλιματικές μεταβλητές (π.χ. T_a , T_{mrt}) και από τα αρχεία του BIO-met για τους δείκτες θερμικής άνεσης (PET, UTCI), όπου απαιτούνταν.

Πέραν της βασικής λειτουργίας του, το ENVI-met συνοδεύεται και από επίσημο εκπαιδευτικό υλικό εφαρμογής, όπως το παράδειγμα ENVI-met Playground, στο οποίο παρουσιάζεται ενδεικτικά η συγκριτική διερεύνηση ενός σεναρίου αναφοράς και ενός βελτιστοποιημένου σεναρίου παρεμβάσεων. Το υλικό αυτό δεν αξιοποιείται ως πρωτογενής επιστημονική τεκμηρίωση, αλλά λειτούργησε επικουρικά ως μέσο εξοικείωσης με τη λογική οργάνωσης των σεναρίων, την ανάγνωση των χαρτογραφικών εξόδων και την ερμηνεία βασικών παραμέτρων του αστικού μικροκλίματος (σκίαση, βλάστηση, υλικά επιφανειών, αερισμός), χωρίς να υποκαθιστά τη βιβλιογραφική τεκμηρίωση ή τα ευρήματα της παρούσας έρευνας.

2.2.2 Επιλογή πεδίου και υπολογιστικού πλέγματος

Για λόγους γεωμετρικής αξιοπιστίας και συγκρισιμότητας μεταξύ των σεναρίων, το τελικό μοντέλο προσομοιώθηκε χωρίς ενεργό ανάγλυφο, θεωρώντας το έδαφος πρακτικά επίπεδο.

Το υπολογιστικό πεδίο (*computational domain*) ορίστηκε ώστε να περιλαμβάνει το σύνολο της κεντρικής αυλής του νοσοκομείου και τον άμεσο περιβάλλοντα αστικό ιστό, λαμβάνοντας υπόψη τη γεωμετρική επίδραση των γειτονικών κτιριακών όγκων στη σκίαση, στην ακτινοβολιακή ανταλλαγή και στη ροή του αέρα. Η επιλογή αυτή συνάδει με τη λειτουργία του ENVI-met ως τρισδιάστατου μικροκλιματικού μοντέλου, το οποίο προσομοιώνει τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ αστικών επιφανειών, βλάστησης και ατμόσφαιρας (Bruse & Fleer, 1998). Η προσομοίωση πραγματοποιήθηκε σε πεδίο διαστάσεων περίπου 132×130 m, το οποίο καλύπτει τους υπαίθριους χώρους του νοσοκομείου και το άμεσο δομημένο περιβάλλον.

Η κλίμακα αυτή επιλέχθηκε ώστε να αποτυπώνει επαρκώς τα βασικά μορφολογικά χαρακτηριστικά του χώρου, όπως ο λόγος ύψους προς πλάτος H/W, ο προσανατολισμός, η επίδραση των γειτονικών κτιριακών όγκων και ο περιορισμός του συντελεστή θέασης ουρανού SVF. Οι παράμετροι αυτές επηρεάζουν τη σκίαση, την ακτινοβολιακή έκθεση, τη μέση ακτινοβολούμενη θερμοκρασία και τον τοπικό αερισμό και, επομένως, είναι κρίσιμες για την ερμηνεία των μικροκλιματικών διαφοροποιήσεων στην κλίμακα του αστικού τετραγώνου (Oke, 1995). Παράλληλα, η έκταση του πεδίου διατηρεί το υπολογιστικό κόστος σε διαχειρίσιμο επίπεδο για τις ανάγκες της συγκριτικής προσομοίωσης.

Η γεωμετρία του μοντέλου βασίστηκε σε επεξεργασμένα γεωχωρικά δεδομένα στο Ελληνικό Γεωδαιτικό Σύστημα Αναφοράς 1987 (ΕΓΣΑ '87 / EPSG:2100), τα οποία συμπληρώθηκαν και επαληθεύτηκαν με επίσημα τεχνικά στοιχεία της Τεχνικής Υπηρεσίας του Γενικού Νοσοκομείου Αθηνών «Αλεξάνδρα», όπως το τοπογραφικό διάγραμμα και το διάγραμμα δόμησης της τεχνικής Υπηρεσίας του Γενικού Νοσοκομείου Αθηνών «Αλεξάνδρα». Η αξιοποίηση των στοιχείων αυτών μείωσε τη γεωμετρική αβεβαιότητα του μοντέλου και βελτίωσε την αξιοπιστία της αναπαράστασης του χώρου. Στο πλαίσιο της παρούσας μελέτης, η ανάλυση επικεντρώνεται στη θερμική άνεση και στη θερμική καταπόνηση και δεν περιλαμβάνει προσομοίωση ατμοσφαιρικών ρύπων. Η

αξιολόγηση βασίζεται στις μικροκλιματικές μεταβλητές που επηρεάζουν άμεσα τη θερμική κατάσταση των χρηστών. Οι τεχνικές ρυθμίσεις του υπολογιστικού πλέγματος και η αναλυτική παραμετροποίηση του μοντέλου παρουσιάζονται στην Ενότητα 2.4.1.

2.2.3 Δείκτες και παράμετροι μικροκλιματικής αξιολόγησης

Η αξιολόγηση της θερμικής άνεσης και της θερμικής καταπόνησης βασίζεται στους βιοκλιματικούς δείκτες PET και UTCI, με τη μέση ακτινοβολούμενη θερμοκρασία T_{mrt} και βασικές μικροκλιματικές και μορφολογικές παραμέτρους

Οι PET και UTCI αποτελούν τους κύριους δείκτες αξιολόγησης, ενώ η T_{mrt} αξιοποιείται για την ερμηνεία της ακτινοβολιακής επιβάρυνσης. Ο συντελεστής θέασης ουρανού SVF λαμβάνεται υπόψη ως μορφολογική παράμετρος για την ερμηνεία των διαφοροποιήσεων της σκίασης και της ακτινοβολιακής έκθεσης (Bröde et al., 2012; Höppe, 1999b).

Οι δείκτες PET και UTCI υπολογίζονται μέσω του εργαλείου BIO-met με βάση τα μικροκλιματικά πεδία της προσομοίωσης ENVI-met και, ειδικότερα, τη θερμοκρασία αέρα, τη σχετική υγρασία, την ταχύτητα του ανέμου και τη μέση ακτινοβολούμενη θερμοκρασία T_{mrt} . Η παράλληλη εφαρμογή τους επιτρέπει τη συνεξέταση δύο διαφορετικών θερμοφυσιολογικών προσεγγίσεων, χωρίς να προϋποθέτει άμεση αριθμητική αντιστοίχιση μεταξύ των τιμών τους (Bröde et al., 2012; Bruse, 2025; Höppe, 1999b).

Ο PET χρησιμοποιείται τόσο για τη χωρική και χρονική αξιολόγηση της θερμικής κατάστασης όσο και για τη διαφοροποιημένη εξέταση των επιλεγμένων προφίλ χρηστών. Η δυνατότητα παραμετροποίησης των χαρακτηριστικών του ατόμου αναφοράς στο BIO-met καθιστά τον PET κατάλληλο για τη συγκριτική αξιολόγηση του ενήλικα, του ηλικιωμένου και του παιδιού. Αντίθετα, ο UTCI υπολογίζεται βάσει τυποποιημένου ατόμου αναφοράς και αξιοποιείται για τη γενική αποτίμηση του επιπέδου θερμικής καταπόνησης του χώρου, χωρίς διαφοροποίηση ανάλογα με τα επιλεγμένα προσωπικά χαρακτηριστικά του χρήστη (Bröde et al., 2012; Bruse, 2025; Höppe, 1999b) .

Για την ταξινόμηση των τιμών υιοθετούνται μεσογειακά προσαρμοσμένες κλίμακες θερμικής αίσθησης και θερμικού στρες. Για τον PET εφαρμόζεται η μεσογειακή κλίμακα (Pantavou et al., 2014), ενώ για τον UTCI εφαρμόζεται η μεσογειακά προσαρμοσμένη κλίμακα των Pantavou et al. (2013), η οποία χρησιμοποιήθηκε και στη μικροκλιματική

εφαρμογή των Tseliou και Tsiros (2016), όπως παρουσιάζονται στους Πίνακες 2.8.1.1 και 2.8.1.2. Η επιλογή τους αποσκοπεί στην πληρέστερη αποτύπωση της θερμικής προσαρμογής και της θερμοαισθητικής απόκρισης πληθυσμών σε θερμά μεσογειακά αστικά περιβάλλοντα.

Οι δείκτες και οι μικροκλιματικές παράμετροι χρησιμοποιούνται για τη συγκριτική αποτίμηση του σεναρίου αναφοράς S1 και του συνδυαστικού σεναρίου παρέμβασης S3. Η αξιολόγηση βασίζεται στις χωρικές και χρονικές μεταβολές των PET, UTCI και Tmrt, καθώς και στην ερμηνεία των μικροκλιματικών μηχανισμών που διαμορφώνουν τις παρατηρούμενες διαφοροποιήσεις. Η αναλυτική παρουσίαση των προσωπικών παραμέτρων και των προφίλ ατόμων αναφοράς που χρησιμοποιούνται στον υπολογισμό του PET ακολουθεί στην Ενότητα 2.2.4.

Η επίσημη τεκμηρίωση του BIO-met αναφέρει ότι ο PET ανταποκρίνεται στις διαθέσιμες προσωπικές ρυθμίσεις, ενώ στην εφαρμογή του UTCI οι αντίστοιχες ρυθμίσεις δεν μεταβάλλουν τον υπολογισμό του δείκτη. Η αρχική επιστημονική θεμελίωση του PET προέρχεται από τον Höppe, ενώ η επιχειρησιακή διαδικασία του UTCI αναπτύχθηκε στο αντίστοιχο θερμοφυσιολογικό πλαίσιο.

2.2.4 Ευάλωτες ομάδες και ανθρωποκεντρικά προφίλ αξιολόγησης

Η αξιολόγηση της θερμικής άνεσης στην παρούσα εργασία δεν περιορίζεται σε έναν τυποποιημένο μέσο χρήστη, αλλά λαμβάνει υπόψη τη διαφοροποιημένη θερμική ευαλωτότητα συγκεκριμένων κατηγοριών χρηστών. Η επιλογή αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική στους υπαίθριους χώρους υγειονομικών υποδομών, καθώς τα παιδιά και οι ηλικιωμένοι συγκαταλέγονται στις ομάδες που παρουσιάζουν αυξημένη ευαισθησία κατά τη διάρκεια επεισοδίων έντονης ζέστης (United Nations Population Division, 2025).

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας εξετάζονται δύο ευάλωτες ομάδες, το παιδί και ο ηλικιωμένος χρήστης, σε σύγκριση με το προφίλ αναφοράς του ενήλικα. Η κατηγορία των ασθενών δεν εξετάζεται ως ενιαίο ανθρωποκεντρικό προφίλ, λόγω της έντονης ετερογένειάς της ως προς την ηλικία, τη φυσιολογική κατάσταση, την κινητικότητα, τη φαρμακευτική αγωγή και τη θερμορρυθμιστική ικανότητα. Η ετερογένεια αυτή δεν μπορεί να αποδοθεί επαρκώς μέσω ενός ενιαίου τυποποιημένου προφίλ BIO-met.

Για τη διαφοροποιημένη αξιολόγηση των προφίλ χρησιμοποιείται ο δείκτης PET μέσω του εργαλείου *Simulate Thermal Comfort* του BIO-met. Ο PET αποτελεί θερμοφυσιολογικό δείκτη που βασίζεται στο ενεργειακό ισοζύγιο του ανθρώπινου σώματος, ενώ στο BIO-met επιτρέπει την παραμετροποίηση χαρακτηριστικών του ατόμου αναφοράς, όπως η ηλικία, το φύλο, το ύψος, το βάρος, η ένδυση και η μεταβολική δραστηριότητα (Bruse, 2025; Höppe, 1999b). Αντίθετα, ο UTCI δεν χρησιμοποιείται για τη σύγκριση των ανθρωποκεντρικών προφίλ, καθώς στο BIO-met υπολογίζεται βάσει τυποποιημένου ατόμου αναφοράς και δεν διαφοροποιείται ανάλογα με τις επιλεγμένες προσωπικές παραμέτρους (Bruse, 2025).

Για λόγους συγκρισιμότητας χρησιμοποιήθηκαν τα ακόλουθα ενσωματωμένα προφίλ του BIO-met:

Πίνακας 2.2.4 Προφίλ ατόμων αναφοράς για τον υπολογισμό του PET στο BIO-met

Προφίλ BIO-met	Αντιστοίχιση στην παρούσα εργασία	Ερμηνευτική χρήση
Default Male, Summer Clothing	Προφίλ Ενήλικα – προφίλ αναφοράς	Βασική συγκριτική αποτίμηση του PET
Old Person, male (80 y), Summer Clothing	Προφίλ ηλικιωμένου χρήστη	Προσεγγιστική αξιολόγηση της θερμικής επιβάρυνσης ηλικιωμένου προφίλ
Child, male (8 y), Summer Clothing	Προφίλ παιδιού	Προσεγγιστική αξιολόγηση της θερμικής επιβάρυνσης παιδικού προφίλ

Πηγή: Ενσωματωμένα προφίλ BIO-met, ENVI-met 5.8.0.

Τα προφίλ χρησιμοποιούνται ως τυποποιημένα σενάρια ατόμων αναφοράς και όχι ως εξατομικευμένες αναπαραστάσεις πραγματικών χρηστών. Το φύλο διατηρείται σταθερό ως άρρεν και στα τρία προφίλ, ώστε να περιορίζεται μία πρόσθετη πηγή διαφοροποίησης. Ωστόσο, οι διαφορές των τιμών PET δεν αποδίδονται αποκλειστικά στην ηλικία, αλλά στο σύνολο των ανθρωπομετρικών και φυσιολογικών χαρακτηριστικών που ενσωματώνει κάθε προκαθορισμένο προφίλ του BIO-met (Bruse, 2025).

Για όλα τα προφίλ χρησιμοποιείται το ίδιο μικροκλιματικό πεδίο. Κατά συνέπεια, η θερμοκρασία αέρα, η σχετική υγρασία, η ταχύτητα του ανέμου και η T_{mrt} παραμένουν κοινές για κάθε εξεταζόμενο χρονικό σημείο και θέση. Οι διαφοροποιήσεις των τιμών PET

προκύπτουν από τα χαρακτηριστικά των προφίλ ατόμων αναφοράς και όχι από διαφορετικές περιβαλλοντικές συνθήκες.

Η προσέγγιση αυτή επιτρέπει τη συγκριτική εξέταση της θερμικής επιβάρυνσης του παιδιού και του ηλικιωμένου σε σχέση με τον ενήλικα χρήστη αναφοράς και ενισχύει τον ανθρωποκεντρικό χαρακτήρα της ανάλυσης. Η αναλυτική θεωρητική τεκμηρίωση της θερμικής ευαλωτότητας των παιδιών και των ηλικιωμένων και η σύνδεσή της με τους υπαίθριους χώρους υγειονομικών υποδομών παρουσιάζονται στην Ενότητα 2.5.

2.2.5 Παραδοχές γεωμετρικής αναπαράστασης και όρια ερμηνείας του μοντέλου

Η παρούσα μελέτη βασίζεται σε ορισμένες μεθοδολογικές παραδοχές και σε συγκεκριμένα όρια ερμηνείας των αποτελεσμάτων, τα οποία κρίθηκαν αναγκαία για τη συγκρότηση ενός συνεκτικού και συγκρίσιμου μοντέλου μικροκλιματικής προσομοίωσης. Οι παραδοχές αυτές δεν αναιρούν την αξιοπιστία της συγκριτικής αξιολόγησης των σεναρίων, αλλά καθορίζουν το πλαίσιο εντός του οποίου ερμηνεύονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης.

Συγκεκριμένα, υιοθετούνται οι ακόλουθες βασικές παραδοχές:

- απλουστευμένη αναπαράσταση των μικροκλιματικών συνθηκών,
- απλοποιημένη απόδοση των θερμοφυσικών ιδιοτήτων των υλικών,
- σταθερές οριακές συνθήκες κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης,
- μη εξέταση της κατηγορίας των ασθενών ως ενιαίου ανθρωποκεντρικού προφίλ, λόγω της ετερογένειας των φυσιολογικών, ηλικιακών και κλινικών χαρακτηριστικών τους,
- ανασύσταση των αρχικά ακάλυπτων χώρων ως δυνητικά ανακτήσιμων υπαίθριων χώρων,
- χρήση ενιαίας γεωμετρικής βάσης για τη σύγκριση των σεναρίων S1 και S3.

Η μικροκλιματική προσομοίωση πραγματοποιείται υπό ελεγχόμενο πλαίσιο ανάλυσης, με συγκεκριμένες αρχικές και οριακές συνθήκες. Συνεπώς, το μοντέλο δεν αποσκοπεί στην πλήρη αναπαραγωγή όλων των δυναμικών μεταβολών που μπορεί να εμφανίζονται σε μια πραγματική θερινή ημέρα, όπως πρόσκαιρες μεταβολές της νεφοκάλυψης, της έντασης του ανέμου ή της λειτουργικής χρήσης του χώρου. Αντίθετα, αποσκοπεί στη συγκριτική αξιολόγηση της θερμικής συμπεριφοράς του χώρου υπό κοινές συνθήκες αναφοράς, ώστε

οι διαφοροποιήσεις μεταξύ των σεναρίων να μπορούν να αποδοθούν κυρίως στις προτεινόμενες βιοκλιματικές παρεμβάσεις.

Οι θερμοφυσικές ιδιότητες των υλικών αποδόθηκαν με βάση τις διαθέσιμες κατηγορίες υλικών του ENVI-met και τις ανάγκες της συγκριτικής ανάλυσης. Η προσέγγιση αυτή επιτρέπει την αξιολόγηση της σχετικής επίδρασης των υλικών επιφανειών στη θερμική άνεση και στο μικροκλίμα, χωρίς να απαιτείται εργαστηριακή μέτρηση κάθε επιμέρους επιφανειακού υλικού του χώρου μελέτης. Επομένως, τα αποτελέσματα ερμηνεύονται κυρίως ως συγκριτικές ενδείξεις της μικροκλιματικής επίδρασης των διαφορετικών επιφανειών και όχι ως απόλυτη αποτύπωση όλων των επιμέρους υλικών χαρακτηριστικών του πραγματικού χώρου.

Οι οριακές συνθήκες της προσομοίωσης διατηρήθηκαν σταθερές μεταξύ των σεναρίων, ώστε να διασφαλιστεί η συγκρισιμότητα των αποτελεσμάτων. Με τον τρόπο αυτό, οι διαφορές που παρατηρούνται μεταξύ του σεναρίου S1 και του συνδυαστικού σεναρίου παρεμβάσεων S3 αποδίδονται στις μεταβολές της φύτευσης, των υλικών επιφανειών και των επιλεγμένων βιοκλιματικών παρεμβάσεων και όχι σε διαφοροποίηση των εξωτερικών μετεωρολογικών συνθηκών.

Επιπλέον, η κατηγορία των ασθενών δεν εξετάστηκε ως ενιαίο ανθρωποκεντρικό προφίλ, καθώς παρουσιάζει μεγάλη ετερογένεια ως προς την ηλικία, τη φυσιολογική κατάσταση, την κινητικότητα, τη φαρμακευτική αγωγή και τη θερμορρυθμιστική ικανότητα. Για τον λόγο αυτό, η παρούσα εργασία εστιάζει σε δύο σαφέστερα οριζόμενες ευάλωτες ομάδες, τα παιδιά και τους ηλικιωμένους, οι οποίες αξιολογούνται σε σχέση με το προφίλ αναφοράς του ενήλικα. Τα τρία αυτά ανθρωποκεντρικά προφίλ (ενήλικας, ηλικιωμένος, παιδί) επιτρέπουν πιο συνεπή και συγκρίσιμη αξιολόγηση των διαφορών θερμικής άνεσης υπό τις ίδιες μικροκλιματικές συνθήκες.

Ιδιαίτερη μεθοδολογική παραδοχή αφορά τη γεωμετρική αναπαράσταση των αρχικά ακάλυπτων χώρων του συγκροτήματος. Οι χώροι που αρχικά προβλέπονταν ή λειτουργούσαν ως ακάλυπτοι αποδίδονται στο μοντέλο ως ελεύθεροι υπαίθριοι χώροι, σύμφωνα με τον ερευνητικό στόχο της διερεύνησης του μικροκλιματικού δυναμικού και της δυνατότητας βιοκλιματικής αναβάθμισής τους. Η παραδοχή τεκμηριώνεται από τη λογική της κλιματικής ανθεκτικότητας: οι ελεύθεροι υπαίθριοι χώροι ενός νοσοκομείου

μπορούν να λειτουργήσουν ως ζώνες θερμικής αποφόρτισης, σκίασης και προσωρινής παραμονής, ενώ η μόνιμη κατάληψή τους από βοηθητικές ή μεταγενέστερες κατασκευές περιορίζει αυτή τη δυνατότητα.

Το σημείο PO1 (ορίζεται στην Ενότητα 2.8.2) αντιστοιχεί σε αρχικά ακάλυπτο χώρο, ο οποίος σήμερα περιλαμβάνει μεταγενέστερο κτίσμα με μεταλλική κάλυψη που δεν ενσωματώθηκαν στο μοντέλο.

Η επιλογή αυτή συνδέεται με τον ερευνητικό στόχο της διερεύνησης του δυναμικού των υπαίθριων χώρων και με τον υποχρεωτικό ακάλυπτο που προβλέπει το θεσμικό πλαίσιο.

Πρόκειται για συνειδητή μεθοδολογική αφαίρεση: ο χώρος εξετάζεται ως δυνητικά ανακτήσιμο υπαίθριο τμήμα και όχι ως αποτύπωση της τρέχουσας κατάληψής του. Η ενδεχόμενη απομάκρυνση ή μετεγκατάσταση των βοηθητικών εγκαταστάσεων δεν εξετάζεται τεχνικά εδώ, αλλά αναγνωρίζεται ως πιθανή προϋπόθεση μελλοντικού σχεδιασμού, με γνώμονα τη λειτουργία, την ασφάλεια και την προσβασιμότητα του νοσοκομείου.

Η παραδοχή εφαρμόστηκε με ενιαίο τρόπο σε όλα τα σενάρια. Επομένως, η σύγκριση S1–S3 δεν επηρεάζεται από διαφοροποίηση της γεωμετρικής βάσης, και τα αποτελέσματα του PO1 ερμηνεύονται ως ευρήματα ενός χώρου αναφοράς με χαρακτήρα δυνητικά ανακτήσιμου υπαίθριου χώρου.

Οι παραπάνω παραδοχές συγκροτούν το ερμηνευτικό πλαίσιο της προσομοίωσης και οριοθετούν τη χρήση των αποτελεσμάτων ως συγκριτικών και σχεδιαστικών ευρημάτων. Η παρούσα εργασία δεν αποσκοπεί στην απόλυτη αναπαραγωγή κάθε επιμέρους κατασκευαστικής ή λειτουργικής λεπτομέρειας του νοσοκομειακού συγκροτήματος, αλλά στη συγκριτική μικροκλιματική αξιολόγηση επιλεγμένων υπαίθριων χώρων και στη διερεύνηση της δυνατότητας βελτίωσης της θερμικής άνεσης μέσω βιοκλιματικών παρεμβάσεων. Επομένως, τα αποτελέσματα πρέπει να ερμηνεύονται κυρίως ως συγκριτικά και σχεδιαστικά ευρήματα, με έμφαση στις διαφορές μεταξύ των σεναρίων και όχι αποκλειστικά στις απόλυτες τιμές κάθε σημείου.

2.3 Κλιματικά Δεδομένα και Οριακές Συνθήκες

Η παρούσα ενότητα τεκμηριώνει τα μετεωρολογικά δεδομένα εισόδου και τις οριακές συνθήκες των προσομοιώσεων στο ENVI-met, καθώς και την αιτιολόγηση της επιλογής της ημέρας και της ώρας ανάλυσης υπό συνθήκες έντονης θερμικής επιβάρυνσης.

Με βάση τα παρατηρούμενα δεδομένα κατασκευάστηκε αντιπροσωπευτικό ημερήσιο θερμοκρασιακό προφίλ, το οποίο χρησιμοποιήθηκε ως μετεωρολογική είσοδος στις προσομοιώσεις. Η ημερήσια καμπύλη θερμοκρασίας ακολουθεί τη συνήθη θερινή μεσογειακή εξέλιξη, με ελάχιστη θερμοκρασία κατά τις πρώτες πρωινές ώρες και μέγιστη κατά τις πρώτες απογευματινές ώρες.

Οι βασικές μετεωρολογικές παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν ως είσοδοι στο μοντέλο συνοψίζονται στον Πίνακα 2.3.1.1

Στην παρούσα μελέτη, το αρχείο EPW δεν χρησιμοποιήθηκε ως πλήρες μετεωρολογικό forcing του μοντέλου. Ωστόσο, αξιοποιήθηκε συμπληρωματικά η σχετική υγρασία και χρησιμοποιήθηκε ως τιμή εισόδου στο μοντέλο.

Δεδομένου ότι η παρούσα έρευνα έχει συγκριτικό χαρακτήρα, με αντικείμενο τη σύγκριση του σεναρίου αναφοράς S1 με το συνδυαστικό σενάριο παρέμβασης S3, και δεν αποσκοπεί σε ακριβή αριθμητική πρόγνωση των πραγματικών συνθηκών, τα αποτελέσματα αξιοποιούνται κυρίως για τη συγκριτική αποτίμηση της μικροκλιματικής απόκρισης των δύο σεναρίων. Ο έλεγχος της φυσικής συνέπειας των οριακών συνθηκών και των προσομοιωμένων αποτελεσμάτων υποστηρίζει τη συγκριτική τους ερμηνεία, χωρίς να υποκαθιστά την επικύρωση μέσω επιτόπιων μετρήσεων. Το μοντέλο προσομοιώνει το μικροκλίμα σε χωρική κλίμακα λίγων μέτρων, επιλύοντας τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ επιφανειών, ατμόσφαιρας, βλάστησης και ακτινοβολίας. Συνεπώς, οι μετεωρολογικές συνθήκες που χρησιμοποιούνται ως οριακές παράμετροι δεν αποσκοπούν στην ακριβή αναπαραγωγή σημειακών μετρήσεων, αλλά στη διαμόρφωση ρεαλιστικών ατμοσφαιρικών συνθηκών για τη συγκριτική αξιολόγηση της μικροκλιματικής συμπεριφοράς των σεναρίων S1 και S3.

Η παρούσα ενότητα παρουσιάζει τα μετεωρολογικά δεδομένα εισόδου και τις οριακές συνθήκες που χρησιμοποιήθηκαν στις προσομοιώσεις μικροκλίματος με το λογισμικό

ENVI-met. Η έμφαση δίνεται στην τεκμηρίωση των δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν ως είσοδοι στο μοντέλο.

Οι κλιματικές συνθήκες εισόδου του μοντέλου βασίστηκαν σε πραγματικά ωριαία μετεωρολογικά δεδομένα που καταγράφηκαν στην Αθήνα στις 25 Ιουλίου 2025, κατά τη διάρκεια επεισοδίου καύσωνα. Οι τιμές αυτές χρησιμοποιήθηκαν για τη διαμόρφωση των εισόδων του μοντέλου κατά την επιλεγμένη ημέρα ανάλυσης.

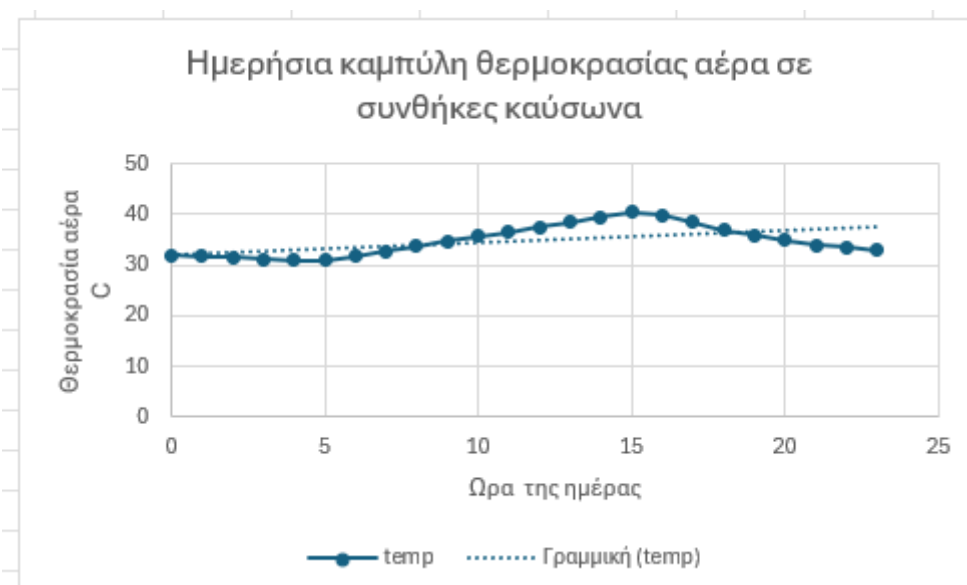
Ο σταθμός Αμπελοκήπων ανήκει στο δίκτυο αυτόματων μετεωρολογικών σταθμών του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών, παρέχει ωριαίες μετρήσεις βασικών παραμέτρων, όπως θερμοκρασία αέρα και ταχύτητα ανέμου, μέσω της πλατφόρμας Meteo.gr. Λόγω της θέσης του εντός του αστικού ιστού και της μικρής απόστασής του από την περιοχή μελέτης, θεωρείται αντιπροσωπευτικός των τοπικών αστικών θερμικών συνθηκών.

2.3.1 Επιλογή αντιπροσωπευτικής ημέρας θερμικής αιχμής

Η επιλογή ακραίου θερμικού επεισοδίου, αντί τυπικών θερινών συνθηκών, τεκμηριώνεται τόσο από τη σχετική βιβλιογραφία όσο και από το θεσμικό πλαίσιο προσαρμογής στην κλιματική αλλαγή, το οποίο αναγνωρίζει τους καύσωνες ως κυρίαρχο κλιματικό κίνδυνο. Κατά την επιλεγμένη ημέρα η μέγιστη θερμοκρασία αέρα έφθασε τους 40,4 °C και η ελάχιστη τους 30,9 °C, με επικρατούσα διεύθυνση ανέμου βορειοανατολική (NE) και μέση ένταση ~ 1,30 m/s. Οι υψηλές νυχτερινές θερμοκρασίες είναι χαρακτηριστικές της παρατεταμένης θερμικής επιβάρυνσης σε πυκνοδομημένα αστικά περιβάλλοντα.

Η επιλογή ακραίου θερμικού επεισοδίου, αντί τυπικών θερινών συνθηκών, τεκμηριώνεται τόσο από τη σχετική βιβλιογραφία όσο και από το θεσμικό πλαίσιο προσαρμογής στην κλιματική αλλαγή (Περιφέρεια Αττικής, 2022), το οποίο αναγνωρίζει τους καύσωνες ως κυρίαρχο κλιματικό κίνδυνο για αστικές υποδομές υψηλής ευαισθησίας και ευάλωτες ομάδες. Τα κριτήρια επιλογής περιλάμβαναν μέγιστη θερμοκρασία αέρα υψηλότερη από 38 °C, αυξημένες νυχτερινές θερμοκρασίες και έντονη ηλιακή ακτινοβολία υπό συνθήκες περιορισμένης νέφωσης. Η ίδια ημέρα και οι ίδιες οριακές μετεωρολογικές συνθήκες εφαρμόστηκαν στα σενάρια S1 και S3, ώστε να διασφαλίζεται η μεταξύ τους συγκρισιμότητα, χωρίς πρόθεση γενίκευσης των αποτελεσμάτων σε κλιματολογική ή μακροκλιματική κλίμακα.

Με βάση τις παρατηρούμενες ωριαίες καταγραφές του σταθμού Αμπελοκήπων διαμορφώθηκε το ημερήσιο θερμοκρασιακό προφίλ που χρησιμοποιήθηκε για την παραμετροποίηση της προσομοίωσης, Σχήμα 2.3.1.1. Το προφίλ παρουσιάζει την αναμενόμενη θερινή ημερήσια εξέλιξη, με τις χαμηλότερες τιμές κατά τις πρώτες πρωινές ώρες και τις υψηλότερες κατά τις πρώτες απογευματινές ώρες. Οι βασικές μετεωρολογικές παράμετροι εισόδου συνοψίζονται στον Πίνακα 2.3.1. Σημειώνεται ότι το αρχείο EPW δεν χρησιμοποιήθηκε ως πλήρες μετεωρολογικό forcing αλλά αξιοποιήθηκε μόνο συμπληρωματικά η σχετική υγρασία ως τιμή εισόδου.



Σχήμα 2.3.1.1 Ωριαία μεταβολή της θερμοκρασίας αέρα κατά τη διάρκεια της επιλεγμένης ημέρας καύσωνα στην Αθήνα.

Πηγή: Ιδία επεξεργασία

Πίνακας 2.3.1.1 Μετεωρολογικές παράμετροι εισόδου για την προσομοίωση ENVI-met

Παράμετρος (Parameter)	Τιμή (Value)	Μονάδα (Unit)	Πηγή δεδομένων (Data Source)
Ημερομηνία προσομοίωσης (Simulation Date)	25 Ιουλίου 2025	—	Επιλεγμένη ημέρα καύσωνα
Ωρα ανάλυσης (Analysis Hour / Critical Hour)	16:00	—	Επιλογή ώρας θερμικής αιχμής
Θερμοκρασία αέρα (Air Temperature)	40	°C	Μετεωρολογικός σταθμός Αμπελοκήπων

Παράμετρος (Parameter)	Τιμή (Value)	Μονάδα (Unit)	Πηγή δεδομένων (Data Source)
Σχετική υγρασία (Relative Humidity)	41-50	%	EPW Athens EPW (EnergyPlus Weather File / αρχείο τυπικού μετεωρολογικού έτους), συμπληρωματική χρήση
Ταχύτητα ανέμου (Wind Speed)	1.30	m/s	Μετεωρολογικός σταθμός Αμπελοκήπων
Διεύθυνση ανέμου (Wind Direction)	NE	—	Μετεωρολογικός σταθμός Αμπελοκήπων

Πηγή: Ιδία επεξεργασία δεδομένων του μετεωρολογικού σταθμού Αμπελοκήπων του ΕΑΑ/meteo.gr και συμπληρωματικών δεδομένων σχετικής υγρασίας από το αρχείο EPW Athens. Οι παράμετροι εισήχθησαν στο ENVI-met 5.8.0.

Το αρχείο EPW δεν χρησιμοποιήθηκε ως πλήρες μετεωρολογικό forcing του μοντέλου. Από αυτό αντλήθηκε μόνο η σχετική υγρασία, η οποία αξιοποιήθηκε συμπληρωματικά ως παράμετρος εισόδου στο μοντέλο. Η θερμοκρασία αέρα, η ταχύτητα και η διεύθυνση του ανέμου προήλθαν από τις καταγραφές του μετεωρολογικού σταθμού Αμπελοκήπων

2.3.2 Ώρα και εύρος ανάλυσης

Η συνολική διάρκεια της προσομοίωσης ορίστηκε σε 24 ώρες, ώστε να επιτευχθεί η δυναμική εξισορρόπηση των πεδίων θερμοκρασίας, υγρασίας και ροής αέρα. Η ώρα 16:00 επιλέγεται ως κύρια ώρα χωρικής παρουσίας των χαρτών, καθώς αντιστοιχεί σε περίοδο μέγιστης θερμικής επιβάρυνσης, ενώ η συγκριτική χρονική αξιολόγηση των σεναρίων εκτείνεται από τις 02:00 έως τις 23:00. Η εστίαση στις απογευματινές ώρες συνδέεται με τη θερμική αδράνεια των αστικών επιφανειών: η συσσώρευση θερμότητας στα δομικά υλικά επηρεάζει σημαντικά τη T_{mrt} και, κατ' επέκταση, δείκτες όπως ο PET.

2.3.3 Μετεωρολογικές παράμετροι εισόδου και έλεγχος

Οι οριακές συνθήκες καθορίστηκαν μέσω του συστήματος forcing του ENVI-met, με παραμέτρους εισόδου τη θερμοκρασία, τη σχετική υγρασία, την ταχύτητα και τη διεύθυνση ανέμου, ενώ η ηλιακή ακτινοβολία υπολογίζεται εσωτερικά από το μοντέλο βάσει της γεωγραφικής θέσης, της ημερομηνίας και της ώρας. Ειδικότερα, η εισερχόμενη ροή ανέμου ορίστηκε σε 45° (βορειοανατολική διεύθυνση) με ταχύτητα 1,30 m/s σε ύψος 10 m, βάσει των βασικών μετεωρολογικών ρυθμίσεων του ENVI-met. Οι ίδιες συνθήκες

εφαρμόζονται και στα δύο σενάρια, ώστε οι διαφοροποιήσεις των αποτελεσμάτων να αποδίδονται αποκλειστικά στις μεταβολές της χωρικής διαμόρφωσης, της βλάστησης και των επιφανειακών χαρακτηριστικών. Δεδομένου ότι η έρευνα έχει συγκριτικό χαρακτήρα (σενάριο αναφοράς έναντι σεναρίου παρέμβασης) και όχι στόχος ακριβούς αριθμητικής πρόγνωσης, ο ποιοτικός έλεγχος των οριακών συνθηκών κρίνεται επαρκής: το μοντέλο επιλύει το μικροκλίμα σε κλίμακα λίγων μέτρων (αλληλεπιδράσεις). επιφανειών–ατμόσφαιρας–βλάστησης–ακτινοβολίας, οπότε οι οριακές παράμετροι δεν αποσκοπούν στην αναπαραγωγή σημειακών μετρήσεων, αλλά στη δημιουργία ρεαλιστικών συνθηκών για τη συγκριτική αξιολόγηση.

2.4 Ψηφιακό μοντέλο και παραμετροποίηση

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζεται η τεχνική παραμετροποίηση του υπολογιστικού μοντέλου ENVI-met, με έμφαση στη διαμόρφωση του υπολογιστικού πλέγματος και στη γεωμετρική και φυσική αναπαράσταση του χώρου. Η παραμετροποίηση αυτή αποτελεί κρίσιμο στάδιο για την αξιόπιστη αναπαράσταση των μικροκλιματικών διεργασιών στην κλίμακα του αστικού τετραγώνου.

2.4.1 Υπολογιστικό πεδίο (Computational Domain)

Το υπολογιστικό πεδίο διακριτοποιήθηκε σε τρισδιάστατο πλέγμα υπολογιστικών κελιών (voxels), το οποίο καλύπτει την περιοχή της αυλής του νοσοκομείου και τον άμεσο περιβάλλοντα αστικό ιστό. Οι τελικές διαστάσεις του πλέγματος ορίστηκαν ως $N_x = 132$, $N_y = 130$, $N_z = 30$, με χωρική ανάλυση $dx = dy = 1,0 \text{ m}$ και $dz = 2,0 \text{ m}$.

Η επιλογή υψηλής οριζόντιας ανάλυσης (1 m) επιτρέπει την ακριβή γεωμετρική αποτύπωση των κτιρίων, των στοιχείων σκίασης και της βλάστησης, τα οποία επηρεάζουν καθοριστικά τη μέση ακτινοβολούμενη θερμοκρασία T_{mrt} . Η κατακόρυφη ανάλυση ($dz = 2 \text{ m}$) επιλέχθηκε ως συμβιβασμός μεταξύ υπολογιστικής ακρίβειας και αριθμητικής σταθερότητας. Δεν εφαρμόστηκε κατακόρυφος διαχωρισμός των χαμηλών κελιών, ώστε να αποφευχθούν αριθμητικές αστάθειες και πιθανές υπερεκτιμήσεις των δεικτών θερμικής άνεσης.

Για τη βελτιστοποίηση του υπολογιστικού κόστους ενεργοποιήθηκε η επιλογή *telescoping grid*, με έναρξη σε ύψος 30 m και συντελεστή αύξησης 15%, ώστε να διατηρείται υψηλή

ανάλυση κοντά στο έδαφος, όπου εκδηλώνονται οι βασικές μικροκλιματικές διεργασίες. Περιμετρικά της περιοχής μελέτης εφαρμόστηκε ζώνη εξομάλυνσης (buffer zone) πλάτους 4 κελιών, με στόχο τον περιορισμό των επιδράσεων των οριακών συνθηκών και τη σταθεροποίηση των πεδίων ροής και θερμοκρασίας.

Η συνολική διάρκεια της προσομοίωσης ορίστηκε σε 24 ώρες.

Ο προσανατολισμός του μοντέλου ρυθμίστηκε με περιστροφή περίπου $89,95^\circ$ ως προς τον γεωγραφικό βορρά, ώστε να διασφαλίζεται η ορθή προσομοίωση της ηλιακής τροχιάς και της σκίασης. Η διαφορετική τιμή που εμφανίζεται στο αρχείο EDX ως προς τη διεύθυνση της εισερχόμενης ροής ανέμου ερμηνεύεται ως αποτέλεσμα αυτής της περιστροφής και αντιστοιχεί στην ίδια φυσική διεύθυνση ανέμου, εκφρασμένη όμως στο τοπικό σύστημα αναφοράς του υπολογιστικού πλέγματος. Επομένως, δεν υφίσταται ασυμφωνία μεταξύ των οριακών συνθηκών εισόδου και των αρχείων εξόδου της προσομοίωσης.

Πίνακας 2.4.1.1. Ρυθμίσεις υπολογιστικού πλέγματος (computational grid) του μοντέλου ENVI-met.

Parameter (Παράμετρος)	Value (Τιμή)
Model domain size (μέγεθος υπολογιστικού πεδίου)	$132 \times 130 \times 30$ cells
Horizontal resolution (οριζόντια ανάλυση πλέγματος)	$1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$
Vertical resolution (κατακόρυφη ανάλυση πλέγματος)	2 m
Voxel size (μέγεθος voxel – κυψελίδα υπολογιστικού πλέγματος)	$1 \times 1 \times 2 \text{ m}$
Telescoping grid (προοδευτική αύξηση κατακόρυφων κελιών με το ύψος)	ενεργό
Telescoping factor (συντελεστής αύξησης κατακόρυφου κελιού)	15 %
Start telescoping height (ύψος έναρξης telescoping)	30 m
Model rotation (περιστροφή μοντέλου ως προς τον γεωγραφικό βορρά)	$89,95^\circ$
Simulation duration (διάρκεια προσομοίωσης)	24 h

Πηγή: Ιδία επεξεργασία, εισαγωγή στοιχείων στο ENVI-met 5.8.0

Η προσομοίωση εκτελέστηκε για συνολική διάρκεια 24 ωρών, όπως αναφέρεται στον πίνακα ρυθμίσεων. Η εκκίνηση ορίστηκε στις 2:00 της 25.07.2025. Επομένως, η ώρα ανάλυσης των 16:00 ακολουθεί μετά από 14 ώρες λειτουργίας του μοντέλου. Το διάστημα αυτό λειτουργεί ως χρόνος προθέρμανσης (spin-up). Σκοπός του είναι να σταθεροποιηθούν τα πεδία θερμοκρασίας και ροής και να περιοριστεί η εξάρτηση από τις αρχικές συνθήκες.

Η μορφή του δικτύου των στρωμάτων των κελιών στο κατακόρυφο άξονα ακολουθούν όπως αναφέρθηκε την μέθοδο equidistant, όπου όλα τα στρώματα έχουν το ίδιο ύψος, πλην του χαμηλότερου που χωρίζεται σε 5 υποστρώματα με $dzs=0.2 \cdot dz$.

Για τη διασφάλιση της συγκρισιμότητας μεταξύ των σεναρίων, όλες οι προσομοιώσεις εκτελέστηκαν με ίδιες οριακές συνθήκες (boundary conditions / οριακές συνθήκες), κοινή χρονική περίοδο προσομοίωσης, ίδιες μετεωρολογικές παραμέτρους εισόδου και ίδιες αριθμητικές ρυθμίσεις. Ως εκ τούτου, οι διαφοροποιήσεις στα αποτελέσματα αποδίδονται στις χωρικές και μορφολογικές παρεμβάσεις κάθε σεναρίου και όχι σε μεταβολές των εξωτερικών συνθηκών.

Η συγκρισιμότητα των σεναρίων ελέγχθηκε βάσει κοινών οριακών συνθηκών, ίδιων μετεωρολογικών παραμέτρων εισόδου, ταυτόσημης χρονικής περιόδου προσομοίωσης και ίδιων αριθμητικών ρυθμίσεων του μοντέλου. Συνεπώς, οι διαφορές που προκύπτουν στα αποτελέσματα αποδίδονται στις εφαρμοζόμενες παρεμβάσεις και όχι σε διαφοροποίηση των εξωτερικών ή υπολογιστικών συνθηκών.

2.4.2 Γεωμετρική αναπαράσταση, υλικά και βλάστηση

Η γεωμετρική αναπαράσταση της περιοχής βασίστηκε σε γεωχωρικά δεδομένα (QGIS / Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών), τα οποία συμπληρώθηκαν και επαληθεύτηκαν με στοιχεία της Τεχνικής Υπηρεσίας του Γενικού Νοσοκομείου Αθηνών «Αλεξάνδρα».

Τα κτίρια εισήχθησαν στο μοντέλο μέσω GIS δεδομένων, με χρήση του πεδίου ύψους (height_m2), το οποίο έχει προσαρμοστεί ώστε να αποδίδει ρεαλιστικά τα ύψη των κτιριακών όγκων. Η ακρίβεια των υψών επιβεβαιώθηκε μέσω: τρισδιάστατης απεικόνισης (Google Earth Pro), οπτικής επαλήθευσης (Google Street View) και εκτίμησης αριθμού ορόφων και αντιπροσωπευτικών υψών

Η προσέγγιση αυτή θεωρείται επαρκής για μικροκλιματικές προσομοιώσεις σε κλίμακα αστικού τετραγώνου, όπου η σχετική γεωμετρική ακρίβεια είναι σημαντικότερη από την απόλυτη αποτύπωση.

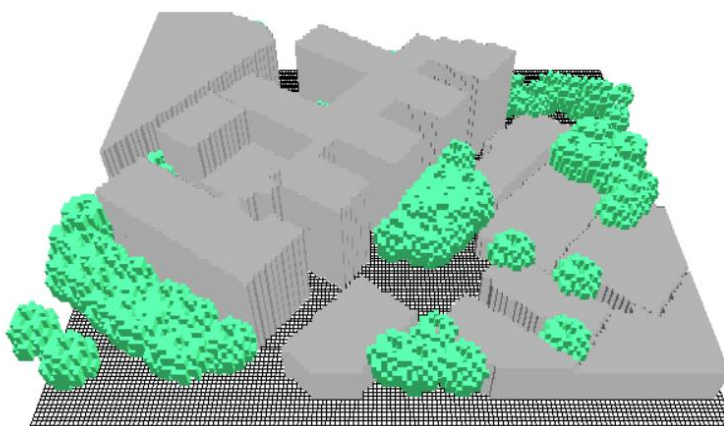
Κατά τη γεωμετρική αναπαράσταση του μοντέλου δεν ενσωματώθηκαν όλες οι μεταγενέστερες ελαφρές κατασκευές, στεγάσεις ή βοηθητικές καλύψεις που έχουν προστεθεί σε επιμέρους αρχικά ακάλυπτους χώρους του νοσοκομείου. Η επιλογή αυτή συνδέεται με τη μεθοδολογική παραδοχή που αναλύθηκε στην ενότητα 2.2.5. Η ίδια

γεωμετρική βάση εφαρμόστηκε στα δύο τελικά σενάρια προσομοίωσης S1 και S3, ώστε να διασφαλίζεται η συγκρισιμότητα των αποτελεσμάτων.

Η βλάστηση παραμετροποιήθηκε με χρήση τριών αντιπροσωπευτικών τυπολογιών δέντρων (ύψους 6 m, 12 m και 15 m), με διαφοροποίηση της πυκνότητας φυλλικής επιφάνειας (LAD – Leaf Area Density / πυκνότητα φυλλικής επιφάνειας), ώστε να αποδίδονται ρεαλιστικά τα φαινόμενα σκίασης και εξατμισοδιαπνοής.

Οι αστικές επιφάνειες (έδαφος, οδοστρώματα, σκληρές επιφάνειες) αποδόθηκαν με χρήση τυπικών θερμοφυσικών ιδιοτήτων από τη βιβλιοθήκη υλικών του ENVI-met, σύμφωνα με διεθνείς εφαρμογές του μοντέλου.

Η περιοχή προσομοίωσης θεωρήθηκε επίπεδη (flat terrain).



Σχήμα 2.4.2.1 Υπολογιστικό πεδίο και γεωμετρική αναπαράσταση του μοντέλου ENVI-met 5.8.0

Πηγή: Ιδία επεξεργασία από ENVI-met 5.8.0.

2.4.3 Ρυθμίσεις προσομοίωσης και παραγωγή αποτελεσμάτων

Η ανάπτυξη του υπολογιστικού μοντέλου βασίστηκε σε ορισμένες τεχνικές παραδοχές, οι οποίες είναι σύμφωνες με τη διεθνή πρακτική εφαρμογής του ENVI-met σε αστικά περιβάλλοντα. Συγκεκριμένα, οι θερμοφυσικές ιδιότητες των υλικών θεωρήθηκαν ομοιογενείς και βασίστηκαν σε τυπικές τιμές η γεωμετρική αναπαράσταση των κτιρίων

βασίστηκε σε επεξεργασμένα GIS δεδομένα δεν ενσωματώθηκαν δυναμικά δεδομένα κυκλοφορίας ή μεταβλητής ανθρωπογενούς θερμότητας. Οι παραδοχές αυτές ενδέχεται να επηρεάζουν τις απόλυτες τιμές των μικροκλιματικών μεταβλητών. Ωστόσο, δεδομένου ότι η παρούσα μελέτη ακολουθεί συγκριτική προσέγγιση μεταξύ σεναρίων, η επίδρασή τους θεωρείται περιορισμένη ως προς την ερμηνεία των σχετικών διαφορών των αποτελεσμάτων.

Το μοντέλο χρησιμοποιείται για την προσομοίωση της μικροκλιματικής συμπεριφοράς σε χωρική κλίμακα λίγων μέτρων, επιλύοντας τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ αστικών επιφανειών, ατμόσφαιρας, βλάστησης και ακτινοβολίας. Στο πλαίσιο αυτό, η έμφαση δίνεται στη ρεαλιστική ως στρατηγική κατεύθυνση υπό προϋποθέσεις, στην προσομοίωση των φυσικών διεργασιών και όχι στην ακριβή αναπαραγωγή σημειακών μετεωρολογικών μετρήσεων.

2.5 Ευάλωτες ομάδες και θερμική άνεση

Η αξιολόγηση της θερμικής άνεσης σε υπαίθριους αστικούς χώρους διαφοροποιείται μεταξύ των χρηστών, καθώς η ανθρώπινη απόκριση στις μικροκλιματικές συνθήκες επηρεάζεται σημαντικά από φυσιολογικά και συμπεριφορικά χαρακτηριστικά. Στο πλαίσιο της παρούσας μελέτης, ιδιαίτερη έμφαση δίνεται σε ευάλωτες ομάδες, όπως τα παιδιά και οι ηλικιωμένοι, οι οποίοι εμφανίζουν αυξημένη ευαισθησία σε συνθήκες θερμικής καταπόνησης. Για τον λόγο αυτό, η διερεύνηση της θερμικής επιβάρυνσης δεν περιορίζεται σε έναν «μέσο χρήστη», αλλά λαμβάνει υπόψη τη διαφοροποιημένη θερμική ευαλωτότητα των ομάδων αυτών.

Η επιλογή των παιδιών και των ηλικιωμένων ως ομάδων αναφοράς συνδέεται άμεσα με τον ανθρωποκεντρικό χαρακτήρα της παρούσας έρευνας και με την ανάγκη αποτίμησης των υπαίθριων νοσοκομειακών χώρων υπό το πρίσμα της κλιματικής προσαρμογής και της προστασίας των πλέον ευαίσθητων χρηστών. Στο πλαίσιο αυτό, οι ομάδες αυτές εξετάζονται όχι μόνο ως θεωρητικές κατηγορίες αυξημένης ευαλωτότητας, αλλά και ως λειτουργικές παράμετροι ερμηνείας της θερμικής επιβάρυνσης στον συγκεκριμένο χώρο μελέτης.

2.5.1 Παιδιά

Τα παιδιά αποτελούν ομάδα αυξημένης θερμικής ευαλωτότητας, κυρίως λόγω φυσιολογικών και συμπεριφορικών παραγόντων. Σε φυσιολογικό επίπεδο, παρουσιάζουν μειωμένη ικανότητα θερμορύθμισης, χαμηλότερη αποδοτικότητα εφίδρωσης και μεγαλύτερη αναλογία επιφάνειας σώματος προς μάζα, χαρακτηριστικά που οδηγούν σε ταχύτερη απορρόφηση θερμότητας και αυξημένο κίνδυνο υπερθέρμανσης. Σε συμπεριφορικό επίπεδο, τα παιδιά εκτίθενται συχνά περισσότερο στην ηλιακή ακτινοβολία λόγω αυξημένης δραστηριότητας, ενώ δεν προσαρμόζουν πάντα τη συμπεριφορά τους αναζητώντας σκιά ή περιορίζοντας την έκθεση.

Ως αποτέλεσμα, για ίδιες μικροκλιματικές συνθήκες, ενδέχεται να βιώνουν εντονότερη θερμική επιβάρυνση σε σχέση με έναν μέσο ενήλικα χρήστη. Επιπλέον, η θερμική τους αντίληψη μπορεί να διαφοροποιείται, γεγονός που ενδέχεται να ενισχύει την εμπειρία θερμικού στρες για ίδιες τιμές δεικτών θερμικής άνεσης. Η παραπάνω ευαλωτότητα καθιστά τα παιδιά κρίσιμη ομάδα αναφοράς σε μελέτες θερμικής άνεσης που αφορούν υπαίθριους χώρους με πιθανή παραμονή ή διέλευση χρηστών υπό συνθήκες θερινής αιχμής.

Από φυσιολογική σκοπιά, η αυξημένη θερμική ευαλωτότητα των παιδιών συνδέεται με τρεις βασικούς μηχανισμούς θερμορύθμισης. Πρώτον, η μεγαλύτερη αναλογία επιφάνειας προς μάζα σώματος μπορεί να αυξήσει το θερμικό φορτίο ανά μονάδα μάζας.

Δεύτερον, η ικανότητα εφίδρωσης είναι χαμηλότερη, λόγω μικρότερης ενεργοποίησης και χαμηλότερης μέγιστης ροής ιδρώτα. Τρίτον, η μεταφορά θερμότητας από τον πυρήνα προς το δέρμα μέσω της περιφερικής κυκλοφορίας μπορεί να είναι λιγότερο αποτελεσματική, επιβραδύνοντας την αποβολή θερμότητας μετά την έκθεση (Bar-Or, 1980; Falk & Dotan, 2008; Tsuzuki-Hayakawa et al., 1995). Οι μηχανισμοί αυτοί ποσοτικοποιούνται στα αποτελέσματα της παρούσας μελέτης μέσω της ενότητας του ενσωματωμένου εργαλείου BIO-met του ENVI-met 5.8.0 και αξιολογούνται στο Κεφάλαιο 3.

2.5.2 Ηλικιωμένοι

Οι ηλικιωμένοι αποτελούν επίσης πληθυσμό υψηλής θερμικής ευαλωτότητας, λόγω της σταδιακής μείωσης της φυσιολογικής προσαρμοστικότητας στον θερμικό φόρτο. Η ευαλωτότητα αυτή σχετίζεται με μειωμένη αγγειοδιαστολή, περιορισμένη ικανότητα εφίδρωσης και γενικότερη μείωση της καρδιοαναπνευστικής απόκρισης, παράγοντες που

επιρεάζουν την ικανότητα αποβολής θερμότητας. Παράλληλα, χρόνιες παθήσεις, φαρμακευτική αγωγή και μειωμένη κινητικότητα ενισχύουν περαιτέρω την ευαισθησία τους σε συνθήκες υψηλής θερμοκρασίας (Balmain et al., 2018; Kenny et al., 2010).

Σε υπαίθριους χώρους νοσοκομείων, η παραμονή σε περιοχές με αυξημένη ακτινοβολία και περιορισμένο αερισμό μπορεί συνεπώς να οδηγήσει σε σημαντική αύξηση της θερμικής καταπόνησης. Η ομάδα αυτή παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον για την παρούσα μελέτη, καθώς η ανάγκη προστασίας της από δυσμενείς μικροκλιματικές συνθήκες είναι άμεσα συνδεδεμένη με τον σχεδιασμό ασφαλέστερων και περισσότερο ανθεκτικών υπαίθριων θεραπευτικών και λειτουργικών χώρων.

Η επιλογή ειδικής ανάλυσης για τους ηλικιωμένους συνδέεται με πρόσφατες μικροκλιματικές μελέτες σε μεσογειακά αστικά περιβάλλοντα. Οι Tousi et al. (2025) χρησιμοποίησαν ENVI-met και PET για να αξιολογήσουν τη θερμική άνεση ηλικιωμένων σε πυκνοδομημένη περιοχή της Αθήνας, αναδεικνύοντας ότι οι ηλικιωμένοι αποτελούν πληθυσμιακή ομάδα με αυξημένη ευαισθησία σε συνθήκες υπαίθριου θερμικού στρες (Tousi et al., 2025).

2.5.3 Ερμηνεία του δείκτη PET

Στην παρούσα μελέτη η αξιολόγηση της θερμικής επιβάρυνσης των εύάλωτων ομάδων βασίζεται στον δείκτη PET (*Physiologically Equivalent Temperature* / Φυσιολογικά Ισοδύναμη Θερμοκρασία), επιτρέπει την ενσωμάτωση παραμέτρων που σχετίζονται με το άτομο αναφοράς, όπως η ηλικία, το φύλο, ο ρουχισμός και η δραστηριότητα, μέσω της επιλογής τυποποιημένων ενσωματωμένων προφίλ (built-in personal profiles) του εργαλείου BIO-met.

Η ερμηνεία των αποτελεσμάτων για τα παιδιά και τους ηλικιωμένους βασίζεται στις τιμές PET και στα ανθρωποκεντρικά προφίλ Simulate Thermal Comfort (BIO-met). Κατά συνέπεια, οι τιμές του δείκτη δεν ερμηνεύονται απομονωμένα, αλλά σε συνάρτηση με τα χαρακτηριστικά των εξεταζόμενων ομάδων και με τις ιδιαίτερες συνθήκες έκθεσης στον χώρο μελέτης. Η προσέγγιση αυτή επιτρέπει τη δυνητικά ρεαλιστική αποτίμηση της θερμικής επιβάρυνσης υπό συνθήκες θερινής αιχμής και ενισχύει τον ανθρωποκεντρικό χαρακτήρα της ανάλυσης.

2.5.4 Σύνδεση με την παρούσα μελέτη

Η αξιολόγηση εστιάζει στους υπαίθριους χώρους του νοσοκομείου, όπου η παρουσία και η διέλευση ευάλωτων ομάδων είναι λειτουργικά σημαντική. Στο πλαίσιο αυτό, η αξιολόγηση δεν περιορίζεται σε έναν μέσο χρήστη, αλλά λαμβάνει υπόψη διαφοροποιημένα ανθρωποκεντρικά προφίλ, με έμφαση στο παιδί και τον ηλικιωμένο χρήστη, ώστε να αποτυπωθεί πιο ρεαλιστικά η θερμική επιβάρυνση στον εξεταζόμενο χώρο.

Η ερμηνεία των αποτελεσμάτων βασίζεται στον δείκτη PET και στη χωρική κατανομή των μικροκλιματικών μεταβλητών, με έμφαση στον εντοπισμό ζωνών αυξημένης θερμικής επιβάρυνσης και στη σύγκριση μεταξύ του S1 και S3. Με τον τρόπο αυτό, η μελέτη συνδέει τα μικροκλιματικά ευρήματα με πραγματικές συνθήκες χρήσης του χώρου και τεκμηριώνει στοχευμένες παρεμβάσεις για τη βελτίωση της θερμικής άνεσης των πλέον ευάλωτων χρηστών.

2.6 Επιλογή παρεμβάσεων

Η επιλογή των παρεμβάσεων βασίστηκε στη συνδυασμένη επίδραση περιβαλλοντικών, χωρικών και ανθρωποκεντρικών παραμέτρων στη θερμική άνεση. Η θερμική επιβάρυνση δεν εξαρτάται μόνο από τη θερμοκρασία του αέρα, αλλά και από την ηλιακή έκθεση, τη σκίαση, τα υλικά των επιφανειών, τη βλάστηση, τη γεωμετρία του χώρου και τα χαρακτηριστικά των χρηστών.

Η σύνθετη αυτή σχέση αποκτά ιδιαίτερη σημασία στο νοσοκομειακό περιβάλλον, καθώς οι υπαίθριοι χώροι δεν λειτουργούν απλώς ως χώροι διέλευσης ή αναμονής, αλλά μπορούν να υποστηρίξουν την παραμονή, την ανάπαυση και την αποκατάσταση της επαφής των χρηστών με το εξωτερικό περιβάλλον. Για τον λόγο αυτό, η θερμική άνεση στους χώρους αυτούς συνδέεται τόσο με την περιβαλλοντική ποιότητα όσο και με τη λειτουργική και θεραπευτική αξία του νοσοκομειακού συγκροτήματος.

Η θεωρητική διερεύνηση οδηγεί επομένως στην ανάγκη εξέτασης στρατηγικών βελτιστοποίησης που στοχεύουν στη μείωση της θερμικής επιβάρυνσης και στη βελτίωση των συνθηκών παραμονής. Παρεμβάσεις όπως η σκίαση, η ενίσχυση της βλάστησης, η επιλογή κατάλληλων υλικών επιφανείας και η αξιοποίηση δωματίων αποτελούν βασικές

κατευθύνσεις βιοκλιματικού σχεδιασμού για την προσαρμογή των υπαίθριων νοσοκομειακών χώρων στις συνθήκες της κλιματικής κρίσης.

Οι παρεμβάσεις βιοκλιματικής αναβάθμισης που εξετάζονται στην παρούσα εργασία επιλέχθηκαν με βάση τη μικροκλιματική τους αποτελεσματικότητα, τη συμβατότητά τους με τη λειτουργία του νοσοκομείου και τη δυνατότητα εφαρμογής τους σε πραγματικές συνθήκες υπαίθριων χώρων υγείας. Η επιλογή τους οργάνωνεται σε τρεις βασικές κατηγορίες: (α) παρεμβάσεις αλλαγής υλικών επιφανειών, (β) παρεμβάσεις φύτευσης και (γ) παρεμβάσεις στα δώματα με πράσινες στέγες. Οι κατηγορίες αυτές δεν αντιμετωπίζονται μόνο ως θεωρητικές σχεδιαστικές επιλογές, αλλά συνδέονται άμεσα με τα σενάρια προσομοίωσης που αναπτύσσονται στην Ενότητα 2.7.

2.6.1 Παρεμβάσεις αλλαγής υλικών επιφανειών

Η χρήση ψυχρών υλικών υψηλής ανακλαστικότητας συμβάλλει στη μείωση της απορρόφησης της ηλιακής ακτινοβολίας και, κατ' επέκταση, στη μείωση της θερμοκρασίας των αστικών επιφανειών. Η μείωση αυτή περιορίζει τη θερμική φόρτιση του υπαίθριου χώρου και μπορεί να οδηγήσει σε χαμηλότερες τιμές μέσης ακτινοβολούμενης θερμοκρασίας T_{mrt} (Mean Radiant Temperature / Μέση Ακτινοβολούμενη Θερμοκρασία), ιδιαίτερα σε εκτεθειμένες περιοχές σκληρών επιφανειών.

Η εφαρμογή ψυχρών υλικών είναι ιδιαίτερα σημαντική σε χώρους έντονης χρήσης, όπως οι κύριες διαδρομές κίνησης και οι περιοχές στάσης, όπου η ακτινοβολούμενη θερμότητα από τα δάπεδα επηρεάζει άμεσα τη θερμική εμπειρία των χρηστών. Η επιλογή τους βασίζεται σε τεκμηριωμένα ευρήματα της βιβλιογραφίας για τη συμβολή τους στον περιορισμό της αστικής θερμικής νησίδας και στη βελτίωση των υπαίθριων μικροκλιματικών συνθηκών.

Η παρούσα μελέτη αντιμετωπίζει την αλλαγή υλικών ως τμήμα συνδυαστικής παρέμβασης και όχι ως αυτόνομη λύση. Η μέγιστη βιοκλιματική ωφέλεια των υλικών αναμένεται όταν αυτά λειτουργούν σε συνέργεια με τη σκίαση και τη βλάστηση, καθώς η θερμική άνεση στον υπαίθριο χώρο εξαρτάται όχι μόνο από τη θερμοκρασία επιφάνειας, αλλά και από τη μέση ακτινοβολούμενη θερμοκρασία T_{mrt} , την άμεση και ανακλώμενη ακτινοβολία και τη γεωμετρία του χώρου.

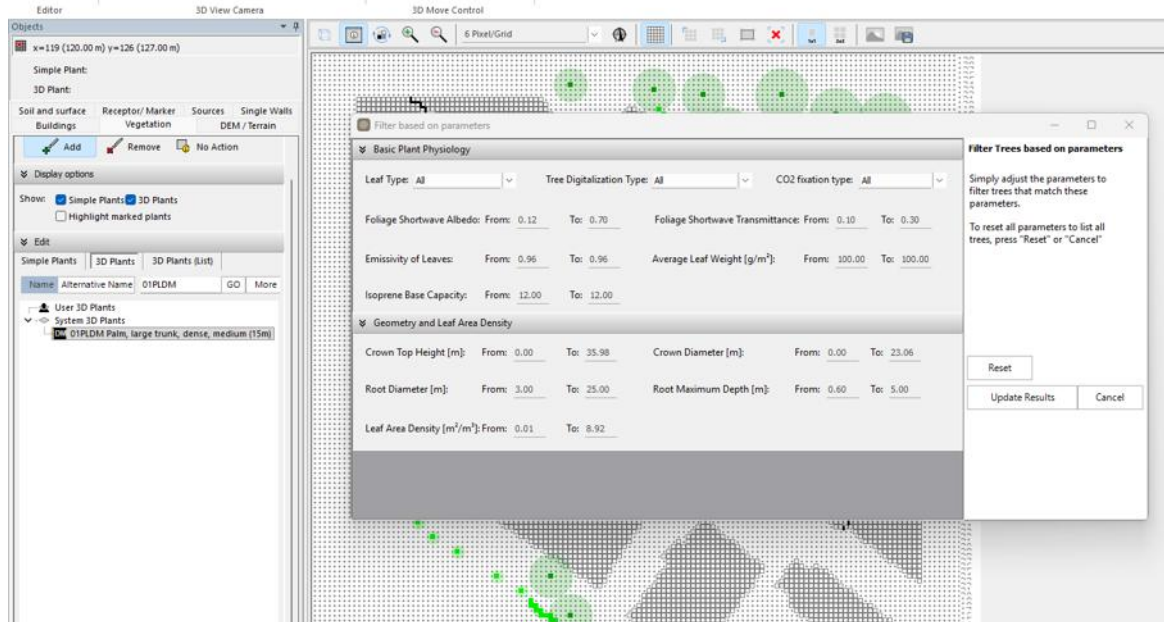
Οι αλλαγές των υλικών επιφανειών ενσωματώθηκαν στο S3 ως συμπληρωματικός μηχανισμός μικροκλιματικής βελτίωσης, μαζί με τη φύτευση, τη σκίαση και τις παρεμβάσεις στα δώματα. Η επιλογή αυτή επιτρέπει την αξιολόγηση της συνολικής απόκρισης του χώρου σε ένα ρεαλιστικό σενάριο βιοκλιματικής αναβάθμισης.

2.6.2 Παρεμβάσεις φύτευσης και σκίασης

Οι παρεμβάσεις φύτευσης και σκίασης αποσκοπούν κυρίως στον περιορισμό της έκθεσης στην ηλιακή ακτινοβολία και στη βελτίωση των τοπικών μικροκλιματικών συνθηκών. Η κατηγορία αυτή περιλαμβάνει την ενίσχυση της φυτοκάλυψης και την προσθήκη φυσικών ή τεχνητών στοιχείων σκίασης σε θέσεις λειτουργικής σημασίας, όπως οι διαδρομές κίνησης, οι είσοδοι, οι χώροι αναμονής και οι ζώνες σύντομης παραμονής. Η επιλογή και η χωροθέτηση των παρεμβάσεων αξιολογούνται με γνώμονα τη λειτουργική συμβατότητα με το νοσοκομειακό περιβάλλον, την ασφάλεια, την προσβασιμότητα και τη δυνατότητα ουσιαστικής μείωσης της ακτινοβολιακής επιβάρυνσης.

Η βλάστηση αποτελεί βασικό μηχανισμό μικροκλιματικής βελτίωσης μέσω της σκίασης, της εξατμισοδιαπνοής και της μείωσης της θερμοκρασίας των επιφανειών. Η στοχευμένη τοποθέτηση δέντρων και άλλων φυτικών στοιχείων σε κρίσιμα σημεία του χώρου μπορεί να συμβάλει στη μείωση της μέσης ακτινοβολούμενης θερμοκρασίας και της θερμικής επιβάρυνσης των χρηστών (Tseliou & Tsiros, 2016; Tsoka et al., 2018).

Στην παρούσα μελέτη, η φύτευση επιλέγεται όχι μόνο για τη μικροκλιματική της λειτουργία, αλλά και για τη συμβολή της στη χωρική οργάνωση του υπαίθριου χώρου. Η χρήση δέντρων και θάμνων μπορεί να υποστηρίξει την οπτική καθοδήγηση και τη διάκριση διαφορετικών ροών κίνησης, υπό την προϋπόθεση ότι δεν περιορίζονται η ορατότητα, ο φυσικός αερισμός, η προσβασιμότητα και η ασφαλής μετακίνηση χρηστών, προσωπικού και οχημάτων έκτακτης ανάγκης. Η παραμετροποίηση των τρισδιάστατων φυτικών στοιχείων στο ENVI-met περιλαμβάνει χαρακτηριστικά που σχετίζονται με τη γεωμετρία της κόμης, τη φυλλική πυκνότητα, την ανακλαστικότητα και τη διαπερατότητα του φυλλώματος.



Σχήμα 2.6.2.1. Περιβάλλον επιλογής και ελέγχου των φυσιολογικών και γεωμετρικών παραμέτρων τρισδιάστατου φυτικού στοιχείου στο εργαλείο SPACE του ENVI-met 5.8.0.

Πηγή: Ιδία επεξεργασία, στιγμιότυπο οθόνης από το ENVI-met 5.8.0.

Η παροχή σκίασης μέσω ελαφρών κατασκευών, όπως τέντες, στέγαστρα ή άλλα συστήματα σκίασης, αποτελεί άμεσο μέτρο περιορισμού της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας. Η επίδρασή της αφορά κυρίως τη μείωση της μέσης ακτινοβολούμενης θερμοκρασίας, η οποία αποτελεί καθοριστικό παράγοντα της θερμικής επιβάρυνσης σε θερινές συνθήκες.

Η τεχνητή σκίαση είναι ιδιαίτερα χρήσιμη σε περιοχές όπου δεν είναι εφικτή η άμεση ή επαρκής δενδροφύτευση, καθώς και σε ζώνες στάσης ή αναμονής που απαιτούν άμεση θερμική προστασία. Στους υπαίθριους χώρους νοσοκομείων, η στοχευμένη σκίαση των λειτουργικά κρίσιμων σημείων μπορεί να περιορίσει σημαντικά την ακτινοβολιακή επιβάρυνση χρηστών και προσωπικού κατά τις ώρες θερμικής αιχμής.

2.6.3 Παρεμβάσεις στα δώματα με πράσινες στέγες

Οι παρεμβάσεις στα δώματα εξετάζονται μέσω της εφαρμογής εκτατικών φυτεμένων επιφανειών, οι οποίες εντάσσονται στη συνολική στρατηγική βιοκλιματικής αναβάθμισης του νοσοκομειακού συγκροτήματος. Στην παρούσα εργασία τα εκτατικά δώματα δεν αντιμετωπίζονται ως πλήρης αρχιτεκτονική διαμόρφωση roof garden (κήπος δώματος /

χώρος παραμονής), αλλά ως παθητικό στοιχείο βελτίωσης της θερμικής συμπεριφοράς της οροφής και της συνολικής περιβαλλοντικής απόκρισης του συγκροτήματος.

Η παρέμβαση αποσκοπεί κυρίως στον περιορισμό της υπερθέρμανσης των οριζόντιων επιφανειών, στη μείωση της θερμικής αποθήκευσης και στην ενίσχυση του πράσινου στοιχείου σε ένα πυκνοδομημένο νοσοκομειακό περιβάλλον με περιορισμένες δυνατότητες φύτευσης στο επίπεδο του εδάφους. Η επιλογή εκτατικού τύπου δώματος συνδέεται με χαμηλότερες απαιτήσεις συντήρησης και μεγαλύτερη συμβατότητα με υφιστάμενα κτιριακά συγκροτήματα, χωρίς να υποκαθιστά την ανάγκη τεχνικού ελέγχου για ζητήματα στατικής επάρκειας, προσβασιμότητας και ασφάλειας.

Η τελική στάθμη της εξεταζόμενης επιφάνειας δώματος αντιστοιχεί περίπου στα 15 m από το επίπεδο αναφοράς του μοντέλου. Η στάθμη αυτή χρησιμοποιείται στην εργασία ως τεχνικό χαρακτηριστικό της παρέμβασης και, συμπληρωματικά, ως επίπεδο κατακόρυφης μικροκλιματικής διερεύνησης. Η διερεύνηση στη στάθμη των 15 m δεν ταυτίζεται με πλήρη αξιολόγηση βατού χώρου παραμονής χρηστών, αλλά αποτυπώνει τις μικροκλιματικές συνθήκες στο επίπεδο εφαρμογής του εκτατικού φυτεμένου δώματος στο επίπεδο πεζού.

Τα φυτεμένα δώματα μπορούν να αποτελέσουν συμπληρωματική λύση σε πυκνοδομημένα περιβάλλοντα με περιορισμένη διαθεσιμότητα ελεύθερου χώρου για φύτευση. Η μικροκλιματική και κτιριακή τους λειτουργία συνδέεται με τη σκίαση της επιφάνειας, την εξατμισοδιαπνοή και τον περιορισμό της επιφανειακής υπερθέρμανσης. Η επιλογή φυτικών ειδών χαμηλών υδατικών απαιτήσεων και η εφαρμογή αποδοτικών συστημάτων άρδευσης είναι ιδιαίτερα σημαντικές υπό τις θερινές συνθήκες της Μεσογείου.

Για υφιστάμενα κτίρια, οι λύσεις εκτατικού τύπου εμφανίζουν συνήθως μικρότερες απαιτήσεις υποστρώματος και συντήρησης σε σχέση με τις εντατικές λύσεις. Ωστόσο, η δυνατότητα εφαρμογής τους δεν μπορεί να θεωρείται δεδομένη χωρίς έλεγχο της φέρουσας ικανότητας, της στεγάνωσης, της αποστράγγισης και των λοιπών τεχνικών απαιτήσεων.

2.6.4 Λειτουργικά και τεχνικά κριτήρια επιλογής των παρεμβάσεων

Η επιλογή των παρεμβάσεων δεν βασίστηκε μόνο στη θεωρητική μικροκλιματική αποτελεσματικότητά τους, αλλά και σε λειτουργικά και τεχνικά κριτήρια που συνδέονται

με τις ιδιαίτερες απαιτήσεις του νοσοκομειακού περιβάλλοντος. Τα κριτήρια αυτά περιλαμβάνουν τη διατήρηση της προσβασιμότητας, τη συμβατότητα με τις ροές κυκλοφορίας, την ασφάλεια ασθενών, συνοδών και προσωπικού, τις απαιτήσεις συντήρησης και τη δυνατότητα ενσωμάτωσης των παρεμβάσεων σε υφιστάμενες υποδομές.

Η χωροθέτηση των παρεμβάσεων βασίστηκε τόσο στον εντοπισμό περιοχών αυξημένης θερμικής και ακτινοβολιακής επιβάρυνσης όσο και στη λειτουργική χρήση του χώρου. Ιδιαίτερη βαρύτητα δόθηκε στις διαδρομές κίνησης, στις εισόδους, στις ζώνες αναμονής και σύντομης παραμονής, καθώς και στα τμήματα που εξυπηρετούν καθημερινές λειτουργίες του νοσοκομειακού συγκροτήματος. Η ενίσχυση της φύτευσης, η εφαρμογή στοιχείων τεχνητής σκίασης και η τροποποίηση των υλικών επιφανειών οργανώθηκαν έτσι ώστε να μην περιορίζονται οι απαιτούμενες διαδρομές, η πρόσβαση οχημάτων έκτακτης ανάγκης, η ορατότητα και η ασφαλής μετακίνηση χρηστών και προσωπικού.

Ειδικά ως προς τα υλικά επιφανειών, η ενδεχόμενη εφαρμογή τους απαιτεί αξιολόγηση όχι μόνο της θερμικής τους συμπεριφοράς, αλλά και της αντοχής, της αντοχής σε έντονη χρήση, της δυνατότητας καθαρισμού και συντήρησης, της οπτικής άνεσης και του κινδύνου πρόκλησης θάμβωσης. Η παρούσα εργασία εξετάζει τα υλικά κυρίως ως παραμέτρους μικροκλιματικής προσομοίωσης· η οριστική επιλογή και πιστοποίησή τους θα πρέπει να αποτελέσει αντικείμενο μεταγενέστερης εφαρμοστικής μελέτης.

Αντίστοιχα, η εφαρμογή παρεμβάσεων στα δώματα προϋποθέτει έλεγχο της φέρουσας ικανότητας, της στεγάνωσης, της αποστράγγισης, της άρδευσης, της συντήρησης και της ασφαλούς πρόσβασης. Στην παρούσα εργασία οι παρεμβάσεις αυτές αξιολογούνται ως μέρος του συνδυαστικού μικροκλιματικού σεναρίου και όχι ως πλήρως τεκμηριωμένες κατασκευαστικές λύσεις.

Η επιλογή των παρεμβάσεων λαμβάνει επίσης υπόψη τις κατευθύνσεις του τοπικού κλιματικού σχεδιασμού. Το Σχέδιο Δράσης για το Κλίμα του Δήμου Αθηναίων περιλαμβάνει στόχους περιορισμού των υψηλών θερμοκρασιών και της αστικής θερμικής νησίδας, προστασίας της δημόσιας υγείας και κάλυψης, έως το 2030, του 30% της επιφάνειας της πόλης με χώρους πρασίνου και/ή διαπερατές επιφάνειες. Παράλληλα, ο Νέος Οικοδομικός Κανονισμός περιλαμβάνει ρυθμίσεις για τις κατασκευές και τις

φυτεύσεις στους ακάλυπτους χώρους στο άρθρο 17 και για τις φυτεμένες επιφάνειες στα δώματα, στις στέγες και στους υπαίθριους χώρους στο άρθρο 18.

Οι παρεμβάσεις του S3 εναρμονίζονται σε επίπεδο γενικών σχεδιαστικών κατευθύνσεων με τους παραπάνω στόχους. Ωστόσο, αποτελούν δυνητικά εφαρμόσιμες προτάσεις μικροκλιματικής αναβάθμισης και δεν υποκαθιστούν τον απαιτούμενο πολεοδομικό, στατικό, κατασκευαστικό και λειτουργικό έλεγχο μιας μελέτης εφαρμογής.

2.7 Διαμόρφωση σεναρίων προσομοίωσης

Με βάση τις παραδοχές γεωμετρικής αναπαράστασης που παρουσιάστηκαν στην Ενότητα 2.2.5, διαμορφώθηκαν δύο τελικά σενάρια προσομοίωσης: το σενάριο αναφοράς S1 και το συνδυαστικό σενάριο παρέμβασης S3.

Τα δύο σενάρια βασίζονται στην ίδια γεωμετρική αναπαράσταση του χώρου, ώστε η συγκριτική μεταβολή S3-S1 να αποδίδεται στις προτεινόμενες βιοκλιματικές παρεμβάσεις και όχι σε διαφοροποιήσεις της βασικής χωρικής αναπαράστασης. Το S1 λειτουργεί ως βάση αναφοράς, ενώ το S3 ενσωματώνει το σύνολο των εξεταζόμενων παρεμβάσεων. Οι ειδικότερες παραδοχές και τα χαρακτηριστικά τους παρουσιάζονται στις Ενότητες 2.7.1 και 2.7.2.

Για λόγους ιχνηλασιμότητας, στις αυτόματα παραγόμενες επικεφαλίδες ορισμένων εξαγωγών του ENVI-met 5.8.0/Leonardo το σενάριο S1 εμφανίζεται με την τεχνική ονομασία «S1_yfistameno». Η ένδειξη αυτή αποτελεί αποκλειστικά εσωτερικό κωδικό του αρχείου προσομοίωσης και αντιστοιχεί στο σενάριο αναφοράς S1, όπως ορίζεται στην παρούσα ενότητα, δεν δηλώνει πλήρη αποτύπωση της σημερινής λειτουργικής κατάστασης.

Τα δύο σενάρια προσομοιώθηκαν υπό τις ίδιες οριακές συνθήκες, για την ίδια ημερομηνία, το ίδιο χρονικό διάστημα και τα ίδια ύψη αναφοράς, ώστε η μεταξύ τους σύγκριση να είναι συνεπής. Στη συνέχεια της εργασίας χρησιμοποιούνται οι σύντομες ονομασίες S1 και S3, ενώ οι συγκριτικές μεταβολές αποδίδονται ως $\Delta = S3-S1$.

2.7.1 Σενάριο αναφοράς S1

Το S1 συγκροτεί τη βάση αναφοράς για τη συγκριτική αξιολόγηση των σεναρίων. Περιλαμβάνει τα υφιστάμενα υλικά επιφανειών, την υπάρχουσα βλάστηση, τους βασικούς

κτιριακούς όγκους και τις αντίστοιχες συνθήκες σκίασης, αλλά εφαρμόζει τη μεθοδολογική παραδοχή ανασύστασης των αρχικά ακάλυπτων χώρων ως δυνητικά ανακτήσιμων υπαίθριων χώρων, όπως τεκμηριώθηκε στην Ενότητα 2.2.5. Επομένως, δεν αποτελεί πλήρη αποτύπωση της σημερινής λειτουργικής κατάστασης του νοσοκομειακού συγκροτήματος, αλλά συνεπή βάση σύγκρισης για την αποτίμηση της μικροκλιματικής αποτελεσματικότητας του συνδυαστικού σεναρίου S3.

Τα σενάρια S1 και S3 βασίζονται στην ίδια γεωμετρική αναπαράσταση του χώρου, ώστε οι μεταξύ τους διαφοροποιήσεις να αποδίδονται στις προτεινόμενες βιοκλιματικές παρεμβάσεις και όχι σε μεταβολές της βασικής γεωμετρίας. Επομένως, η παραδοχή ανασύστασης των αρχικά ακάλυπτων χώρων εφαρμόζεται με συνέπεια και στα δύο σενάρια.

α) Χαρακτηριστικά της υφιστάμενης βλάστησης και παραμετροποίηση στο ENVI-met

Στο σενάριο αναφοράς S1 καταγράφηκαν συνολικά 23 δέντρα, τα οποία αποδόθηκαν στο ENVI-met 5.8.0 με βάση πέντε βασικούς τύπους τρισδιάστατης βλάστησης της βιβλιοθήκης του λογισμικού. Ειδικότερα, καταγράφηκαν 2 φοίνικες, 9 Wild Fruit Tree (young), 6 κωνικής μορφής δέντρα, 3 κυλινδρικής μορφής δέντρα και 3 σφαιρικής μορφής δέντρα. Για την περιγραφή της υφιστάμενης βλάστησης θεωρήθηκε σκόπιμη η καταγραφή βασικών μορφολογικών και φυσικών χαρακτηριστικών, όπως το ύψος, το πλάτος της κόμης, η πυκνότητα φυλλικής επιφάνειας (Leaf Area Density, LAD) και το albedo του φυλλώματος, καθώς οι παράμετροι αυτές επηρεάζουν άμεσα τη σκίαση, τη διαπερατότητα της ηλιακής ακτινοβολίας και, κατ' επέκταση, τη μικροκλιματική συμπεριφορά του χώρου.

Πίνακας 2.7.1.1 Μορφολογικά και φυσικά χαρακτηριστικά των τύπων τρισδιάστατης βλάστησης που χρησιμοποιήθηκαν για την αποτύπωση του σεναρίου αναφοράς (S1)

ID	Τύπος 3D φυτού	Μοντελοποιητική προσέγγιση	Πλήθος	Ύψος (m)	Πλάτος (m)	LAD	Albedo	Τύπος φύλλων
01PLDM	Palm, large trunk, dense,	Πλεγματοειδές 3D φυτό (grid-based)	2	15,00	9,00	0,60	0,18	Φυλλοβόλο*

ID	Τύπος 3D φυτού	Μοντελοποιητική προσέγγιση	Πλήθος	Ύψος (m)	Πλάτος (m)	LAD	Albedo	Τύπος φύλλων
	medium (15m)							
010721	Wild Fruit Tree (young)	Παραμετρικό δέντρο (QSM/L-System)	9	4,67	2,51 × 2,50	Μεταβλητό στο z = 1 (0,337–0,803)	0,18	Φυλλοβόλο
02AMDM	Conic, medium trunk, dense, medium (15m)	Πλεγματοειδές 3D φυτό (grid-based)	6	15,00	7,00	1,40	0,12	Κωνοφόρο
02CLDM	Cylindric, large trunk, dense, medium (15m)	Πλεγματοειδές 3D φυτό (grid-based)	3	15,00	9,00	1,40	0,12	Κωνοφόρο
02SMDM	Spherical, medium trunk, dense, medium (15m)	Πλεγματοειδές 3D φυτό (grid-based)	3	15,00	11,00	1,10	0,18	Φυλλοβόλο

Πηγή: Ιδία επεξεργασία από δεδομένα ENVI-met 5.8.0

Σημείωση: Για το είδος 010721 (Wild Fruit Tree, young) η παράμετρος LAD δεν αποδίδεται ως μία ενιαία σταθερή τιμή για ολόκληρο το δέντρο, καθώς το συγκεκριμένο είδος μοντελοποιείται ως παραμετρικό δέντρο τύπου QSM/L-System και όχι ως απλό πλεγματοειδές 3D φυτό. Για τον λόγο αυτό καταγράφηκε το εύρος των τιμών που παρατηρήθηκε στα ενεργά voxels της κόμης στο επίπεδο z = 1,0 m. Ο χαρακτηρισμός του τύπου φύλλων αποδίδεται όπως ορίζεται στη βιβλιοθήκη του ENVI-met.

Από τον Πίνακα 2.7.1.1 προκύπτει ότι η υφιστάμενη βλάστηση του χώρου δεν είναι ομοιογενής, αλλά συγκροτείται από διαφορετικούς τύπους δέντρων με διακριτά μορφολογικά και ακτινοβολιακά χαρακτηριστικά. Κυρίαρχη παρουσία εμφανίζει το είδος Wild Fruit Tree (young), το οποίο καταγράφηκε εννέα φορές, ενώ ακολουθεί ο τύπος Conic, medium trunk, dense, medium, ο οποίος εμφανίζεται έξι φορές. Παράλληλα, καταγράφεται μικρότερη παρουσία φοινίκων, κυλινδρικής μορφής και σφαιρικής μορφής δέντρων.

Από μορφολογική άποψη, οι περισσότεροι τύποι βλάστησης αποδίδονται με ονομαστικό ύψος 15,00 m, ενώ διαφοροποιούνται κυρίως ως προς το πλάτος της κόμης, την τιμή LAD και το albedo του φυλλώματος. Οι τιμές LAD των πλεγματικών 3D φυτών κυμαίνονται από 0,60 έως 1,40, γεγονός που υποδηλώνει διαφοροποίηση ως προς την πυκνότητα της κόμης και, κατ' επέκταση, ως προς τη δυνητική σκιαστική τους συμβολή. Αντίστοιχα, το albedo του φυλλώματος κυμαίνεται από 0,12 έως 0,18, στοιχείο που σχετίζεται με τον βαθμό ανάκλασης της προσπίπτουσας βραχέος κύματος ακτινοβολίας.

Ιδιαίτερη σημασία παρουσιάζει το είδος Wild Fruit Tree (young), καθώς, σε αντίθεση με τα υπόλοιπα είδη, αποδίδεται στο ENVI-met ως παραμετρικό δέντρο τύπου QSM/L-System και όχι ως grid-based 3D plant. Ως αποτέλεσμα, η παράμετρος LAD δεν εμφανίζεται ως ενιαία σταθερή τιμή, αλλά ως χωρικά μεταβαλλόμενο μέγεθος εντός της κόμης. Η ιδιαιτερότητα αυτή αντανακλά τη συνθετότερη γεωμετρική και μορφολογική δομή του συγκεκριμένου τύπου βλάστησης και θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη κατά την ερμηνεία της μικροκλιματικής του συμβολής.

Συμπληρωματική χαμηλή βλάστηση

Πέραν των δέντρων, στο σενάριο αναφοράς αποτυπώθηκε και στοιχείο χαμηλής βλάστησης τύπου φράκτη, το οποίο μοντελοποιήθηκε στο ENVI-met 5.8.0 ως simple plant της βιβλιοθήκης του λογισμικού. Το στοιχείο αυτό δεν συμπεριλαμβάνεται στο σύνολο των 23 δέντρων, καθώς αποτελεί γραμμική χαμηλή βλάστηση και όχι τρισδιάστατο δέντρο. Ωστόσο, η παρουσία του θεωρείται μικροκλιματικά σημαντική, επειδή επηρεάζει το τοπικό επίπεδο σκίασης, τη διαπερατότητα της ηλιακής ακτινοβολίας και τη διαμόρφωση του μικροπεριβάλλοντος κοντά στο έδαφος.

Πίνακας 2.7.1.2. Συμπληρωματικά στοιχεία χαμηλής βλάστησης που χρησιμοποιήθηκαν για την αποτύπωση του σεναρίου αναφοράς S1.

ID	Τύπος φυτού	Κατηγορία μοντέλου	Υψος (m)	Albedo	Emissivity	Transmittance	Leaf type	Root Zone Depth (m)
0200H2	Hedge dense, 2m	Simple plant	2,00	0,20	0,97	0,30	Deciduous	1,00

Πηγή: Ιδία επεξεργασία από δεδομένα ENVI-met 5.8.0

Σημείωση: Το στοιχείο [0200H2] Hedge dense, 2m αποδίδεται ως simple plant της βιβλιοθήκης ENVI-met 5.8.0 και όχι ως 3D tree. Για τον λόγο αυτό δεν περιλαμβάνεται στο πλήθος των δέντρων του Σεναρίου 1, αλλά καταγράφεται ξεχωριστά ως συμπληρωματικό στοιχείο χαμηλής βλάστησης.

Η παρουσία του φράκτη τύπου Hedge dense, 2m ενισχύει τη μικροκλιματική πολυπλοκότητα του σεναρίου αναφοράς S1, καθώς εισάγει χαμηλή αλλά πυκνή βλάστηση σε ύψος 2,00 m. Παρότι η συμβολή του στη συνολική σκίαση είναι σαφώς μικρότερη σε σχέση με τα υψηλά δέντρα του χώρου, η ύπαρξή του μπορεί να επηρεάζει το μικροκλίμα σε τοπική κλίμακα, κυρίως κοντά στο επίπεδο κίνησης των χρηστών και στα όρια των διαδρομών ή των παρτεριών όπου αναπτύσσεται.

β) Χαρακτηριστικά των υφιστάμενων υλικών επιφανειών και παραμετροποίηση στο ENVI-met 5.8.0

Πέραν της βλάστησης, για την αποτύπωση του σεναρίου αναφοράς S1 στο ENVI-met παραμετροποιήθηκαν και τα βασικά υλικά επιφανειών του χώρου, καθώς οι ακτινοβολιακές και θερμικές ιδιότητές τους επηρεάζουν ουσιαστικά τη διαμόρφωση του μικροκλίματος. Ειδικότερα, η ασφαλτος, οι σκληρές τσιμεντοστρωμένες επιφάνειες και οι μη σφραγισμένες επιφάνειες εδάφους διαφοροποιούνται ως προς την ικανότητα απορρόφησης, ανάκλασης και επανεκπομπής θερμότητας, επηρεάζοντας τις θερμοκρασίες επιφανείας, τη μέση ακτινοβολούμενη θερμοκρασία και τελικά τη θερμική επιβάρυνση των χρηστών του χώρου.

Πίνακας 2.7.1.3 Βασικά υλικά επιφανειών που χρησιμοποιήθηκαν για την αποτύπωση του σεναρίου αναφοράς S1 στο ENVI-met

Κωδικός υλικού	Ονομασία υλικού	Κατηγορία επιφάνειας	z0 Roughness Length	Albedo	Emissivity	Surface is irrigated
[0200ST]	Asphalt Road	Ασφαλτική επιφάνεια οδού	0,010	0,12	0,90	False

Κωδικός υλικού	Ονομασία υλικού	Κατηγορία επιφάνειας	z0 Roughness Length	Albedo	Emissivity	Surface is irrigated
[0200PP]	Pavement (Concrete), used/dirty	Σκληρή τσιμεντοστρωμένη επιφάνεια	0,010	0,25	0,90	False
[0200SL]	Default Unsealed Soil (Sandy Loam)	Μη σφραγισμένη εδαφική επιφάνεια	0,015	0,20	0,90	False

Πηγή: Ιδία επεξεργασία από δεδομένα ENVI-met 5.8.0

Σημείωση: Στο σενάριο αναφοράς χρησιμοποιήθηκαν τα προφίλ επιφανειών [0200ST] Asphalt Road, [0200PP] Pavement (Concrete), used/dirty και [0200SL] Default Unsealed Soil (Sandy Loam), όπως αυτά ορίζονται στη βιβλιοθήκη του ENVI-met. Τα προφίλ της κατηγορίας Legacy δεν χρησιμοποιήθηκαν στο παρόν μοντέλο.

Από τον Πίνακα 2.7.1.3 προκύπτει ότι στο σενάριο αναφοράς η κατάσταση του χώρου αποδίδεται με τρεις βασικούς τύπους επιφανειών: ασφαλτικές επιφάνειες, τσιμεντοστρωμένες σκληρές επιστρώσεις και μη σφραγισμένες εδαφικές επιφάνειες. Οι διαφοροποιήσεις τους ως προς το albedo και τη τραχύτητα επιφάνειας έχουν άμεση μικροκλιματική σημασία, καθώς επηρεάζουν την απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας, τη θερμική αποθήκευση και την ανταλλαγή θερμότητας με την ατμόσφαιρα.

Ειδικότερα, η άσφαλτος [0200ST], με albedo 0,12, εμφανίζει τη χαμηλότερη ανακλαστικότητα από τα τρία υλικά, γεγονός που σημαίνει ότι απορροφά μεγαλύτερο ποσοστό της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας. Ως αποτέλεσμα, αναμένεται να συμβάλλει εντονότερα στην αύξηση της θερμοκρασίας επιφάνειας και, κατά συνέπεια, στη θερμική επιβάρυνση του υπαίθριου χώρου, ιδιαίτερα κατά τις ώρες μέγιστης ηλιακής φόρτισης.

Αντίθετα, η επιφάνεια Pavement (Concrete), used/dirty [0200PP], με albedo 0,25, παρουσιάζει μεγαλύτερη ανακλαστικότητα από την άσφαλτο. Η ιδιότητα αυτή υποδηλώνει μικρότερη απορρόφηση ηλιακής ακτινοβολίας και δυνητικά ηπιότερη θερμική συμπεριφορά σε σχέση με τις ασφαλτικές επιφάνειες, αν και εξακολουθεί να αποτελεί σκληρή, σφραγισμένη επιφάνεια με σημαντική συμβολή στη θερμική φόρτιση του χώρου.

Το Default Unsealed Soil (Sandy Loam) [0200SL], με albedo 0,20 και ελαφρώς μεγαλύτερη τιμή z_0 roughness length (0,015), διαφοροποιείται από τις σκληρές επιστρώσεις τόσο ως προς την τραχύτητα όσο και ως προς τη γενικότερη θερμική του συμπεριφορά. Ως μη σφραγισμένη επιφάνεια, εμφανίζει διαφορετική απόκριση στη θέρμανση και στην ανταλλαγή θερμότητας με το περιβάλλον, ενώ σε συνδυασμό με τη βλάστηση μπορεί να συμβάλλει στη διαμόρφωση ηπιότερων τοπικών μικροκλιματικών συνθηκών.

Το σενάριο αναφοράς διαφοροποιείται τόσο ποσοτικά ως προς τον αριθμό των δέντρων όσο και ποιοτικά ως προς τη μορφολογία της βλάστησης και τις φυσικές ιδιότητες των υλικών των επιφανειών. Η συνδυαστική αυτή παραμετροποίηση αποτελεί αναγκαία βάση για την ερμηνεία των αποτελεσμάτων του S1, καθώς επιτρέπει τη συσχέτιση της χωρικής κατανομής της θερμικής επιβάρυνσης με τα επιμέρους χαρακτηριστικά της βλάστησης και των επιφανειών που υφίστανται στον χώρο.

Με βάση την παραπάνω παραμετροποίηση της υφιστάμενης βλάστησης και των υλικών επιφανειών, στην επόμενη ενότητα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του S1 ως προς τη χωρική και χρονική αποτύπωση της θερμικής επιβάρυνσης και της θερμικής άνεσης στον υπό μελέτη χώρο του νοσοκομειακού συγκροτήματος.

2.7.2 Συνδυαστικό σενάριο παρέμβασης S3: βιοκλιματική αναβάθμιση

Το τελικό σενάριο παρέμβασης κωδικοποιείται ως S3, για λόγους συνέπειας με τα αρχεία προσομοίωσης και τους παραγόμενους χάρτες αποτελεσμάτων. Στην τελική δομή της εργασίας, το S3 δεν αποτελεί τρίτο ανεξάρτητο σενάριο, αλλά το συνδυαστικό σενάριο βιοκλιματικής παρέμβασης που συγκρίνεται με το σενάριο αναφοράς S1.

Το S3 διαμορφώθηκε ως ενιαίο σενάριο βιοκλιματικής αναβάθμισης και ενσωματώνει ταυτόχρονα τροποποιήσεις επιλεγμένων υλικών επιφανειών, ενίσχυση της φύτευσης, εφαρμογή στοιχείων σκίασης και παρεμβάσεις στα δώματα. Η συνδυαστική προσέγγιση επιλέχθηκε επειδή, στον αστικό σχεδιασμό, οι επιμέρους παρεμβάσεις δεν λειτουργούν απομονωμένα, αλλά αλληλεπιδρούν και επηρεάζουν συνολικά το μικροκλιματικό ισοζύγιο και την υπολογιζόμενη θερμική επιβάρυνση των εξεταζόμενων προφίλ χρήστη.

Το S3 αποτελεί δυνητικά εφαρμόσιμο σχεδιαστικό σενάριο και όχι κατασκευαστικά ώριμη μελέτη εφαρμογής. Η εφαρμογή του προϋποθέτει τη δυνατότητα λειτουργικής

αναδιοργάνωσης και ανάκτησης των αρχικά ακάλυπτων χώρων από μεταγενέστερες βοηθητικές χρήσεις. Επομένως, αξιολογεί το σχεδιαστικό και μικροκλιματικό δυναμικό των υπαίθριων χώρων του νοσοκομείου υπό τις συγκεκριμένες μεθοδολογικές παραδοχές. Η σύγκριση S3–S1 αφορά τη συνολική επίδραση του συνδυασμού των παρεμβάσεων. Συνεπώς, τα αποτελέσματα δεν επιτρέπουν την απομόνωση της επιμέρους συμβολής της βλάστησης, της σκίασης, των υλικών επιφανειών ή των παρεμβάσεων στα δώματα, αλλά αποτυπώνουν τη συνολική μικροκλιματική απόκριση του συνδυαστικού σεναρίου.

α) Χαρακτηριστικά της πρόσθετης βλάστησης και παραμετροποίηση στο ENVI-met

Στο συνδυαστικό σενάριο παρέμβασης S3, η βλάστηση αντιμετωπίστηκε ως βασική παράμετρος βιοκλιματικού σχεδιασμού. Η επιλογή και η χωροθέτηση των φυτικών στοιχείων πραγματοποιήθηκαν με γνώμονα την ενίσχυση του θερινού σκιασμού, τη μείωση της ακτινοβολιακής έκθεσης και τον περιορισμό της θερμικής επιβάρυνσης στους υπαίθριους χώρους του νοσοκομείου. Ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στις διαδρομές κίνησης, στις εισόδους, στις θέσεις αναμονής και στις ζώνες σύντομης παραμονής.

Για την παραμετροποίηση των φυτικών στοιχείων συνεκτιμήθηκαν το συνολικό ύψος, η διάμετρος και η γεωμετρία της κόμης, καθώς και η πυκνότητα φυλλικής επιφάνειας, όπως εκφράζεται μέσω της παραμέτρου Leaf Area Density (LAD). Οι παράμετροι αυτές επηρεάζουν τη διαπερατότητα της κόμης στην ηλιακή ακτινοβολία, την έκταση του παραγόμενου σκιασμού και τη συνολική μικροκλιματική λειτουργία της βλάστησης. Η βιβλιογραφία αναγνωρίζει τον δείκτη LAD, μαζί με τον δείκτη Leaf Area Index (LAI), ως βασική παράμετρο περιγραφής της δομής της κόμης και της επίδρασής της στο αστικό μικροκλίμα. Στις προσομοιώσεις των Asef et al. (2020), οι πυκνότερες κόμης με υψηλότερες τιμές LAI και LAD παρουσίασαν εντονότερη μικροκλιματική επίδραση, χωρίς αυτό να σημαίνει ότι η αύξηση της LAD αποτελεί από μόνη της επαρκές κριτήριο επιλογής, ανεξάρτητα από τη χωροθέτηση και τις συνθήκες αερισμού.

Το ύψος, η γεωμετρία και η θέση των πρόσθετων φυτικών στοιχείων καθορίστηκαν σε συνάρτηση με τους γειτονικούς κτιριακούς όγκους, την υφιστάμενη βλάστηση και τη λειτουργική οργάνωση του υπαίθριου χώρου. Με τον τρόπο αυτό επιδιώχθηκε η προσαρμογή της φύτευσης στη μορφολογία της περιοχής μελέτης, χωρίς να περιορίζονται

η προσβασιμότητα, η ορατότητα, η ασφαλής μετακίνηση και η λειτουργία των απαιτούμενων διαδρομών.

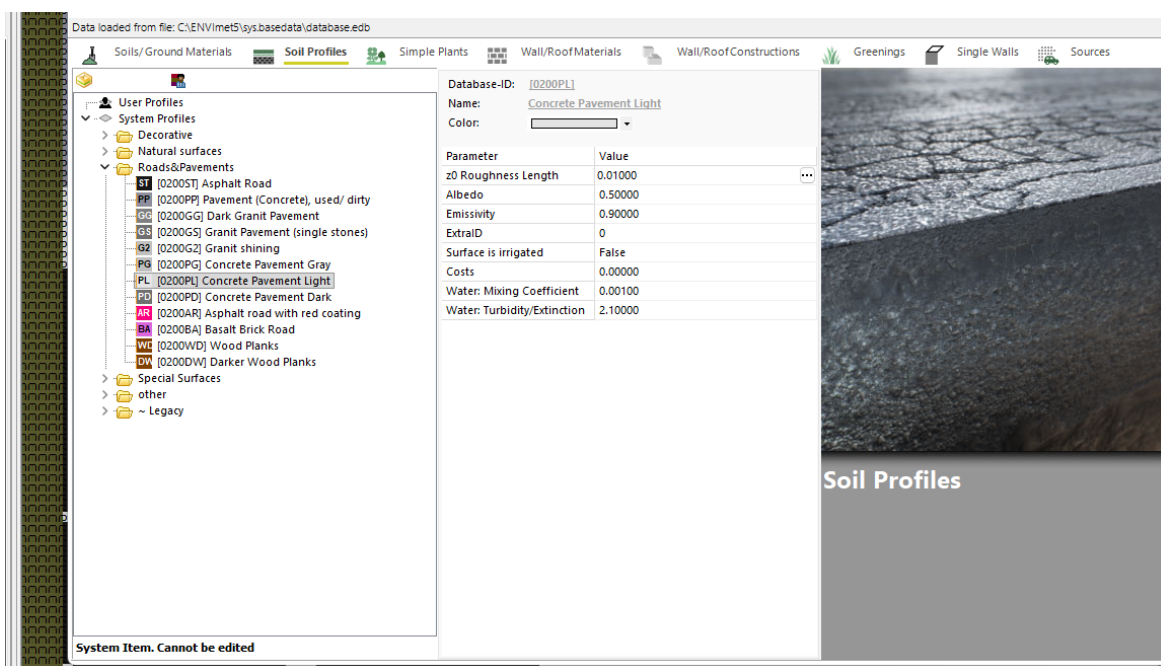
Σε επιλεγμένες θέσεις δόθηκε προτεραιότητα στη χρήση φυλλοβόλων ειδών, ώστε να ενισχύεται ο θερινός σκιασμός και να διατηρείται μεγαλύτερη δυνατότητα ηλιακής πρόσβασης κατά την ψυχρή περίοδο. Η επιλογή αυτή εφαρμόστηκε ως σχεδιαστική αρχή και όχι ως αυτοτελώς αξιολογούμενη παρέμβαση, καθώς τα αποτελέσματα του S3 αποδίδουν τη συνολική επίδραση του συνδυασμού βλάστησης, σκίασης, υλικών επιφανειών και παρεμβάσεων στα δώματα.

Η παραμετροποίηση των τρισδιάστατων φυτικών στοιχείων στο ENVI-met 5.8.0 περιέλαβε τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της κόμης και του ριζικού συστήματος, την LAD, την ανακλαστικότητα και τη διαπερατότητα του φυλλώματος στη βραχέως κύματος ακτινοβολία, καθώς και τις λοιπές διαθέσιμες φυσιολογικές παραμέτρους του μοντέλου. Η διαδικασία αυτή επέτρεψε τη συνεπή ενσωμάτωση της πρόσθετης βλάστησης στο ψηφιακό μοντέλο του συνδυαστικού σεναρίου S3.

β) Χαρακτηριστικά των νέων υλικών επιφανειών και παραμετροποίηση στο ENVI-met

Στο S3 τροποποιήθηκαν επίσης επιλεγμένα υλικά επιφανειών, ώστε να βελτιωθεί η θερμική συμπεριφορά του χώρου. Η παρέμβαση αυτή βασίστηκε στη διαπίστωση ότι τα υλικά υψηλής απορροφητικότητας και μεγάλης θερμικής αποθήκευσης, όπως οι σκούρες και σκληρές επιστρώσεις, ενισχύουν τη θερμική επιβάρυνση, ιδιαίτερα κατά τις ώρες μέγιστης ηλιακής φόρτισης. Ως εκ τούτου, στο S3 εξετάστηκε η αντικατάσταση ή αναβάθμιση επιλεγμένων επιφανειών με υλικά ευνοϊκότερων ακτινοβολιακών χαρακτηριστικών, με στόχο τον περιορισμό της απορρόφησης ηλιακής ακτινοβολίας και τη μείωση της θερμοκρασίας επιφανείας.

Η επιλογή των υλικών στο συνδυαστικό σενάριο δεν αντιμετωπίστηκε ως μεμονωμένη τεχνική μεταβολή, αλλά ως τμήμα μιας ολοκληρωμένης στρατηγικής μικροκλιματικής αναβάθμισης, σε συνδυασμό με τη βλάστηση και τις παρεμβάσεις στα δώματα. Η τροποποίηση των επιφανειών επιδιώκει να περιορίσει την ένταση των θερμικών φορτίων στο επίπεδο του πεζού και να βελτιώσει τη συνολική ακτινοβολιακή ισορροπία του υπαίθριου χώρου.



Σχήμα 2.7.2.1 Περιβάλλον επιλογής και ελέγχου υλικών εργαλείο SPACE του ENVI-met 5.8.0.

Πηγή: Ιδία επεξεργασία, στιγμιότυπο οθόνης από το ENVI-met 5.8.0.

Οι βασικές παρεμβάσεις που συγκροτούν το συνδυαστικό σενάριο, οι επιδιωκόμενοι στόχοι τους και ο αναμενόμενος μηχανισμός μικροκλιματικής δράσης συνοψίζονται στον ακόλουθο πίνακα.

Πίνακας 2.7.2.1 Συνδυαστικό σενάριο βιοκλιματικής αναβάθμισης: παρεμβάσεις, στόχος και μηχανισμός δράσης

Παρέμβαση	Στόχος	Αναμενόμενος μικροκλιματικός μηχανισμός
Αντικατάσταση υφιστάμενων υλικών δαπέδου με υλικά ευνοϊκότερης θερμικής συμπεριφοράς	Μείωση της επιφανειακής υπερθέρμανσης και περιορισμός της θερμικής επιβάρυνσης των υπαίθριων διαδρομών και περιοχών στάσης	Μείωση της θερμοκρασίας επιφάνειας, περιορισμός της αποθήκευσης θερμότητας στα δομικά υλικά και μείωση της μακρού κύματος επανεκπομπής προς το περιβάλλον
Ενίσχυση της φύτευσης με θάμνους	Βελτίωση του τοπικού μικροκλίματος σε επίπεδο χαμηλής βλάστησης και μετριασμός της θερμικής επιβάρυνσης σε επιλεγμένες ζώνες	Τοπική σκίαση επιφανειών, ενίσχυση της εξατμισοδιαπνοής και ήπια μείωση της επιφανειακής και ατμοσφαιρικής θερμικής φόρτισης

Παρέμβαση	Στόχος	Αναμενόμενος μικροκλιματικός μηχανισμός
Στοχευμένη τοποθέτηση δέντρων σε κρίσιμα σημεία	Παροχή σκίασης σε περιοχές κίνησης και παραμονής και βελτίωση της θερμικής άνεσης των χρηστών	Μείωση της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας, περιορισμός της T _{mrt} , σκίαση του εδάφους και ενίσχυση της εξατμισοδιαπνοής
Προσθήκη στοιχείων σκίασης σε ζώνες στάσης και διέλευσης	Άμεση προστασία των χρηστών από την ηλιακή έκθεση στις περισσότερες επιβαρυνόμενες περιοχές	Μείωση της άμεσης βραχέος κύματος ακτινοβολίας στο ύψος του ανθρώπου, περιορισμός της ακτινοβολιακής φόρτισης και μείωση της T _{mrt}
Εφαρμογή μη εντατικού δώματος σε βαθύ οροφή/διάδρομο επικοινωνίας	Βελτίωση της θερμικής συμπεριφοράς της οροφής που λειτουργεί ως υπαίθριος διάδρομος διέλευσης	Μείωση της επιφανειακής θερμοκρασίας της οροφής, περιορισμός της αποθηκευμένης θερμότητας και ηπιότερο θερμικό υπόβαθρο στο επίπεδο κίνησης των πεζών

Πηγή: Ιδία επεξεργασία από δεδομένα ENVI-met 5.8.0

γ) Χαρακτηριστικά της Παρέμβασης Δωμάτων και παραμετροποίηση στο ENVI-met

Στο σενάριο παρέμβασης S3 ενσωματώθηκε εφαρμογή εκτατικού φυτεμένου δώματος στις οριζόντιες επιφάνειες του νοσοκομειακού συγκροτήματος, όπως φαίνεται στο σενάριο S3. Η παρέμβαση αποδόθηκε στο μοντέλο ως στοιχείο παθητικής βιοκλιματικής αναβάθμισης, με στόχο τη μείωση της θερμικής επιβάρυνσης των οροφών και τη βελτίωση της συνολικής θερμικής συμπεριφοράς του συγκροτήματος.

Ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στην τελική στάθμη της εξεταζόμενης επιφάνειας δώματος αντιστοιχεί περίπου στα 15 m από το επίπεδο αναφοράς του μοντέλου. Στην παρούσα εργασία η στάθμη αυτή δεν αντιμετωπίζεται ως ανεξάρτητο σενάριο, αλλά ως τεχνικό χαρακτηριστικό της παρέμβασης δωμάτων που εντάσσεται στο S3. Η παρέμβαση αφορά κυρίως εκτατικό φυτεμένο δώμα και όχι πλήρη αρχιτεκτονική διαμόρφωση βατού roof garden (κήπος δώματος / χώρος παραμονής), κυρίως λόγω μη υπάρχουσας μελέτης στατικής επάρκειας.

Η διάκριση αυτή είναι μεθοδολογικά σημαντική, διότι η μετατροπή ενός δώματος σε χώρο συστηματικής παραμονής θα απαιτούσε πρόσθετη τεχνική και λειτουργική τεκμηρίωση, όπως έλεγχο στατικής επάρκειας, προσβασιμότητα, ασφάλεια, προστασία από πτώση,

σκίαση, εξοπλισμό παραμονής και διαχείριση της νοσοκομειακής λειτουργίας. Για τον λόγο αυτό, το δώμα αξιολογείται εδώ πρωτίστως ως επιφάνεια βιοκλιματικής παρέμβασης και συμπληρωματικά ως στάθμη μικροκλιματικής διερεύνησης.

Ιδιαίτερη πρόβλεψη στο πλαίσιο του συνδυαστικού σεναρίου αφορά τμήμα χαμηλού κτιριακού όγκου, του οποίου η οροφή λειτουργεί ως βατή επιφάνεια και χρησιμοποιείται ως διάδρομος επικοινωνίας μεταξύ κτιρίων. Επειδή το συγκεκριμένο τμήμα δεν αποτελεί απλώς τεχνική οροφή αλλά λειτουργικό υπαίθριο χώρο διέλευσης, κρίθηκε σκόπιμη η ειδική αντιμετώπισή του στο σενάριο παρέμβασης.

Η εφαρμογή φυτεμένου δώματος εκτατικού τύπου αποσκοπεί στη βελτίωση της θερμικής συμπεριφοράς της οριζόντιας επιφάνειας, μέσω του περιορισμού της επιφανειακής υπερθέρμανσης και της μείωσης της αποθήκευσης θερμότητας στην οροφή. Η παρέμβαση αξιολογείται ως μέρος του συνολικού συνδυαστικού σεναρίου και όχι ως ανεξάρτητο σενάριο προσομοίωσης.

Η παρέμβαση στα δώματα δεν εξετάζεται ως ανεξάρτητο σενάριο, αλλά ως επιμέρους στοιχείο του συνδυαστικού σεναρίου S3. Η επιλογή αυτή συνδέεται με τη βιβλιογραφική τεκμηρίωση ότι τα πράσινα δώματα εμφανίζουν μεγαλύτερη μικροκλιματική σημασία όταν λειτουργούν συνεργιστικά με άλλες μορφές αστικού πρασίνου και σκίασης. Στη μελέτη των Tseliou et al. (2023), ο συνδυασμός πράσινων δωματίων και πράσινων όψεων εμφάνισε ισχυρότερη βελτίωση από τις μεμονωμένες παρεμβάσεις, γεγονός που υποστηρίζει τη λογική της συνδυαστικής βιοκλιματικής αξιολόγησης που υιοθετείται στην παρούσα εργασία.

Για την αριθμητική αναπαράσταση του φυτεμένου δώματος στο ENVI-met χρησιμοποιήθηκε στοιχείο χαμηλής βλάστησης από τη βάση δεδομένων του λογισμικού, με χαρακτηρισμό *Hedera helix* και τιμή Leaf Area Index (LAI) ίση με 1,5. Η επιλογή αυτή αποτελεί παραμετροποίηση του μοντέλου για την προσομοίωση της χαμηλής βλάστησης και δεν συνιστά οριστική φυτοτεχνική πρόταση ή τεχνική προδιαγραφή κατασκευής.

Η παρέμβαση ενσωματώθηκε στο S3 ως μέρος της συνολικής στρατηγικής βιοκλιματικής αναβάθμισης. Συνεπώς, η επίδρασή της δεν αξιολογείται αυτοτελώς, αλλά σε συνδυασμό με τις μεταβολές των υλικών επιφανειών, την πρόσθετη βλάστηση και τα στοιχεία σκίασης.

2.7.3 Συνοπτική συγκριτική περιγραφή των σεναρίων

Τα δύο σενάρια διαμορφώθηκαν με τρόπο που να επιτρέπουν τη συστηματική σύγκριση μεταξύ της «υφιστάμενης κατάστασης» και μιας ολοκληρωμένης στρατηγικής βιοκλιματικής αναβάθμισης. Το πρώτο σενάριο S1 λειτουργεί ως βάση αναφοράς, ενώ το δεύτερο S3, συγκεντρώνει στο ίδιο μοντέλο τις βασικές παρεμβάσεις που κρίθηκαν τεχνικά εφικτές και μικροκλιματικά ουσιαστικές για τον συγκεκριμένο χώρο. Η διάρθρωση αυτή επιτρέπει την άμεση ποσοτική αποτίμηση της συνολικής θερμικής βελτίωσης και τη λειτουργική αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας του συνδυαστικού σχεδιασμού σε υπαίθριους χώρους νοσοκομείων.

Για λόγους συντομίας και συνέπειας, στη συνέχεια της εργασίας τα δύο σενάρια αναφέρονται ως S1 και S3. Η διαφορά S3–S1 δηλώνει τη μεταβολή που προκαλεί το συνδυαστικό σενάριο παρέμβασης σε σχέση με το σενάριο αναφοράς.

Η χωρική διάταξη του S3 προέκυψε από τη συνεκτίμηση των μικροκλιματικών χαρακτηριστικών του σεναρίου αναφοράς S1 και των λειτουργικών απαιτήσεων του νοσοκομειακού χώρου. Οι παρεμβάσεις συγκεντρώθηκαν κυρίως σε περιοχές αυξημένης ακτινοβολιακής έκθεσης και σε ζώνες κίνησης, αναμονής και σύντομης παραμονής.

Η σύγκριση των δύο σεναρίων αφορά τη συνολική απόκριση του S3. Επομένως, οι μεταβολές που προκύπτουν δεν αποδίδονται αποκλειστικά σε μία κατηγορία παρέμβασης, αλλά στον συνδυασμό βλάστησης, σκίασης, υλικών επιφανειών και παρεμβάσεων στα δώματα.

2.8 Μέθοδος αξιολόγησης και κριτήρια συγκριτικής ανάλυσης

Η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της παρούσας μελέτης οργανώνεται στη βάση μιας συνδυαστικής προσέγγισης, η οποία περιλαμβάνει δεικτοκεντρική, χρονική και χωρική ανάλυση, καθώς και συγκριτική αποτίμηση των σεναρίων παρέμβασης. Η ανάλυση εστιάζει αρχικά στους δείκτες θερμικής άνεσης PET και UTCI, οι οποίοι χρησιμοποιούνται για τη γενική αποτύπωση της θερμικής επιβάρυνσης στον χώρο μελέτης. Παράλληλα, η ερμηνεία των αποτελεσμάτων ενισχύεται μέσω της εξέτασης βασικών μικροκλιματικών παραμέτρων, όπως η Tmrt (Mean Radiant Temperature / Μέση Ακτινοβολούμενη Θερμοκρασία), η Tair (air temperature / θερμοκρασία αέρα) και ο SVF,

ώστε να αποδοθούν οι φυσικοί μηχανισμοί που διαμορφώνουν τη θερμική εμπειρία στον υπαίθριο χώρο. Επιπλέον, η αξιολόγηση εξειδικεύεται για ευάλωτες ομάδες χρηστών μέσω διαφοροποιημένων ανθρωποκεντρικών προφίλ με βάση τον δείκτη PET. Στο πλαίσιο αυτό, η σύγκριση των σεναρίων δεν περιορίζεται σε αριθμητικές διαφοροποιήσεις των δεικτών, αλλά επεκτείνεται στη λειτουργική ερμηνεία της θερμικής επιβάρυνσης, στη χωρική ιεράρχηση των θερμικά δυσμενών ζωνών και στην αποτίμηση της αποτελεσματικότητας των προτεινόμενων παρεμβάσεων.

Πίνακας 2.8.1 Βασικοί δείκτες αξιολόγησης.

Δείκτης	Περιγραφή	Ρόλος
PET	Θερμική άνεση	Κύριος δείκτης αξιολόγησης του χώρου και αποκλειστικός δείκτης διαφοροποίησης ευάλωτων ομάδων
UTCI	Βιομετεωρολογικός δείκτης	Συμπληρωματική αξιολόγηση της γενικής θερμικής επιβάρυνσης του χώρου
T _{mrt}	Μέση ακτινοβολούμενη θερμοκρασία	Ερμηνευτικός δείκτης / μηχανισμός θερμικής επιβάρυνσης
SVF	Συντελεστής θέασης ουρανού	Μορφολογικός δείκτης ερμηνείας

Πηγή: Ιδία επεξεργασία από δεδομένα Envi-met 5.8.0

Σχέση χάρτη κατόψεων και χρονοσειράς

Οι χάρτες κατόψεων των υποενοτήτων 3.1.1–3.1.4 αποτυπώνουν τη χωρική κατανομή των δεικτών για μία συγκεκριμένη χρονική στιγμή (16:00) σε όλο το πεδίο προσομοίωσης, ενώ οι χρονοσειρές της παρούσας υποενότητας αποτυπώνουν τη χρονική εξέλιξη των ίδιων δεικτών σε ένα συγκεκριμένο σημείο PO1 σε όλη τη διάρκεια του 24ώρου. Οι δύο μορφές παρουσίας είναι συμπληρωματικές: ο χάρτης απαντά στο «πού» εμφανίζεται η μέγιστη επιβάρυνση και η χρονοσειρά στο «πότε». Σημειώνεται ότι η μέγιστη τιμή UTCI στο σημείο PO1 (~ 48,44 °C στις 14:00) είναι υψηλότερη από τη μέγιστη τιμή UTCI του χάρτη κατόψεων στις 16:00 (54,72 °C), διότι οι δύο τιμές αναφέρονται σε διαφορετικές χρονικές στιγμές: η πρώτη στην ώρα αιχμής του σημείου PO1, η δεύτερη στο πεδίο όλης της περιοχής μελέτης στις 16:00.

2.8.1 Δείκτες αξιολόγησης θερμικής άνεσης

Η ποσοτική αξιολόγηση της θερμικής επιβάρυνσης πραγματοποιείται μέσω δύο βιοκλιματικών δεικτών: του Physiologically Equivalent Temperature (PET) και του

Universal Thermal Climate Index (UTCI). Οι δύο δείκτες συνθέτουν βασικές μικροκλιματικές μεταβλητές, όπως τη θερμοκρασία αέρα, τη σχετική υγρασία, την ταχύτητα του ανέμου και τη μέση ακτινοβολούμενη θερμοκρασία (T_{mrt}), σε ισοδύναμες θερμοκρασιακές τιμές με ανθρωποκεντρική ερμηνεία. Με τον τρόπο αυτό, επιτρέπουν την ταξινόμηση των μικροκλιματικών συνθηκών σε κατηγορίες θερμικής αίσθησης ή θερμικού στρες.

Ο PET χρησιμοποιείται ως βασικός ανθρωποκεντρικός δείκτης, επειδή το εργαλείο Simulate Thermal Comfort του BIO-met επιτρέπει τον υπολογισμό του για διακριτά προφίλ ενήλικα, ηλικιωμένου και παιδιού. Ο UTCI χρησιμοποιείται συμπληρωματικά ως γενικός δείκτης βιομετεωρολογικής επιβάρυνσης του χώρου και υπολογίζεται βάσει τυποποιημένου προφίλ αναφοράς, χωρίς διαφοροποίηση ανά εξεταζόμενο προφίλ χρήστη, όπως αναλύεται στις Ενότητες 2.2.3 και 2.2.4.

Επιλογή κλιμάκων ταξινόμησης και μεσογειακή προσαρμογή

Η αντίληψη και η αξιολόγηση των θερμικών συνθηκών επηρεάζονται από την κλιματική προσαρμογή του πληθυσμού. Για τον λόγο αυτό, στην παρούσα εργασία υιοθετούνται οι μεσογειακά προσαρμοσμένες κλίμακες ταξινόμησης του PET και του UTCI, όπως συνοψίζονται στον Πίνακα 1 των Tseliou et al. (2022).

Για τον PET εφαρμόζεται η κλίμακα των Pantavou et al. (2014), η οποία βασίζεται σε επιτόπιες έρευνες θερμικής αίσθησης στην Αθήνα. Για τον UTCI εφαρμόζεται η μεσογειακά προσαρμοσμένη κλίμακα των Pantavou et al. (2013), όπως χρησιμοποιήθηκε από τους Tseliou και Tsiros (2016). Στην τελευταία, τιμές UTCI μεγαλύτερες από 39,9 °C ταξινομούνται στην κατηγορία του «Ακραίου θερμικού στρες». Οι κλίμακες αυτές έχουν βαθμονομηθεί με βάση τις θερμοαισθητικές αποκρίσεις πληθυσμού προσαρμοσμένου στις μεσογειακές κλιματικές συνθήκες και, συνεπώς, περιλαμβάνουν διαφορετικά κατώφλια από τις πρωτότυπες διεθνείς κλίμακες.

Στους Πίνακες 2.8.1.1 και 2.8.1.2 παρατίθενται οι μεσογειακές κλίμακες ταξινόμησης των δεικτών PET και UTCI, μαζί με τη συντομογραφία κάθε κατηγορίας. Οι συντομογραφίες αυτές χρησιμοποιούνται στους αναλυτικούς ωριαίους πίνακες του Κεφαλαίου 3, ώστε κάθε αριθμητική τιμή PET και UTCI να συνοδεύεται από την αντίστοιχη κατηγορία θερμικής αίσθησης ή θερμικού στρες.

Πίνακας 2.8.1.1: Μεσογειακή κλίμακα ταξινόμησης του δείκτη PET

PET (°C)	Κατηγορία θερμικής αίσθησης	Συντομογραφία	Thermal perception
PET > 39,1	Πολύ θερμή	ΠΘ	Very hot
31,2 < PET ≤ 39,1	Θερμή	Θ	Warm
23,8 < PET ≤ 31,2	Ελαφρώς θερμή	ΕΘ	Slightly warm
14,8 < PET ≤ 23,8	Ουδέτερη	Ο	Neutral
5,2 < PET ≤ 14,8	Ελαφρώς δροσερή	ΕΔ	Slightly cool
0,7 < PET ≤ 5,2	Δροσερή	Δ	Cool
PET ≤ 0,7	Πολύ δροσερή	ΠΔ	Cold

Πηγή: Ιδία επεξεργασία βάσει Pantavou et al. (2014), όπως παρουσιάζεται στον Πίνακα 1 των Tseliou et al. (2022).

Σημείωση: Για την ταξινόμηση των αποτελεσμάτων, κάθε οριακή τιμή εντάσσεται στην κατηγορία που τελειώνει σε αυτήν. Έτσι, η τιμή PET = 23,8 °C εντάσσεται στην κατηγορία «ουδέτερη», η τιμή PET = 31,2 °C στην κατηγορία «ελαφρώς θερμή» και η τιμή PET = 39,1 °C στην κατηγορία «θερμή». Ο ίδιος τρόπος ταξινόμησης εφαρμόζεται σε όλους τους πίνακες αποτελεσμάτων.

Πίνακας 2.8.1.2: Μεσογειακή κλίμακα ταξινόμησης του δείκτη UTCI για τη θερμή περίοδο.

UTCI (°C)	Κατηγορία θερμικού στρες	Συντομογραφία	Thermal stress
UTCI > 39,9	Ακραίο θερμικό στρες	ΑΘΣ	Extreme heat stress
38,3 < UTCI ≤ 39,9	Πολύ ισχυρό θερμικό στρες	ΠΙΘΣ	Very strong heat stress
36,8 < UTCI ≤ 38,3	Ισχυρό θερμικό στρες	ΙΘΣ	Strong heat stress
34,0 < UTCI ≤ 36,8	Μέτριο θερμικό στρες	ΜΘΣ	Moderate heat stress
27,0 < UTCI ≤ 34,0	Χωρίς θερμικό στρες	ΧΘΣ	No thermal stress

UTCI (°C)	Κατηγορία θερμικού στρες	Συντομογραφία	Thermal stress
24,6 < UTCI ≤ 27,0	Ελαφρύ ψυχρό στρες	ΕΨΣ	Slight cold stress
23,0 < UTCI ≤ 24,6	Μέτριο ψυχρό στρες	ΜΨΣ	Moderate cold stress
21,5 < UTCI ≤ 23,0	Ισχυρό ψυχρό στρες	ΙΨΣ	Strong cold stress
20,2 < UTCI ≤ 21,5	Πολύ ισχυρό ψυχρό στρες	ΠΙΨΣ	Very strong cold stress
UTCI ≤ 20,2	Ακραίο ψυχρό στρες	ΑΨΣ	Extreme cold stress

Πηγή: Ιδία επεξεργασία βάσει της μεσογειακά προσαρμοσμένης κλίμακας των (Pantavou et al., 2013), όπως εφαρμόστηκε από τους Tseliou και Tsiros (2016) και παρουσιάζεται στον Πίνακα 1 των Tseliou et al. (2022).

Σχέση με τις διεθνείς κλίμακες αναφοράς

Οι μεσογειακά προσαρμοσμένες κλίμακες που εφαρμόζονται στην παρούσα εργασία διαφοροποιούνται από τις καθιερωμένες διεθνείς κλίμακες αναφοράς των δύο δεικτών. Στην αρχική κλίμακα αξιολόγησης του UTCI, η οποία αναπτύχθηκε στο πλαίσιο της COST Action 730 και παρουσιάστηκε από τους Jendritzky et al. (2012) και Bröde et al. (2012), η κατηγορία του «Ακραίου θερμικού στρες» αρχίζει σε τιμές μεγαλύτερες από 46 °C. Αντίθετα, στη μεσογειακά προσαρμοσμένη κλίμακα της θερμής περιόδου των Tseliou και Tsiros (2016), το αντίστοιχο κατώφλι ορίζεται σε UTCI >39,9 °C.

Αντίστοιχα, στην αρχική κλίμακα PET των Matzarakis και Mayer (1996), όπως εφαρμόστηκε και παρουσιάστηκε περαιτέρω από τους Matzarakis et al. (1999), η κατηγορία «πολύ θερμή» αρχίζει σε τιμές PET >41 °C. Στη μεσογειακή κλίμακα των Pantavou et al. (2014), η οποία εφαρμόζεται στην παρούσα μελέτη, το αντίστοιχο κατώφλι ορίζεται σε PET >39,1 °C.

Η διαφοροποίηση των κατωφλίων δεν ερμηνεύεται ως απλή αυστηροποίηση ή χαλάρωση των αρχικών κλιμάκων, αλλά ως διαφορετική εμπειρική βαθμονόμηση, η οποία λαμβάνει υπόψη τις θερμοαισθητικές αποκρίσεις πληθυσμού εκτεθειμένου και προσαρμοσμένου σε

μεσογειακές κλιματικές συνθήκες. Κατά συνέπεια, η ίδια αριθμητική τιμή PET ή UTCI μπορεί να εντάσσεται σε διαφορετική κατηγορία ανάλογα με την κλίμακα ταξινόμησης που εφαρμόζεται.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, όλες οι αναφορές σε κατηγορίες θερμικής αίσθησης του PET και θερμικού στρες του UTCI βασίζονται αποκλειστικά στις μεσογειακά προσαρμοσμένες κλίμακες των Πινάκων 2.8.1.1 και 2.8.1.2. Οι διεθνείς κλίμακες αναφοράς παρουσιάζονται στο θεωρητικό μέρος και χρησιμοποιούνται στην παρούσα ενότητα μόνο για τη μεθοδολογική τεκμηρίωση της επιλογής των μεσογειακών κατωφλίων· δεν χρησιμοποιούνται για την τελική ταξινόμηση των αποτελεσμάτων.

Η χρονική αξιοποίηση των κατηγοριών PET εντάσσεται στο συνθετικό μεθοδολογικό πλαίσιο της επόμενης ενότητας.

2.8.2 Συνθετικό μεθοδολογικό πλαίσιο αξιολόγησης της θερμικής άνεσης

Μετά τον προσδιορισμό των βιοκλιματικών δεικτών PET και UTCI, διαμορφώνεται συνθετικό μεθοδολογικό πλαίσιο για την ανάλυση και την ερμηνεία των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων. Στο πλαίσιο αυτό, οι βασικές μικροκλιματικές παράμετροι —όπως η θερμοκρασία αέρα, η σχετική υγρασία, η ταχύτητα του ανέμου, η άμεση ηλιακή ακτινοβολία και η μέση ακτινοβολούμενη θερμοκρασία T_{mrt} — δεν εξετάζονται απομονωμένα, αλλά συσχετίζονται με τους δείκτες PET και UTCI και με την εκτίμηση της θερμικής επιβάρυνσης σε κλίμακα ανθρώπου.

Η αξιοποίηση των δεικτών PET και UTCI επιτρέπει τη μετατροπή των φυσικών μικροκλιματικών μεταβλητών σε ανθρωποκεντρικά μεγέθη θερμικής αίσθησης και θερμικού στρες. Με τον τρόπο αυτό καθίσταται δυνατή η συγκριτική αξιολόγηση του σεναρίου αναφοράς S1 και του συνδυαστικού σεναρίου παρέμβασης S3, καθώς και η ποσοτική αποτίμηση του μικροκλιματικού οφέλους που προκύπτει από τις προτεινόμενες βιοκλιματικές παρεμβάσεις.

Ιδιαίτερη σημασία αποδίδεται στη διαφοροποίηση των χρηστών, καθώς οι υπαίθριοι χώροι νοσοκομείων εξυπηρετούν άτομα με διαφορετικά ανθρωπομετρικά και θερμοφυσιολογικά χαρακτηριστικά. Για τον λόγο αυτό, ο PET υπολογίζεται διακριτά για τα προφίλ ενήλικα, ηλικιωμένου και παιδιού. Το νοσοκομειακό προσωπικό προσεγγίζεται μέσω του προφίλ ενήλικα, ενώ δεν διαμορφώνεται ξεχωριστό βιοφυσικό προφίλ ασθενούς. Τα

αποτελέσματα, ωστόσο, έχουν έμμεσες προεκτάσεις για τους ασθενείς και τους λοιπούς ευάλωτους χρήστες του νοσοκομειακού περιβάλλοντος, χωρίς οι ομάδες αυτές να αξιολογούνται ποσοτικά ως διακριτά προφίλ.

Η αξιολόγηση αναπτύσσεται σε συμπληρωματικά επίπεδα χωρικής και χρονικής ανάλυσης. Η χωρική ανάλυση αποτυπώνει την κατανομή των μικροκλιματικών παραμέτρων και των βιοκλιματικών δεικτών στο υπολογιστικό πεδίο, επιτρέποντας τον εντοπισμό ζωνών υψηλής θερμικής επιβάρυνσης και περιοχών στις οποίες οι παρεμβάσεις επιφέρουν ουσιαστική βελτίωση. Η χρονική ανάλυση βασίζεται στις ωριαίες τιμές των σημείων PO1 και PO2 και αποτυπώνει την ημερήσια εξέλιξη, την ώρα αιχμής, τη διάρκεια της επιβάρυνσης και τη χρονική μεταβολή μεταξύ των σεναρίων.

Συμπληρωματικά, η χρονική διάρκεια της θερμικής επιβάρυνσης ποσοτικοποιείται μέσω της ταξινόμησης των ωριαίων τιμών PET στις κατηγορίες της μεσογειακής κλίμακας των Pantavou et al. (2014). Για κάθε προφίλ χρήστη, σημείο αναφοράς και σενάριο υπολογίζεται ο αριθμός των ωρών κατά τις οποίες η τιμή PET εμπίπτει σε κάθε κατηγορία. Η ταξινόμηση εφαρμόζει τα όρια του Πίνακα 2.8.1.1 και πραγματοποιείται με βάση τις πλήρεις, μη στρογγυλοποιημένες ωριαίες τιμές του BIO-met. Η προσέγγιση αυτή επιτρέπει την αποτίμηση της έντασης, της ώρας αιχμής και της διάρκειας της θερμικής επιβάρυνσης κατά το εξεταζόμενο 24ωρο. Τα ίδια όρια εφαρμόζονται στα τρία εξεταζόμενα προφίλ, ενώ οι μεταξύ τους διαφοροποιήσεις προκύπτουν από τις αντίστοιχες υπολογισμένες τιμές PET. Δεν εισάγεται ξεχωριστή λειτουργική κλίμακα ούτε αντιστοίχιση του PET με συγκεκριμένα χρονικά όρια παραμονής. Η ποιοτική λειτουργική ερμηνεία των κατηγοριών παρουσιάζεται στην Ενότητα 3.4.1 και η συγκεντρωτική ποσοτικοποίηση των ωρών στην Ενότητα 3.4.2.

Το συνθετικό πλαίσιο συνδέει διαδοχικά τις μικροκλιματικές παραμέτρους, τους βιοκλιματικούς δείκτες, τη χωρική κατανομή, τη χρονική διάρκεια της θερμικής επιβάρυνσης και τη σχετική λειτουργική καταλληλότητα των επιμέρους ζωνών. Η σύνδεση αυτή δεν αποτελεί άμεση μέτρηση της αντίληψης ή της συμπεριφοράς των χρηστών. Χρησιμοποιείται ως ερμηνευτικό εργαλείο για την εκτίμηση της λειτουργικής σημασίας των μικροκλιματικών αποτελεσμάτων και της ανάγκης πρόσβασης σε περισσότερο προστατευμένες περιοχές.

Με βάση το πλαίσιο αυτό, οι παρεμβάσεις σκίασης, ενίσχυσης της βλάστησης, τροποποίησης των υλικών επιφανειών και αξιοποίησης των δωματίων αξιολογούνται ως στρατηγικές με μετρήσιμο μικροκλιματικό αντίκτυπο. Η αποτελεσματικότητά τους εξετάζεται κυρίως ως προς:

- τη μεταβολή της θερμοκρασίας αέρα,
- τη μείωση της άμεσης ακτινοβολιακής έκθεσης και της T_{mrt} ,
- τη μεταβολή των τιμών PET και UTCI,
- τη μείωση των ωρών στις υψηλότερες κατηγορίες PET και της διάρκειας «Ακραίου θερμικού στρες» βάσει UTCI,
- τη χωρική έκταση και τη χρονική διάρκεια του μικροκλιματικού οφέλους.

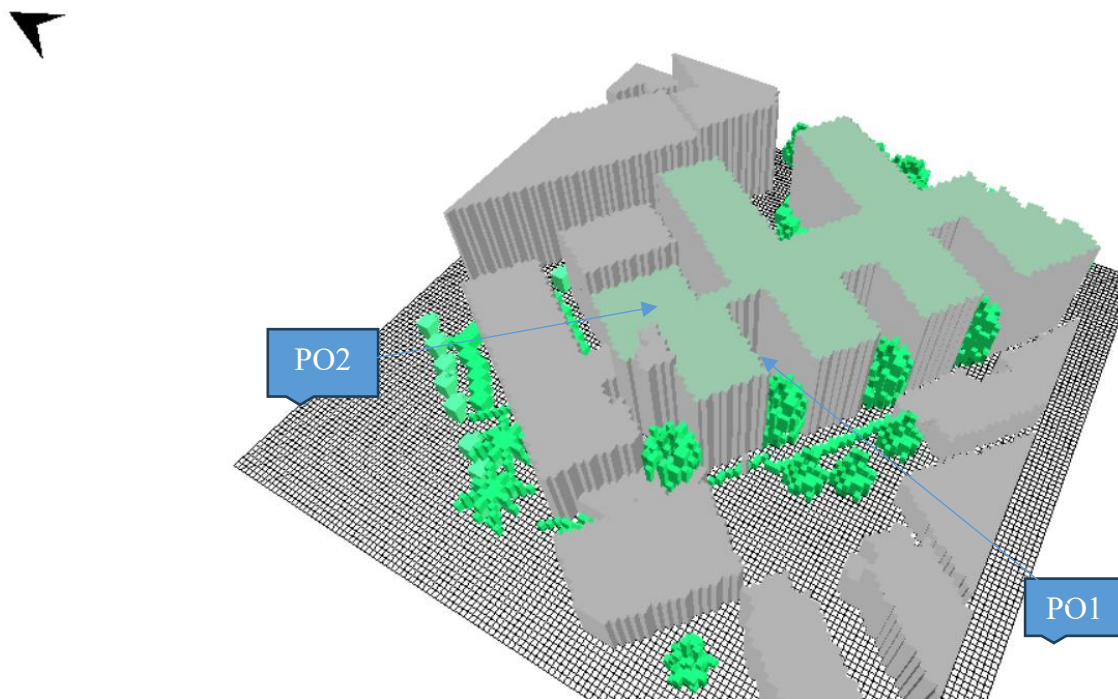
2.8.3 Χρονική ανάλυση στα σημεία PO1 και PO2

Η χρονική ανάλυση πραγματοποιήθηκε σε δύο σταθερά σημεία ελέγχου, τα οποία διατηρήθηκαν αμετάβλητα σε όλα τα εξεταζόμενα σενάρια. Οι θέσεις των σημείων PO1 και PO2 επιλέχθηκαν ώστε να βρίσκονται εντός της ενεργής περιοχής του μοντέλου και εκτός της άμεσης επίδρασης της περιμετρικής ζώνης εξομάλυνσης που περιγράφηκε στην Ενότητα 2.4.1.

Το σημείο PO1 με συντεταγμένες κάρναβου (77, 59, 3), αντιστοιχεί σε στάθμη πεζού και χρησιμοποιείται ως κύριο σημείο αξιολόγησης της θερμικής έκθεσης σε ζώνη πιθανής στάσης, αναμονής ή σύντομης παραμονής χρηστών του υπαίθριου νοσοκομειακού χώρου. Η επιλογή του βασίστηκε στη λειτουργική σημασία της θέσης και στη χωρικά συνεκτική μεταβολή των δεικτών θερμικής άνεσης στους συγκριτικούς χάρτες.

Το σημείο PO2, με συντεταγμένες κάρναβου (50, 60, 11), αντιστοιχεί σε υπερυψωμένο σημείο ελέγχου στο επίπεδο χρήστη επάνω από το δώμα, σε απόλυτη στάθμη περίπου $z \approx 15$ m από το έδαφος. Εξετάζεται συμπληρωματικά, με στόχο τη διερεύνηση της κατακόρυφης διαφοροποίησης των μικροκλιματικών συνθηκών στη στάθμη της παρέμβασης του εκτατικού φυτεμένου δώματος. Η ανάλυση δεν αντικαθιστά την κύρια αξιολόγηση στο επίπεδο πεζού ούτε συνιστά πλήρη αξιολόγηση βατού δώματος, αλλά αποτελεί συμπληρωματική κατακόρυφη μικροκλιματική διερεύνηση.

Το PO1 αντιστοιχεί σε σημείο ελέγχου στο επίπεδο πεζού, ενώ το PO2 αντιστοιχεί σε υπερυψωμένο σημείο ελέγχου στο επίπεδο χρήστη επάνω από το δώμα, σε απόλυτη στάθμη περίπου $z \approx 15$ m από το έδαφος.



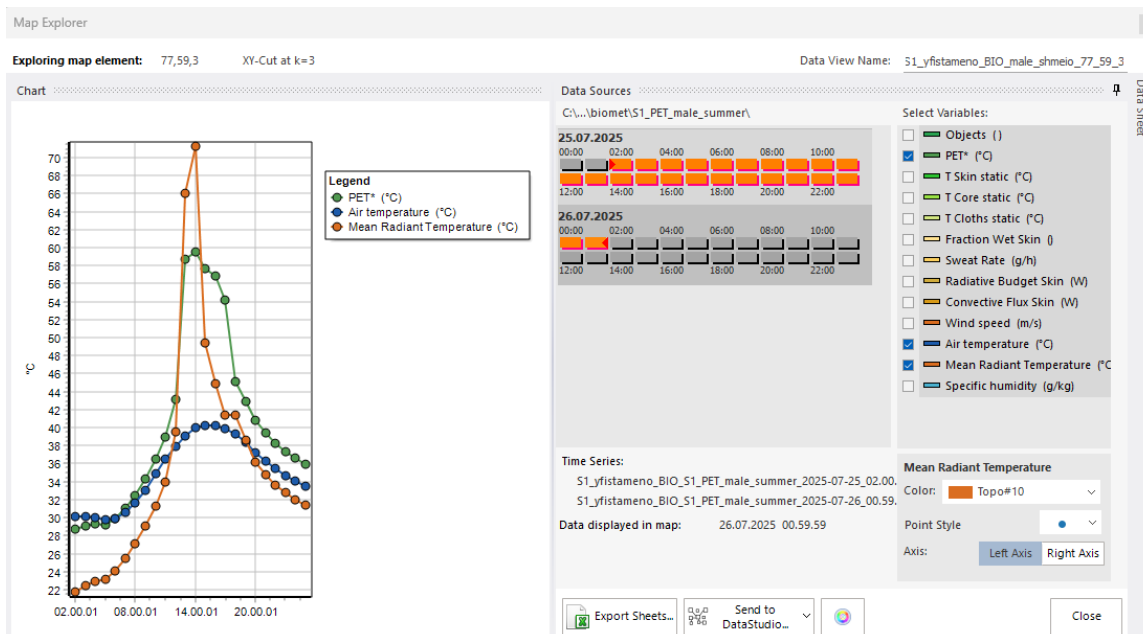
Σχήμα 2.8.3.1 Θέσεις των σημείων ελέγχου PO1 και PO2 στο υπολογιστικό πεδίο της προσομοίωσης.

Πηγή: Ιδία επεξεργασία στιγμιότυπου από το ENVI-met 5.8.0.

Η αξιολόγηση πραγματοποιήθηκε για όλες τις ωριαίες χρονικές στιγμές του εξεταζόμενου 24ώρου, ώστε να καλύπτεται το σύνολο της ημερήσιας θερμικής διακύμανσης. Για τα δύο σημεία εξήχθησαν χρονοσειρές των βασικών μικροκλιματικών παραμέτρων και βιοκλιματικών δεικτών για την ίδια ημέρα προσομοίωσης.

Οι ωριαίες χρονοσειρές της T_a και της T_{mrt} στα σημεία PO1 και PO2 εξήχθησαν από τα αποτελέσματα του ENVI-met μέσω του Map Explorer. Οι αντίστοιχες χρονοσειρές των δεικτών PET και UTCI προέκυψαν από την επεξεργασία των αποτελεσμάτων στο BIO-met. Τα δεδομένα οργανώθηκαν σε κοινή ωριαία βάση και υποβλήθηκαν σε ενιαία επεξεργασία για την παραγωγή των διαγραμμάτων, τη σύγκριση των σεναρίων S1 και S3 και τον υπολογισμό των μεταβολών ΔT_a , ΔT_{mrt} , ΔPET και $\Delta UTCI$.

Στο Σχήμα παρουσιάζεται ενδεικτικά το περιβάλλον εξαγωγής και απεικόνισης των ωριαίων χρονοσειρών στο σημείο PO1 μέσω του ENVI-met Map Explorer.



Σχήμα 2.8.3.2 Ενδεικτική απεικόνιση των ωριαίων χρονοσειρών της T_a , της T_{mrt} και του PET για το προφίλ ενήλικου χρήστη στο σημείο PO1, με συντεταγμένες κάρναβου (77, 59, 3), για το σενάριο αναφοράς S1, μέσω του ENVI-met 5.8.0 Map Explorer.

Πηγή: Ιδία επεξεργασία, στιγμιότυπο οθόνης από το ENVI-met 5.8.0 Map Explorer, με απεικόνιση αποτελεσμάτων ENVI-met και BIO-met.

Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στην βασική ώρα 16:00, η οποία χρησιμοποιείται ως βασική ώρα χαρτογραφικής και συγκριτικής αποτίμησης, καθώς αντιστοιχεί σε συνθήκες αυξημένης θερμικής επιβάρυνσης και επιτρέπει την αξιολόγηση της απόδοσης των παρεμβάσεων σε κρίσιμη περίοδο της ημέρας. Οι χρονοσειρές χρησιμοποιούνται για να εντοπιστούν όχι μόνο οι μέγιστες τιμές αλλά και οι απότομες μεταβάσεις λόγω σκίασης/ακτινοβολιακής αποφόρτισης.

Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στην ώρα αναφοράς των 16:00, η οποία χρησιμοποιείται για τη χαρτογραφική και συγκριτική αποτίμηση των δύο σεναρίων. Η ώρα αυτή αντιστοιχεί σε συνθήκες αυξημένης θερμικής επιβάρυνσης και επιτρέπει την αξιολόγηση της απόδοσης των παρεμβάσεων κατά κρίσιμη περίοδο της ημέρας. Οι πλήρεις χρονοσειρές χρησιμοποιούνται για τον εντοπισμό τόσο των μέγιστων τιμών όσο και των χρονικών μεταβάσεων που συνδέονται με μεταβολές της σκίασης και της ακτινοβολιακής φόρτισης. Οι πλήρεις χρονοσειρές χρησιμοποιούνται για τον εντοπισμό των μέγιστων και ελάχιστων τιμών, της διάρκειας παραμονής σε δυσμενείς κατηγορίες θερμικής επιβάρυνσης και των

χρονικών μεταβάσεων που συνδέονται με τη μεταβολή της σκίασης και του ακτινοβολιακού περιβάλλοντος. Η χρονική ανάλυση στα PO1 και PO2 επιτρέπει, παράλληλα, τη σύγκριση της έντασης και της διάρκειας της θερμικής επιβάρυνσης στη στάθμη πεζού και στη στάθμη δώματος.

2.8.4 Χωρική ανάλυση και χαρτογραφική απεικόνιση

Η αξιολόγηση πραγματοποιείται επίσης σε χωρικό επίπεδο, μέσω χαρτογραφικής απεικόνισης των δεικτών PET και UTCI. Οι χάρτες που παράγονται από τις προσομοιώσεις επιτρέπουν τον εντοπισμό περιοχών υψηλής θερμικής επιβάρυνσης, ζωνών σχετικής θερμικής προστασίας και μεταβολών στη χωρική κατανομή των τιμών μεταξύ των δύο σεναρίων.

Η χωρική ανάλυση είναι ιδιαίτερα σημαντική, καθώς επιτρέπει τη σύνδεση των τιμών των δεικτών με συγκεκριμένα στοιχεία του χώρου, όπως η γεωμετρία, η σκίαση, η παρουσία βλάστησης και τα χαρακτηριστικά των επιφανειών.

Για τη στατιστική περιγραφή των χωρικών κατανομών χρησιμοποιούνται περιγραφικά μέτρα θέσης. Ως διάμεσος ορίζεται η τιμή που χωρίζει την κατανομή των κελιών του υπολογιστικού πεδίου σε δύο ίσα μέρη, ενώ ως πρώτο τεταρτημόριο (Q1) η τιμή κάτω από την οποία βρίσκεται το 25 % των κελιών. Σε αντίθεση με τη μέση τιμή, η διάμεσος δεν επηρεάζεται από ακραίες τοπικές τιμές και αποδίδει τη χωρικά αντιπροσωπευτική συνθήκη του πεδίου. Τα μέτρα αυτά εφαρμόζονται σε δύο διακριτά μεγέθη, τα οποία δεν πρέπει να συγχέονται: αφενός στην κατανομή των απόλυτων τιμών του δείκτη (π.χ. PET(S1), όπου χρησιμοποιούνται ως όρια ποσοστημοριακής ταξινόμησης, και αφετέρου στην κατανομή των μεταβολών (ΔPET), όπου η διάμεσος εκφράζει τη χωρικά αντιπροσωπευτική μεταβολή του πεδίου.

2.8.5 Συγκριτική αξιολόγηση σεναρίων

Η συγκριτική αξιολόγηση των σεναρίων βασίζεται στην αντιπαραβολή των χωρικών και χρονικών μεταβολών των δεικτών θερμικής άνεσης και των βασικών μικροκλιματικών παραμέτρων μεταξύ της «υφιστάμενης κατάστασης» και του σεναρίου παρέμβασης. Η σύγκριση πραγματοποιείται τόσο σε επίπεδο χαρτογραφικής αποτύπωσης όσο και σε επίπεδο επιλεγμένων σημείων αναφοράς και χρονικών διακυμάνσεων. Με τον τρόπο αυτό καθίσταται δυνατή η αξιολόγηση της σχετικής αποτελεσματικότητας κάθε κατηγορίας

παρέμβασης, αλλά και του συνολικού οφέλους που προκύπτει από τη συνδυαστική εφαρμογή τους.

Η συγκριτική αξιολόγηση πραγματοποιείται μεταξύ του σεναρίου αναφοράς και του συνδυαστικού σεναρίου παρεμβάσεων, με στόχο την αποτίμηση της μικροκλιματικής βελτίωσης και της μεταβολής της θερμικής επιβάρυνσης στον υπαίθριο χώρο του νοσοκομείου.

Η συγκριτική αξιολόγηση οργανώνεται σε δύο συμπληρωματικά επίπεδα: γενική θερμική απόκριση του χώρου και διαφοροποίηση των προφίλ χρήστη. Σε πρώτο επίπεδο, αξιολογείται η γενική θερμική απόκριση του χώρου μέσω των δεικτών PET και UTCI, με έμφαση στη μεταβολή των τιμών των δεικτών, στη μετατόπιση μεταξύ κατηγοριών θερμικού στρες, και στη μείωση της έκτασης των περιοχών υψηλής θερμικής επιβάρυνσης. Σε δεύτερο επίπεδο, εξετάζεται η ανθρωποκεντρική διαφοροποίηση της θερμικής επιβάρυνσης για τις ευάλωτες ομάδες χρηστών. Για τον σκοπό αυτό, η συγκριτική αξιολόγηση βασίζεται αποκλειστικά στον δείκτη PET, ο οποίος επιτρέπει την εφαρμογή διαφοροποιημένων ανθρωποκεντρικών προφίλ μέσω του εργαλείου Simulate Thermal Comfort (BIO-met). Με τον τρόπο αυτό καθίσταται δυνατή η εκτίμηση της σχετικής αποτελεσματικότητας των παρεμβάσεων για το παιδί και τον ηλικιωμένο χρήστη, σε σχέση με το προφίλ αναφοράς του ενήλικα.

Σε ποσοτικό επίπεδο εξετάζονται οι διαφορές τιμών και οι χρονικές μεταβολές, ενώ σε χωρικό επίπεδο ερμηνεύεται η χαρτογραφική κατανομή των δεικτών. Η προσέγγιση αυτή επιτρέπει όχι μόνο την αποτίμηση της συνολικής μικροκλιματικής βελτίωσης του χώρου, αλλά και την αξιολόγηση της συμβολής των παρεμβάσεων στη μείωση της θερμικής επιβάρυνσης των πλέον ευάλωτων χρηστών.

Η συγκριτική αξιολόγηση πραγματοποιείται μέσω χωρικής και χρονικής ανάλυσης των μικροκλιματικών παραμέτρων και των βιοκλιματικών δεικτών. Η κύρια αξιολόγηση πραγματοποιείται στη στάθμη πεζού, ενώ η διερεύνηση στη στάθμη δώματος έχει συμπληρωματικό χαρακτήρα. Ο PET υπολογίζεται χωριστά για τα προφίλ ενηλίκου, ηλικιωμένου και παιδιού, ενώ ο UTCI χρησιμοποιείται ως τυποποιημένος δείκτης θερμικού στρες.

Μέσω της σύγκρισης του S3 με το σενάριο αναφοράς S1 επιδιώκεται η αποτίμηση της συνολικής μικροκλιματικής επίδρασης του συνδυαστικού σεναρίου και η αναγνώριση των περιοχών και των χρονικών διαστημάτων στα οποία εμφανίζεται η εντονότερη μείωση της θερμικής επιβάρυνσης.

2.8.6 Κριτήρια σχεδιαστικής αποτίμησης των παρεμβάσεων

Πέραν της ποσοτικής αποτίμησης των μικροκλιματικών αποτελεσμάτων, η τελική αξιολόγηση των παρεμβάσεων λαμβάνει υπόψη και κριτήρια σχεδιαστικής αποτίμησης, όπως η λειτουργική συμβατότητα με τις ανάγκες του νοσοκομείου, η εφικτότητα εφαρμογής, η δυνατότητα συντήρησης και η καταλληλότητά τους για ευάλωτες ομάδες χρηστών. Η προσέγγιση αυτή επιτρέπει τη μετάβαση από την αριθμητική σύγκριση των σεναρίων σε μια πιο ολοκληρωμένη εκτίμηση της χρησιμότητας και της εφαρμοσιμότητάς τους στον πραγματικό σχεδιασμό υπαίθριων χώρων υγείας.

Για τη σύνθετη χωρική αποτίμηση των προτεραιοτήτων παρέμβασης συνδυάζονται το πεδίο PET του σεναρίου αναφοράς S1 και το πεδίο μεταβολής $\Delta PET = PET(S3) - PET(S1)$, για κοινή χρονική στιγμή, στάθμη και προφίλ χρήστη. Ως προφίλ αναφοράς για τη σύνθεση επιλέγεται το προφίλ ηλικιωμένου, καθώς κατά την ώρα αναφοράς εμφανίζει τη μέγιστη τιμή PET του πεδίου (62,84 °C έναντι 62,02 °C για το προφίλ ενήλικα) και συνιστά, επομένως, τη δυσμενέστερη και πλέον προστατευτική βάση ιεράρχησης. Δεδομένου ότι οι κατανομές ΔPET του ενήλικα και του ηλικιωμένου σχεδόν ταυτίζονται, η επιλογή αυτή δεν μεταβάλλει ουσιωδώς τη χωρική εικόνα.

Επειδή κατά την ώρα αναφοράς το μεγαλύτερο μέρος του πεδίου ανήκει στην υψηλότερη κατηγορία της μεσογειακής κλίμακας PET, η εσωτερική χωρική διαφοροποίηση αποδίδεται με ποσοστημοριακά κατώφλια της κατανομής PET(S1) και με κατηγορίες απόκρισης του ΔPET . Η μέθοδος χρησιμοποιείται αποκλειστικά για τη σχετική ιεράρχηση των ζωνών του ίδιου υπολογιστικού πεδίου και δεν αποτελεί γενικεύσιμη κανονιστική ταξινόμηση.

2.8.7 Συμπληρωματική κατακόρυφη μικροκλιματική διερεύνηση στη στάθμη δώματος (z= 15 m)

Συμπληρωματικά προς την κύρια ανάλυση στο επίπεδο πεζού, πραγματοποιήθηκε κατακόρυφη μικροκλιματική διερεύνηση στη στάθμη των 15 m, η οποία αντιστοιχεί στο

επίπεδο της παρέμβασης του εκτατικού φυτεμένου δώματος. Η διερεύνηση εφαρμόστηκε για τα δύο τελικά σενάρια της εργασίας, δηλαδή το σενάριο αναφοράς S1 και το συνδυαστικό σενάριο παρέμβασης S3.

Η στάθμη των 15 m δεν ορίζεται ως νέο σενάριο προσομοίωσης ούτε ως πλήρης μελέτη θερμικής άνεσης βατού δώματος. Αποτελεί συμπληρωματικό επίπεδο ελέγχου, μέσω του οποίου εξετάζεται εάν οι παρεμβάσεις στα δώματα διαφοροποιούν τις μικροκλιματικές συνθήκες σε ανώτερη στάθμη του κτιριακού συγκροτήματος. Η ερμηνεία των αποτελεσμάτων γίνεται με προσοχή, καθώς το κύριο επίπεδο ανθρωποκεντρικής αξιολόγησης της εργασίας παραμένει το επίπεδο πεζού.

Για τη σύγκριση χρησιμοποιήθηκε η ίδια λογική διαφορών που εφαρμόζεται και στο επίπεδο πεζού, δηλαδή $\Delta = S3 - S1$. Αρνητικές τιμές υποδηλώνουν μείωση της εξεταζόμενης παραμέτρου στο σενάριο παρέμβασης, ενώ θετικές τιμές υποδηλώνουν αύξηση. Η ανάλυση στη στάθμη των 15 m αξιοποιείται επομένως ως πρόσθετη ένδειξη της κατακόρυφης μικροκλιματικής απόκρισης του συνδυαστικού σεναρίου και όχι ως ανεξάρτητη αξιολόγηση χρήσης του δώματος.

Το PO2 δεν ερμηνεύεται ως τυπικό σημείο ισογείου, αλλά ως υπερυψωμένο σημείο έκθεσης στη στάθμη δώματος και δεν αποτελεί πλήρη αξιολόγηση βατού χώρου ούτε αυτόματη πρόταση παραμονής. Συνεπώς, οι ιδιαίτερα υψηλές τιμές T_{mrt} και UTCI αποδίδονται στην αυξημένη έκθεση στην άμεση και ανακλώμενη ηλιακή ακτινοβολία και όχι σε αντίστοιχη αύξηση της θερμοκρασίας αέρα.

Κεφάλαιο 3: Αποτελέσματα προσομοιώσεων και συγκριτική αξιολόγηση σεναρίων

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων μικροκλίματος που πραγματοποιήθηκαν με το λογισμικό ENVI-met 5.8.0 για το σενάριο αναφοράς S1 και για το συνδυαστικό σενάριο παρεμβάσεων S3, καθώς και η συγκριτική αξιολόγηση των δύο σεναρίων. Η ανάλυση οργανώνεται σε τρία διαδοχικά επίπεδα: αρχικά εξετάζονται τα αποτελέσματα του σεναρίου αναφοράς (S1), στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του σεναρίου παρέμβασης (S3) και, τέλος, αποτιμάται συγκριτικά η αποτελεσματικότητα των παρεμβάσεων ως προς τη θερμική άνεση, το τοπικό μικροκλίμα και τις επιπτώσεις σε ευάλωτες ομάδες χρηστών. Επιπλέον, στο τέλος της συγκριτικής ανάλυσης εντάσσεται συμπληρωματική κατακόρυφη μικροκλιματική διερεύνηση στη στάθμη των 15 m, με στόχο την αποτίμηση της μικροκλιματικής επίδρασης της παρέμβασης στο επίπεδο του δώματος.

Για την αξιολόγηση των θερμικών συνθηκών του χώρου αξιοποιούνται δύο διακριτές αλλά συμπληρωματικές κατηγορίες μεγεθών. Η πρώτη κατηγορία αφορά βασικές μικροκλιματικές μεταβλητές, όπως η δυνητική θερμοκρασία αέρα T_a (Potential Air Temperature / δυνητική θερμοκρασία αέρα) και η μέση ακτινοβολούμενη θερμοκρασία T_{mrt} (Mean Radiant Temperature / μέση ακτινοβολούμενη θερμοκρασία) και SVF. Οι μεταβλητές αυτές χρησιμοποιούνται ερμηνευτικά, δηλαδή για να αποδοθούν οι φυσικοί μηχανισμοί που διαμορφώνουν το τοπικό θερμικό περιβάλλον. Συμβάλλουν, επομένως, στην κατανόηση των χωρικών και χρονικών διαφοροποιήσεων του μικροκλίματος σε συνάρτηση με τη γεωμετρία του χώρου, τη σκίαση, την έκθεση στην ηλιακή ακτινοβολία, τα υλικά των επιφανειών και τη βλάστηση.

Η δεύτερη κατηγορία αφορά τους βιοκλιματικούς δείκτες θερμικής άνεσης και θερμικού στρες, κυρίως τον PET και τον UTCI. Ο UTCI χρησιμοποιείται ως γενικός δείκτης βιομετεωρολογικής επιβάρυνσης του χώρου, ενώ ο PET αξιοποιείται για την ανθρωποκεντρική σύγκριση διαφορετικών προφίλ χρηστών. Με τον τρόπο αυτό, η αξιολόγηση δεν περιορίζεται στη μικροκλιματική περιγραφή του χώρου, αλλά

επεκτείνεται στην εκτίμηση της θερμικής καταπόνησης όπως αυτή διαφοροποιείται για τον ενήλικα, τον ηλικιωμένο και το παιδί.

Η ερμηνεία συνδέει τις χωρικές και χρονικές μεταβολές των δεικτών με τη γεωμετρία, τη σκίαση, το ακτινοβολιακό ισοζύγιο και τα λοιπά μικροκλιματικά χαρακτηριστικά του χώρου. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται όχι μόνο στην περιγραφή των χωρικών και χρονικών διαφοροποιήσεων των δεικτών, αλλά και στην αποτίμηση της πραγματικής αποτελεσματικότητας των παρεμβάσεων. Η προσέγγιση αυτή είναι κρίσιμη, καθώς οι επιδράσεις εξαρτώνται από τη θέση της παρέμβασης, τη σκίαση, την ακτινοβολιακή έκθεση και τις τοπικές συνθήκες αερισμού. (Ενότητα 4.1).

Η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων πραγματοποιείται τόσο για τις γενικές μικροκλιματικές συνθήκες όσο και για διαφοροποιημένα ανθρωποκεντρικά προφίλ χρήστη. Για τη διερεύνηση της επίδρασης της θερμικής επιβάρυνσης σε ευάλωτες ομάδες χρησιμοποιούνται τρία προφίλ αναφοράς στο BIO-met: τυπικός ενήλικας, ηλικιωμένος και παιδί. Τα προφίλ αυτά επιτρέπουν τη σύγκριση της θερμικής καταπόνησης υπό τις ίδιες μικροκλιματικές συνθήκες, λαμβάνοντας υπόψη τη διαφοροποίηση της φυσιολογικής απόκρισης των χρηστών.

Για την αξιολόγηση του PET χρησιμοποιήθηκαν τα τρία προκαθορισμένα προφίλ BIO-met που αντιστοιχούν στον ενήλικα, στον ηλικιωμένο και στο παιδί, όπως παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.2.4.x

Σημειώνεται ότι τα προφίλ χρηστών χρησιμοποιούνται για την ερμηνεία του δείκτη PET. Αντίθετα, ο UTCI παρουσιάζεται ως γενικός δείκτης αποτίμησης του θερμικού στρες του χώρου και δεν διαφοροποιείται ανά προφίλ χρήστη. Η διάκριση αυτή ακολουθείται σε όλη την παρουσίαση των αποτελεσμάτων, ώστε να αποφεύγεται σύγχυση μεταξύ των δύο δεικτών.

3.1 Αποτελέσματα σεναρίου αναφοράς S1

Η ενότητα παρουσιάζει τα αποτελέσματα του σεναρίου αναφοράς S1. Στόχος είναι η αποτύπωση της θερμικής συμπεριφοράς του σεναρίου αναφοράς S1, ώστε να συγκροτηθεί συνεπής βάση σύγκρισης για το συνδυαστικό σενάριο S3. Η ανάλυση οργανώνεται σε δύο επίπεδα: αφενός μέσω των βιοκλιματικών δεικτών PET ανά προφίλ και UTCI, οι οποίοι

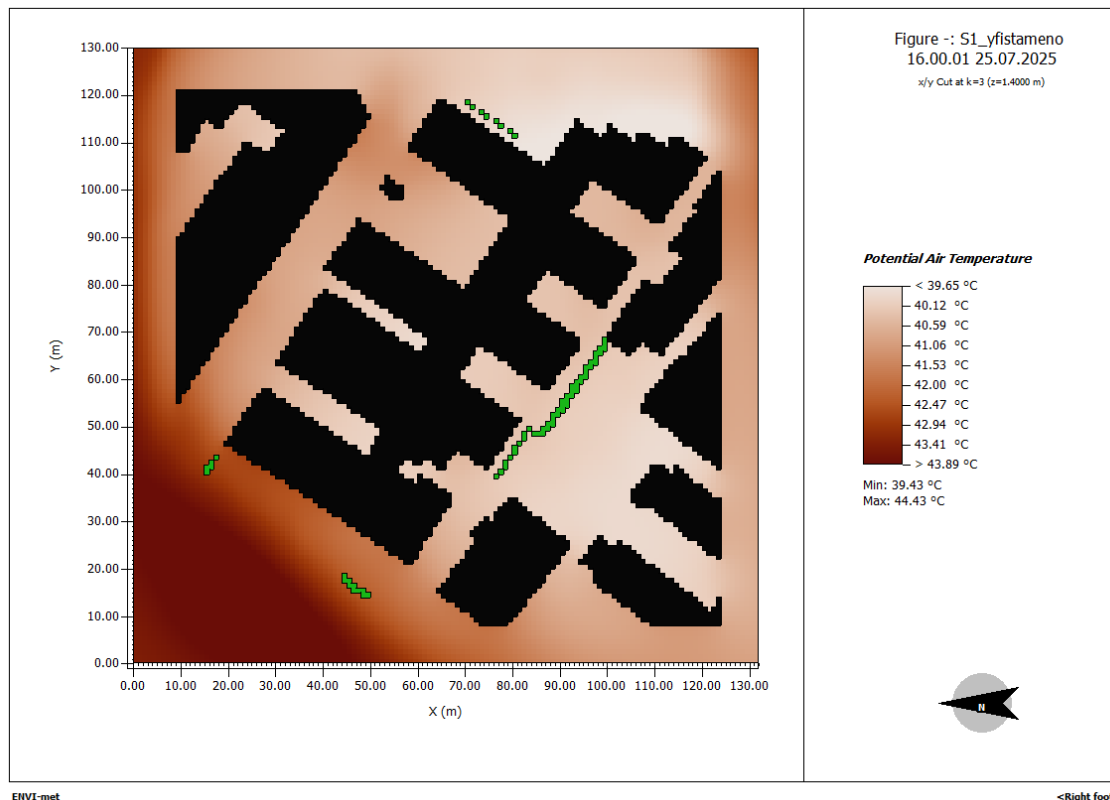
αποτυπώνουν την ένταση της θερμικής επιβάρυνσης, και αφετέρου μέσω βασικών μικροκλιματικών μεταβλητών —δυναμική θερμοκρασία αέρα (T_a) και μέση ακτινοβολία (T_{mrt})— οι οποίες συμβάλλουν στην ερμηνεία των φυσικών μηχανισμών που διαμορφώνουν τις παρατηρούμενες συνθήκες. Με τον τρόπο αυτό, η ανάλυση της «υφιστάμενης κατάστασης» δεν περιορίζεται στην περιγραφή του βαθμού θερμικής επιβάρυνσης, αλλά επεκτείνεται και στην κατανόηση των αιτίων που την προκαλούν, δημιουργώντας έτσι το απαραίτητο υπόβαθρο για τη σύγκριση με το σενάριο παρέμβασης που ακολουθεί.

Στόχος της ανάλυσης είναι η αποτύπωση της θερμικής συμπεριφοράς του χώρου όπως αυτή προκύπτει από το σενάριο αναφοράς S1, με έμφαση στη χωρική και χρονική κατανομή της θερμικής επιβάρυνσης.

3.1.1 Χωρική κατανομή της δυναμικής θερμοκρασίας αέρα T_a

Η υποενότητα εξετάζει τη χωρική κατανομή της δυναμικής θερμοκρασίας αέρα T_a ως βασική μικροκλιματική παράμετρο, προκειμένου να αποτυπωθεί το θερμοκρασιακό υπόβαθρο του χώρου και να υποστηριχθεί η ερμηνεία της συνολικής θερμικής επιβάρυνσης.

Στο Σχήμα 3.1.1.1 παρουσιάζεται η χωρική κατανομή της T_a για το σενάριο αναφοράς S1. Η απεικόνιση αφορά την 25.07.2025 και ώρα 16:00, σε ύψος $z = 1,40$ m, δηλαδή περίπου στο επίπεδο πεζού.



Σχήμα 3.1.1.1 Χωρική κατανομή της Ta στο σενάριο αναφοράς S1, 25.07.2025, ώρα 16:00, z = 1,40 m.

Πηγή: Ιδία επεξεργασία αποτελεσμάτων ENVI-met 5.8.0 / Leonardo.

Σημείωση: Η ένδειξη S1_yfistameno στην αυτόματη επικεφαλίδα της εξαγωγής αποτελεί την τεχνική ονομασία του αρχείου προσομοίωσης και αντιστοιχεί στο σενάριο αναφοράς S1. Το ίδιο ισχύει για τις επόμενες απεικονίσεις.

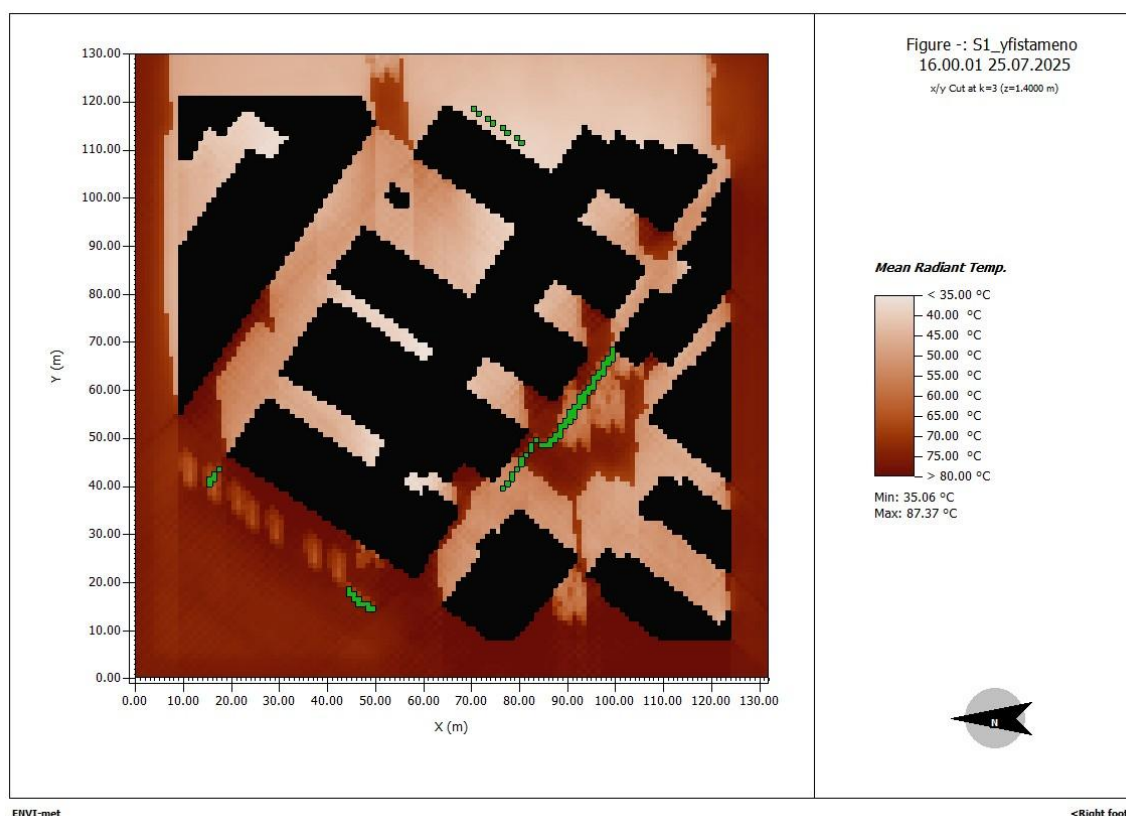
Οι τιμές της Ta στο σενάριο S1 κυμαίνονται από 39,43 °C έως 44,43 °C, γεγονός που αποτυπώνει ιδιαίτερα επιβαρυνμένο θερμικό πεδίο στο σύνολο σχεδόν της περιοχής μελέτης. Οι υψηλότερες τιμές εμφανίζονται κυρίως στις περισσότερο εκτεθειμένες, μη σκιασμένες επιφάνειες, όπου η ηλιακή ακτινοβολία και η θερμική αποθήκευση των σκληρών υλικών συμβάλλουν στην αύξηση της θερμοκρασίας αέρα.

Αντίθετα, σχετικά χαμηλότερες τιμές παρατηρούνται σε περιοχές που επηρεάζονται από σκίαση κτιριακών όγκων ή από την παρουσία βλάστησης. Η χωρική αυτή διαφοροποίηση δείχνει ότι η αστική μορφολογία, η σκίαση και τα επιφανειακά υλικά επηρεάζουν το μικροκλιματικό πεδίο, ακόμη και στην περίπτωση της θερμοκρασίας αέρα, η οποία

μεταβάλλεται ηπιότερα σε σχέση με ακτινοβολιακές παραμέτρους όπως η Tmrt (Mean Radiant Temperature / μέση ακτινοβολούμενη θερμοκρασία).

3.1.2 Μικροκλιματικοί παράγοντες: Tmrt (Mean Radiant Temperature / Μέση Ακτινοβολούμενη Θερμοκρασία) και SVF

Η υποενότητα αυτή επικεντρώνεται σε τρεις βασικούς μικροκλιματικούς παράγοντες, τη μέση ακτινοβολούμενη θερμοκρασία Tmrt (Mean Radiant Temperature / Μέση Ακτινοβολούμενη Θερμοκρασία), τον συντελεστή θέασης ουρανού SVF καθώς και την άμεση ηλιακή ακτινοβολία (Direct SW Radiation) στο ύψος 1.40 m.

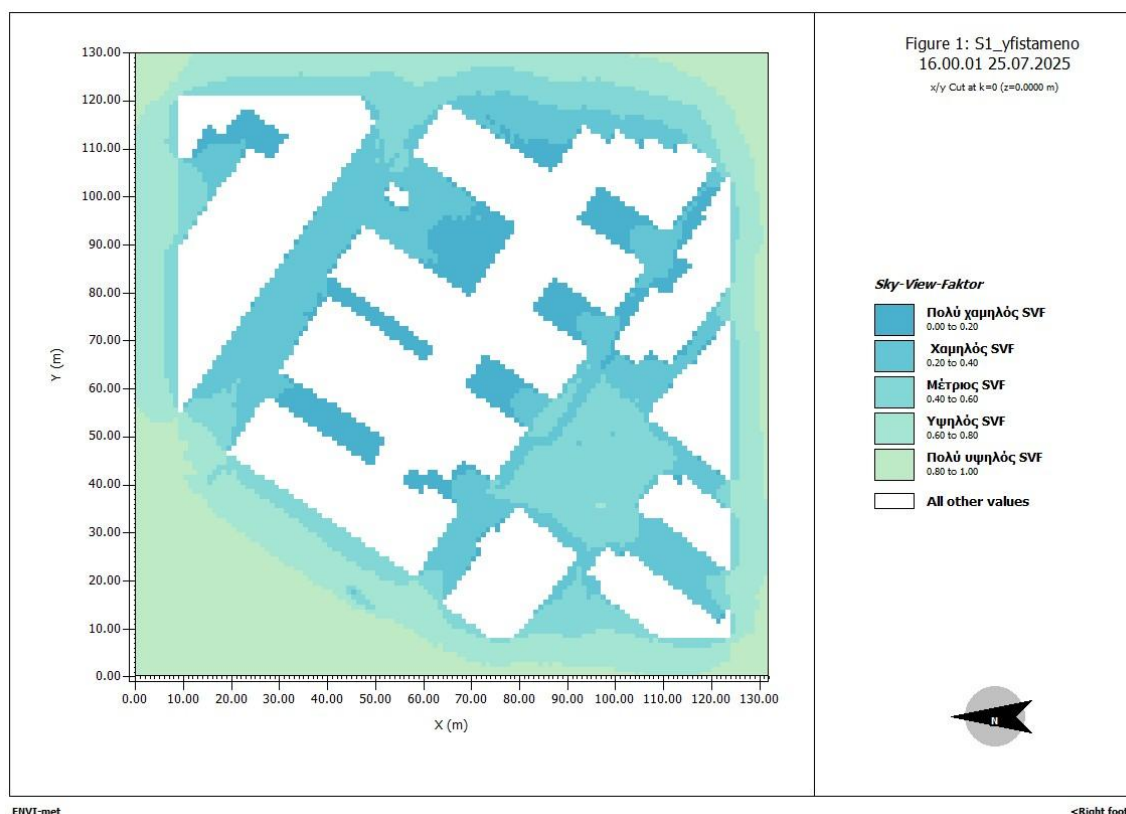


Σχήμα 3.1.2.1 Χωρική κατανομή της μέσης ακτινοβολούμενης θερμοκρασίας Tmrt (Mean Radiant Temperature / Μέση Ακτινοβολούμενη Θερμοκρασία) στο σενάριο αναφοράς S1 στις 16:00, σε ύψος 1,40 m.

Πηγή: Ιδία επεξεργασία αποτελεσμάτων ENVI-met 5.8.0 / Leonardo.

Ο χάρτης της Tmrt στο σενάριο αναφοράς S1 στις 16:00 παρουσιάζει τιμές από 35,06 °C έως 87,37 °C. Οι υψηλότερες τιμές καταγράφονται στις ανοικτές και εκτεθειμένες στον ήλιο επιφάνειες, κυρίως στα νότια και νοτιοδυτικά τμήματα του χώρου, ενώ χαμηλότερες

τιμές εμφανίζονται σε ζώνες που επηρεάζονται από τη σκίαση των κτιριακών όγκων. Η κατανομή αυτή δείχνει έντονη χωρική διαφοροποίηση της ακτινοβολιακής επιβάρυνσης στο σενάριο αναφοράς.



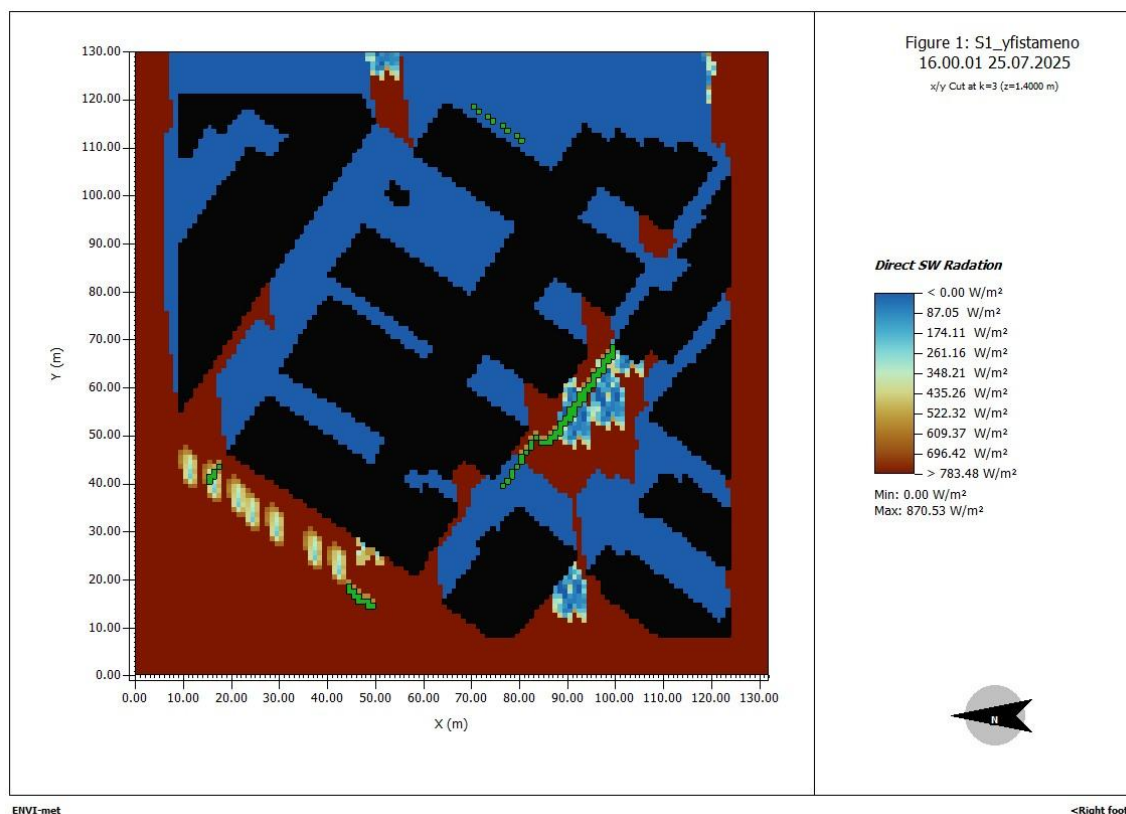
Σχήμα 3.1.2.2 Χωρική κατανομή του SVF (Sky View Factor / Συντελεστής Θέασης Ουρανού) στο σενάριο αναφοράς S1.

Πηγή: Ιδία επεξεργασία αποτελεσμάτων ENVI-met 5.8.0 / Leonardo.

Ο χάρτης του SVF αποτυπώνει τη γεωμετρική διαφοροποίηση του χώρου του σεναρίου αναφοράς. Οι υψηλότερες τιμές SVF καταγράφονται στις περισσότερο ανοικτές επιφάνειες, όπου η θέαση προς τον ουράνιο θόλο είναι μεγαλύτερη. Αντίθετα, χαμηλότερες τιμές εμφανίζονται στους στενότερους διαδρόμους και στις ζώνες που περιβάλλονται από κτιριακούς όγκους. Η κατανομή αυτή δείχνει ότι το κτιριακό σύμπλεγμα δημιουργεί επιμέρους περιοχές γεωμετρικού περιορισμού, οι οποίες συνδέονται με αυξημένη σκίαση και μικρότερη άμεση έκθεση στον ουρανό.

Χάρτης άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας (Direct Shortwave Radiation)

Στο Σχήμα 3.1.2.3 παρουσιάζεται η χωρική κατανομή της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας στο σενάριο αναφοράς S1. Η αποτύπωση πραγματοποιείται για την ίδια ημερομηνία, ώρα και στάθμη ανάλυσης με το σενάριο S3, δηλαδή στις 25.07.2025, ώρα 16:00 και σε ύψος $z = 1,40$ m, ώστε να διασφαλίζεται η άμεση συγκρισιμότητα των δύο σεναρίων.



Σχήμα 3.1.2.3 Χωρική κατανομή της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας στο σενάριο αναφοράς S1, 25.07.2025, ώρα 16:00, $z = 1,40$ m.

Πηγή: Ιδία επεξεργασία αποτελεσμάτων ENVI-met 5.8.0 / Leonardo για το σενάριο αναφοράς S1.

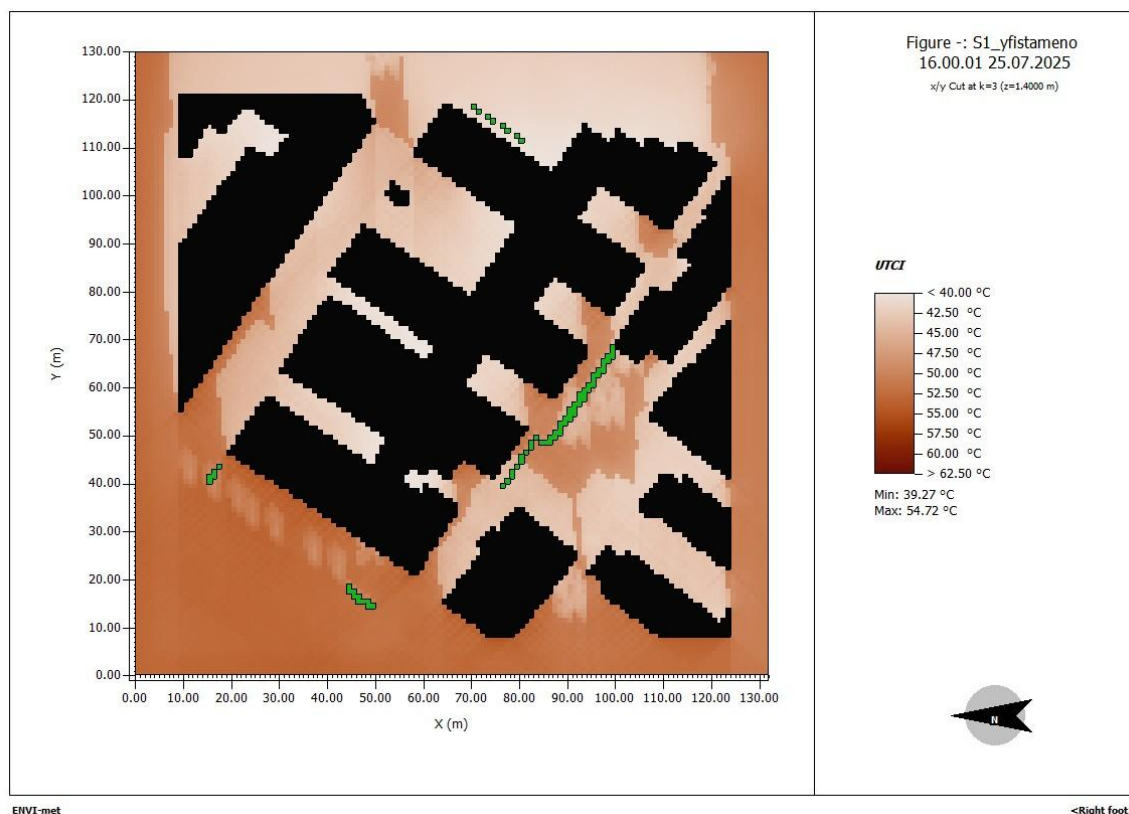
Στο S1 υπάρχουν εκτεθειμένες ζώνες με υψηλή άμεση ηλιακή ακτινοβολία.

3.1.3 Χωρική κατανομή του δείκτη UTCI στο σενάριο αναφοράς S1.

Η παρούσα υποενότητα παρουσιάζει τη χωρική κατανομή του δείκτη UTCI (Universal Thermal Climate Index / Καθολικός Δείκτης Θερμικού Κλίματος) στο σενάριο αναφοράς S1, με στόχο την αποτύπωση της έντασης και της χωρικής διαφοροποίησης της θερμικής επιβάρυνσης στον υπαίθριο χώρο του νοσοκομείου, κατά την ώρα αναφοράς της χαρτογραφικής ανάλυσης στο επίπεδο πεζού ($z = 1,40$ m).

Ο UTCI υπολογίστηκε μέσω του BIO-met, με βάση τα μικροκλιματικά πεδία της προσομοίωσης ENVI-met 5.8.0, δηλαδή τη θερμοκρασία αέρα, τη μέση ακτινοβολούμενη θερμοκρασία T_{mrt} , τη σχετική υγρασία και την ταχύτητα ανέμου, και απεικονίστηκε χαρτογραφικά στο Leonardo.

Ο UTCI αξιοποιείται ως ενιαίος βιομετεωρολογικός δείκτης θερμικού στρες, χωρίς διαφοροποίηση ανά ηλικιακό ή σωματομετρικό προφίλ. Ο δείκτης PET, ο οποίος παρουσιάζεται στην επόμενη υποενότητα, αξιοποιείται για τη διαφοροποιημένη αποτίμηση των προφίλ χρήστη, καθώς στο BIO-met επιτρέπει την παραμετροποίηση ανθρωπομετρικών και βιοφυσικών χαρακτηριστικών. Σε αντίθεση με τον PET, ο UTCI δεν χρησιμοποιείται στην παρούσα ανάλυση για διακριτή αποτίμηση παιδιού, ηλικιωμένου και ενήλικα, αλλά ως ενιαίος δείκτης αποτύπωσης του θερμικού στρες στον χώρο.



Σχήμα 3.1.3.1. Χωρική κατανομή του δείκτη UTCI στο σενάριο αναφοράς S1 στις 16:00, σε ύψος 1,40 m.

Πηγή: Ιδία επεξεργασία αποτελεσμάτων ENVI-met 5.8.0 / Leonardo.

Στις 16:00, οι τιμές του UTCI κυμαίνονται από 39,27 °C έως 54,72 °C, με εύρος ~15,5 K εντός της περιοχής μελέτης. Οι υψηλότερες τιμές εντοπίζονται στις πλέον ηλιοεκτεθειμένες και ανοιχτές επιφάνειες, κυρίως στα νότια και νοτιοδυτικά τμήματα του πεδίου, εκεί όπου η T_{mrt} φτάνει τους 87,37 °C και η Direct SW Radiation τα 870,53 W/m². Οι χαμηλότερες τιμές καταγράφονται τοπικά σε ζώνες σκίασης από τους κτιριακούς όγκους και σε σημεία επιρροής της υφιστάμενης φύτευσης.

Με βάση τη μεσογειακή κλίμακα του UTCI (Tseliou & Tsiros, 2016, θερμή περίοδος), η οποία υιοθετείται στην παρούσα εργασία, το κατώφλι του «Ακραίου θερμικού στρες» ορίζεται στους 39,9 °C. Στον χάρτη του S1 στις 16:00, σχεδόν ολόκληρο το πεδίο μελέτης (UTCI 39,27–54,72 °C) υπερβαίνει το κατώφλι αυτό και κατατάσσεται στην κατηγορία «ακραίο θερμικό στρες». Μόνο οι οριακά χαμηλότερες τιμές (~39,27 °C) πλησιάζουν, χωρίς να φτάνουν, το όριο των 39,9 °C.

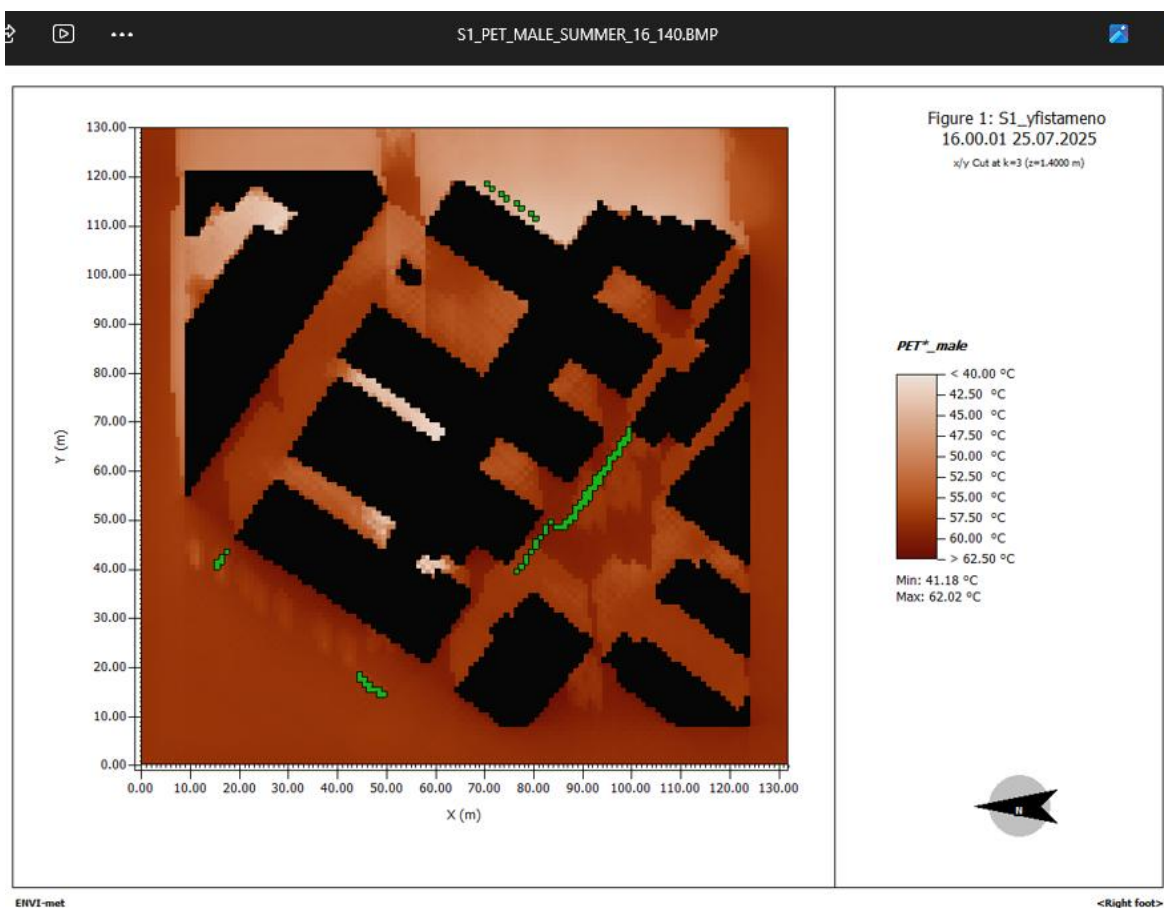
Είναι κρίσιμο να σημειωθεί ότι ακόμη και η ελάχιστη τιμή του χάρτη (39,27 °C) βρίσκεται οριακά μόλις κάτω από το μεσογειακό κατώφλι του «Ακραίου θερμικού στρες» (39,9 °C), αποκλίνοντας κατά ~0,6 °C. Δηλαδή καμία ζώνη της περιοχής μελέτης δεν εξασφαλίζει συνθήκες ουσιαστικά χαμηλότερες του «Ακραίου θερμικού στρες» κατά την ώρα αιχμής. Η χωρική κατανομή του UTCI ακολουθεί στενά την κατανομή της T_{mrt} και της Direct SW Radiation, ενώ έχει πιο συγκρατημένη διακύμανση από τον PET για το προφίλ αναφοράς (male: 41,18–62,02 °C). Η σύνδεση αυτή επιβεβαιώνει ότι η ακτινοβολιακή φόρτιση αποτελεί τον κύριο προσδιοριστικό παράγοντα της θερμικής επιβάρυνσης, ενώ η δυνητική θερμοκρασία αέρα T_a , που κυμαίνεται μόνο 39,43–44,43 °C με εύρος ~5,0 K, δεν επαρκεί από μόνη της για να ερμηνεύσει την έκταση και την ένταση της δυσφορίας. Συνεπώς, η αστική γεωμετρία και η σκίαση από τα κτίρια λειτουργούν ως κύριοι μηχανισμοί τοπικής ανακούφισης μέσω της μείωσης της T_{mrt} — όπως επιβεβαιώνεται από τους χάρτες SVF και Direct SW Radiation στο 3.1.2 — αλλά η εμβέλειά τους είναι χωρικά περιορισμένη και δεν επαρκεί για ουσιαστική μετάβαση σε χαμηλότερη κατηγορία θερμικού στρες. Η εικόνα αυτή συνιστά τη βασική κατάσταση αναφοράς, με την οποία συγκρίνεται το συνδυαστικό σενάριο παρέμβασης (3.2.3) και ο χάρτης χωρικής μεταβολής Δ UTCI (3.3.3).

3.1.4 Χωρική κατανομή του δείκτη PET ανά προφίλ ενήλικα / ηλικιωμένου / παιδιού.

Μετά την αποτύπωση του UTCI, η παρούσα υποενότητα παρουσιάζει τη χωρική κατανομή του δείκτη PET στο σενάριο S1. Σε αντίθεση με τον UTCI, ο οποίος χρησιμοποιήθηκε ως γενικός δείκτης θερμικού στρες και μικροκλιματικής επιβάρυνσης του χώρου, ο PET εξετάζεται εδώ διαφοροποιημένα για τρία προφίλ χρηστών: προφίλ αναφοράς ενήλικα άνδρα με θερινή ένδυση, ηλικιωμένο άτομο και παιδί.

Οι χάρτες PET παρουσιάζονται για την ίδια χρονική στιγμή, στις 16:00, και στο ίδιο ύψος ανάλυσης, 1,40 m, ώστε να είναι συγκρίσιμοι μεταξύ τους. Για όλους τους χάρτες χρησιμοποιείται κοινή σταθερή χρωματική κλίμακα, με σκοπό την άμεση σύγκριση της χωρικής κατανομής της θερμικής επιβάρυνσης μεταξύ των διαφορετικών προφίλ χρηστών.

α) Προφίλ ενήλικα



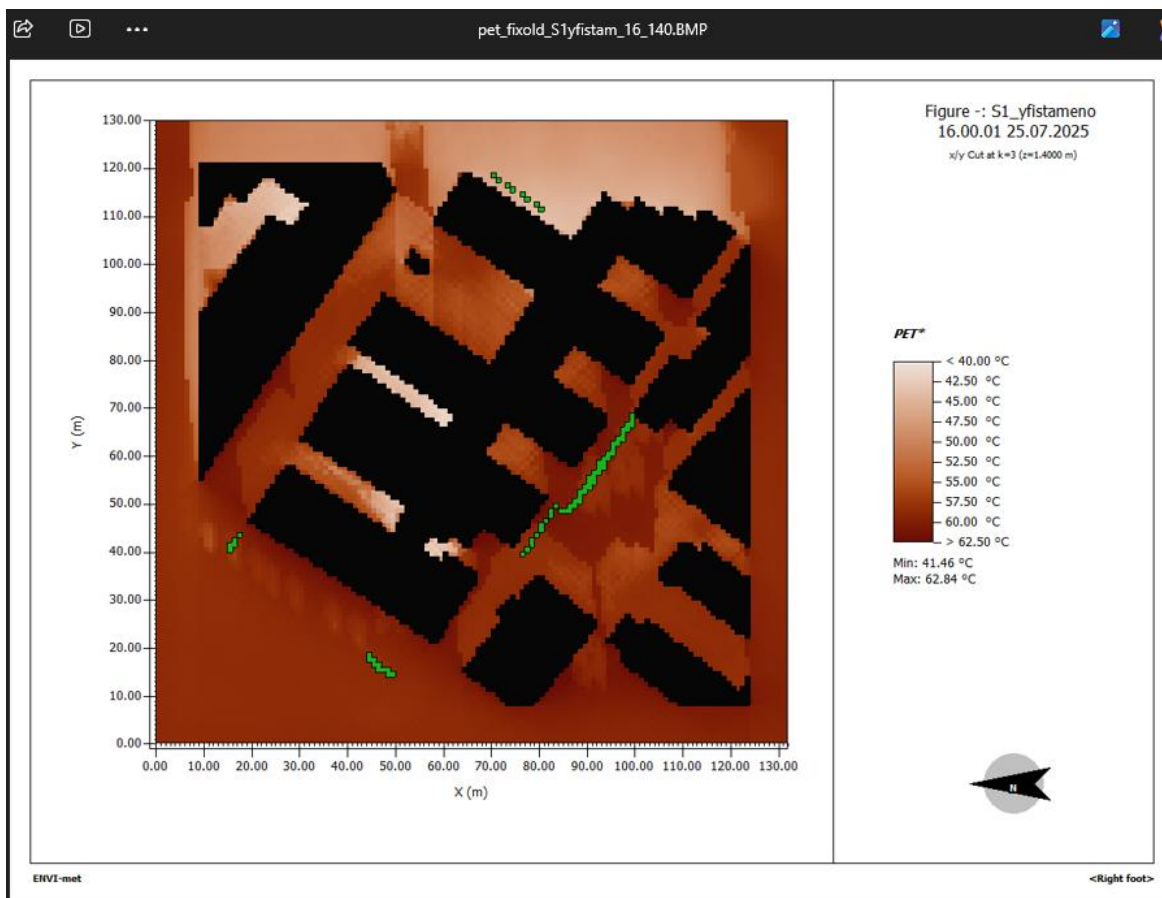
Σχήμα 3.1.4.1 Χωρική κατανομή του δείκτη PET (Physiologically Equivalent Temperature / φυσιολογικά ισοδύναμη θερμοκρασία) για το προφίλ ενήλικα χρήστη στο σενάριο αναφοράς S1, στις 16:00, σε ύψος 1,40 m.

Πηγή: Ιδία επεξεργασία αποτελεσμάτων ENVI-met 5.8.0 / Leonardo.

Για το προφίλ αναφοράς ενήλικα άνδρα με θερινή ένδυση, ο δείκτης PET κυμαίνεται από 41,18 °C έως 62,02 °C. Οι τιμές αυτές εμπίπτουν στην ανώτατη κατηγορία «πολύ θερμή» της μεσογειακής κλίμακας PET (Pantavou et al., 2014>39,1 °C), υποδηλώνοντας έντονη θερμική καταπόνηση για τον χρήστη σχεδόν σε όλον τον υπαίθριο χώρο κατά την ώρα αιχμής. Οι υψηλότερες τιμές εμφανίζονται κυρίως σε ανοικτές και άμεσα εκτεθειμένες επιφάνειες, ενώ σχετικά χαμηλότερες τιμές καταγράφονται τοπικά σε ζώνες που επηρεάζονται από τη σκίαση των κτιριακών όγκων και από την περιορισμένη υφιστάμενη φύτευση.

Παρά τις επιμέρους χωρικές διαφοροποιήσεις, ο χάρτης δείχνει ότι δεν διαμορφώνονται θερμικά άνετες ή ουσιαστικά ανεκτές ζώνες για το συγκεκριμένο προφίλ χρήστη στο σενάριο S1.

β) Προφίλ ηλικιωμένου.



Σχήμα 3.1.4.2 Χωρική κατανομή του δείκτη PET για το προφίλ ηλικιωμένου χρήστη στο σενάριο αναφοράς S1, στις 16:00, σε ύψος 1,40 m.

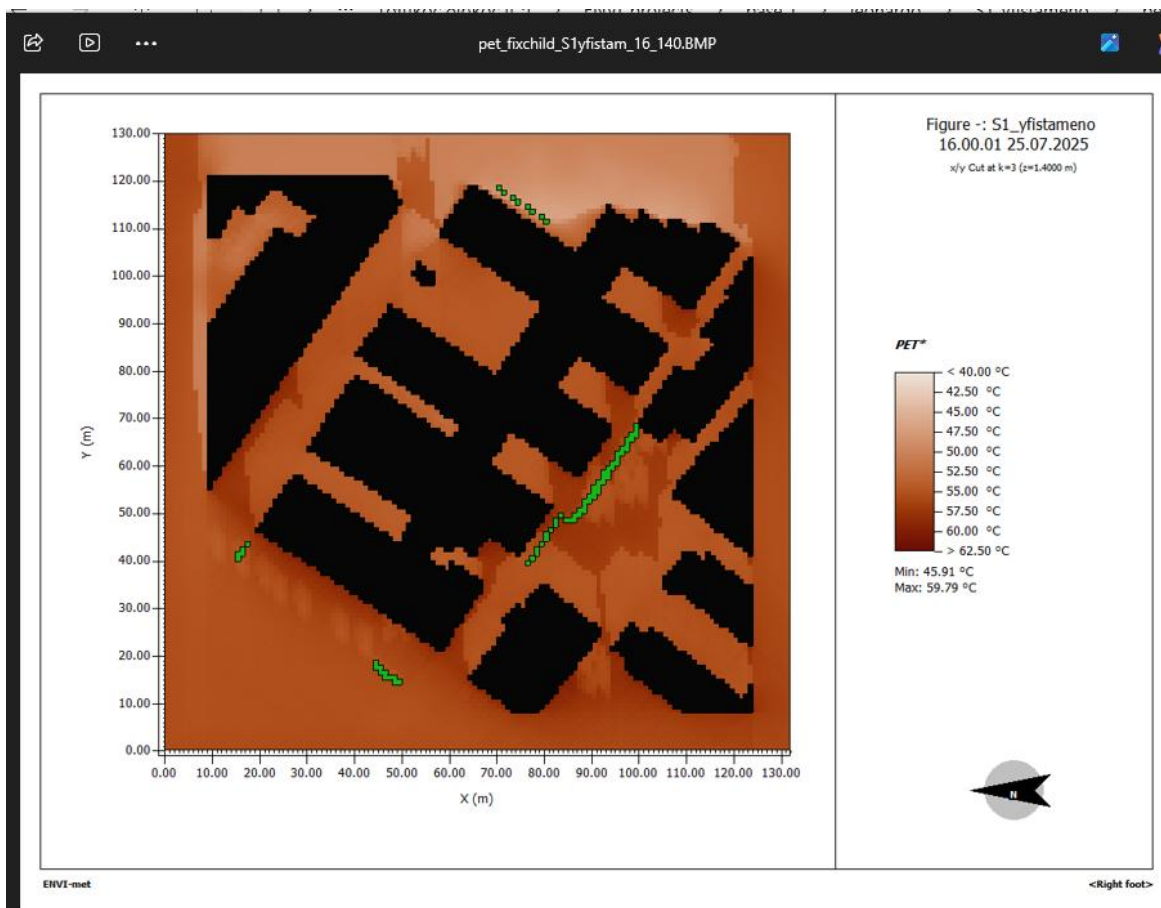
Πηγή: Ιδία επεξεργασία αποτελεσμάτων ENVI-met 5.8.0 / Leonardo.

Για το προφίλ ηλικιωμένου ατόμου, ο δείκτης PET κυμαίνεται από **41,46 °C έως 62,84 °C**. Το εύρος τιμών δείχνει ότι ο χώρος παρουσιάζει ιδιαίτερα δυσμενείς συνθήκες θερμικής καταπόνησης για την ηλικιακή αυτή ομάδα. Οι υψηλότερες τιμές συγκεντρώνονται στις περισσότερο ανοικτές και ηλιοεκτεθειμένες επιφάνειες, ενώ χαμηλότερες τιμές εμφανίζονται τοπικά σε σκιαζόμενες ζώνες, κυρίως κοντά στους κτιριακούς όγκους.

Σε σύγκριση με το προφίλ αναφοράς, το προφίλ ηλικιωμένου ατόμου εμφανίζει ελαφρώς υψηλότερη μέγιστη τιμή PET, γεγονός που υποδηλώνει αυξημένη θερμική επιβάρυνση για την ομάδα αυτή υπό τις ίδιες μικροκλιματικές συνθήκες. Ωστόσο, η συνολική χωρική εικόνα παραμένει παρόμοια, με εκτεταμένη θερμική δυσφορία στο μεγαλύτερο μέρος του χώρου.

Οι τρεις χάρτες PET καταγράφουν εκτεταμένη θερμική καταπόνηση στο S1 για όλα τα εξεταζόμενα προφίλ. Οι χωρικές διαφοροποιήσεις ακολουθούν παρόμοια λογική και στα τρία προφίλ, με υψηλότερες τιμές στις ανοικτές και εκτεθειμένες επιφάνειες και χαμηλότερες τιμές στις τοπικά σκιαζόμενες ζώνες. Ωστόσο, οι απόλυτες τιμές διαφοροποιούνται ανάλογα με το προφίλ χρήστη, γεγονός που καθιστά αναγκαία τη διακριτή παρουσίαση του PET για κάθε κατηγορία.

γ) Προφίλ παιδιού



Σχήμα 3.1.4.3 Χωρική κατανομή του δείκτη PET για το παιδικό προφίλ στο σενάριο αναφοράς S1, στις 16:00, σε ύψος 1,40 m.

Πηγή: Ιδία επεξεργασία αποτελεσμάτων ENVI-met 5.8.0 / Leonardo.

Για το προφίλ παιδιού, ο δείκτης PET κυμαίνεται από 45,91 °C έως 59,79 °C. Η ελάχιστη τιμή είναι υψηλότερη σε σχέση με τα δύο προηγούμενα προφίλ, γεγονός που δείχνει ότι ακόμη και οι σχετικά ευνοϊκότερες ζώνες του χώρου παραμένουν θερμικά επιβαρυνμένες για το παιδικό προφίλ. Οι υψηλότερες τιμές εμφανίζονται κυρίως σε ανοικτές και εκτεθειμένες επιφάνειες, ενώ οι χαμηλότερες καταγράφονται τοπικά σε ζώνες με σκίαση. Η χωρική κατανομή του PET για το παιδί δείχνει μικρότερο εύρος τιμών σε σχέση με τα άλλα προφίλ, αλλά συνολικά υψηλότερη κατώτατη θερμική επιβάρυνση. Αυτό σημαίνει

ότι το παιδικό προφίλ παρουσιάζει γενικευμένη έκθεση σε δυσμενείς συνθήκες θερμικής καταπόνησης στο σύνολο σχεδόν της περιοχής μελέτης.

3.1.5 Χρονική εξέλιξη της θερμικής επιβάρυνσης στο PO1 — σενάριο αναφοράς S1

Η παρούσα υποενότητα παρουσιάζει τη χρονική εξέλιξη των μικροκλιματικών παραμέτρων T_a και T_{mrt} , καθώς και των βιοκλιματικών δεικτών UTCI και PET ανά προφίλ χρήστη, στο σημείο αναφοράς PO1 για το σύνολο της ημέρας προσομοίωσης 25.07.2025.

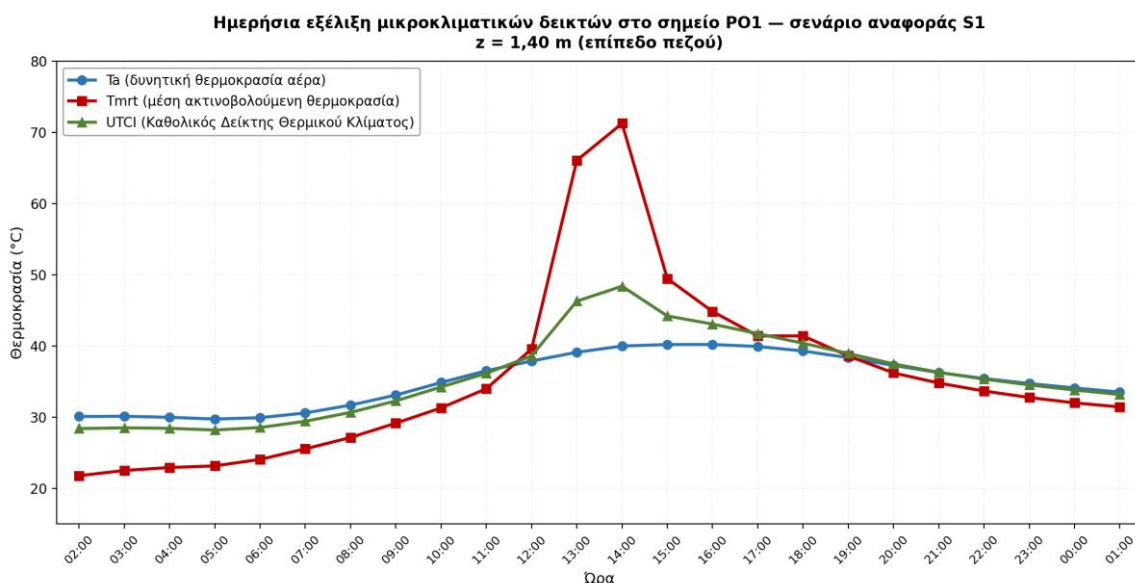
Το σημείο PO1 ερμηνεύεται υπό τη μεθοδολογική παραδοχή που παρουσιάστηκε στην Ενότητα 2.2.5, δηλαδή ως σημείο αναφοράς ενός αρχικά ακάλυπτου και δυνητικά ανακτήσιμου υπαίθριου χώρου. Συνεπώς, τα αποτελέσματα του σημείου δεν αποσκοπούν στην πλήρη αποτύπωση της σημερινής κατασκευαστικής (λειτουργικής) κατάστασης της αυλής, αλλά στην αξιολόγηση της μικροκλιματικής συμπεριφοράς ενός χώρου αναφοράς με δυνητική αξία για βιοκλιματική αναβάθμιση.

Το σημείο PO1 ορίστηκε στην Ενότητα 2.8.3 με συντεταγμένες κάρναβου (77, 59, 3) και βρίσκεται σε στάθμη πεζού, σε ύψος $z = 1,40$ m.

α) Χρονική εξέλιξη της T_a , της T_{mrt} και του UTCI στο PO1

Όπως διευκρινίζεται στην Ενότητα 2.2.4, στην παρούσα εφαρμογή του BIO-met ο UTCI υπολογίζεται για τυποποιημένο άτομο αναφοράς και δεν διαφοροποιείται ανά επιλεγμένο ανθρωποκεντρικό προφίλ. Η εξαγωγή των αντίστοιχων χρονοσειρών για τα τρία προφίλ στο PO1 έδωσε ταυτόσημες τιμές σε όλο το εξεταζόμενο 24ωρο. Για τον λόγο αυτό, παρουσιάζεται μία χρονοσειρά UTCI, ενώ η διαφοροποίηση μεταξύ του ενηλίκου, του ηλικιωμένου και του παιδιού εξετάζεται μέσω του PET.

Το Σχήμα 3.1.5.1 παρουσιάζει την ημερήσια εξέλιξη της δυνητικής θερμοκρασίας αέρα, της μέσης ακτινοβολούμενης θερμοκρασίας και του δείκτη UTCI στο σημείο PO1, στη στάθμη πεζού, για το σενάριο αναφοράς S1.



Σχήμα 3.1.5.1: Ημερήσια εξέλιξη της Ta, της Tmrt και του UTCI στο σημείο PO1, στη στάθμη πεζού z = 1,40 m, για το σενάριο αναφοράς S1, στις 25.07.2025.

Πηγή: Ιδία επεξεργασία αποτελεσμάτων ENVI-met 5.8.0/ BIO-met

Στο PO1, η Ta φθάνει τη μέγιστη τιμή των 40,21 °C στις 15:00, ενώ η Tmrt και ο UTCI κορυφώνονται μία ώρα νωρίτερα, στις 14:00, με τιμές 71,27 °C και 48,39 °C αντίστοιχα. Η μεγαλύτερη ημερήσια διακύμανση καταγράφεται στην Tmrt, με εύρος 49,51 K μεταξύ της ελάχιστης τιμής των 21,76 °C στις 02:00 και της μέγιστης τιμής των 71,27 °C στις 14:00.

Ο UTCI υπερβαίνει το κατώφλι των 39,9 °C της εφαρμοζόμενης μεσογειακής κλίμακας από τις 13:00 έως τις 18:00, δηλαδή για έξι συνεχείς ώρες. Η αύξηση της Tmrt συμπίπτει χρονικά με τις υψηλές τιμές της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας, οι οποίες ανέρχονται σε 993,59 W/m² στις 13:00 και 975,34 W/m² στις 14:00. Η χρονική αυτή αντιστοιχία δείχνει ότι η εξέλιξη της θερμικής επιβάρυνσης στο PO1 συνδέεται κυρίως με το ακτινοβολιακό περιβάλλον.

Η ταχύτητα ανέμου παραμένει χαμηλότερη από 0,07 m/s σε όλο το εξεταζόμενο 24ωρο και δεν παρουσιάζει μεταβολή ανάλογη με τις έντονες διακυμάνσεις της Tmrt και του UTCI. Επομένως, η ημερήσια εξέλιξη των αποτελεσμάτων δεν μπορεί να ερμηνευθεί κυρίως μέσω του αερισμού.

Συγκεντρωτικός πίνακας ωριαίων τιμών στο PO1

Στον Πίνακα 3.1.5.1 παρουσιάζονται οι αναλυτικές ωριαίες τιμές των μικροκλιματικών παραμέτρων T_a και T_{mrt} , του δείκτη UTCI και του δείκτη PET για τα προφίλ ενηλίκου, ηλικιωμένου και παιδιού στο σημείο PO1, για το σύνολο του εξεταζόμενου 24ώρου. Οι κατηγορίες PET βασίζονται στην εφαρμοζόμενη μεσογειακή κλίμακα των Pantanov et al. (2014) και οι κατηγορίες UTCI στην εφαρμοζόμενη μεσογειακή κλίμακα των Tseliou και Tsiros (2016).

Πίνακας 3.1.5.1: Ωριαίες τιμές των T_a , T_{mrt} και UTCI και του PET ανά προφίλ χρήστη, με τις αντίστοιχες κατηγορίες θερμικής αίσθησης και θερμικού στρες, στο σημείο PO1 — σενάριο αναφοράς S1, $z = 1,40$ m.

Ωρα	T_a (°C)	T_{mrt} (°C)	UTCI (°C) (κατηγορία)	PET ενήλικα (°C) (κατηγορία)	PET ηλικιωμένου (°C) (κατηγορία)	PET παιδιού (°C) (κατηγορία)
02:00	30,08	21,76	28,38 (XΘΣ)	28,72 (ΕΘ)	29,03 (ΕΘ)	31,21 (Θ)
03:00	30,11	22,49	28,49 (XΘΣ)	29,12 (ΕΘ)	29,43 (ΕΘ)	31,61 (Θ)
04:00	29,97	22,91	28,42 (XΘΣ)	29,27 (ΕΘ)	29,59 (ΕΘ)	31,75 (Θ)
05:00	29,72	23,14	28,18 (XΘΣ)	29,24 (ΕΘ)	29,55 (ΕΘ)	31,70 (Θ)
06:00	29,91	24,05	28,53 (XΘΣ)	29,84 (ΕΘ)	30,16 (ΕΘ)	32,30 (Θ)
07:00	30,58	25,53	29,41 (XΘΣ)	31,04 (ΕΘ)	31,35 (Θ)	33,47 (Θ)
08:00	31,68	27,13	30,66 (XΘΣ)	32,50 (Θ)	32,81 (Θ)	34,93 (Θ)
09:00	33,09	29,14	32,27 (XΘΣ)	34,36 (Θ)	34,67 (Θ)	36,76 (Θ)
10:00	34,85	31,29	34,23	36,49	36,79	38,85

Ωρα	Ta (°C)	Tmrt (°C)	UTCI (°C) (κατηγορία)	PET ενήλικα (°C) (κατηγορία)	PET ηλικιωμένου (°C) (κατηγορία)	PET παιδιού (°C) (κατηγορία)
			(ΜΘΣ)	(Θ)	(Θ)	(Θ)
11:00	36,51	33,98	36,15 (ΜΘΣ)	38,92 (Θ)	39,22 (ΠΘ)	41,24 (ΠΘ)
12:00	37,88	39,56	38,60 (ΠΠΘΣ)	43,16 (ΠΘ)	43,44 (ΠΘ)	50,74 (ΠΘ)
13:00	39,11	66,07	46,29 (ΑΘΣ)	58,75 (ΠΘ)	59,59 (ΠΘ)	56,45 (ΠΘ)
14:00	39,98	71,27	48,39 (ΑΘΣ)	59,48 (ΠΘ)	60,31 (ΠΘ)	57,20 (ΠΘ)
15:00	40,21	54,19	44,21 (ΑΘΣ)	57,65 (ΠΘ)	58,49 (ΠΘ)	55,33 (ΠΘ)
16:00	40,20	49,47	43,07 (ΑΘΣ)	56,81 (ΠΘ)	57,20 (ΠΘ)	54,89 (ΠΘ)
17:00	39,92	41,40	41,72 (ΑΘΣ)	54,20 (ΠΘ)	53,92 (ΠΘ)	54,42 (ΠΘ)
18:00	39,29	41,40	40,38 (ΑΘΣ)	45,16 (ΠΘ)	45,43 (ΠΘ)	53,78 (ΠΘ)
19:00	38,35	38,60	38,94 (ΠΠΘΣ)	42,87 (ΠΘ)	43,15 (ΠΘ)	51,58 (ΠΘ)
20:00	37,26	36,21	37,47 (ΙΘΣ)	40,80 (ΠΘ)	41,09 (ΠΘ)	46,01 (ΠΘ)
21:00	36,25	34,78	36,29 (ΜΘΣ)	39,41 (ΠΘ)	39,70 (ΠΘ)	41,77 (ΠΘ)
22:00	35,42	33,66	35,34 (ΜΘΣ)	38,30 (Θ)	38,60 (Θ)	40,67 (ΠΘ)
23:00	34,71	32,75	34,52	37,39	37,69	39,77

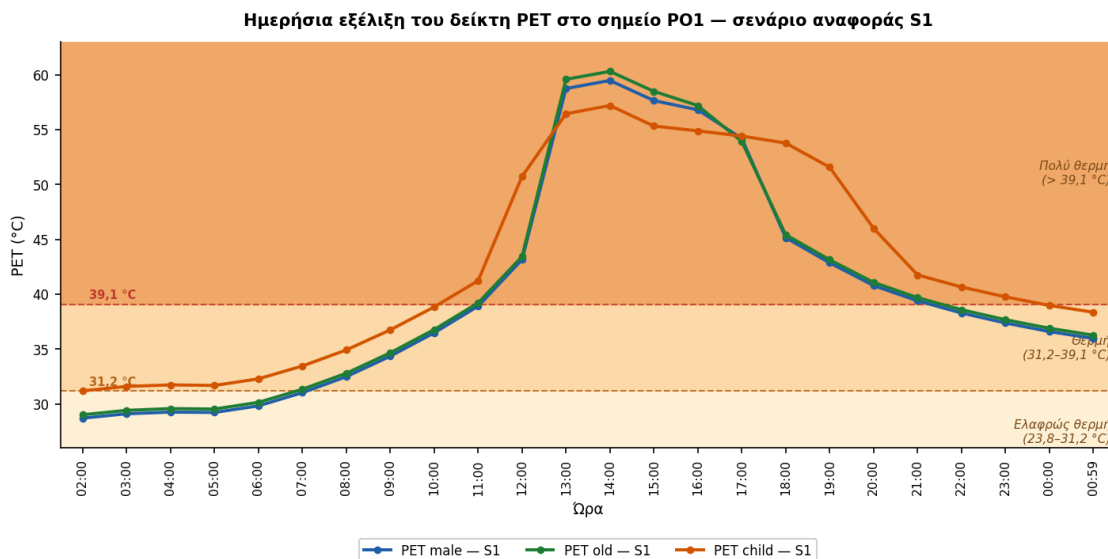
Ωρα	Ta (°C)	Tmrt (°C)	UTCI (°C) (κατηγορία)	PET ενήλικα (°C) (κατηγορία)	PET ηλικιωμένου (°C) (κατηγορία)	PET παιδιού (°C) (κατηγορία)
			(ΜΘΣ)	(Θ)	(Θ)	(ΠΘ)
00:00	34,09	31,99	33,80 (ΧΘΣ)	36,61 (Θ)	36,91 (Θ)	38,99 (Θ)
01:00	33,51	31,43	33,17 (ΧΘΣ)	35,98 (Θ)	36,28 (Θ)	38,37 (Θ)
Peak	40,21 (15:00)	71,27 (14:00)	48,39 (14:00) (ΑΘΣ)	59,48 (14:00) (ΠΘ)	60,31 (14:00) (ΠΘ)	57,20 (14:00) (ΠΘ)
Min	29,72 (05:00)	21,76 (02:00)	28,18 (05:00) (ΧΘΣ)	28,72 (02:00) (ΕΘ)	29,03 (02:00) (ΕΘ)	31,21 (02:00) (Θ)

Πηγή: Ιδία επεξεργασία αποτελεσμάτων ENVI-met 5.8.0 και BIO-met. Οι χρονοσειρές της Ta και της Tmrt εξήχθησαν μέσω του Map Explorer, ενώ οι τιμές των PET και UTCI προέκυψαν από την επεξεργασία των αποτελεσμάτων στο BIO-met.

Σημείωση: Με κίτρινο επισημαίνεται η κοινή ώρα κορύφωσης της Tmrt, του UTCI και του PET για τα τρία προφίλ χρήστη στις 14:00. Η μέγιστη τιμή της Ta καταγράφεται στις 15:00. Οι συντομογραφίες των κατηγοριών παρουσιάζονται στους Πίνακες 2.8.1.1 για τον PET και 2.8.1.2 για τον UTCI. Ο UTCI υπολογίζεται για τυποποιημένο άτομο αναφοράς και δεν διαφοροποιείται ανά προφίλ χρήστη.

β) Χρονική εξέλιξη του PET ανά προφίλ χρήστη στο PO1

Το ακόλουθο διάγραμμα παρουσιάζει τη χρονική εξέλιξη του PET στο PO1 για τα τρία ανθρωποκεντρικά προφίλ, με σκοπό την αποτύπωση των διαφοροποιήσεων που προκύπτουν από την εφαρμογή των παραμετροποιημένων προφίλ στις ίδιες μικροκλιματικές συνθήκες.



Σχήμα 3.1.5.2: Ημερήσια εξέλιξη του PET στο σημείο PO1 για τα προφίλ ενήλικα, ηλικιωμένου και παιδιού, στο σενάριο αναφοράς S1, στις 25.07.2025 και σε ύψος $z = 1,40\text{ m}$

Πηγή: Ιδία επεξεργασία ωριαίων αποτελεσμάτων ENVI-met 5.8.0/BIO-met, με εξαγωγή μέσω Map Explorer.

Η ημερήσια εξέλιξη του PET στο PO1 παρουσιάζει παρόμοια γενική χρονική πορεία και στα τρία προφίλ, με τιμές αιχμής στις 14:00. Κατά τη συγκεκριμένη ώρα, ο PET ανέρχεται σε 59,48 °C για τον ενήλικα, 60,31 °C για τον ηλικιωμένο και 57,20 °C για το παιδικό προφίλ. Όλες οι τιμές υπερβαίνουν το κατώφλι των 39,1 °C της εφαρμοζόμενης μεσογειακής κλίμακας και εντάσσονται στην κατηγορία «πολύ θερμή».

Παρά την κοινή γενική χρονική πορεία, η σχέση μεταξύ του παιδικού και του ενήλικου προφίλ μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια της ημέρας. Στις 12:00, ο PET του παιδικού προφίλ ανέρχεται σε 50,74 °C, έναντι 43,16 °C για τον ενήλικα, με απόκλιση +7,58 K. Στις 19:00, οι αντίστοιχες τιμές είναι 51,58 °C και 42,87 °C, με απόκλιση +8,71 K.

Η διαφοροποίηση του ηλικιωμένου από το προφίλ του ενήλικα είναι μικρότερη, με απόλυτες αποκλίσεις που κυμαίνονται κυρίως από περίπου 0,3 έως 0,8 K. Η χρονική μεταβολή των αποκλίσεων δείχνει ότι οι διαφορές μεταξύ των παραμετροποιημένων προφίλ δεν παραμένουν σταθερές σε όλο το 24ωρο. Δεν επιτρέπει, ωστόσο, βάσει μόνο των αποτελεσμάτων PET, την απόδοσή τους σε συγκεκριμένο φυσιολογικό μηχανισμό. Η ευρύτερη ερμηνεία του ευρήματος αναπτύσσεται στην Ενότητα 4.2.3.

γ) Συμπληρωματικότητα χωρικής και χρονικής αποτύπωσης

Οι χάρτες των Υποενοτήτων 3.1.1–3.1.4 αποτυπώνουν τη χωρική κατανομή των μικροκλιματικών παραμέτρων και των βιοκλιματικών δεικτών κατά την κοινή ώρα αναφοράς των 16:00. Αντίθετα, οι χρονοσειρές της παρούσας υποενοτήτας παρουσιάζουν την ημερήσια εξέλιξή τους σε ένα συγκεκριμένο σημείο, το PO1. Οι δύο μορφές παρουσίασης είναι συμπληρωματικές: οι χάρτες απαντούν στο «πού» εντοπίζονται οι δυσμενέστερες συνθήκες, ενώ οι χρονοσειρές στο «πότε» κορυφώνεται η θερμική επιβάρυνση στο επιλεγμένο σημείο.

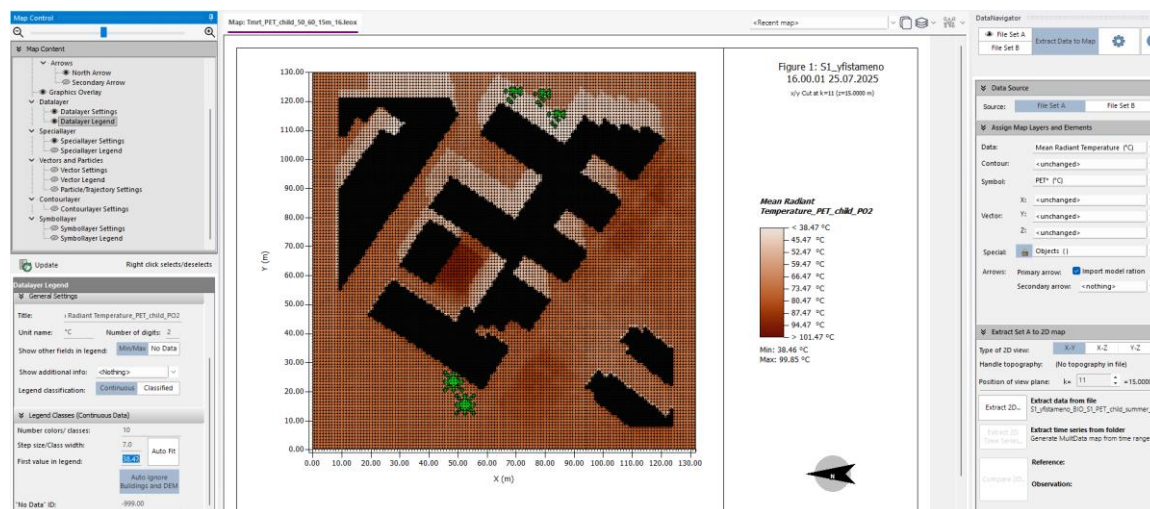
Η τιμή αιχμής του UTCI στο PO1 καταγράφεται στις 14:00 και ανέρχεται σε 48,39 °C. Η τιμή αυτή δεν είναι άμεσα συγκρίσιμη με τη μέγιστη χωρική τιμή του χάρτη των 16:00, δεδομένου ότι η πρώτη προέρχεται από τη χρονική ανάλυση στο συγκεκριμένο σημείο, ενώ η δεύτερη από τη χωρική αποτύπωση ολόκληρου του πεδίου σε διαφορετική χρονική στιγμή.

3.1.6 Χωρική και χρονική εξέλιξη της θερμικής επιβάρυνσης στο PO2 — σενάριο αναφοράς S1

Η παρούσα υποενοότητα παρουσιάζει τη χωρική και χρονική εξέλιξη της θερμικής επιβάρυνσης στο σημείο PO2 για το σενάριο S1. Το PO2 ορίστηκε στην Ενότητα 2.8.3 με συντεταγμένες κάρναβου (50, 60, 11) σε στάθμη περίπου $z \approx 15$ m από το έδαφος. Η ανάλυση του PO2 δεν αντικαθιστά την αξιολόγηση σε στάθμη πεζού (PO1, Ενότητα 3.1.5), αλλά λειτουργεί συμπληρωματικά, με στόχο τη διερεύνηση της κατακόρυφης διαφοροποίησης των μικροκλιματικών συνθηκών.

Εξετάζονται οι μικροκλιματικές παράμετροι T_a και T_{mrt} , καθώς και ο UTCI και PET για τα τρία προφίλ χρηστών.

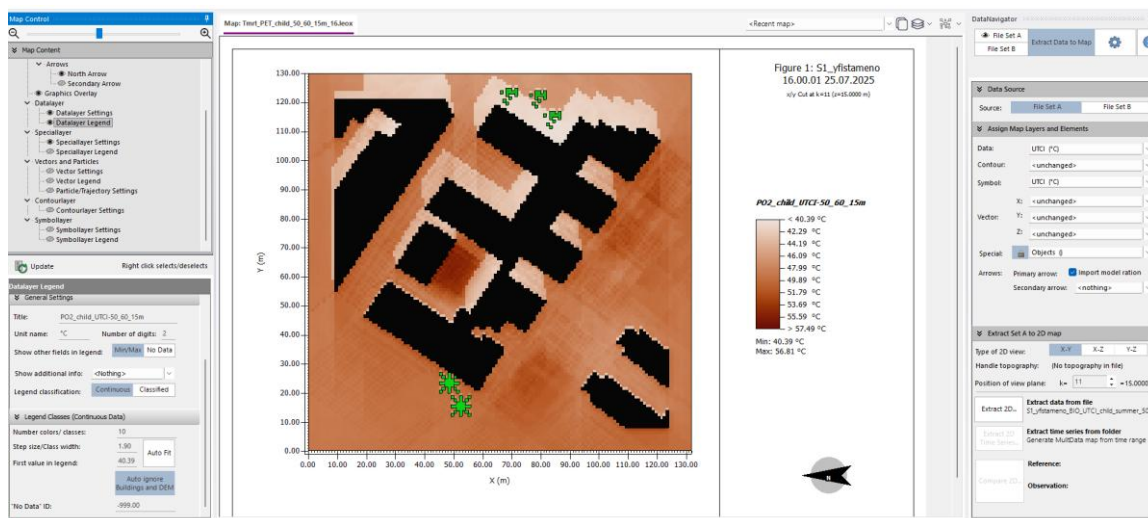
α) Χωρική αποτύπωση της θερμικής επιβάρυνσης στο PO2, σε στάθμη $z \approx 15$ m (Tmrt, UTCI)



Σχήμα 3.1.6.1: Χωρική κατανομή της Tmrt στο επίπεδο $z \approx 15$ m — στο σενάριο αναφοράς S1, 25.07.2025, ώρα 16:00.

Πηγή: Ιδία επεξεργασία αποτελεσμάτων ENVI-met 5.8.0/BIO-met/Leonardo.

Στη στάθμη $z \approx 15$ m, η χωρική αποτύπωση δείχνει ότι η αυξημένη θερμική επιβάρυνση δεν περιορίζεται σημειακά στο PO2, αλλά εκτείνεται σε σημαντικό τμήμα του εξεταζόμενου υπερυψωμένου επιπέδου. Η Tmrt εμφανίζει υψηλές τιμές στις εκτεθειμένες περιοχές της στάθμης δώματος, ενώ ο UTCI αποτυπώνει την αντίστοιχη θερμική επιβάρυνση. Οι υψηλές τιμές της Tmrt είναι συμβατές με την έντονη ακτινοβολιακή έκθεση και την περιορισμένη σκίαση. Επομένως, οι συνθήκες στη συγκεκριμένη στάθμη δεν μπορούν να ερμηνευθούν μόνο μέσω της θερμοκρασίας αέρα, αλλά απαιτούν συνδυαστική ανάγνωση της Tmrt και του UTCI.



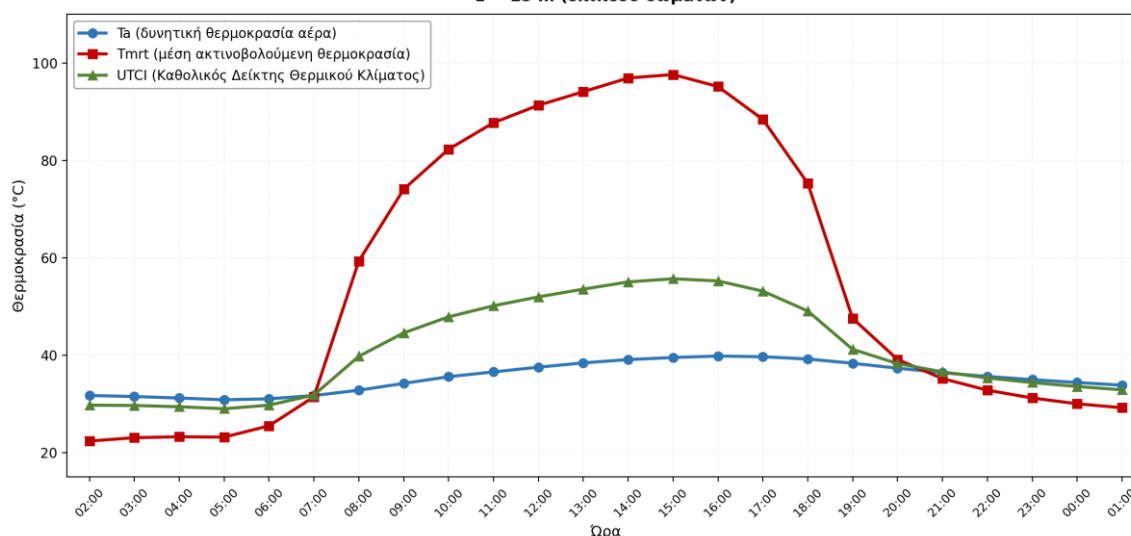
Σχήμα 3.1.6.2: Χωρική κατανομή του UTCI στο επίπεδο $z \approx 15$ m — στο σενάριο αναφοράς S1, 25.07.2025, ώρα 16:00

Πηγή: Ιδία επεξεργασία αποτελεσμάτων ENVI-met 5.8.0 / BIO-met / Leonardo.

β) Χρονική εξέλιξη T_a , T_{mrt} και UTCI στο PO2

Όπως διευκρινίζεται στην Ενότητα 2.2.4 και σε αντιστοιχία με την ανάλυση του PO1, στην παρούσα εφαρμογή του BIO-met ο UTCI υπολογίζεται για τυποποιημένο άτομο αναφοράς και δεν διαφοροποιείται ανά επιλεγμένο ανθρωποκεντρικό προφίλ. Η εξαγωγή των αντίστοιχων χρονοσειρών για τα τρία προφίλ στο PO2 έδωσε ταυτόσημες τιμές σε όλο το εξεταζόμενο 24ωρο. Για τον λόγο αυτό παρουσιάζεται μία χρονοσειρά UTCI, ενώ η διαφοροποίηση μεταξύ ενήλικα, ηλικιωμένου και παιδιού εξετάζεται μέσω του PET.

Ημερήσια εξέλιξη μικροκλιματικών δεικτών στο σημείο PO2 — σενάριο αναφοράς S1 $z \approx 15$ m (επίπεδο δωμάτων)



Σχήμα 3.1.6.3. Ημερήσια εξέλιξη της T_a , της T_{mrt} και του UTCI στο σημείο PO2, στη στάθμη $z \approx 15$ m, για το σενάριο S1, 25.07.2025.

Πηγή: Ιδία επεξεργασία αποτελεσμάτων ENVI-met 5.8.0 / BIO-met / Leonardo.

Στο PO2, η T_a κορυφώνεται στους 39,81 °C στις 16:00, ενώ η T_{mrt} φθάνει τους 97,63 °C στις 15:00 και ο UTCI τους 55,68 °C την ίδια ώρα. Η χρονική εξέλιξη δείχνει σημαντικά εντονότερη ημερήσια διακύμανση της T_{mrt} σε σχέση με την T_a , γεγονός που αναδεικνύει τον καθοριστικό ρόλο του ακτινοβολιακού περιβάλλοντος στη διαμόρφωση της θερμικής επιβάρυνσης.

Η τιμή αιχμής της T_{mrt} στο PO2 είναι κατά 26,36 K υψηλότερη από την αντίστοιχη τιμή αιχμής στο PO1. Επειδή οι δύο αιχμές εμφανίζονται σε διαφορετικές ώρες, η τιμή αυτή αποτελεί διαφορά μεταξύ αιχμών και όχι μεταβολή κοινής χρονικής στιγμής. Το καταγραφόμενο πρότυπο είναι συμβατό με τη βιβλιογραφία που αναδεικνύει τη σημασία της σκίασης και της T_{mrt} για τη θερμική επιβάρυνση των υπαίθριων χώρων (Lai et al., 2019· Erell et al., 2014).

Ο UTCI υπερβαίνει το κατώφλι των 39,9 °C της εφαρμοζόμενης μεσογειακής κλίμακας από τις 09:00 έως τις 19:00, δηλαδή για 11 συνεχείς ώρες. Η ταχύτητα ανέμου στο PO2 κυμαίνεται από 0,08 έως 0,18 m/s και παραμένει χαμηλή σε όλο το εξεταζόμενο 24ωρο. Παρότι είναι ελαφρώς υψηλότερη από την αντίστοιχη τιμή στο PO1, δεν παρουσιάζει μεταβολή ανάλογη με τις έντονες διακυμάνσεις της T_{mrt} και του UTCI. Συνολικά, η χρονική εξέλιξη των μεταβλητών δείχνει ότι η θερμική επιβάρυνση στο PO2 συνδέεται κυρίως με το ακτινοβολιακό περιβάλλον και λιγότερο με τη διαφοροποίηση της θερμοκρασίας αέρα ή της ταχύτητας ανέμου.

γ) Συγκεντρωτικός πίνακας βασικών τιμών στο PO2

Στον Πίνακα 3.1.6.1 παρουσιάζονται οι αναλυτικές ωριαίες τιμές των δεικτών στο σημείο PO2 για ολόκληρο το 24ωρο της προσομοίωσης.

Πίνακας 3.1.6.1: Ωριαίες τιμές T_a , T_{mrt} , UTCI και PET για ενήλικα (male), ηλικιωμένου (old), παιδιού (child) στο σημείο PO2 για όλο το 24ωρο της προσομοίωσης — στο σενάριο αναφοράς S1, 25.07.2025, σε $z \approx 15$ m. Με κίτρινο επισημαίνεται η κοινή ώρα αιχμής της T_{mrt} , του UTCI και του PET στο PO2, στις 15:00.

Ωρα	Ta (°C)	Tmrt (°C)	UTCI (°C)	PET ενήλικα	PET ηλικιωμένου	PET παιδιού
02:00	31,70	22,34	29,71 (XΘΣ)	29,42(ΕΘ)	29,75(ΕΘ)	31,70(Θ)
03:00	31,49	23,03	29,65 (XΘΣ)	29,64(ΕΘ)	29,98(ΕΘ)	31,92(Θ)
04:00	31,18	23,23	29,39(XΘΣ)	29,54(ΕΘ)	29,88(ΕΘ)	31,82(Θ)
05:00	30,82	23,15	28,98 (XΘΣ)	29,23(ΕΘ)	29,57(ΕΘ)	31,51(Θ)
06:00	31,02	25,47	29,72 (XΘΣ)	30,64(ΕΘ)	30,98(ΕΘ)	32,92(Θ)
07:00	31,69	31,42	31,80 (XΘΣ)	34,51(Θ)	34,82(Θ)	36,79(Θ)
08:00	32,79	59,31	39,75(ΠΘΣ)	54,88(ΠΘ)	55,20(ΠΘ)	54,46(ΠΘ)
09:00	34,19	74,07	44,56 (ΑΘΣ)	58,65(ΠΘ)	59,49(ΠΘ)	56,35(ΠΘ)
10:00	35,56	82,28	47,86 (ΑΘΣ)	60,01(ΠΘ)	60,84(ΠΘ)	57,74(ΠΘ)
11:00	36,55	87,73	50,13 (ΑΘΣ)	60,93(ΠΘ)	61,76(ΠΘ)	58,67(ΠΘ)
12:00	37,52	91,32	51,96 (ΑΘΣ)	61,54(ΠΘ)	62,36(ΠΘ)	59,29(ΠΘ)
13:00	38,40	94,10	53,54 (ΑΘΣ)	62,11(ΠΘ)	62,92(ΠΘ)	59,87(ΠΘ)
14:00	39,08	96,92	55,03 (ΑΘΣ)	62,67(ΠΘ)	63,48(ΠΘ)	60,44(ΠΘ)
15:00	39,50	97,63	55,68	62,89(ΠΘ)	63,70(ΠΘ)	60,67(ΠΘ)

Ωρα	Ta (°C)	Tmrt (°C)	UTCI (°C)	PET ενήλικα	PET ηλικιωμένου	PET παιδιού
			(ΑΘΣ)			
16:00	39,81	95,17	55,23 (ΑΘΣ)	62,60(ΠΘ)	63,41(ΠΘ)	60,38(ΠΘ)
17:00	39,66	88,41	53,14 (ΑΘΣ)	61,64(ΠΘ)	62,46(ΠΘ)	59,40(ΠΘ)
18:00	39,20	75,29	49,06 (ΑΘΣ)	59,87(ΠΘ)	60,70(ΠΘ)	57,59(ΠΘ)
19:00	38,32	47,55	41,18 (ΑΘΣ)	54,17(ΠΘ)	53,95(ΠΘ)	54,40(ΠΘ)
20:00	37,31	39,10	38,27 (ΙΘΣ)	42,66(ΠΘ)	42,94(ΠΘ)	49,52(ΠΘ)
21:00	36,38	35,18	36,55 (ΜΘΣ)	39,67(ΠΘ)	39,97(ΠΘ)	41,99(ΠΘ)
22:00	35,62	32,80	35,31 (ΜΘΣ)	37,77(Θ)	38,08(Θ)	40,08(ΠΘ)
23:00	34,96	31,19	34,36 (ΜΘΣ)	36,43(Θ)	36,74(Θ)	38,73(Θ)
00:00	34,37	30,00	33,55 (ΧΘΣ)	35,37(Θ)	35,68(Θ)	37,67(Θ)
01:00	33,82	29,19	32,87 (ΧΘΣ)	34,56(Θ)	34,87(Θ)	36,86(Θ)
Peak	39,81 (16:00)	97,63 (15:00)	55,68 (15:00) (ΑΘΣ)	62,89 (15:00)(ΠΘ)	63,70 (15:00)(ΠΘ)	60,67 (15:00)(ΠΘ)
Min	30,82 (05:00)	22,34 (02:00)	28,98 (05:00) (ΧΘΣ)	29,23 (05:00)(ΕΘ)	29,57 (05:00)(ΕΘ)	31,51 (05:00)(Θ)

Πηγή: Επεξεργασία αρχείων EDX του ENVI-met 5.8.0 (BIO-met).

Ο πίνακας επιβεβαιώνει ότι η μέγιστη θερμική επιβάρυνση στο PO2 εμφανίζεται μεταξύ 14:00 και 16:00. Η Tmrt παραμένει ιδιαίτερα υψηλή κατά το διάστημα αυτό, ενώ οι δείκτες UTCI και PET καταγράφουν τιμές που αντιστοιχούν σε πολύ έντονη θερμική καταπόνηση. Η χρονική σύμπτωση υψηλής Tmrt, υψηλού UTCI και υψηλών τιμών PET ενισχύει το συμπέρασμα ότι η ακτινοβολιακή επιβάρυνση αποτελεί τον κύριο μηχανισμό θερμικής δυσφορίας στο υπερυψωμένο επίπεδο.

Η απότομη μεταβολή των τιμών κατά τις απογευματινές ώρες συνδέεται με τη μετάβαση του σημείου σε συνθήκες σκίασης και αποτελεί φυσική συνέπεια της ημερήσιας ακτινοβολιακής γεωμετρίας στο υπερυψωμένο επίπεδο. Επομένως, η μείωση των βιοκλιματικών δεικτών στο συγκεκριμένο χρονικό διάστημα δεν ερμηνεύεται ως αποτέλεσμα αντίστοιχης πτώσης της θερμοκρασίας αέρα, αλλά ως αποτέλεσμα της μείωσης της άμεσης ακτινοβολιακής έκθεσης.

Μεταξύ 18:00 και 20:00 καταγράφεται απότομη μείωση της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας, της Tmrt και των τιμών PET, ενώ η Ta μεταβάλλεται πολύ ηπιότερα. Οι επιλεγμένες τιμές παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.1.6.2.

Πίνακας 3.1.6.2 Επιλεγμένες τιμές κατά την απογευματινή μετάβαση στο PO2

Φάση	Ωρα	PET ενήλικα	PET ηλικιωμένου	PET παιδιού	Tmrt	Ta	Direct SW Radiation	Ερμηνεία
Πριν από την μεταβολή	18:00	59,87 °C	60,70 °C	57,59 °C	75,29 °C	39,20 °C	508,03 W/m ²	Άμεση ηλιακή έκθεση και υψηλή Tmrt
Έναρξη της μεταβολής	19:00	54,17 °C	53,95 °C	54,40 °C	47,55 °C	38,32 °C	0,00 W/m ²	Μηδενισμός της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας και μείωση της Tmrt
Μετά τη μεταβολή	20:00	42,66 °C	42,94 °C	49,52 °C	39,10 °C	37,31 °C	0,00 W/m ²	Περαιτέρω μείωση της

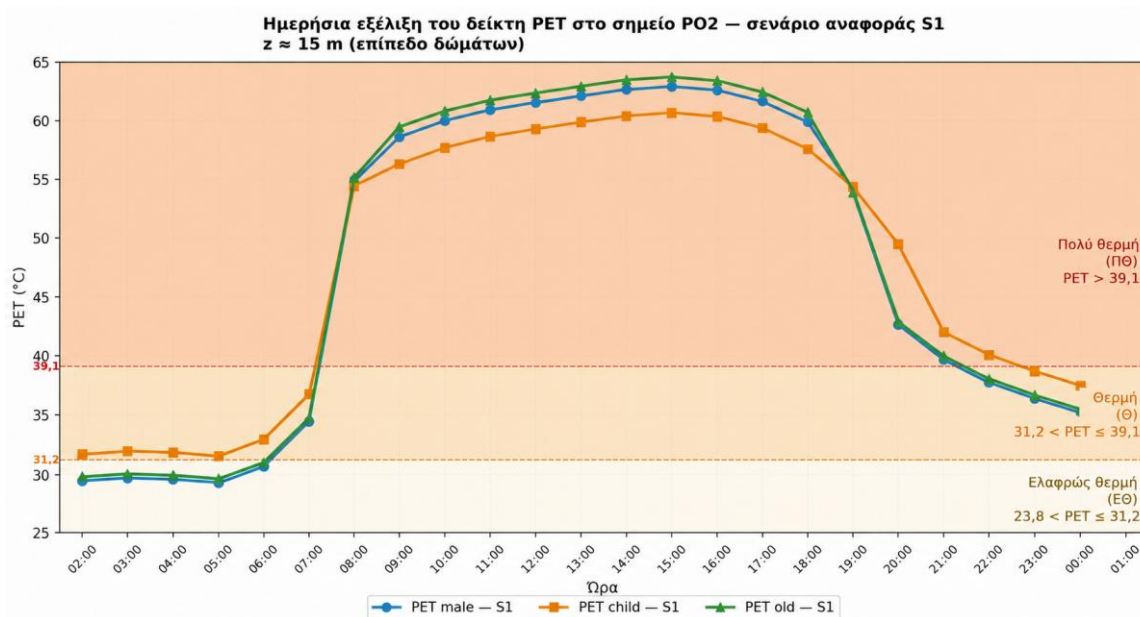
								Tmrt και του PET
--	--	--	--	--	--	--	--	------------------

Πηγή: Ιδία επεξεργασία ωριαίων αποτελεσμάτων ENVI-met 5.8.0/BIO-met.

Η χρονική σύμπτωση του μηδενισμού της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας με την έντονη μείωση της Tmrt και του PET δείχνει ότι η απογευματινή μεταβολή συνδέεται κυρίως με τη μετάβαση σε συνθήκες σκίασης και όχι με αντίστοιχου μεγέθους πτώση της Ta.

δ) Χρονική εξέλιξη PET ανά προφίλ χρήστη στο PO2

Το ακόλουθο διάγραμμα παρουσιάζει την ημερήσια εξέλιξη του PET στο PO2 για τα προφίλ ενήλικα, ηλικιωμένου και παιδιού, επιτρέποντας τη σύγκριση της χρονικής τους απόκρισης υπό το ίδιο μικροκλιματικό πεδίο.



Σχήμα 3.1.6.4. Ημερήσια εξέλιξη του PET στο σημείο PO2 για τα προφίλ ενήλικα, ηλικιωμένου και παιδιού στο σενάριο S1, στάθμη δώματος, στις 25.07.2025 και σε ύψος z ≈ 15 m.

Πηγή: Ιδία επεξεργασία αποτελεσμάτων ENVI-met 5.8.0 / BIO-met / Leonardo.

Στο PO2, οι τιμές αιχμής του PET καταγράφονται στις 15:00 και ανέρχονται σε 62,89 °C για το προφίλ του ενήλικα, 63,70 °C για το προφίλ του ηλικιωμένου και 60,67 °C για το παιδικό προφίλ. Όλες οι τιμές υπερβαίνουν το κατώφλι των 39,1 °C της εφαρμοζόμενης μεσογειακής κλίμακας και εντάσσονται στην κατηγορία «πολύ θερμή».

Κατά την ώρα αιχμής των 15:00, το παιδικό προφίλ εμφανίζει τη χαμηλότερη τιμή PET, ακολουθούμενο από το προφίλ του ενήλικα και του ηλικιωμένου. Η συγκεκριμένη

κατάταξη δεν διατηρείται σε όλο το 24ωρο. Στις 20:00, το παιδικό προφίλ εμφανίζει PET 49,52 °C, έναντι 42,66 °C για τον ενήλικα και 42,94 °C για τον ηλικιωμένο. Η απόκλιση του παιδικού προφίλ από το προφίλ του ενήλικα ανέρχεται σε 6,86 K.

Το εύρημα δείχνει ότι οι διαφορές μεταξύ των παραμετροποιημένων προφίλ δεν παραμένουν χρονικά σταθερές. Δεν επιτρέπει, ωστόσο, βάσει μόνο των αποτελεσμάτων PET, την απόδοση της διαφοροποίησης σε συγκεκριμένο φυσιολογικό μηχανισμό. Η ευρύτερη ερμηνεία των διαφορών μεταξύ των προφίλ αναπτύσσεται στην Ενότητα 4.2.3.

ε) Συμπληρωματικότητα χωρικής και χρονικής αποτύπωσης στο PO2

Οι χάρτες των Σχημάτων 3.1.6.1 και 3.1.6.2 αποτυπώνουν τη χωρική κατανομή της T_{mrt} και του UTCI στη στάθμη $z \approx 15$ m κατά την κοινή ώρα αναφοράς των 16:00. Αντίθετα, οι χρονοσειρές των Σχημάτων 3.1.6.3 και 3.1.6.4 παρουσιάζουν την ημερήσια εξέλιξη των μεταβλητών σε ένα συγκεκριμένο σημείο, το PO2. Οι δύο μορφές παρουσίασης είναι συμπληρωματικές: οι χάρτες απαντούν στο «πού» εντοπίζεται η θερμική επιβάρυνση, ενώ οι χρονοσειρές στο «πότε» μεταβάλλεται.

Οι τιμές του PO2 δεν αποτελούν άμεσο ισοδύναμο των χωρικών ελάχιστων και μέγιστων των χαρτών στη στάθμη πεζού, καθώς αφορούν διαφορετική κατακόρυφη στάθμη και συγκεκριμένη θέση του υπολογιστικού πλέγματος. Η σύγκριση με το PO1 πραγματοποιείται διακριτά μέσω των σημειακών τιμών αιχμής που παρουσιάζονται στην επόμενη υποενότητα.

στ) Σύγκριση τιμών αιχμής μεταξύ PO1 ($z = 1,40$ m) και PO2 ($z \approx 15$ m)

Για να αναδειχθεί η κατακόρυφη διαφοροποίηση της θερμικής επιβάρυνσης μεταξύ της στάθμης πεζού και της στάθμης δώματος, στον Πίνακα 3.1.6.3 παρουσιάζεται συγκεντρωτική σύγκριση των τιμών αιχμής των δεικτών στα δύο σημεία αναφοράς.

Πίνακας 3.1.6.3: Σύγκριση των τιμών αιχμής των T_a , T_{mrt} , UTCI και PET στα σημεία PO1 και PO2 για το σενάριο αναφοράς S1, στις 25.07.2025. Η διαφορά υπολογίζεται ως $PO2_{peak} - PO1_{peak}$.

Δείκτης	PO1 peak ($z=1,40$ m)	Ωρα	PO2 peak ($z \approx 15$ m)	Ωρα	Διαφορά αιχμών $PO2_{peak} - PO1_{peak}$ (K)
T_a (°C)	40,21	15:00	39,81	16:00	-0,40

Δείκτης	PO1 peak (z=1,40 m)	Ωρα	PO2 peak (z≈15 m)	Ωρα	Διαφορά αιχμών PO2peak – PO1peak (K)
Tmrt (°C)	71,27	14:00	97,63	15:00	+26,36
UTCI (°C)	48,39	14:00	55,68	15:00	+7,29
PET ενήλικα (°C)	59,48	14:00	62,89	15:00	+3,41
PET ηλικιωμένου (°C)	60,31	14:00	63,70	15:00	+3,39
PET παιδιού (°C)	57,20	14:00	60,67	15:00	+3,47

Πηγή: Ιδία επεξεργασία ωριαίων αποτελεσμάτων ENVI-met 5.8.0/BIO-met.

Σημείωση: Οι διαφορές αφορούν τιμές αιχμής των δύο σημείων, οι οποίες δεν εμφανίζονται κατ' ανάγκη την ίδια ώρα. Επομένως, δεν αποτελούν μεταβολές κοινής χρονικής στιγμής.

Στο PO2, η τιμή αιχμής της Ta είναι κατά 0,40 K χαμηλότερη από την αντίστοιχη τιμή στο PO1, ενώ οι αιχμές της Tmrt και του UTCI είναι υψηλότερες κατά 26,36 K και 7,29 K, αντίστοιχα. Για τον PET, οι διαφορές αιχμών κυμαίνονται από +3,39 έως +3,47 K στα τρία προφίλ.

Επειδή οι αιχμές στα δύο σημεία εμφανίζονται σε διαφορετικές ώρες, οι παραπάνω τιμές δεν αποτελούν ταυτόχρονες διαφορές. Παρ' όλα αυτά, αποτυπώνουν σαφή διαφοροποίηση μεταξύ της στάθμης πεζού και της στάθμης δώματος. Η ελαφρώς χαμηλότερη τιμή αιχμής της Ta στο PO2 δεν συνοδεύεται από χαμηλότερες αιχμές της Tmrt και των βιοκλιματικών δεικτών.

Οι τιμές αιχμής του PET και στα δύο σημεία υπερβαίνουν το κατώφλι των 39,1 °C της εφαρμοζόμενης μεσογειακής κλίμακας. Η λειτουργική και σχεδιαστική σημασία της αυξημένης θερμικής επιβάρυνσης στη στάθμη δώματος εξετάζεται στο Κεφάλαιο 4.

Η διερεύνηση του PO2 προσθέτει κατακόρυφη διάσταση στην αξιολόγηση του S1: η Ta παραμένει στην ίδια τάξη μεγέθους με το PO1, ενώ οι αιχμές Tmrt, UTCI και PET είναι

υψηλότερες. Το εύρημα δείχνει ότι η θερμική επιβάρυνση στην υπερυψωμένη στάθμη συνδέεται κυρίως με το ακτινοβολιακό περιβάλλον και δεν μπορεί να ερμηνευθεί μόνο μέσω της θερμοκρασίας αέρα. Η λειτουργική σημασία των αποτελεσμάτων για την πιθανή αξιοποίηση των δωματίων εξετάζεται στο Κεφάλαιο 4.

3.1.7 Σύνοψη ευρημάτων S1

Το S1 χαρακτηρίζεται από έντονη θερμική επιβάρυνση κατά τη μεσημβρινή–απογευματινή περίοδο. Ειδικότερα, ο χάρτης της Ta έδειξε ιδιαίτερα υψηλές τιμές θερμοκρασίας αέρα σε ολόκληρο σχεδόν το πεδίο, ενώ ο χάρτης της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας κατέδειξε υψηλές τιμές άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας στις εκτεθειμένες επιφάνειες, με μέγιστες τιμές που προσεγγίζουν τα 870,53 W/m². Η κατανομή της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας εξηγεί σε σημαντικό βαθμό την αναμενόμενη αύξηση της ακτινοβολιακής φόρτισης και των δεικτών θερμικής άνεσης, ιδίως στις ανοικτές και μη σκιασμένες περιοχές. Συνεπώς, το σενάριο αναφοράς S1 αποτυπώνει μικροκλιματικό περιβάλλον με περιορισμένη προστασία από την άμεση ηλιακή ακτινοβολία και αυξημένη θερμική επιβάρυνση για τους χρήστες του χώρου.

Η συγκριτική χωρική κατανομή του PET για τα τρία προφίλ χρήστη κατά την κοινή ώρα αναφοράς των 16:00 συνοψίζεται στον Πίνακα 3.1.7.1.

Πίνακας 3.1.7.1.: Χωρικές ελάχιστες, μέγιστες τιμές και εύρος του δείκτη PET για τα προφίλ ενήλικα, ηλικιωμένου και παιδιού στο σενάριο αναφοράς S1, στις 25.07.2025 και ώρα 16:00, στη στάθμη πεζού $z = 1,40$ m.

Παράμετρος	Ενήλικας	Ηλικιωμένος	Παιδί
Ελάχιστη τιμή PET (°C)	41,18	41,46	45,91
Μέγιστη τιμή PET (°C)	62,02	62,84	59,79
Εύρος τιμών PET (K)	20,84	21,38	13,88

Πηγή: Ιδία επεξεργασία χωρικών αποτελεσμάτων PET του ENVI-met 5.8.0/BIO-met για το σενάριο αναφοράς S1.

Στην κοινή ώρα χωρικής αναφοράς των 16:00, η μέγιστη τιμή PET καταγράφεται στο προφίλ ηλικιωμένου, με 62,84 °C, ενώ η χαμηλότερη ελάχιστη τιμή καταγράφεται στο προφίλ ενήλικα, με 41,18 °C. Το παιδικό προφίλ εμφανίζει υψηλότερη ελάχιστη χωρική

τιμή, ίση με 45,91 °C, και μικρότερο χωρικό εύρος, ίσο με 13,88 K, ενώ η μέγιστη τιμή του παραμένει χαμηλότερη από τις αντίστοιχες τιμές των δύο άλλων προφίλ. Το εύρημα αποτυπώνει διαφορετικό πρότυπο χωρικής κατανομής του PET και δεν τεκμηριώνει από μόνο του υψηλότερη χρονική αιχμή για το παιδικό προφίλ.

Στο σενάριο αναφοράς S1 και κατά την ώρα αναφοράς των 16:00, η T_a κυμαίνεται από 39,43 έως 44,43 °C, η T_{mrt} από 35,06 έως 87,37 °C, η άμεση ηλιακή ακτινοβολία από 0,00 έως 870,53 W/m² και ο UTCI από 39,27 έως 54,72 °C. Οι αντίστοιχες χωρικές τιμές PET ανά προφίλ χρήστη παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στον Πίνακα 3.1.7.1. Οι υψηλότερες τιμές καταγράφονται κυρίως στις ανοικτές και άμεσα ηλιοεκτεθειμένες επιφάνειες, ενώ οι χαμηλότερες εμφανίζονται σε τοπικές ζώνες σκίασης από τους κτιριακούς όγκους.

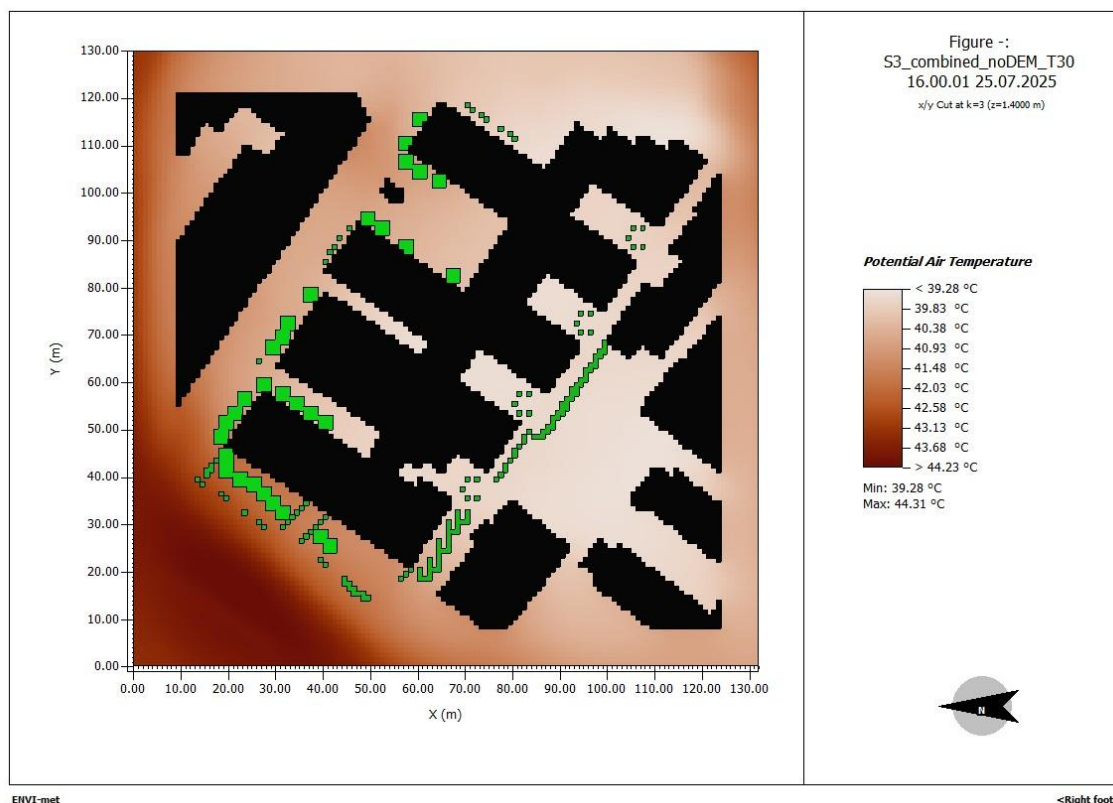
Η διερεύνηση του PO2 προσθέτει κατακόρυφη διάσταση στην αποτίμηση της θερμικής επιβάρυνσης, καθώς επιτρέπει τη σύγκριση των συνθηκών στη στάθμη δώματος με εκείνες στο επίπεδο πεζού. Σε σχέση με το PO1, στο PO2 η θερμοκρασία αέρα παραμένει σε παρόμοια τάξη μεγέθους, ενώ η T_{mrt} εμφανίζεται σημαντικά υψηλότερη. Η διαφοροποίηση αυτή δείχνει ότι η αυξημένη θερμική επιβάρυνση στη στάθμη δώματος συνδέεται κυρίως με την εντονότερη ακτινοβολιακή έκθεση και τη συνεπαγόμενη αύξηση της T_{mrt} και λιγότερο με τη μεταβολή της θερμοκρασίας αέρα.

3.2 Αποτελέσματα συνδυαστικού σεναρίου παρέμβασης S3

Η ενότητα αυτή παρουσιάζει τα αποτελέσματα του συνδυαστικού σεναρίου παρεμβάσεων (S3), το οποίο ενσωματώνει αλλαγές υλικών, ενίσχυση της φύτευσης, στοιχεία σκίασης και παρεμβάσεις στα δώματα. Το σενάριο αυτό διερευνά τη συνολική μικροκλιματική απόκριση του χώρου σε μια ολοκληρωμένη στρατηγική βιοκλιματικής αναβάθμισης. Αρχικά παρουσιάζεται η χωρική κατανομή των βασικών δεικτών θερμικής άνεσης. Στη συνέχεια εξετάζεται η χρονική εξέλιξη της θερμικής επιβάρυνσης στα επιλεγμένα σημεία. Τέλος, τα αποτελέσματα ερμηνεύονται σε σχέση με τις ευάλωτες ομάδες και τη λειτουργική σημασία του χώρου.

3.2.1 Χωρική κατανομή της δυνητικής θερμοκρασίας αέρα T_a , στο ύψος 1,40

Στο Σχήμα 3.2.1.1 παρουσιάζεται η χωρική κατανομή της T_a για το σενάριο S3, το οποίο περιλαμβάνει τις συνδυαστικές βιοκλιματικές παρεμβάσεις. Ο χάρτης αντιστοιχεί στην ίδια ημερομηνία, ώρα και στάθμη ανάλυσης με το σενάριο S1, δηλαδή στις 25.07.2025, ώρα 16:00 και σε ύψος $z = 1,40$ m, ώστε τα δύο σενάρια να είναι άμεσα συγκρίσιμα.



Σχήμα 3.2.1.1 Χωρική κατανομή της T_a στο συνδυαστικό σενάριο παρέμβασης S3, 25.07.2025, ώρα 16:00, $z = 1,40$ m.

Πηγή: Ιδία επεξεργασία αποτελεσμάτων ENVI-met 5.8.0 / Leonardo για το σενάριο S3

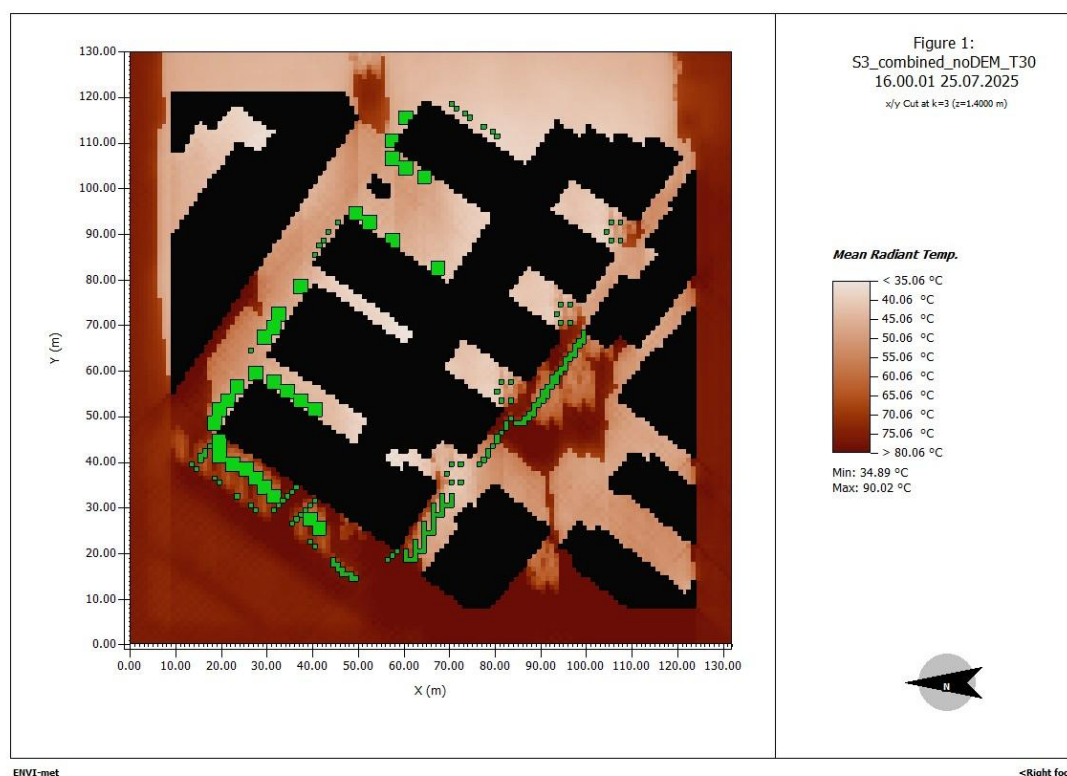
Στο σενάριο S3, οι τιμές της T_a κυμαίνονται από 39,28 °C έως 44,31 °C. Σε σχέση με το σενάριο S1, όπου οι αντίστοιχες τιμές είναι 39,43–44,43 °C, παρατηρείται μικρή μείωση τόσο της ελάχιστης όσο και της μέγιστης τιμής. Συγκεκριμένα, η ελάχιστη τιμή μειώνεται κατά περίπου 0,15 °C, ενώ η μέγιστη τιμή κατά περίπου 0,12 °C.

Η μείωση αυτή είναι περιορισμένη και δείχνει ότι οι παρεμβάσεις του S3 δεν μεταβάλλουν δραστικά το πεδίο της θερμοκρασίας αέρα. Η περιορισμένη μεταβολή της T_a είναι αναμενόμενη, καθώς η T_a είναι παράμετρος που επηρεάζεται σχετικά πιο ήπια από τοπικές

παρεμβάσεις σε σχέση με δείκτες που ενσωματώνουν την ακτινοβολιακή επιβάρυνση, όπως η T_{mrt} , ο PET και ο UTCI.

Ο χάρτης της T_a στο S3 τεκμηριώνει μικρή βελτίωση του θερμοκρασιακού πεδίου, αλλά δεν επαρκεί μόνος του για την αξιολόγηση της θερμικής άνεσης. Η ουσιαστική αποτίμηση της αποτελεσματικότητας των παρεμβάσεων θα πρέπει να βασιστεί κυρίως στη σύγκριση των χαρτών και των τιμών των δεικτών T_{mrt} , PET και UTCI.

3.2.2 Χωρική κατανομή της T_{mrt} και της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας στο σενάριο S3



Σχήμα 3.2.2.1 Χωρική κατανομή της μέσης ακτινοβολούμενης θερμοκρασίας T_{mrt} συνδυαστικό σενάριο παρέμβασης S3 για την ώρα 16:00.

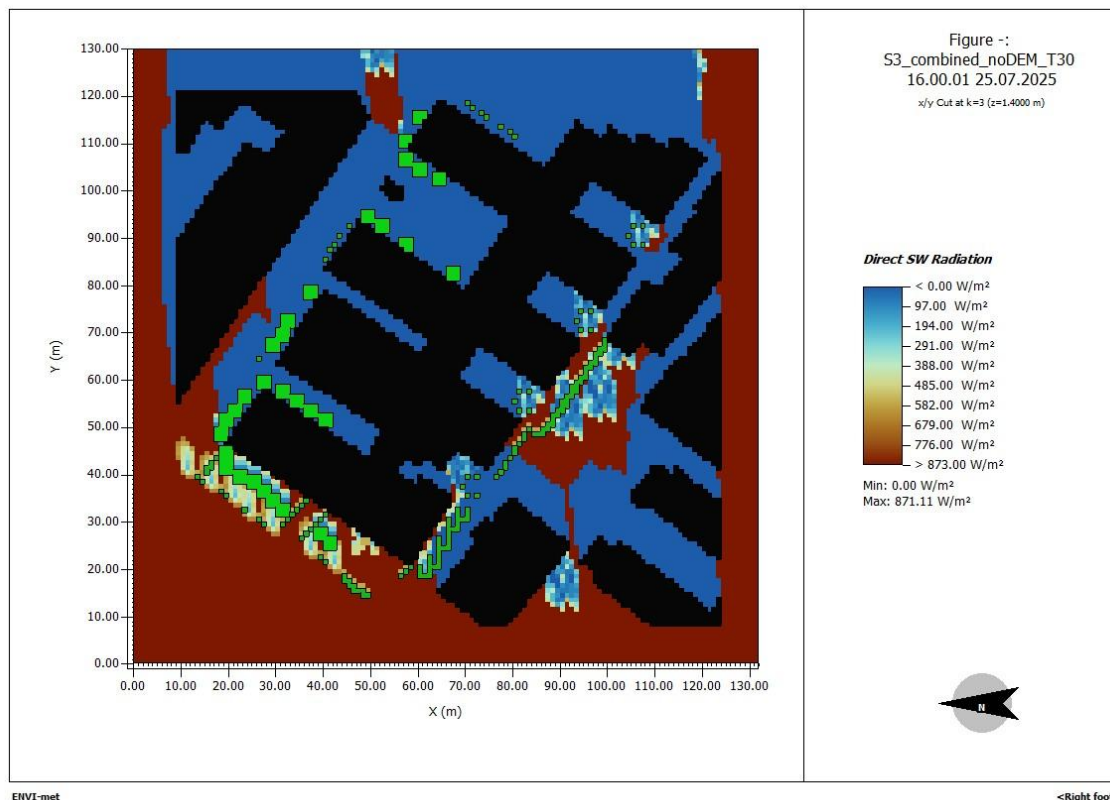
Πηγή: Ιδία επεξεργασία αποτελεσμάτων ENVI-met 5.8.0 / Leonardo για το σενάριο S3

Επειδή το σενάριο S3 δεν μεταβάλλει τους βασικούς κτιριακούς όγκους και τη γεωμετρία του αστικού κενού, ο SVF δεν παρουσιάζεται εκ νέου ως ανεξάρτητος χάρτης για το

σενάριο παρέμβασης. Αντίθετα, αξιοποιείται για την ερμηνεία των χωρικών διαφοροποιήσεων της T_{mrt} , του UTCI και του PET.

Χωρική κατανομή της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας στο S3, στις 16:00, σε ύψος 1,40 m

Στο Σχήμα 3.2.2.1 παρουσιάζεται η χωρική κατανομή της Direct SW Radiation στο σενάριο S3, το οποίο αντιστοιχεί στο συνδυαστικό σενάριο βιοκλιματικών παρεμβάσεων. Η αποτύπωση αφορά την ίδια ημερομηνία, ώρα και στάθμη αναφοράς με το σενάριο S1, δηλαδή την 25.07.2025, ώρα 16:00, σε ύψος $z = 1,40$ m, ώστε τα αποτελέσματα να είναι άμεσα συγκρίσιμα.



Σχήμα 3.2.2.1. Χωρική κατανομή της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας στο σενάριο S3, 25.07.2025, ώρα 16:00, $z = 1,40$ m.

Πηγή: Ιδία επεξεργασία αποτελεσμάτων ENVI-met 5.8.0 / Leonardo για το σενάριο S3.

Οι τιμές της Direct SW Radiation στο S3 κυμαίνονται από 0,00 έως 871,11 W/m². Η μέγιστη τιμή παραμένει πρακτικά αμετάβλητη σε σχέση με το S1, καθώς στα σημεία που εξακολουθούν να είναι πλήρως εκτεθειμένα η ένταση της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας

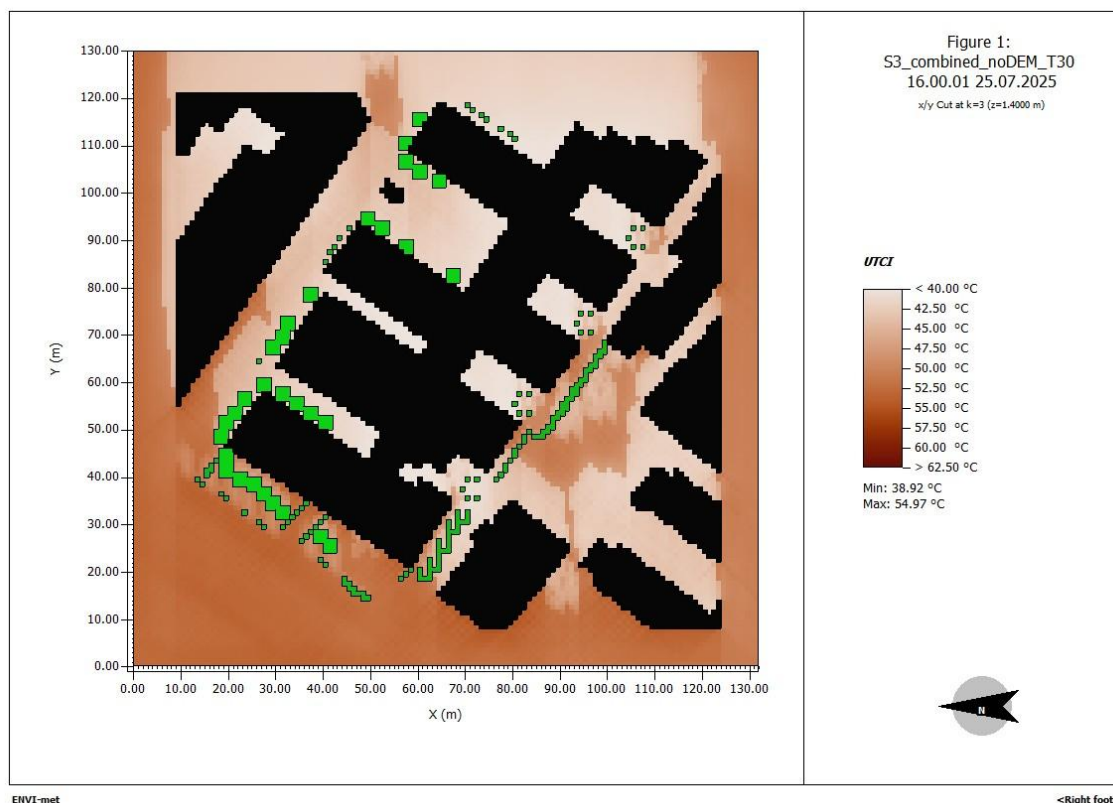
καθορίζεται κυρίως από τη θέση του ήλιου, τη χρονική στιγμή της προσομοίωσης και τις κοινές μετεωρολογικές οριακές συνθήκες.

Η διαφοροποίηση του S3 αποτυπώνεται κυρίως στη χωρική κατανομή της Direct SW Radiation και όχι στη μεταβολή της απόλυτης μέγιστης τιμής. Οι παρεμβάσεις δημιουργούν ή ενισχύουν τοπικές σκιασμένες ζώνες και διευρύνουν τις περιοχές χαμηλότερης άμεσης ηλιακής έκθεσης σε επιμέρους τμήματα του υπαίθριου χώρου. Η μεταβολή αυτή είναι χωρικά εντοπισμένη και δεν συνεπάγεται ομοιόμορφη μείωση της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας στο σύνολο του υπολογιστικού πεδίου.

Η Direct SW Radiation αποτελεί βασική, αλλά όχι τη μοναδική, συνιστώσα του συνολικού ακτινοβολιακού περιβάλλοντος που αποτυπώνεται μέσω της Tmrt. Ο χάρτης της χρησιμοποιείται, επομένως, για τον εντοπισμό των χωρικών επιδράσεων της σκίασης και συνεξετάζεται με την κατανομή της Tmrt, η οποία ενσωματώνει επιπλέον τη διάχυτη και ανακλώμενη βραχέος κύματος ακτινοβολία, καθώς και τη μακρού κύματος ακτινοβολία των γύρω επιφανειών. Η συνεξέταση αυτή υποστηρίζει την ερμηνεία των χωρικών διαφοροποιήσεων των δεικτών PET και UTCI που παρουσιάζονται στις επόμενες ενότητες.

3.2.3 Χωρική κατανομή του δείκτη UTCI στο σενάριο S3 στις 16:00, σε ύψος 1,40 m

Η παρούσα υποενότητα παρουσιάζει τη χωρική κατανομή του δείκτη UTCI στο συνδυαστικό σενάριο παρέμβασης S3, στις 16:00 και σε ύψος 1,40 m. Ο δείκτης UTCI αποτυπώνει τη συνολική θερμική καταπόνηση του χρήστη, λαμβάνοντας υπόψη τη θερμοκρασία αέρα, την υγρασία, την ταχύτητα ανέμου και την ακτινοβολιακή επιβάρυνση.



Σχήμα 3.2.3.1. Χωρική κατανομή του δείκτη UTCI στο σενάριο S3, στις 16:00, σε ύψος 1,40 m.

Πηγή: Ιδία επεξεργασία βάσει αποτελεσμάτων ENVI-met 5.8.0 / Leonardo.

Σύμφωνα με τον χάρτη, οι τιμές UTCI στο σενάριο S3 κυμαίνονται από 38,92 °C έως 54,97 °C, με συνολικό εύρος 16,05 K. Παρά την εφαρμογή των παρεμβάσεων, το θερμικό περιβάλλον παραμένει επιβαρυνμένο κατά την ώρα αναφοράς, καθώς μεγάλο μέρος του υπαίθριου χώρου εξακολουθεί να εντάσσεται σε υψηλές κατηγορίες θερμικής καταπόνησης.

Οι χαμηλότερες τιμές UTCI εντοπίζονται κυρίως σε ζώνες που επηρεάζονται από σκίαση, νέα βλάστηση ή μειωμένη άμεση υψηλή ακτινοβολιακή επιβάρυνση. Αντίθετα, οι υψηλότερες τιμές παρατηρούνται σε περισσότερο εκτεθειμένες επιφάνειες και σε περιοχές όπου η ακτινοβολιακή επιβάρυνση παραμένει έντονη. Η χωρική κατανομή του UTCI δείχνει ότι το σενάριο S3 βελτιώνει τοπικά τις συνθήκες θερμικής άνεσης, χωρίς όμως να εξαλείφει πλήρως τις δυσμενείς συνθήκες κατά την ώρα αιχμής.

Η ερμηνεία του χάρτη πρέπει να γίνει σε συνδυασμό με τη συγκριτική ανάλυση S3–S1 που παρουσιάζεται στην ενότητα 3.3.2. Εκεί αποτυπώνεται ότι η μεταβολή του UTCI

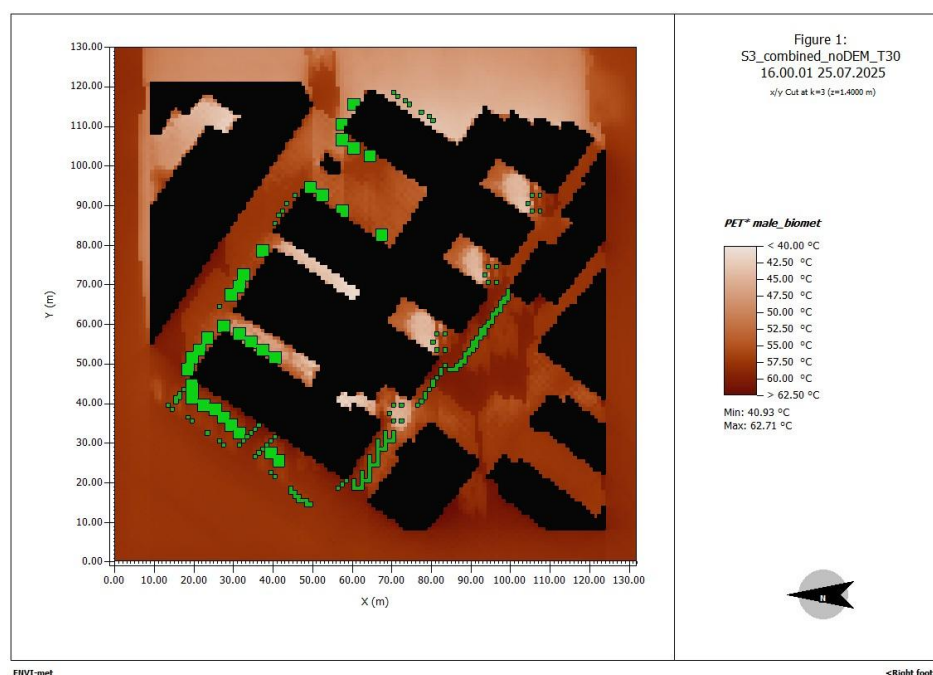
κυμαίνεται από $-6,51$ K έως $+0,91$ K, γεγονός που δείχνει ότι το συνδυαστικό σενάριο επιφέρει κυρίως μείωση του θερμικού στρες, όπως αποτυπώνεται από τον UTCI, με περιορισμένες μόνο τοπικές αυξήσεις.

3.2.4 Χωρική κατανομή του δείκτη PET στο S3 ανά προφίλ χρήστη

Για τη συγκριτική εξέταση των τριών προφίλ χρήστη παρουσιάζονται τα αντίστοιχα χωρικά πεδία PET στο συνδυαστικό σενάριο παρεμβάσεων S3. Η ανάλυση αφορά την 25η Ιουλίου 2025, την κοινή ώρα χωρικής αναφοράς των 16:00 και τη στάθμη πεζού $z = 1,40$ m. Στους τρεις χάρτες εφαρμόζεται η ίδια σταθερή χρωματική κλίμακα, ώστε οι χωρικές και αριθμητικές διαφοροποιήσεις μεταξύ των προφίλ να είναι άμεσα συγκρίσιμες.

α) Χωρική κατανομή PET για το προφίλ ενήλικα, σενάριο S3

Το Σχήμα 3.2.4.1 παρουσιάζει τη χωρική κατανομή του PET για το προφίλ ενήλικα στο S3 κατά την κοινή ώρα αναφοράς των 16:00.

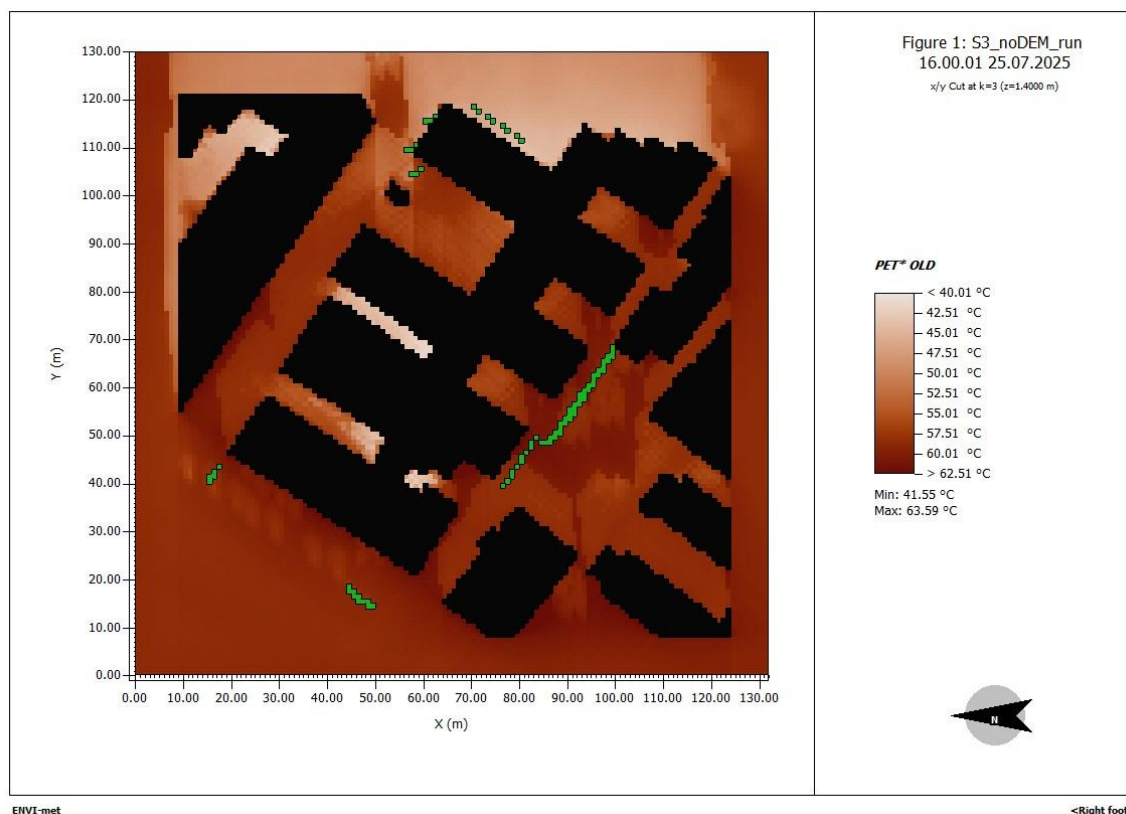


Σχήμα 3.2.4.1. Χωρική κατανομή του δείκτη PET για το προφίλ ενήλικα στο συνδυαστικό σενάριο παρεμβάσεων S3, στις 25.07.2025 και ώρα 16:00, στη στάθμη πεζού $z = 1,40$ m. Χρησιμοποιείται κοινή σταθερή χρωματική κλίμακα με τα Σχήματα 3.2.4.2 και 3.2.4.3.

Πηγή: Ιδία επεξεργασία αποτελεσμάτων ENVI-met 5.8.0/BIO-met· χαρτογραφική απεικόνιση στο Leonardo.

β) Χωρική κατανομή PET για το προφίλ ηλικιωμένου, σενάριο S3

Η αντίστοιχη χωρική κατανομή για το προφίλ ηλικιωμένου παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.2.4.2.

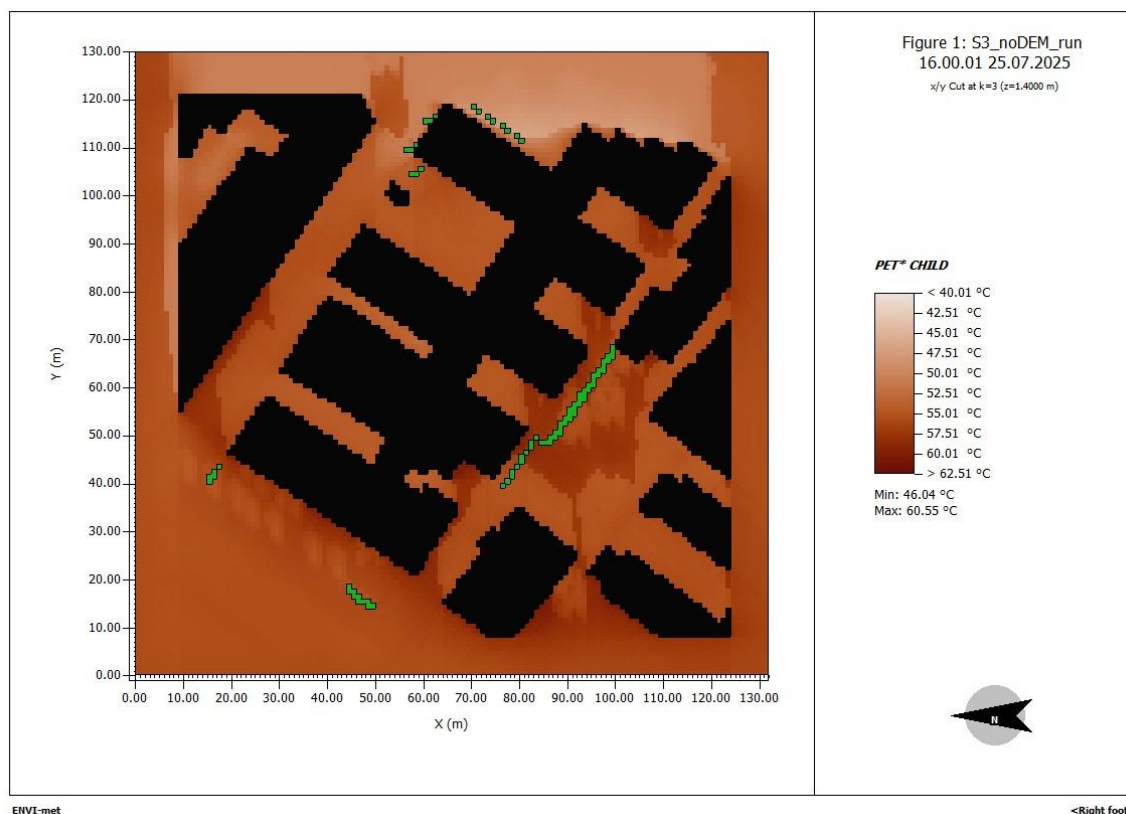


Σχήμα 3.2.4.2. Χωρική κατανομή του δείκτη PET για το προφίλ ηλικιωμένου στο συνδυαστικό σενάριο παρεμβάσεων S3, στις 25.07.2025 και ώρα 16:00, στη στάθμη πεζού $z = 1,40$ m. Χρησιμοποιείται κοινή σταθερή χρωματική κλίμακα με τα Σχήματα 3.2.4.1 και 3.2.4.3.

Πηγή: Ιδία επεξεργασία αποτελεσμάτων ENVI-met 5.8.0/BIO-met· χαρτογραφική απεικόνιση στο Leonardo.

γ) Χωρική κατανομή PET για το παιδικό προφίλ, σενάριο S3

Το Σχήμα 3.2.4.3 παρουσιάζει τη χωρική κατανομή του PET για το παιδικό προφίλ υπό τις ίδιες μικροκλιματικές και χρονικές συνθήκες.



Σχήμα 3.2.4.3. Χωρική κατανομή του δείκτη PET για το παιδικό προφίλ στο συνδυαστικό σενάριο παρεμβάσεων S3, στις 25.07.2025 και ώρα 16:00, στη στάθμη πεζού $z = 1,40$ m. Χρησιμοποιείται κοινή σταθερή χρωματική κλίμακα με τα Σχήματα 3.2.4.1 και 3.2.4.2.

Πηγή: Ιδία επεξεργασία αποτελεσμάτων ENVI-met 5.8.0/BIO-met· χαρτογραφική απεικόνιση στο Leonardo.

Οι τρεις χάρτες παρουσιάζουν παρόμοιο βασικό χωρικό πρότυπο, καθώς τα προφίλ αξιολογούνται στο ίδιο μικροκλιματικό πεδίο. Οι περιοχές υψηλότερων και σχετικά χαμηλότερων τιμών PET εντοπίζονται στις ίδιες περίπου χωρικές θέσεις, ενώ οι διαφορές μεταξύ των προφίλ αφορούν κυρίως το αριθμητικό επίπεδο των υπολογισμένων τιμών. Οι διαφοροποιήσεις αυτές προκύπτουν από τη διαφορετική ανθρωπομετρική και βιοφυσική παραμετροποίηση των προφίλ στο BIO-met και όχι από διαφορετικές περιβαλλοντικές συνθήκες.

Κατά την κοινή ώρα αναφοράς των 16:00, το παιδικό προφίλ δεν εμφανίζει κατ' ανάγκη τις υψηλότερες τιμές PET. Η αυξημένη χρονική επιβάρυνσή του αναδεικνύεται κυρίως από τη μεγαλύτερη διάρκεια παραμονής στην κατηγορία «πολύ θερμή», όπως

ποσοτικοποιείται στην Ενότητα 3.4.2. Επομένως, η συγκριτική αξιολόγηση των προφίλ βασίζεται στη συνδυαστική εξέταση της έντασης και της διάρκειας της θερμικής επιβάρυνσης και όχι αποκλειστικά στη στιγμιαία τιμή PET των 16:00.

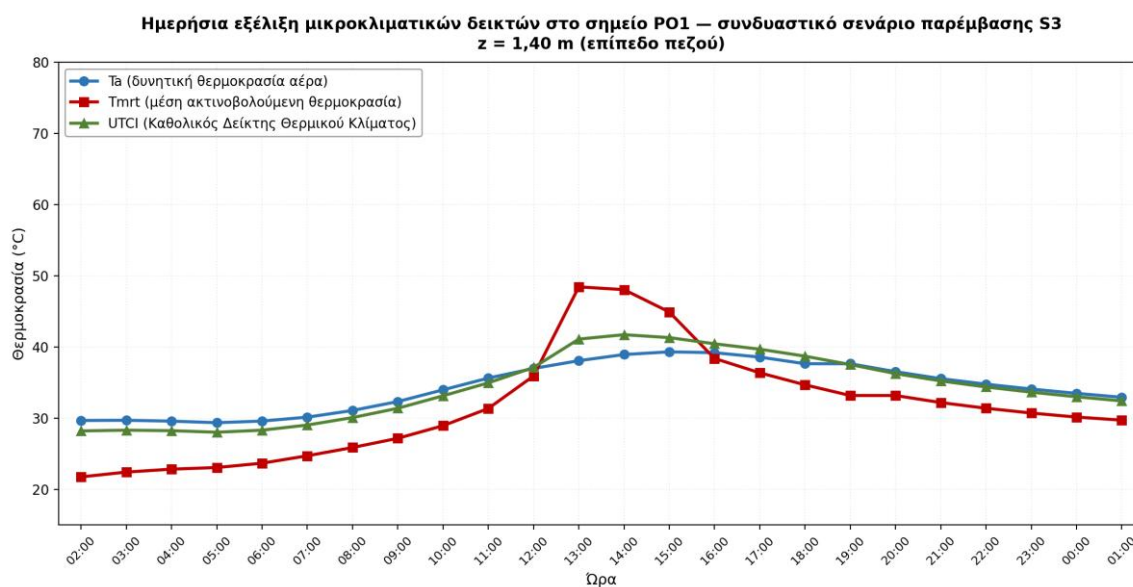
Η ακριβής χωρική μεταβολή του PET μεταξύ των σεναρίων S1 και S3 δεν συνάγεται από τους παρόντες χάρτες, αλλά εξετάζεται μέσω των πεδίων ΔPET στη συγκριτική ανάλυση της Ενότητας 3.3.3.

3.2.5 Χρονική εξέλιξη της θερμικής επιβάρυνσης στο PO1 — σενάριο S3

Στο σενάριο S3, οι χάρτες κατόψεων και οι χρονοσειρές λειτουργούν συμπληρωματικά. Οι χάρτες αποτυπώνουν τη χωρική επίδραση των παρεμβάσεων σε συγκεκριμένη ώρα, ενώ οι χρονοσειρές δείχνουν εάν και πότε οι παρεμβάσεις μεταβάλλουν ουσιαστικά τη θερμική επιβάρυνση στα επιλεγμένα σημεία αναφοράς.

Όπως και στο σενάριο S1, το PO1 ερμηνεύεται υπό την ίδια μεθοδολογική παραδοχή (Ενότητα 2.2.5). Συνεπώς, η αξιολόγηση του S3 στο συγκεκριμένο σημείο αφορά τη μικροκλιματική απόκριση του χώρου μετά τις παρεμβάσεις και όχι την πλήρη αποτύπωση της σημερινής λειτουργικής κατάληψης της αυλής.

Το ακόλουθο διάγραμμα παρουσιάζει την ημερήσια εξέλιξη των βασικών μικροκλιματικών παραμέτρων στο PO1 για το σενάριο S3, ώστε να φανεί η επίδραση των παρεμβάσεων στη στάθμη πεζού



Σχήμα 3.2.5.1 Ημερήσια εξέλιξη της T_a , της T_{mrt} και του UTCI στο σημείο PO1 για το σενάριο παρέμβασης S3, 25.07.2025.

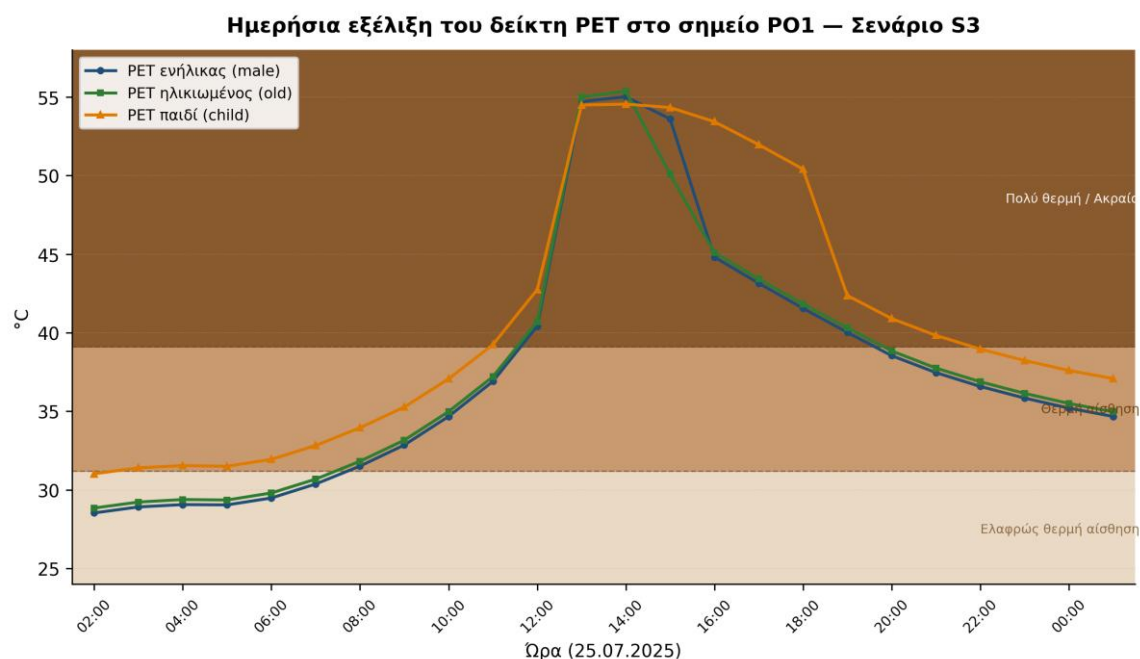
Πηγή: Ιδία επεξεργασία αποτελεσμάτων ENVI-met 5.8.0 / BIO-met / Leonardo.

Στο PO1/S3, η T_a αυξάνεται σταδιακά έως τα 39,31 °C στις 15:00, ενώ η T_{mrt} κορυφώνεται νωρίτερα, στα 48,44 °C στις 13:00. Ο UTCI φθάνει τα 41,72 °C στις 14:00, τιμή που παραμένει πάνω από το μεσογειακό όριο ακραίας θερμικής καταπόνησης (>39,9 °C). Η εικόνα επομένως τεκμηριώνει ότι το S3 μειώνει ουσιαστικά την ακτινοβολιακή επιβάρυνση σε σχέση με το S1, αλλά δεν οδηγεί σε πλήρη θερμική άνεση κατά τις ώρες αιχμής.

Η ημερήσια εξέλιξη του δείκτη UTCI στο σημείο PO1 δείχνει ότι το συνδυαστικό σενάριο S3 οδηγεί σε σημαντική μείωση της θερμικής επιβάρυνσης σε σχέση με το σενάριο S1. Η μείωση αυτή μπορεί να περιορίσει τη θερμική καταπόνηση των χρηστών, ιδίως κατά τις ώρες υψηλής ηλιακής έκθεσης. Κατά τις κρίσιμες μεσημβρινές ώρες (12:00–15:00), οι τιμές του UTCI στο σενάριο S1 υπερβαίνουν τους 48 °C και, με βάση τη μεσογειακή κλίμακα UTCI θερμής περιόδου που υιοθετείται στην παρούσα εργασία, κατατάσσονται στην κατηγορία του «Ακραίου θερμικού στρες». Αντίθετα, στο σενάριο S3 οι μέγιστες τιμές περιορίζονται περίπου στους 41–42 °C, παραμένοντας όμως πάνω από το όριο του «Ακραίου θερμικού στρες» (>39,9 °C). Επομένως, το S3 μειώνει την ένταση της θερμικής επιβάρυνσης, χωρίς να επιτυγχάνει πλήρη αλλαγή κατηγορίας κατά τις ώρες αιχμής.

Χρονική εξέλιξη του PET στο PO1 ανά προφίλ χρήστη — σενάριο S3

Το διάγραμμα PET ανά προφίλ στο PO1 δείχνει τη θερμοφυσιολογική απόκριση των τριών προφίλ μετά τις παρεμβάσεις του S3.



Σχήμα 3.2.5.2 Ημερήσια εξέλιξη του δείκτη PET στο σημείο PO1 για τα προφίλ ενήλικα, ηλικιωμένου και παιδιού, σενάριο S3, ύψος 1,40 m, 25.07.2025.

Πηγή: Ιδία επεξεργασία (ENVI-met 5.8.0/BIO-met· μοντέλο PET κατά Höppe, 1999)

Στο PO1/S3, οι τιμές αιχμής PET μειώνονται αλλά παραμένουν υψηλές. Οι μέγιστες τιμές είναι περίπου 55,02 °C για το προφίλ ενήλικα, 55,37 °C για το προφίλ ηλικιωμένου και 54,55 °C για το προφίλ παιδιού, όλες γύρω στις 14:00.

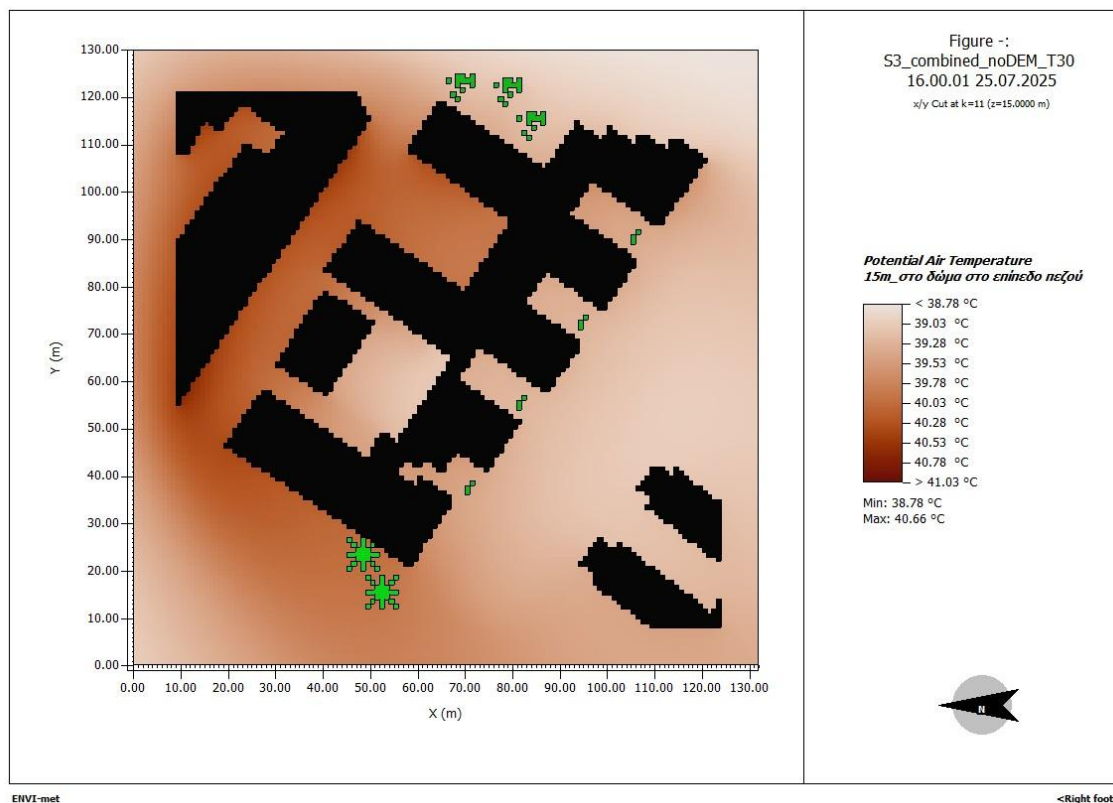
Η ημερήσια εξέλιξη του δείκτη PET στο σημείο PO1 για το συνδυαστικό σενάριο (S3) παρουσιάζει έντονη διακύμανση κατά τη διάρκεια της ημέρας, με σαφή κορύφωση τις μεσημβρινές ώρες. Κατά τις πρώτες πρωινές ώρες (02:00–07:00), οι τιμές κυμαίνονται μεταξύ 28–31°C, εντός της κατηγορίας μέτριας θερμικής καταπόνησης.

Από τις 08:00 και μετά παρατηρείται σταδιακή αύξηση του PET, η οποία εντείνεται σημαντικά μεταξύ 11:00 και 14:00, όπου καταγράφεται απότομη άνοδος των τιμών. Η μέγιστη θερμική επιβάρυνση εμφανίζεται γύρω στις 13:00–14:00, με τιμές που υπερβαίνουν τους 54–55 °C, εμπίπτοντας στην κατηγορία «πολύ θερμή» της μεσογειακής κλίμακας PET (>39,1 °C).

Κατά τις απογευματινές ώρες, το σενάριο S3 εμφανίζει σταδιακή μείωση του PET, ωστόσο οι τιμές παραμένουν υψηλές έως και τις 18:00–19:00, γεγονός που υποδηλώνει σημαντική θερμική επιβάρυνση και καθυστερημένη αποφόρτιση του αστικού περιβάλλοντος.

3.2.6 Χωρική και χρονική εξέλιξη της θερμικής επιβάρυνσης στο PO2 — σενάριο S3

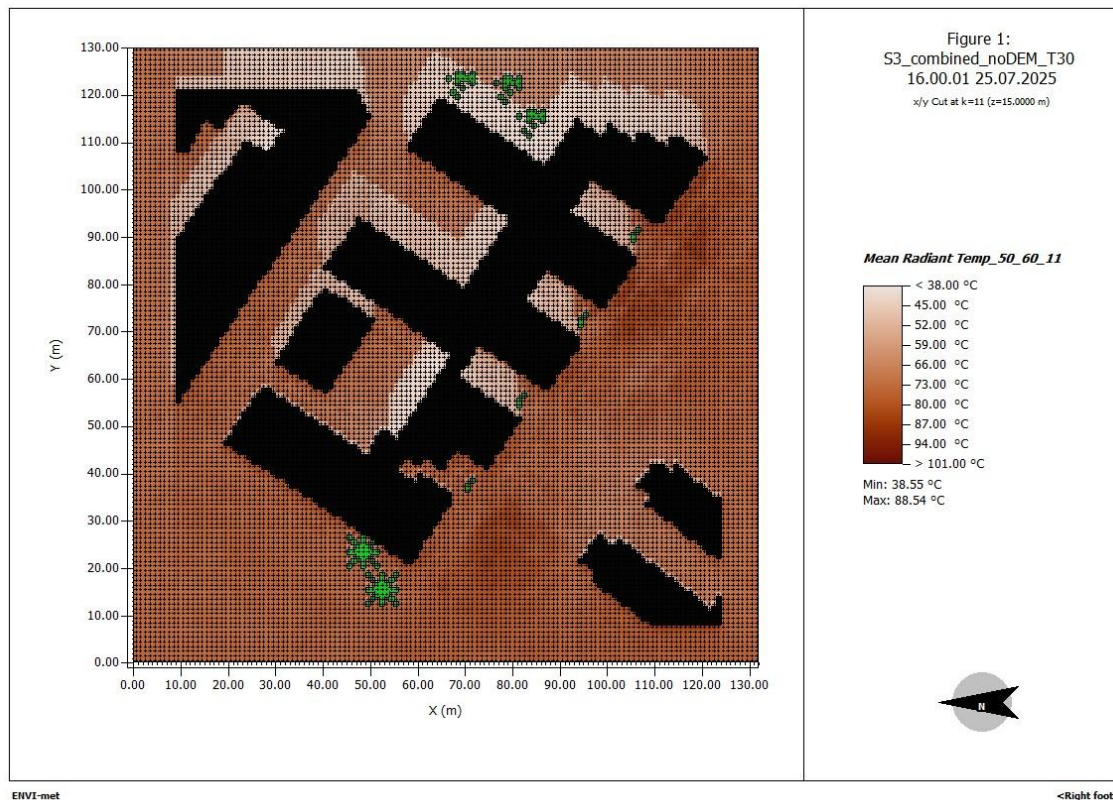
α) Χωρική κατανομή της Ta στο PO2



Σχήμα 3.2.6.1 Χωρική κατανομή της Ta στο PO2 -S3

Πηγή Ιδία επεξεργασία βάσει αποτελεσμάτων ENVI-met 5.8.0 / Leonardo

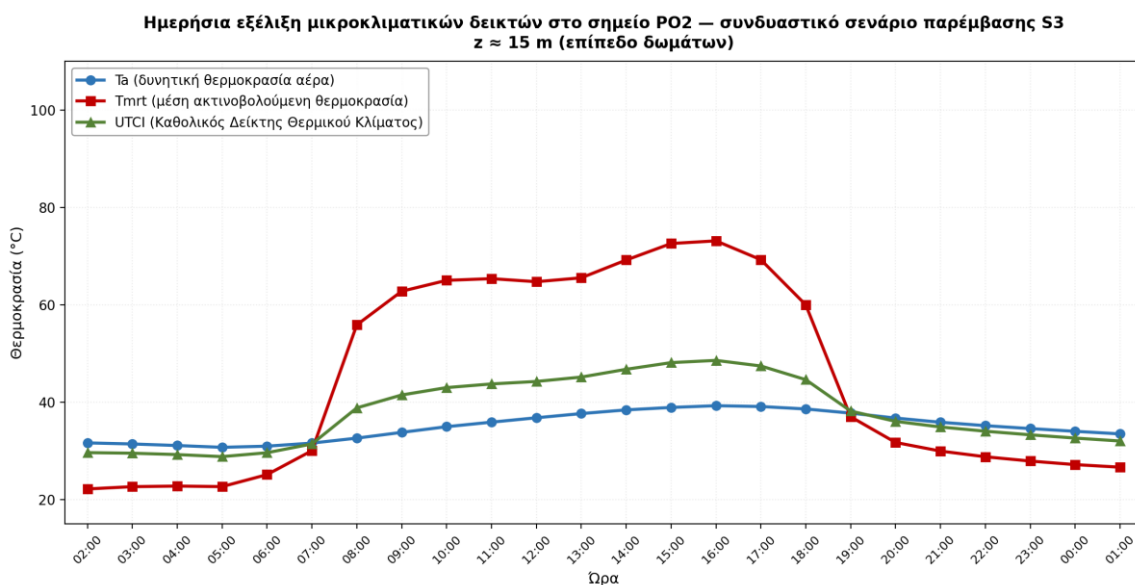
β) Χωρική αποτύπωση της Tmrt στο PO2, σε στάθμη $z \approx 15$ m



Σχήμα 3.2.6.2 Χωρική κατανομή της Tmrt στο PO2, σε στάθμη $z \approx 15$ m -S3

Πηγή Ιδία επεξεργασία βάσει αποτελεσμάτων ENVI-met 5.8.0 / Leonardo

Ακολουθεί το διάγραμμα του UTCI στο PO2/S3, με το οποίο τεκμηριώνεται ότι η μείωση του UTCI και του θερμικού στρες συνδέεται κυρίως με τη μεταβολή της Tmrt και όχι με αντίστοιχη μεγάλη μεταβολή της Ta.



Σχήμα 3.2.6.3. Ημερήσια εξέλιξη της Ta, της Tmrt και του UTCI στο σημείο PO2 για το σενάριο S3, στη στάθμη z=15 m, 25.07.2025.

Πηγή: Ιδία επεξεργασία αποτελεσμάτων ENVI-met 5.8.0 / BIO-met / Leonardo

Στο PO2/S3, η παρέμβαση μειώνει την ακτινοβολιακή επιβάρυνση αλλά δεν εξαλείφει τον υψηλό θερμικό κίνδυνο. Η Ta κορυφώνεται στα 39,26 °C στις 16:00, η Tmrt στα 73,12 °C στις 16:00 και ο UTCI στα 48,57 °C την ίδια ώρα. Η μείωση σε σχέση με το S1 είναι σημαντική, ιδίως για την Tmrt και τον UTCI, όμως οι τιμές παραμένουν πάνω από το όριο ακραίας θερμικής καταπόνησης

Πίνακας 3.2.6.1: Ωριαίες τιμές Ta, Tmrt, UTCI και PET (male/old/child) με κατηγορίες θερμικής αίσθησης και θερμικού στρες στο σημείο PO2 για όλο το 24ωρο της προσομοίωσης — Σενάριο S3, 25.07.2025, σε στάθμη z ≈ 15 m.

Ωρα	Ta (°C)	Tmrt (°C)	UTCI (°C) (κατηγορία)	PET ενήλικα (°C) (κατηγορία)	PET ηλικιωμένου (°C) (κατηγορία)	PET παιδιού (°C) (κατηγορία)
02:00	31,62	22,16	29,62 (ΧΘΣ)	29,28 (ΕΘ)	29,61 (ΕΘ)	31,56 (Θ)
03:00	31,40	22,63	29,50 (ΧΘΣ)	29,38 (ΕΘ)	29,71 (ΕΘ)	31,66 (Θ)
04:00	31,08	22,75	29,22	29,22	29,56	31,50

Ωρα	Ta (°C)	Tmrt (°C)	UTCI (°C) (κατηγορία)	PET ενήλικα (°C) (κατηγορία)	PET ηλικιωμένου (°C) (κατηγορία)	PET παιδιού (°C) (κατηγορία)
			(ΧΘΣ)	(ΕΘ)	(ΕΘ)	(Θ)
05:00	30,71	22,64	28,80 (ΧΘΣ)	28,90 (ΕΘ)	29,24 (ΕΘ)	31,18 (ΕΘ)
06:00	30,95	25,10	29,60 (ΧΘΣ)	30,40 (ΕΘ)	30,74 (ΕΘ)	32,68 (Θ)
07:00	31,58	30,02	31,40 (ΧΘΣ)	33,64 (Θ)	33,96 (Θ)	35,92 (Θ)
08:00	32,60	55,86	38,81 (ΠΙΘΣ)	51,06 (ΠΘ)	51,31 (ΠΘ)	54,11 (ΠΘ)
09:00	33,78	62,77	41,46 (ΑΘΣ)	57,38 (ΠΘ)	58,22 (ΠΘ)	55,05 (ΠΘ)
10:00	34,95	65,01	42,98 (ΑΘΣ)	57,91 (ΠΘ)	58,75 (ΠΘ)	55,60 (ΠΘ)
11:00	35,88	65,36	43,73 (ΑΘΣ)	58,12 (ΠΘ)	58,96 (ΠΘ)	55,81 (ΠΘ)
12:00	36,78	64,73	44,24 (ΑΘΣ)	58,13 (ΠΘ)	58,97 (ΠΘ)	55,82 (ΠΘ)
13:00	37,64	65,53	45,14 (ΑΘΣ)	58,35 (ΠΘ)	59,19 (ΠΘ)	56,05 (ΠΘ)
14:00	38,40	69,18	46,74 (ΑΘΣ)	58,90 (ΠΘ)	59,74 (ΠΘ)	56,61 (ΠΘ)
15:00	38,90	72,57	48,11 (ΑΘΣ)	59,41 (ΠΘ)	60,24 (ΠΘ)	57,13 (ΠΘ)
16:00	39,26	73,12	48,57 (ΑΘΣ)	59,55 (ΠΘ)	60,38 (ΠΘ)	57,26 (ΠΘ)
17:00	39,09	69,25	47,42	59,09	59,93	56,80

Ωρα	Ta (°C)	Tmrt (°C)	UTCI (°C) (κατηγορία)	PET ενήλικα (°C) (κατηγορία)	PET ηλικιωμένου (°C) (κατηγορία)	PET παιδιού (°C) (κατηγορία)
			(AΘΣ)	(ΠΘ)	(ΠΘ)	(ΠΘ)
18:00	38,59	59,98	44,61 (AΘΣ)	58,00 (ΠΘ)	58,84 (ΠΘ)	55,69 (ΠΘ)
19:00	37,74	36,99	38,16 (IΘΣ)	41,56 (ΠΘ)	41,84 (ΠΘ)	44,12 (ΠΘ)
20:00	36,72	31,71	36,04 (MΘΣ)	37,75 (Θ)	38,06 (Θ)	40,06 (ΠΘ)
21:00	35,86	29,94	34,89 (MΘΣ)	36,22 (Θ)	36,53 (Θ)	38,53 (Θ)
22:00	35,16	28,77	34,02 (MΘΣ)	35,13 (Θ)	35,45 (Θ)	37,43 (Θ)
23:00	34,56	27,89	33,28 (XΘΣ)	34,26 (Θ)	34,58 (Θ)	36,56 (Θ)
00:00	34,00	27,16	32,61 (XΘΣ)	33,51 (Θ)	33,83 (Θ)	35,80 (Θ)
01:00	33,47	26,63	32,01 (XΘΣ)	32,87 (Θ)	33,20 (Θ)	35,17 (Θ)
Peak	39,26 (16:00)	73,12 (16:00)	48,57 (16:00) (AΘΣ)	59,55 (16:00) (ΠΘ)	60,38 (16:00) (ΠΘ)	57,26 (16:00) (ΠΘ)
Min	30,71 (05:00)	22,16 (02:00)	28,80 (05:00) (XΘΣ)	28,90 (05:00) (EΘ)	29,24 (05:00) (EΘ)	31,18 (05:00) (EΘ)

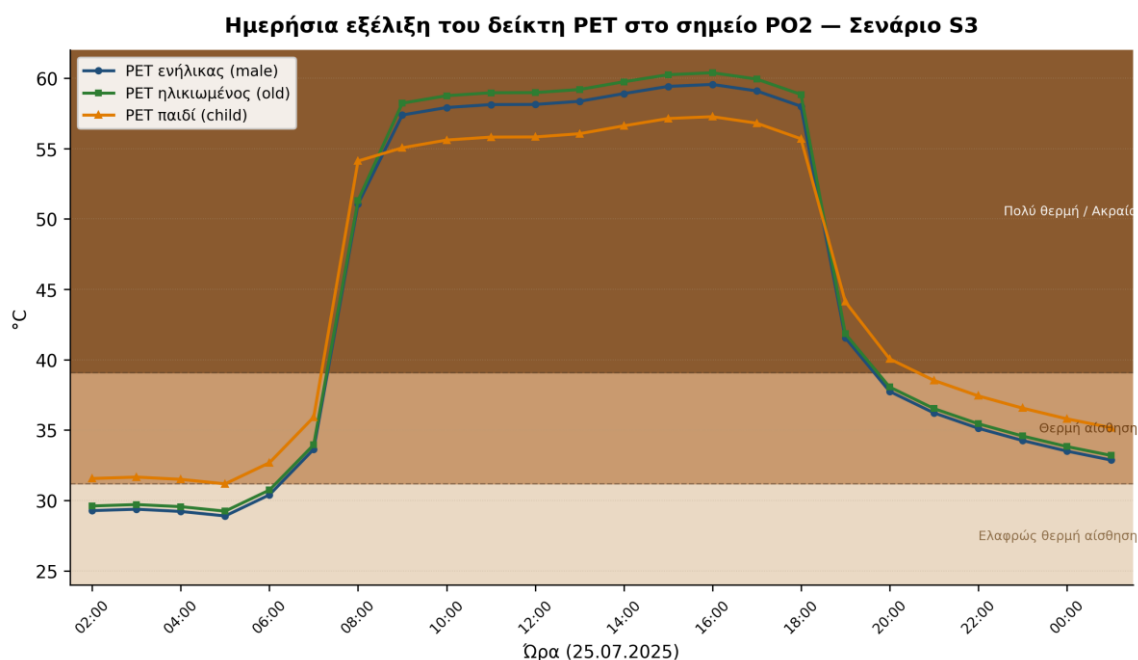
Πηγή: Ιδία επεξεργασία αποτελεσμάτων ENVI-met 5.8.0 / BIO-met / Leonardo. Ταξινόμηση κατηγοριών: PET κατά Pantavou et al. (2014), UTCI κατά Tseliou & Tsiros (2016) — μεσογειακές κλίμακες.

Σημείωση: Με κίτρινο επισημαίνεται η ώρα κορύφωσης (16:00). Οι συντομογραφίες κατηγοριών παρουσιάζονται στους Πίνακες 2.8.1.1 (PET) και 2.8.1.2 (UTCI).

Ο πίνακας δείχνει ότι, στο σενάριο S3, η μέγιστη θερμική επιβάρυνση στο PO2 εξακολουθεί να εμφανίζεται κατά τις ώρες αιχμής. Η Ta κορυφώνεται περίπου στα 39,26

°C, ενώ η T_{mrt} φθάνει τα 73,12 °C και ο UTCI τα 48,57 °C. Παρότι οι τιμές είναι μειωμένες σε σχέση με το S1, παραμένουν πάνω από το όριο ακραίας θερμικής καταπόνησης της μεσογειακής κλίμακας UTCI (>39,9 °C), γεγονός που δείχνει ότι η στάθμη δώματος εξακολουθεί να απαιτεί πρόσθετη σκίαση και ακτινοβολιακή προστασία.

γ) Χρονική εξέλιξη του PET στο PO2 ανά προφίλ χρήστη — σενάριο S3



Σχήμα 3.2.6.4 Ημερήσια εξέλιξη του δείκτη PET στο σημείο PO2 για τα προφίλ ενήλικα, ηλικιωμένου και παιδιού, σενάριο S3, στάθμη $z=15$ m, 25.07.2025.

Πηγή: Ιδία επεξεργασία αποτελεσμάτων ENVI-met 5.8.0 / BIO-met / Leonardo.

Στο PO2/S3, οι μέγιστες τιμές PET φθάνουν περίπου τα 59,55 °C για το προφίλ ενήλικα, 60,38 °C για το προφίλ ηλικιωμένου και 57,26 °C για το προφίλ παιδιού στις 16:00. Η πτώση των τιμών μετά τις 18:00–19:00 πρέπει να ερμηνευθεί με βάση τον πρόσθετο πίνακα Direct SW Radiation, επειδή η απότομη μείωση PET συνδέεται με μηδενισμό της άμεσης ακτινοβολίας και πτώση της T_{mrt} , όχι με αντίστοιχη πτώση της T_a .

Παρατήρηση:

Η απότομη μείωση των τιμών PET στο PO2 μεταξύ 18:00 και 19:00 συνδέεται άμεσα με τη μετάβαση του σημείου από συνθήκες άμεσης ηλιακής έκθεσης σε συνθήκες σκίασης. Η Direct SW Radiation μειώνεται από 508,93 W/m² σε 0,00 W/m², ενώ την ίδια στιγμή η T_{mrt} μειώνεται από 59,98 °C σε 36,99 °C. Αντίθετα, η T_a μειώνεται μόνο κατά 0,85 K.

Συνεπώς, η πτώση του PET δεν ερμηνεύεται ως αποτέλεσμα αντίστοιχης πτώσης της θερμοκρασίας αέρα, αλλά ως αποτέλεσμα απότομης ακτινοβολιακής αποφόρτισης λόγω σκίασης.

Ακολουθεί ο πίνακας ελέγχου ακτινοβολιακής αποφόρτισης 18:00–20:00

Πίνακας 3.2.6.2 έλεγχος της απότομης πτώσης PET λόγω σκίασης

Φάση	Ωρα	PET ενήλικα	PET ηλικιωμένου	PET παιδιού	T _{mrt}	T _a	Direct SW Radiation	Ερμηνεία
πριν την πτώση	18:00	58,00 °C	58,84 °C	55,69 °C	59,98 °C	38,59 °C	508,93 W/m ²	Ηλιακή έκθεση / υψηλή ακτινοβολιακή επιβάρυνση
ώρα πτώσης	19:00	41,56 °C	41,84 °C	44,12 °C	36,99 °C	37,74 °C	0,00 W/m ²	Μετάβαση σε σκιασμένη κατάσταση / μηδενισμός της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας
μετά την πτώση	20:00	37,75 °C	38,06 °C	40,06 °C	31,71 °C	36,72 °C	0,00 W/m ²	Σταθεροποίηση σε σκιασμένες συνθήκες / χαμηλή ακτινοβολιακή επιβάρυνση
Μεταβολή 18:00 → 19:00			Τιμή			Ερμηνεία		
ΔPET ενήλικα			−16,44 K			Έντονη μείωση θερμικής καταπόνησης		
ΔPET ηλικιωμένου			−17,00 K			Έντονη μείωση θερμικής καταπόνησης		
ΔPET παιδιού			−11,57 K			Έντονη μείωση, ηπιότερη σε σχέση με τα ενήλικα προφίλ		
ΔT _{mrt}			−22,99 K			Πολύ μεγάλη ακτινοβολιακή αποφόρτιση		
ΔT _a			−0,85 K			Μικρή πτώση της θερμοκρασίας αέρα		
ΔDirect SW Radiation			−508,93 W/m ²			Μηδενισμός της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας		

Πηγή: Ιδία επεξεργασία αποτελεσμάτων ENVI-met 5.8.0 / BIO-met / Leonardo.

3.2.7 Σύνοψη ευρημάτων S3

Στο S3, οι συνδυαστικές παρεμβάσεις μεταβάλλουν κυρίως τη χωρική διάρθρωση του μικροκλιματικού πεδίου και λιγότερο τις ακραίες τιμές της T_a στα πλήρως εκτεθειμένα σημεία. Ο χάρτης της T_a υποδηλώνει μικρή μόνο μεταβολή της θερμοκρασίας αέρα, ενώ ο χάρτης της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας δείχνει ότι οι παρεμβάσεις δημιουργούν ή ενισχύουν σκιασμένες ζώνες και περιοχές χαμηλότερης ηλιακής έκθεσης. Επομένως, το

κύριο όφελος του S3 δεν εντοπίζεται σε γενικευμένη μείωση των ακραίων τιμών, αλλά στη βελτίωση των μικροκλιματικών συνθηκών σε συγκεκριμένα τμήματα του χώρου.

Η συνοπτική αποτίμηση του S3 δείχνει ότι οι προτεινόμενες παρεμβάσεις οδηγούν σε σημαντική μείωση της θερμικής επιβάρυνσης, κυρίως στις ζώνες όπου συνδυάζονται σκίαση, πρόσθετη βλάστηση και τροποποίηση υλικών επιφανειών. Στις ζώνες άμεσης παρέμβασης, η μείωση του δείκτη PET φτάνει τοπικά έως -14 K και η μείωση του δείκτη UTCI έως $-6,7\text{ K}$ κατά τις απογευματινές ώρες αιχμής. Η βελτίωση δεν εμφανίζεται ομοιόμορφα σε όλο το πεδίο μελέτης, αλλά εξαρτάται από τη θέση της παρέμβασης, την έκθεση στην ηλιακή ακτινοβολία, τη μέση ακτινοβολούμενη θερμοκρασία T_{mrt} και τις τοπικές συνθήκες αερισμού.

Στο επίπεδο πεζού, το S3 παρουσιάζει σαφή μείωση της θερμικής επιβάρυνσης σε σχέση με το S1, ιδιαίτερα κατά τις ώρες υψηλής ηλιακής ακτινοβολίας. Η μείωση αυτή αποτυπώνεται κυρίως στους δείκτες PET και UTCI και μπορεί να συμβάλει στον περιορισμό της θερμικής καταπόνησης των ευάλωτων χρηστών, χωρίς όμως να εξαλείφει τις υψηλές κατηγορίες θερμικού στρες. Η μεταβολή είναι εντονότερη στους ανθρωποκεντρικούς δείκτες θερμικής άνεσης, ιδίως στον PET, καθώς ο δείκτης αυτός επηρεάζεται άμεσα από τη σκίαση και την ακτινοβολιακή επιβάρυνση.

Σε περιορισμένες ζώνες παρατηρούνται οριακές τοπικές αυξήσεις του PET, έως περίπου $+1,73\text{ K}$, οι οποίες δεν αναιρούν τη συνολική θετική τάση του σεναρίου, αλλά δείχνουν ότι η βιοκλιματική παρέμβαση πρέπει να αξιολογείται χωρικά και όχι μόνο με βάση μέσες τιμές. Η χωρική ανομοιογένεια της απόκρισης τεκμηριώνει την ανάγκη οι παρεμβάσεις να τοποθετούνται στοχευμένα σε σχέση με τις λειτουργικές ζώνες χρήσης, τις συνθήκες σκίασης, την έκθεση στην ακτινοβολία και τον αερισμό.

Η ακριβής ποσοτική αποτίμηση της αποτελεσματικότητας, με χωρικές κατανομές, εύρη τιμών και κατηγοριοποιήσεις θερμικού στρες, παρουσιάζεται στη συγκριτική αξιολόγηση S3–S1 που ακολουθεί στην Ενότητα 3.3.

3.3 Συγκριτική αξιολόγηση S3–S1

Η παρούσα ενότητα οργανώνει τη συγκριτική ανάγνωση των αποτελεσμάτων των δύο σεναρίων προσομοίωσης, δηλαδή της «υφιστάμενης κατάστασης» και του συνδυαστικού

σεναρίου παρέμβασης. Η ανάλυση αποσκοπεί στην αποτίμηση του βαθμού στον οποίο η εφαρμογή της ολοκληρωμένης στρατηγικής βιοκλιματικής αναβάθμισης οδηγεί σε ουσιαστική βελτίωση της θερμικής άνεσης και σε μείωση της θερμικής επιβάρυνσης στον υπαίθριο χώρο μελέτης.

Η συγκριτική αξιολόγηση βασίζεται στις χωρικές και χρονικές μεταβολές των PET, UTCI και T_{mrt} μεταξύ S3 και S1. Για την αξιολόγηση των ευάλωτων ομάδων, η σύγκριση βασίζεται αποκλειστικά στον δείκτη PET.

Για την καλύτερη οπτική ερμηνεία των χωρικών διαφορών, οι χάρτες μεταβολής απεικονίστηκαν με χειροκίνητα ορισμένες κατηγορίες τιμών στο περιβάλλον Leonardo. Οι αρνητικές τιμές αντιστοιχούν σε μείωση της εξεταζόμενης μεταβλητής στο σενάριο παρέμβασης, ενώ οι θετικές τιμές αντιστοιχούν σε αύξηση σε σχέση με το σενάριο αναφοράς S1.

3.3.1 Χωρική μεταβολή της T_a , της T_{mrt} και της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας μεταξύ S3 και S1 στις 16:00

α) Χωρική μεταβολή της T_a μεταξύ S3 και S1 στις 16:00

Στην παρούσα υποενότητα εξετάζεται η χωρική μεταβολή της δυνητικής θερμοκρασίας αέρα (T_a) στο συνδυαστικό σενάριο παρέμβασης S3 σε σχέση με το σενάριο αναφοράς S1, με στόχο την αποτίμηση της επίδρασης των παρεμβάσεων στις θερμικές συνθήκες στη στάθμη πεζού. Η ανάλυση πραγματοποιείται στις 16:00, η οποία αποτελεί την κοινή ώρα αναφοράς για τη χωρική σύγκριση των χαρτών και δεν ταυτίζεται κατ' ανάγκη με την ώρα εμφάνισης της μέγιστης τιμής. Τα αποτελέσματα αποτυπώνονται σε ύψος $z = 1,40$ m, το οποίο αντιστοιχεί στη στάθμη αναφοράς του πεζού.

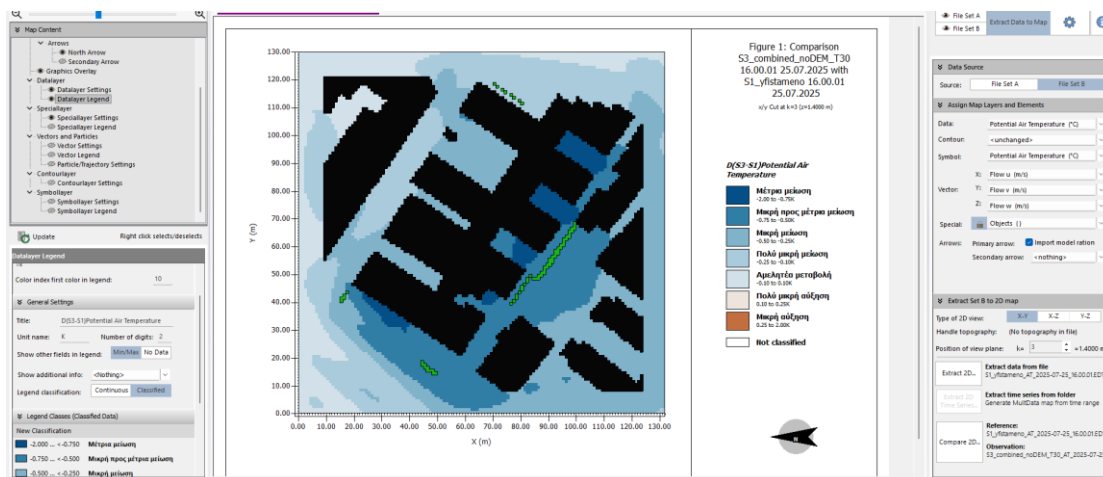
Πίνακας 3.3.1.1 Συγκριτικές ελάχιστες και μέγιστες τιμές και εύρος της δυνητικής θερμοκρασίας αέρα (T_a) στα σενάρια S1 και S3, στις 16:00 της 25.07.2025, στη στάθμη πεζού ($z = 1,40$ m).

Σενάριο	Min T_a	Max T_a	Εύρος
S1 – σενάριο αναφοράς	39,43 °C	44,43 °C	5,00 °K
S3 – συνδυαστικό σενάριο	39,28 °C	44,31 °C	5,03 °K
Διαφορά S3–S1	-0,15 °C στο ελάχιστο	-0,12 °C στο μέγιστο	πρακτικά παρόμοιο εύρος

Πηγή: Εξαγωγή και ιδία επεξεργασία αποτελεσμάτων από το ENVI-met 5.8.0

Η σύγκριση των ακραίων τιμών δείχνει περιορισμένη μείωση της T_a στο S3, ίση με 0,15 K ως προς την ελάχιστη τιμή και 0,12 K ως προς τη μέγιστη τιμή. Το εύρος των τιμών

παραμένει ουσιαστικά αμετάβλητο, επιβεβαιώνοντας ότι η επίδραση του συνδυαστικού σεναρίου στη θερμοκρασία αέρα είναι μικρή.



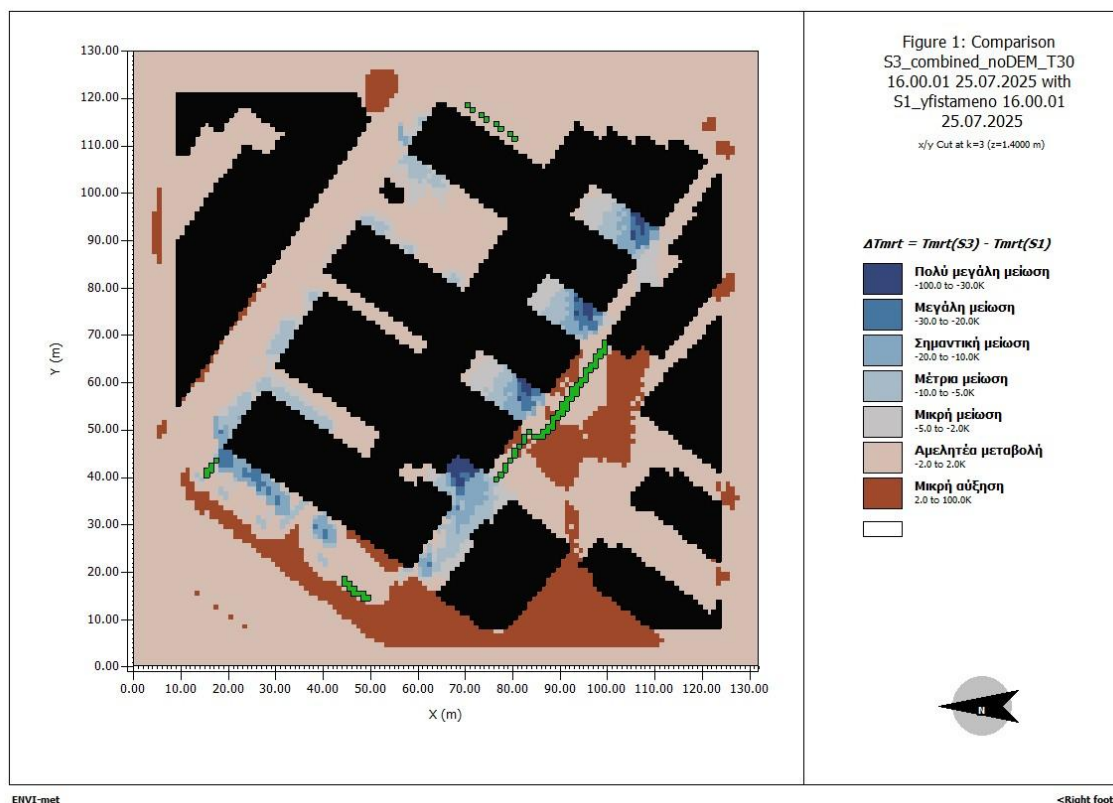
Σχήμα 3.3.1.1 Χωρική μεταβολή της δυνητικής θερμοκρασίας αέρα, $\Delta T_a = T_a(S3) - T_a(S1)$, στις 16:00 της 25.07.2025, στη στάθμη πεζού ($z = 1,40 \text{ m}$). Οι αρνητικές τιμές δηλώνουν μείωση της T_a στο συνδυαστικό σενάριο S3 σε σχέση με το σενάριο αναφοράς S1, ενώ οι θετικές τιμές δηλώνουν αύξηση.

Πηγή: Εξαγωγή αποτελεσμάτων και ίδια χαρτογραφική επεξεργασία από το ENVI-met 5.8.0.

Στο μεγαλύτερο μέρος του πεδίου οι μεταβολές της T_a είναι μικρές. Το S3 εμφανίζει ελαφρώς χαμηλότερες ελάχιστες και μέγιστες τιμές T_a , γεγονός που επιβεβαιώνει ότι η επίδραση των παρεμβάσεων στη θερμοκρασία αέρα είναι περιορισμένη σε σχέση με τη μεταβολή των ακτινοβολιακών παραμέτρων.

β) Χωρική μεταβολή της T_{mrt} μεταξύ S3 και S1 στις 16:00.

Για την αξιολόγηση της επίδρασης του συνδυαστικού σεναρίου S3 στην ακτινοβολιακή θερμική επιβάρυνση της περιοχής μελέτης υπολογίστηκε η μεταβολή της μέσης ακτινοβολούμενης θερμοκρασίας, σύμφωνα με τη σχέση $\Delta T_{mrt} = T_{mrt}(S3) - T_{mrt}(S1)$. Η επιλογή της T_{mrt} ως βασικής παραμέτρου σύγκρισης είναι κρίσιμη, καθώς αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους μικροκλιματικούς παράγοντες που επηρεάζουν το ανθρώπινο θερμικό ισοζύγιο σε υπαίθριους αστικούς χώρους. Η T_{mrt} συνδέεται άμεσα με τη συνολική ακτινοβολιακή φόρτιση που δέχεται το ανθρώπινο σώμα και συμμετέχει στον υπολογισμό βιοκλιματικών δεικτών, όπως ο PET και ο UTCI (Bröde et al., 2012; Matzarakis et al., 1999).



Σχήμα 3.3.1.2 Χωρική κατανομή της μεταβολής της μέσης ακτινοβολούμενης θερμοκρασίας T_{mrt} μεταξύ S3 και S1, στις 16:00 της 25.07.2025 και σε ύψος 1,40 m.

Πηγή: Εξαγωγή αποτελεσμάτων και ιδία χαρτογραφική επεξεργασία από το ENVI-met 5.8.0.

Η ταξινόμηση του χάρτη διαφορών πραγματοποιήθηκε με βάση το πραγματικό εύρος των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης, το οποίο κυμαίνεται περίπου από $-40,86\text{ K}$ έως $+5,30\text{ K}$. Οι κατηγορίες που χρησιμοποιήθηκαν δεν αποτελούν τυποποιημένες κλάσεις θερμικής άνεσης, αλλά ερμηνευτικές κατηγορίες μεταβολής της T_{mrt} , ώστε να αποτυπωθεί με σαφήνεια η ένταση και η κατεύθυνση της επίδρασης των παρεμβάσεων. Η μονάδα K (Kelvin / Κέλβιν) χρησιμοποιείται επειδή πρόκειται για διαφορά θερμοκρασίας· αριθμητικά, μεταβολή 1 K αντιστοιχεί σε μεταβολή $1\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Οι κατηγορίες της ΔT_{mrt} ερμηνεύονται ως εξής: τιμές μικρότερες από -30 K αντιστοιχούν σε πολύ μεγάλη μείωση της T_{mrt} , τιμές από -30 έως -20 K σε μεγάλη μείωση, τιμές από -20 έως -10 K σε σημαντική μείωση, τιμές από -10 έως -5 K σε μέτρια μείωση, τιμές από -5 έως -2 K σε μικρή μείωση, ενώ το διάστημα -2 έως $+2\text{ K}$ θεωρείται αμελητέα μεταβολή. Οι θετικές τιμές άνω των $+2\text{ K}$ ερμηνεύονται ως μικρή τοπική αύξηση της T_{mrt} .

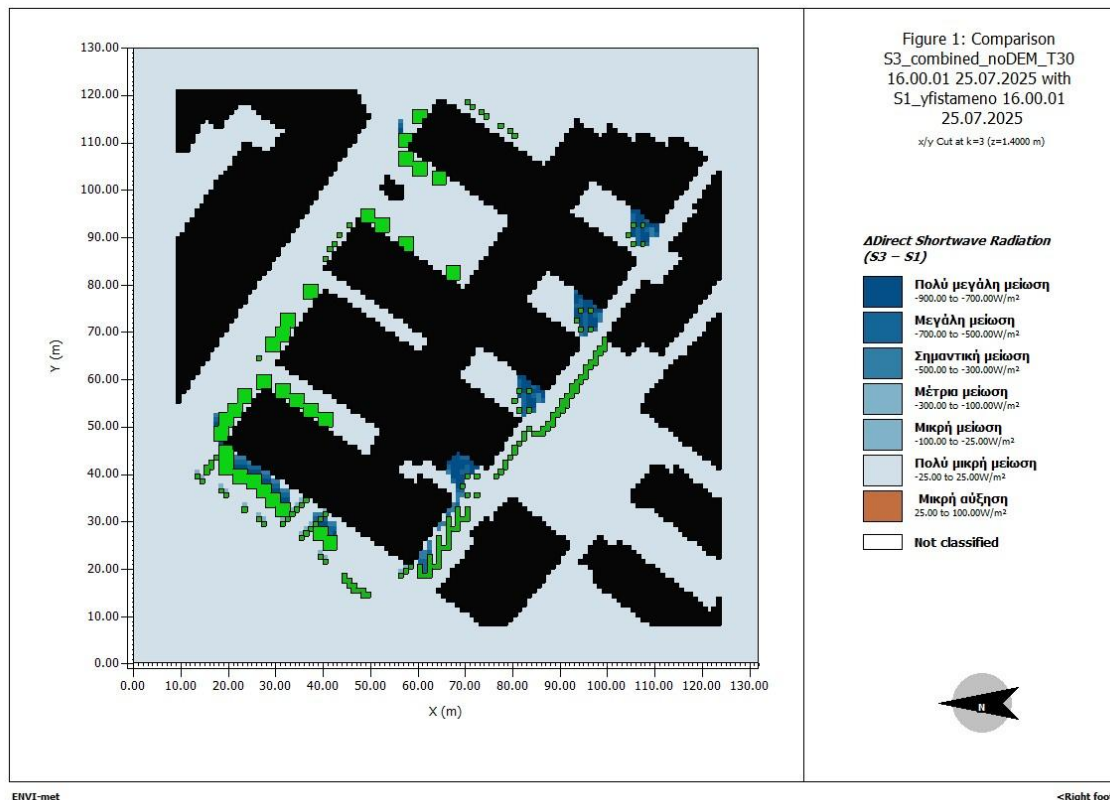
Τα τεχνικά όρια -100 K και $+100\text{ K}$ που εμφανίζονται στο υπόμνημα χρησιμοποιήθηκαν αποκλειστικά για να καλυφθούν όλες οι τιμές του χάρτη και να μην παραμείνουν αταξινόμητα κελιά. Η επιστημονική ερμηνεία βασίζεται στο πραγματικό εύρος $-40,86$ έως $+5,30\text{ K}$.

Η παραπάνω ερμηνευτική ταξινόμηση είναι συμβατή με τη βιβλιογραφία, σύμφωνα με την οποία η σκίαση, η παρουσία δέντρων και ο περιορισμός της άμεσης ηλιακής έκθεσης μπορούν να επιφέρουν σημαντικές μειώσεις της T_{mrt} . Σε μελέτη των Thom et al. (2016), η αύξηση της δενδροκάλυψης οδήγησε σε μέσες ημερήσιες μειώσεις της T_{mrt} κατά $1,7-5,1\text{ }^{\circ}\text{C}$, ενώ κάτω από συστάδες δέντρων οι μειώσεις έφτασαν περίπου τα $14,1-18,7\text{ }^{\circ}\text{C}$. Αντίστοιχα, οι Jareemit και Srivanit (2022) αναφέρουν ότι οι κατασκευές σκίασης και οι δενδρικές κόμεις μπορούν να μειώσουν σημαντικά τη μέση ακτινοβολούμενη θερμοκρασία, με βιβλιογραφικά αναφερόμενες μειώσεις της τάξης των $20-22\text{ }^{\circ}\text{C}$ σε συνθήκες ημερήσιας έκθεσης (Thom et al., 2016).

Ο συγκριτικός χάρτης δείχνει ότι το συνδυαστικό σενάριο S3 επιφέρει χωρικά διαφοροποιημένη μεταβολή της T_{mrt} σε σχέση με το σενάριο αναφοράς S1. Οι μπλε αποχρώσεις αντιστοιχούν σε περιοχές με μείωση της T_{mrt} , δηλαδή σε περιοχές όπου περιορίζεται η ακτινοβολιακή θερμική επιβάρυνση, ενώ οι θερμές αποχρώσεις υποδηλώνουν περιοχές μικρής τοπικής αύξησης. Οι εντονότερες μειώσεις εμφανίζονται κυρίως σε ζώνες όπου οι παρεμβάσεις μεταβάλλουν ουσιαστικά την έκθεση στην άμεση ηλιακή ακτινοβολία, είτε μέσω σκίασης είτε μέσω της προσθήκης βλάστησης. Αντίθετα, οι περιοχές αμελητέας μεταβολής ή μικρής αύξησης της T_{mrt} δείχνουν ότι οι παρεμβάσεις δεν έχουν ομοιόμορφη απόδοση σε όλο το πεδίο. Η συμπεριφορά αυτή είναι συμβατή με τη βιβλιογραφία, καθώς η μικροκλιματική απόκριση της T_{mrt} εξαρτάται έντονα από τη γεωμετρία του χώρου, τον βαθμό σκίασης, τη θέση του ήλιου, το SVF και τα χαρακτηριστικά των επιφανειών. Επομένως, ο χάρτης ΔT_{mrt} λειτουργεί ως εργαλείο εντοπισμού των ζωνών όπου απαιτείται περαιτέρω ανάλυση μέσω σημειακών χρονοσειρών T_{mrt} και, στη συνέχεια, συσχέτιση με τους δείκτες PET και UTCI.

γ) Χωρική μεταβολή της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας μεταξύ S3 και S1 στις 16:00.

Ο χάρτης διαφοράς της Direct SW Radiation αποτυπώνει τη μεταβολή μεταξύ του συνδυαστικού σεναρίου S3 και του σεναρίου αναφοράς S1.



Σχήμα 3.3.1.3. Χωρική κατανομή της μεταβολής της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας, ΔDirect SW Radiation μεταξύ S3 και S1, στις 25.07.2025, ώρα 16:00, z = 1,40 m.

Πηγή: Ιδία επεξεργασία αποτελεσμάτων ENVI-met 5.8.0/ Leonardo.

Οι χάρτες άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας δείχνουν ότι το S3 δεν μειώνει ομοιόμορφα τη μέγιστη άμεση ηλιακή ακτινοβολία στο σύνολο του πεδίου, καθώς οι μέγιστες τιμές παραμένουν παρόμοιες μεταξύ S1 και S3. Ωστόσο, δημιουργεί τοπικές ζώνες σημαντικής μείωσης στις περιοχές παρεμβάσεων. Η χωρική μεταβολή της Direct SW Radiation τεκμηριώνει ότι ο κύριος μηχανισμός βελτίωσης των Tmrt, PET και UTCI είναι η στοχευμένη σκίαση και η ακτινοβολιακή αποφόρτιση.

Οι τιμές κυμαίνονται από $-870,53 \text{ W/m}^2$ έως $+0,59 \text{ W/m}^2$, γεγονός που δείχνει ότι η μεταβολή είναι σχεδόν αποκλειστικά αρνητική, δηλαδή συνδέεται με μείωση της άμεσης ηλιακής έκθεσης στο σενάριο S3.

Οι μεγαλύτερες μειώσεις, της τάξης των -700 έως -870 W/m^2 , αντιστοιχούν σε περιοχές όπου η παρέμβαση οδηγεί σε ουσιαστική σκίαση επιφανειών που στο σενάριο S1 ήταν άμεσα εκτεθειμένες στην ηλιακή ακτινοβολία. Αντίθετα, οι περιοχές με τιμές κοντά στο

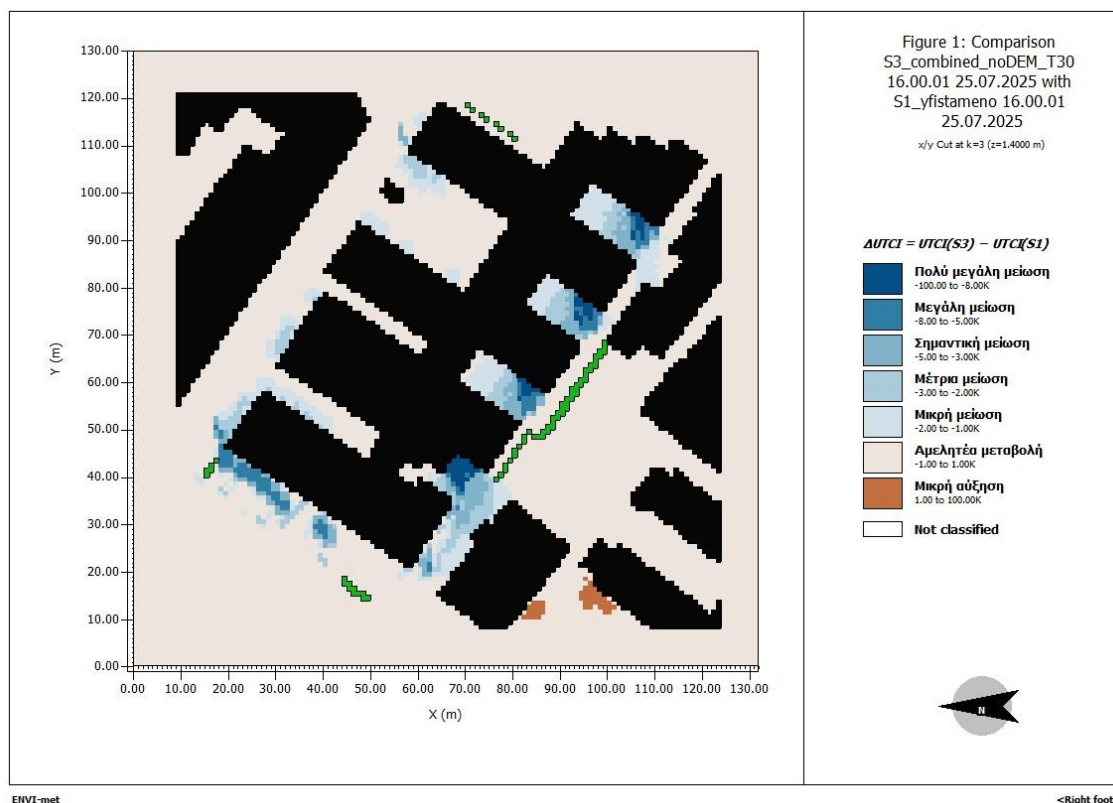
μηδέν υποδηλώνουν τμήματα του χώρου όπου οι συνθήκες άμεσης ηλιακής έκθεσης παραμένουν πρακτικά αμετάβλητες μεταξύ των δύο σεναρίων.

Επομένως, ο χάρτης δεν πρέπει να ερμηνευθεί με βάση τη μεταβολή της μέγιστης τιμής, αλλά με βάση τη χωρική θέση και έκταση των ζωνών μείωσης. Η σημαντική τοπική μείωση της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας αποτελεί βασικό μηχανισμό μέσω του οποίου το S3 μπορεί να οδηγήσει σε μείωση της T_{mrt} και, κατ' επέκταση, σε βελτίωση των δεικτών PET και UTCI.

Η χωρική κατανομή του SVF και της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας χρησιμοποιείται ως ερμηνευτικό υπόβαθρο για την κατανόηση της ακτινοβολιακής επιβάρυνσης του χώρου. Οι περιοχές με υψηλότερο SVF και άμεση έκθεση στην ηλιακή ακτινοβολία εμφανίζουν αυξημένη ακτινοβολιακή φόρτιση, γεγονός που συμβάλλει στην αύξηση της T_{mrt} και, κατ' επέκταση, των δεικτών PET και UTCI. Αντίθετα, οι σκιασμένες ζώνες και οι περιοχές με περιορισμένο άνοιγμα προς τον ουρανό εμφανίζουν χαμηλότερη άμεση ακτινοβολιακή επιβάρυνση.

3.3.2 Χωρική μεταβολή του δείκτη UTCI μεταξύ S3 και S1 στις 16:00, σε ύψος 1,40 m

Η παρούσα υποενότητα παρουσιάζει τον χάρτη χωρικής μεταβολής του δείκτη UTCI, η οποία υπολογίζεται ως $\Delta UTCI = UTCI(S3) - UTCI(S1)$, στις 16:00 και σε ύψος 1,40 m. Οι αρνητικές τιμές αντιστοιχούν σε μείωση του θερμικού στρες, όπως αποτυπώνεται από τον UTCI, στο σενάριο παρέμβασης S3. Σε σχέση με το σενάριο αναφοράς S1, ενώ οι θετικές τιμές αντιστοιχούν σε τοπική αύξηση της θερμικής επιβάρυνσης.



Σχήμα 3.3.2.1. Χωρική μεταβολή του δείκτη UTCI μεταξύ S3 και S1, $\Delta UTCI = UTCI(S3) - UTCI(S1)$, στις 16:00, σε ύψος 1,40 m. οι μπλε αποχρώσεις υποδηλώνουν μείωση του UTCI και του θερμικού στρες, ενώ οι θερμές αποχρώσεις υποδηλώνουν μικρή τοπική αύξηση.

Πηγή: Ιδία επεξεργασία βάσει αποτελεσμάτων ENVI-met 5.8.0 / Leonardo.

Η μεταβολή $\Delta UTCI$ κυμαίνεται από $-6,51$ K, που αντιστοιχεί στη μέγιστη τοπική μείωση, έως $+0,91$ K, που αντιστοιχεί στη μέγιστη τοπική αύξηση. Οι μεγαλύτερες μειώσεις εντοπίζονται κυρίως στις ζώνες άμεσης επιρροής της σκίασης και της νέας βλάστησης, όπου το σενάριο S3 περιορίζει την άμεση ηλιακή έκθεση και μειώνει την ακτινοβολιακή επιβάρυνση του χρήστη. Αντίθετα, οι μικρότερες μεταβολές ή οι περιορισμένες τοπικές αυξήσεις παρατηρούνται σε ζώνες που παραμένουν περισσότερο εκτεθειμένες ή σε σημεία όπου η νέα φύτευση ενδέχεται να επηρεάζει τοπικά τη ροή του αέρα.

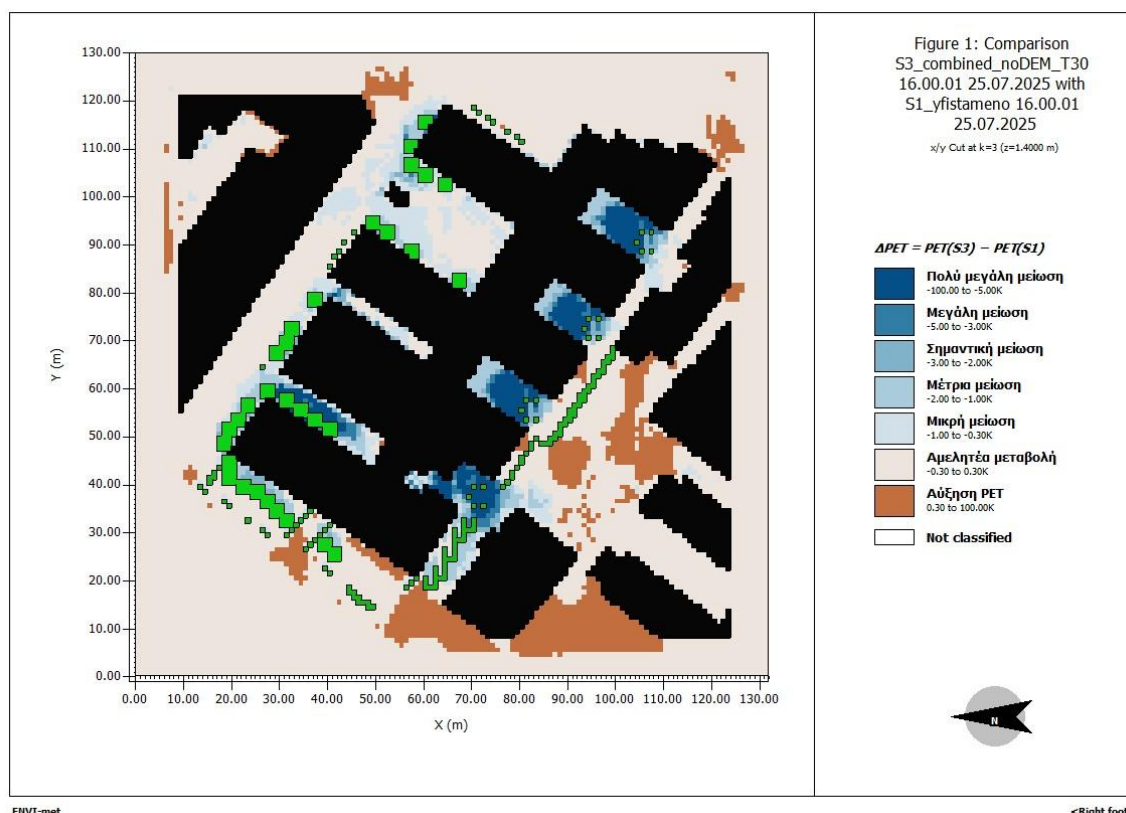
Πέρα από την απόλυτη μεταβολή σε K, ιδιαίτερη σημασία έχει και η πιθανή μεταβολή κατηγορίας θερμικού στρες. Στην παρούσα υποενοότητα η αξιολόγηση πραγματοποιείται κυρίως χωρικά και ποιοτικά, βάσει του χάρτη $\Delta UTCI$. Η πλήρης ποσοτικοποίηση των μεταβάσεων μεταξύ κατηγοριών θερμικής καταπόνησης θα απαιτούσε ταξινόμηση των επιμέρους κελιών του υπολογιστικού πλέγματος για τα σενάρια S1 και S3.

Συνολικά, ο χάρτης 3.3.2.1 επιβεβαιώνει ότι το συνδυαστικό σενάριο S3 επιφέρει σημαντική, τοπικά συγκεντρωμένη, μικροκλιματική βελτίωση ιδίως στα τμήματα του υπαίθριου χώρου όπου έχουν ενσωματωθεί γραμμικές φυτεύσεις ή πρόσθετα στοιχεία σκίασης.

Οι μειώσεις δεν κατανέμονται ομοιόμορφα σε όλο το υπολογιστικό πεδίο, αλλά συγκεντρώνονται κυρίως κοντά στις περιοχές παρέμβασης. Η ψυκτική επίδραση των παρεμβάσεων εξασθενεί βαθμιαία με την απόσταση από τα σημεία εφαρμογής, εύρημα συμβατό με τη διεθνή βιβλιογραφία για nature-based solutions (λύσεις βασισμένες στη φύση) σε μεσογειακά αστικά περιβάλλοντα (Tousi, Tseliou, et al., 2024; Tseliou et al., 2023). Οι περιορισμένες τοπικές αυξήσεις της ΔUTCI δεν αναιρούν τη συνολικά θετική απόδοση του S3, αλλά αναδεικνύουν τη σημασία της χωρικά προσαρμοσμένης τοποθέτησης των βιοκλιματικών παρεμβάσεων.

3.3.3 Χωρική μεταβολή του PET ανά προφίλ χρήστη

α) Χωρική μεταβολή του ΔPET (S3-S1) για το προφίλ ενήλικα



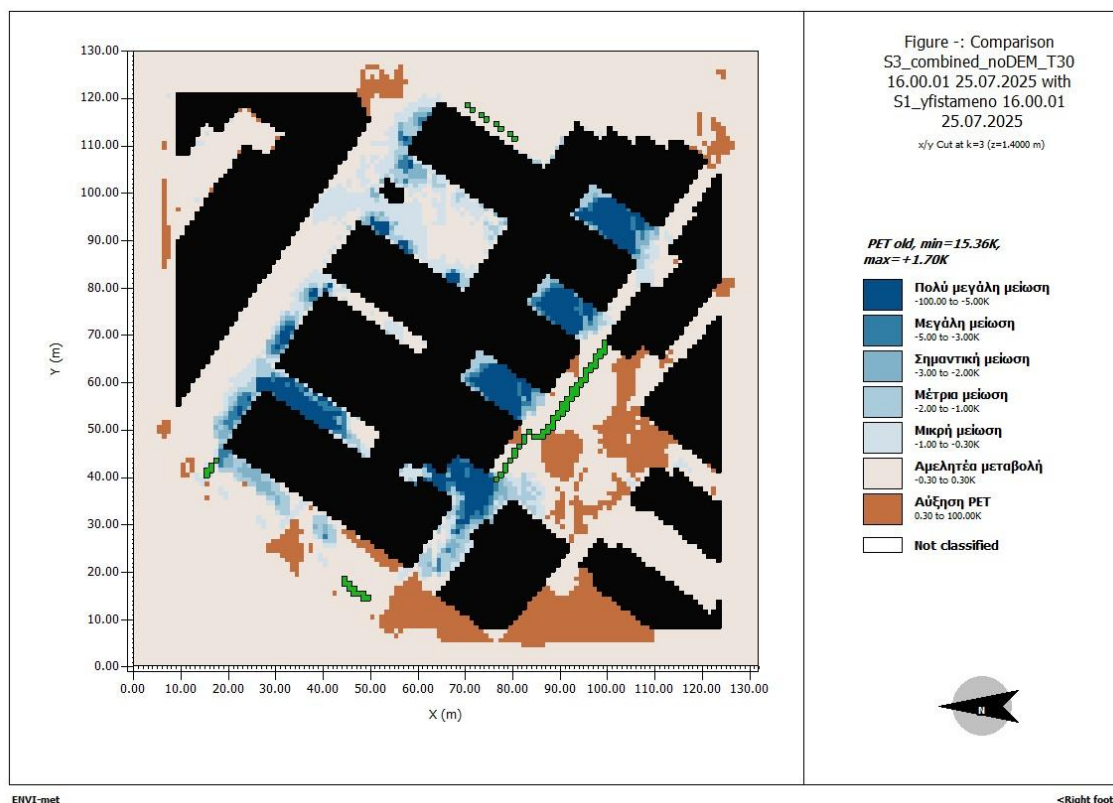
Σχήμα 3.3.3.1. Χωρική κατανομή του δείκτη PET για το προφίλ ενήλικα άνδρα, όπως προκύπτει από τη σχέση $\Delta PET = PET(S3) - PET(S1)$, μεταξύ S3 και S1, στις 16:00 και σε ύψος 1,40 m.

Πηγή: Ιδία επεξεργασία βάσει αποτελεσμάτων ENVI-met 5.8.0 / BIO-met/Leonardo.

Σε επίπεδο ολόκληρου του πεδίου οι θετικές τιμές, με θερμές αποχρώσεις, δείχνουν τοπική αύξηση της θερμικής καταπόνησης σε σχέση με το S1. Οι μεγαλύτερες μειώσεις φθάνουν τοπικά έως -14 K. Εντοπίζονται σε συγκεκριμένες ζώνες, όπου οι παρεμβάσεις περιορίζουν την ακτινοβολιακή επιβάρυνση και ενισχύουν τη σκίαση. Οι αυξήσεις είναι σαφώς μικρότερης έντασης, έως $+1,73$ K για το προφίλ ενήλικα και $+1,70$ K για το προφίλ ηλικιωμένου, και επίσης τοπικές.

Σε επίπεδο ολόκληρου του υπολογιστικού πεδίου, σε ύψος $z = 1,40$ m και ώρα 16:00, η διάμεση μεταβολή ΔPET είναι πρακτικά μηδενική (≈ 0 K), με μέση τιμή $-0,5$ K για το προφίλ ενήλικα. Το αποτέλεσμα αυτό δείχνει ότι η επίδραση του S3 δεν είναι ομοιόμορφη στο σύνολο του πεδίου, αλλά κυρίως τοπική και χωρικά εστιασμένη. Αντίθετα, στις ζώνες άμεσης σκίασης, οι οποίες αντιστοιχούν περίπου στο 14 % του πεδίου για το προφίλ ενήλικα και ηλικιωμένου, η τυπική μείωση ανέρχεται σε περίπου 2 K, με μέγιστη τοπική μείωση -14 K για τον ενήλικα και $-15,4$ K για τον ηλικιωμένο.

β) Χωρική κατανομή ΔPET (S3–S1) για το προφίλ ηλικιωμένου χρήστη, στις 16:00, $z = 1,40$ m



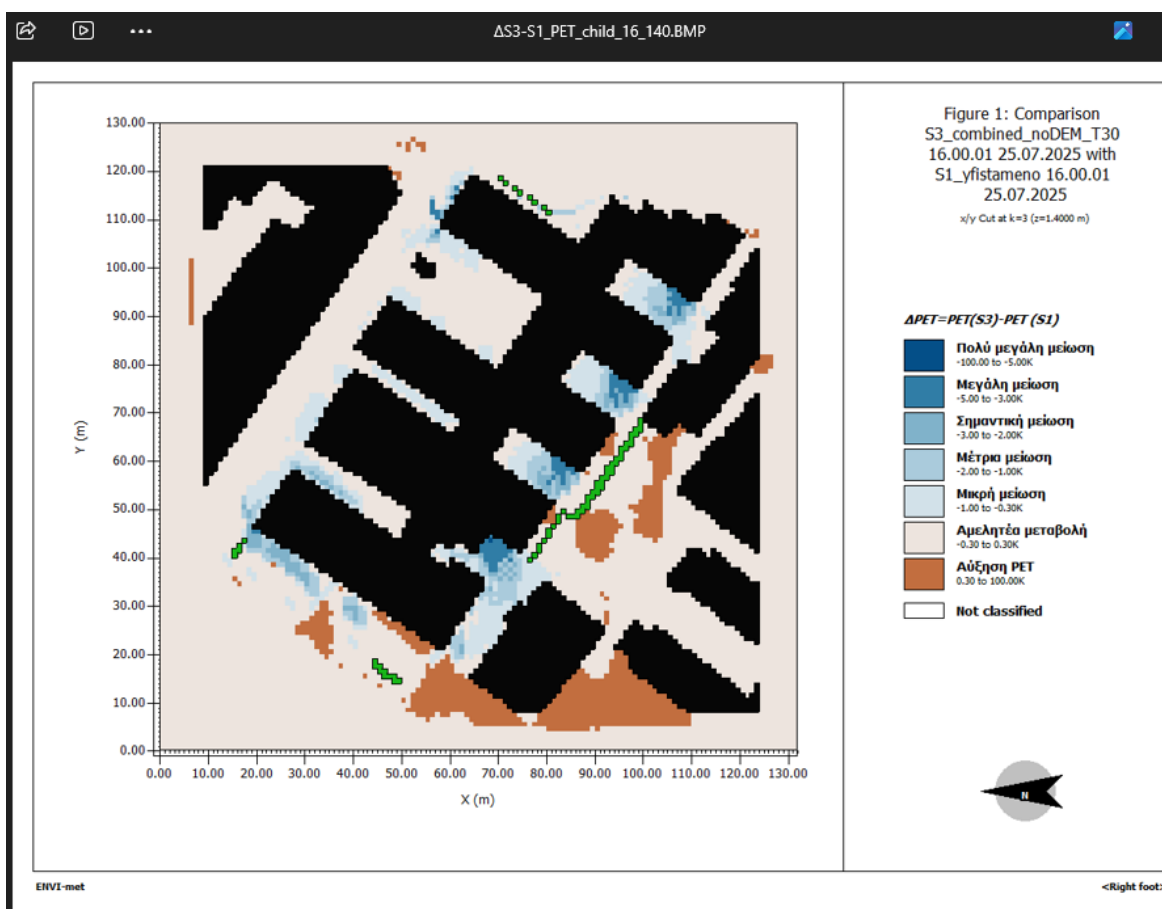
Σχήμα 3.3.3.2. Χωρική μεταβολή του δείκτη PET για το προφίλ ηλικιωμένου χρήστη, $\Delta PET = PET(S3) - PET(S1)$, στις 16:00, σε ύψος 1,40 m.

Πηγή: Ιδία επεξεργασία βάσει αποτελεσμάτων ENVI-met 5.8.0 / BIO-met /Leonardo.

Η μεταβολή κυμαίνεται από $-15,36$ K έως $+1,70$ K. Οι αρνητικές τιμές και οι ψυχρές αποχρώσεις υποδηλώνουν μείωση του PET ηλικιωμένου στο σενάριο S3, δηλαδή βελτίωση της θερμικής άνεσης, ενώ οι θετικές τιμές και οι θερμές αποχρώσεις υποδηλώνουν τοπική αύξηση της θερμικής καταπόνησης σε σχέση με το S1.

Min= -15.36 K, Max= $+1.70$ K

γ) Χωρική μεταβολή του ΔPET (S3-S1) για το παιδικό προφίλ



Σχήμα 3.3.3.3. Χωρική μεταβολή του δείκτη PET για το προφίλ παιδιού $\Delta PET = PET(S3) - PET(S1)$, στις 16:00, σε ύψος 1,40 m.

Πηγή: Ιδία επεξεργασία βάσει αποτελεσμάτων ENVI-met 5.8.0 / BIO-met /Leonardo.

Ο χάρτης μεταβολής του δείκτη PET στις 16:00 παρουσιάζει εύρος τιμών από $-5,04$ K έως $+1,05$ K. Η χωρική αυτή κατανομή δείχνει ότι το S3 επιφέρει τοπική μείωση της θερμικής επιβάρυνσης και στο παιδικό προφίλ, αλλά με ηπιότερη ψυκτική απόκριση σε σύγκριση με τα προφίλ ενήλικα και ηλικιωμένου. Ειδικότερα, η μέγιστη τοπική μείωση για το παιδί φτάνει περίπου τα -5 K, ενώ στα προφίλ ενήλικα και ηλικιωμένου οι αντίστοιχες μέγιστες μειώσεις είναι σημαντικά μεγαλύτερες, της τάξης των -14 έως -15 K.

Οι μεγαλύτερες μειώσεις του PET στο παιδικό προφίλ εντοπίζονται κυρίως στις θέσεις άμεσης σκίασης από τη νέα βλάστηση, γεγονός που επιβεβαιώνει τον ακτινοβολιακό χαρακτήρα της παρέμβασης. Σε χωρικά περιορισμένες θέσεις παρατηρείται οριακή αύξηση του PET, με μέγιστη τιμή $+1,05$ K. Οι τοπικές αυτές αυξήσεις δεν αναιρούν τη

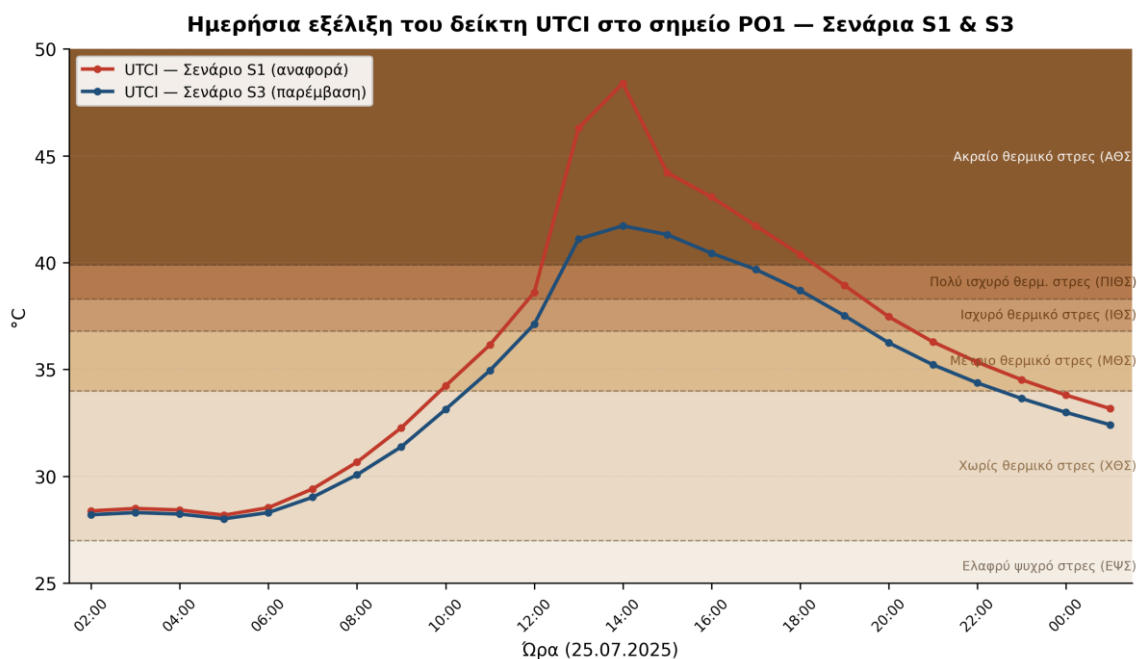
συνολική θετική απόκριση του S3, αλλά δείχνουν ότι η αποτελεσματικότητα της παρέμβασης στο παιδικό προφίλ είναι χωρικά ανομοιογενής και εξαρτάται από τη θέση, τη σκίαση και την ακτινοβολιακή έκθεση.

3.3.4 Χρονική σύγκριση και μεταβολή των δεικτών UTCI και PET στο PO1

Η χρονική σύγκριση στο σημείο PO1 πραγματοποιείται συμπληρωματικά μέσω των απόλυτων τιμών και των ωριαίων μεταβολών των βιοκλιματικών δεικτών. Η παράλληλη απεικόνιση των τιμών UTCI στα σενάρια S1 και S3 επιτρέπει την άμεση αναγνώριση της μετακίνησης μεταξύ των κατηγοριών της μεσογειακής κλίμακας θερμής περιόδου. Αντίστοιχα, οι μεταβολές ΔUTCI και ΔPET , οι οποίες υπολογίζονται ως $S3 - S1$, αποδίδουν το ακριβές μέγεθος της βελτίωσης ανά ώρα. Οι αρνητικές τιμές μεταβολής δηλώνουν μείωση της θερμικής επιβάρυνσης στο S3.

α) Συγκριτική ημερήσια εξέλιξη του UTCI στα S1 και S3

Το Σχήμα 3.3.4.1 παρουσιάζει την ημερήσια εξέλιξη του UTCI στο σημείο PO1 για τα σενάρια S1 και S3, σε συνδυασμό με τα κατώφλια της μεσογειακής κλίμακας θερμής περιόδου. Η απεικόνιση επιτρέπει την άμεση αξιολόγηση τόσο της έντασης του θερμικού στρες όσο και της χρονικής μετακίνησης των τιμών μεταξύ των επιμέρους κατηγοριών.



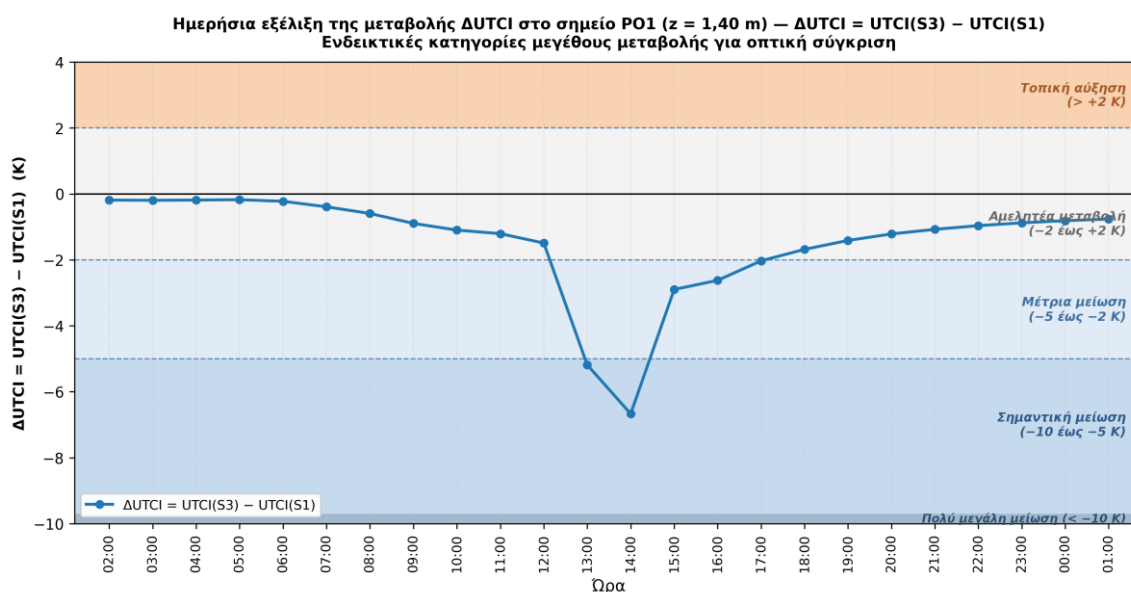
Σχήμα 3.3.4.1. Ημερήσια εξέλιξη του δείκτη UTCI στο σημείο PO1 για τα σενάρια αναφοράς S1 και συνδυαστικής παρέμβασης S3, στις 25.07.2025 και σε ύψος $z = 1,40$ m. Οι έγχρωμες ζώνες και οι οριζόντιες γραμμές αντιστοιχούν στις κατηγορίες θερμικού στρες της μεσογειακής κλίμακας UTCI

Πηγή: Ιδία επεξεργασία ωριαίων αποτελεσμάτων ENVI-met 5.8.0 / BIO-met.

Στο S3, η μέγιστη τιμή UTCI μειώνεται από 48,39 σε 41,72 °C και οι ώρες ακραίου θερμικού στρες από έξι σε τέσσερις. Το διάγραμμα αποτυπώνει επομένως όχι μόνο αριθμητική μείωση του UTCI, αλλά και χρονική μετατόπιση μέρους της ημερήσιας καμπύλης προς χαμηλότερες κατηγορίες θερμικού στρες.

β) Ημερήσια εξέλιξη της μεταβολής ΔUTCI

Η συγκριτική απεικόνιση των απόλυτων τιμών δείχνει σε ποιες κατηγορίες θερμικού στρες εντάσσονται τα δύο σενάρια, αλλά δεν αποδίδει άμεσα το ακριβές μέγεθος της μεταβολής ανά ώρα. Για τον λόγο αυτό, το Σχήμα 3.3.4.2 παρουσιάζει την ημερήσια εξέλιξη του ΔUTCI.



Σχήμα 3.3.4.2. Ημερήσια εξέλιξη της μεταβολής ΔUTCI = UTCI(S3) – UTCI(S1) στο σημείο PO1, στις 25.07.2025 και σε ύψος $z = 1,40$ m. Οι αρνητικές τιμές δηλώνουν μείωση του θερμικού στρες στο S3.

Πηγή: Ιδία επεξεργασία ωριαίων αποτελεσμάτων ENVI-met 5.8.0 / BIO-met.

Η μεταβολή ΔUTCI είναι αρνητική σε όλο το εξεταζόμενο 24ωρο, γεγονός που δείχνει ότι το S3 μειώνει τον δείκτη UTCI σε όλες τις ώρες στο σημείο PO1. Κατά τις νυχτερινές και πρώτες πρωινές ώρες η μείωση είναι περιορισμένη και παραμένει γενικά μικρότερη από 1 K. Η επίδραση ενισχύεται απότομα κατά τις μεσημβρινές ώρες, με μείωση 5,19 K στις

13:00 και μέγιστη μείωση 6,67 K στις 14:00. Στις 15:00 και 16:00 η μείωση παραμένει μέτρια, ενώ από τις 17:00 και μετά περιορίζεται σταδιακά. Οι χρωματικές ζώνες του σχήματος αποτελούν ενδεικτική οπτική ταξινόμηση του μεγέθους της μεταβολής και δεν συνιστούν κανονιστικά ή βιοκλιματικά κατώφλια.

Η μέγιστη μείωση του UTCI στις 14:00 συμπίπτει με την περίοδο αυξημένης ακτινοβολιακής επιβάρυνσης και είναι συνεπής με τη σημαντική μείωση της T_{mrt} που καταγράφηκε στο S3. Η αιχμή αυτή συμπίπτει με το μοναδικό χρονικό διάστημα στο οποίο καταγράφεται άμεση ηλιακή ακτινοβολία στο PO1 για το σενάριο S1 (13:00 και 14:00, με 993,6 και 975,3 W/m² αντίστοιχα, έναντι μηδενικών τιμών στις υπόλοιπες ώρες), γεγονός που εξηγεί τόσο το μέγεθος όσο και τη χρονική συγκέντρωση της μεταβολής. Παρότι η απόλυτη τιμή UTCI μειώνεται από 48,39 °C στο S1 σε 41,72 °C στο S3, και στα δύο σενάρια παραμένει πάνω από το κατώφλι των 39,9 °C της κατηγορίας «ακραίο θερμικό στρες». Επομένως, το αποτέλεσμα εκφράζει ουσιαστική μείωση της έντασης του θερμικού στρες, χωρίς αλλαγή κατηγορίας κατά την ώρα αιχμής.

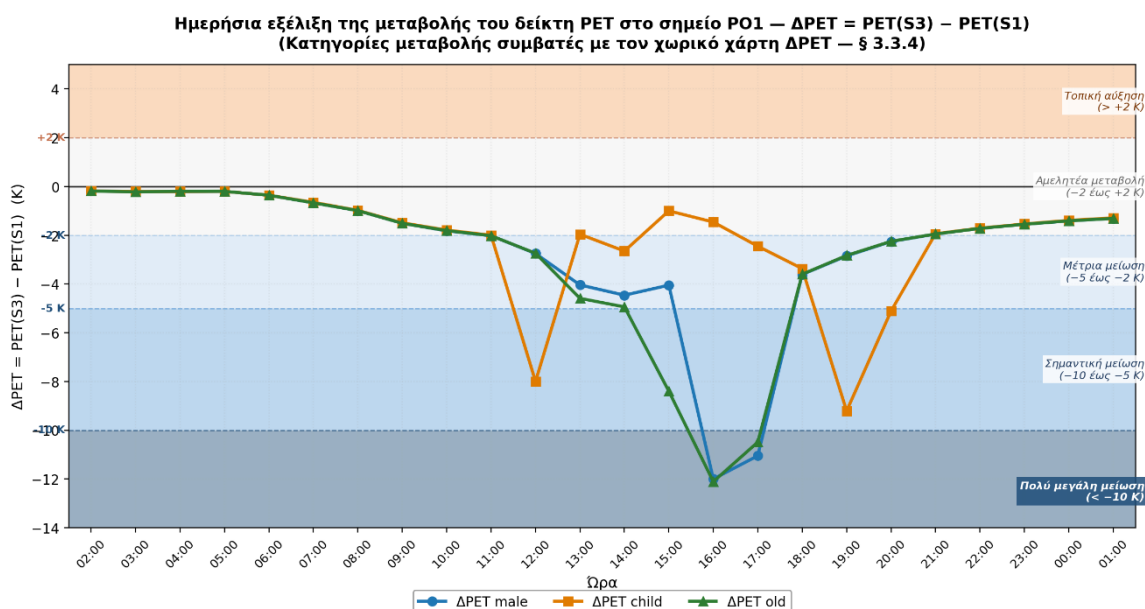
Η συνδυαστική ανάγνωση των απόλυτων τιμών UTCI, του ΔUTCI και του ΔPET δείχνει ότι το S3 μειώνει τόσο την ένταση και τη διάρκεια του γενικού θερμικού στρες όσο και την ανθρωποκεντρικά υπολογισμένη θερμική επιβάρυνση στο PO1. Το σημαντικότερο όφελος συγκεντρώνεται στις ώρες αυξημένης ακτινοβολιακής φόρτισης, ενώ κατά τις νυχτερινές και πρώτες πρωινές ώρες οι μεταβολές παραμένουν περιορισμένες.

Σε ημερήσια βάση, ωστόσο, οι ώρες «Ακραίου θερμικού στρες» μειώνονται από έξι στο S1 σε τέσσερις στο S3, όπως παρουσιάζεται στην Ενότητα 3.3.7.

γ) Ημερήσια εξέλιξη της μεταβολής ΔPET στο PO1 ανά προφίλ χρήστη

Η απότομη μείωση των τιμών PET μετά την περίοδο ηλιακής έκθεσης δεν ερμηνεύεται ως αποτέλεσμα αντίστοιχης απότομης πτώσης της θερμοκρασίας αέρα, αλλά κυρίως ως συνέπεια της ακτινοβολιακής αποφόρτισης του σημείου. Η χρονική σύμπτωση της μείωσης PET με τη μείωση της T_{mrt} και της Direct SW Radiation υποδηλώνει μετάβαση του σημείου από συνθήκες άμεσης ηλιακής έκθεσης σε συνθήκες σκίασης. Το γεγονός ότι η T_a μεταβάλλεται πολύ ηπιότερα ενισχύει την ερμηνεία ότι ο κύριος μηχανισμός της πτώσης PET είναι η μείωση της ακτινοβολιακής επιβάρυνσης.

Στο διάγραμμα υπολογίζεται η μεταβολή $\Delta PET = PET(S3) - PET(S1)$ στο σημείο PO1, για τα τρία προφίλ χρηστών. Οι αρνητικές τιμές δηλώνουν μείωση του PET, η οποία υποδηλώνει βελτίωση των συνθηκών θερμικής άνεσης και πιθανό περιορισμό της θερμικής καταπόνησης των χρηστών, σε σχέση με το σενάριο αναφοράς S1. Οι χρωματικές ζώνες αποδίδουν τις κατηγορίες μεταβολής που χρησιμοποιούνται και στους χωρικούς χάρτες ΔPET της Ενότητας 3.3.3.



Σχήμα 3.3.4.3. Ημερήσια εξέλιξη της μεταβολής $\Delta PET = PET(S3) - PET(S1)$ στο σημείο PO1 για τα προφίλ ενήλικα, ηλικιωμένου και παιδιού, στις 25.07.2025 και σε ύψος $z = 1,40$ m. Οι αρνητικές τιμές δηλώνουν μείωση του PET στο σενάριο S3.

Πηγή: Ιδία επεξεργασία αποτελεσμάτων ENVI-met 5.8.0 / BIO-met / Leonardo

Η χρονική εξέλιξη της ΔPET παρουσιάζει σαφή διαφοροποίηση τόσο κατά τη διάρκεια του 24ώρου όσο και μεταξύ των προφίλ χρήστη. Κατά τη νυχτερινή και πρώιμη πρωινή περίοδο, από τις 02:00 έως περίπου τις 08:00, οι μεταβολές παραμένουν γενικά μικρότερες από 1 K. Από τις πρωινές ώρες η επίδραση του S3 ενισχύεται. Στο παιδικό προφίλ καταγράφεται χαρακτηριστική μείωση, $\Delta PET = -8,00$ K, στις 12:00, ενώ στα προφίλ ενήλικα και ηλικιωμένου η μεγαλύτερη απογευματινή μείωση εμφανίζεται περίπου στις 16:00 και προσεγγίζει τα 12 K. Δεύτερη έντονη απογευματινή μεταβολή, $\Delta PET = -9,21$ K, εμφανίζεται στις 19:00–20:00, με ιδιαίτερα εμφανή απόκριση του παιδικού προφίλ.

Η χρονική συγκέντρωση των μεγαλύτερων μειώσεων είναι συμβατή με τη διαφορετική χρονική εξέλιξη της σκίασης και της ακτινοβολιακής φόρτισης μεταξύ S1 και S3. Το εύρημα δείχνει ότι η μείωση του PET στο PO1 συνδέεται κυρίως με τη μεταβολή της ακτινοβολιακής επιβάρυνσης και λιγότερο με τη μεταβολή της Ta. Οι διαφοροποιήσεις μεταξύ των προφίλ δεν προκύπτουν από διαφορετικά μικροκλιματικά πεδία, αλλά από τη διαφορετική απόκριση των παραμέτρων των προφίλ του BIO-met στις ίδιες περιβαλλοντικές εισόδους.

3.3.5 Χωρική και χρονική μεταβολή της θερμικής επιβάρυνσης στο PO2 μεταξύ S3 και S1

Εκτός από την ανάλυση στο επίπεδο πεζού, εξετάζεται συμπληρωματικά η μικροκλιματική συμπεριφορά στη στάθμη δώματος, σε ύψος περίπου 15 m από το επίπεδο αναφοράς του μοντέλου. Η ανάλυση πραγματοποιείται για τα δύο τελικά σενάρια S1 και S3 και αποσκοπεί στη διερεύνηση της συνολικής απόκρισης του συνδυαστικού σεναρίου S3 στη συγκεκριμένη κατακόρυφη στάθμη.

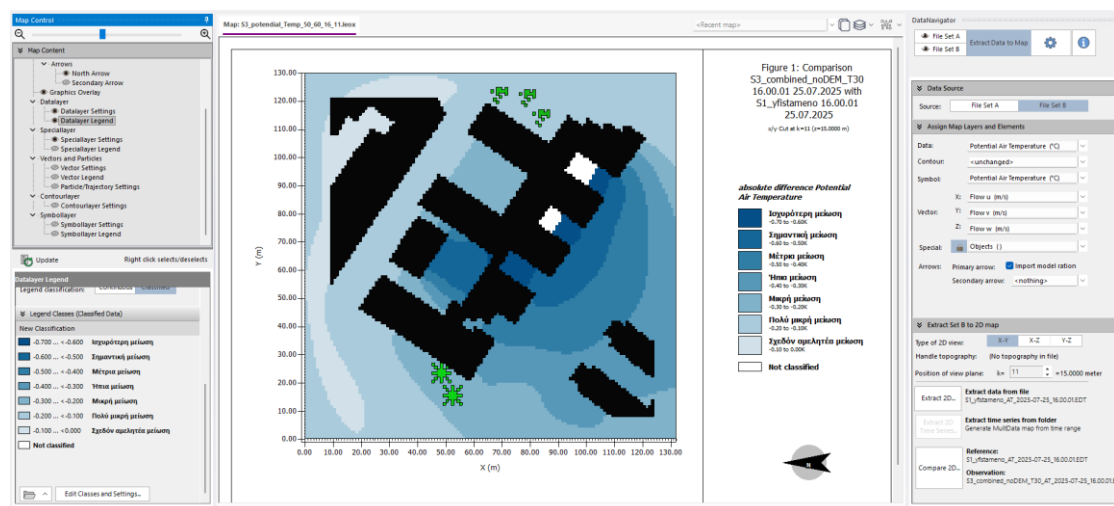
Η διερεύνηση στη στάθμη $z \approx 15$ m χρησιμοποιείται ως συμπληρωματική τεχνική αποτίμηση της μικροκλιματικής συμπεριφοράς του συγκροτήματος. Επειδή το S3 ενσωματώνει συνδυασμό παρεμβάσεων στη φύτευση, στη σκίαση, στα υλικά επιφανειών και στα δώματα, τα αποτελέσματα δεν επιτρέπουν την απομόνωση της επιμέρους συνεισφοράς του εκτατικού φυτεμένου δώματος.

Οι μεταβολές S3–S1 αποτυπώνουν την επίδραση του συνδυαστικού σεναρίου στη στάθμη δώματος, με αρνητικές τιμές να δηλώνουν μείωση και θετικές αύξηση. Οι μεταβολές αυτές ερμηνεύονται ως συνολικό αποτέλεσμα της διαμόρφωσης του συνδυαστικού σεναρίου και όχι ως επίδραση μίας μεμονωμένης παρέμβασης.

Η κατακόρυφη διερεύνηση λειτουργεί υποστηρικτικά προς την κύρια αξιολόγηση στο επίπεδο πεζού και αποτυπώνει τις συνθήκες θερμικής έκθεσης στη στάθμη δώματος. Δεν συνιστά, ωστόσο, πλήρη αξιολόγηση του δώματος ως βατού χώρου παραμονής, καθώς δεν εξετάζονται ζητήματα προσβασιμότητας, ασφάλειας, στατικής επάρκειας και λειτουργικής ένταξης.

α) Χωρική μεταβολή της Ta στο PO2 στις 16:00, στη στάθμη $z \approx 15$ m

Το παρακάτω σχήμα παρουσιάζει τη χωρική μεταβολή της δυνητικής θερμοκρασίας αέρα μεταξύ S3 και S1 στη στάθμη $z \approx 15$ m, κατά την κοινή ώρα χωρικής σύγκρισης των 16:00.



Σχήμα 3.3.5.1 Χωρική μεταβολή της δυνητικής θερμοκρασίας αέρα $\Delta T_a = T_a(S3) - T_a(S1)$ στη στάθμη δώματος, στις 25.07.2025 και ώρα 16:00, σε ύψος $z \approx 15$ m. Οι αρνητικές τιμές δηλώνουν μείωση της T_a στο συνδυαστικό σενάριο S3.

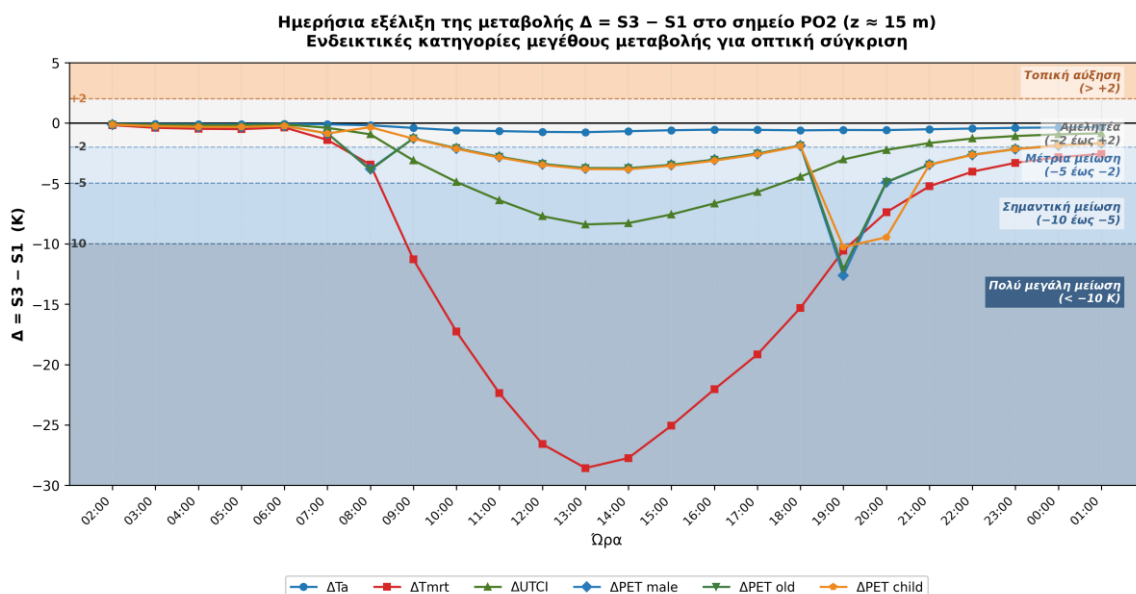
Πηγή: Ιδία επεξεργασία αποτελεσμάτων ENVI-met 5.8.0 / Leonardo.

Κατά την ώρα αναφοράς, η χωρική μεταβολή της δυνητικής θερμοκρασίας αέρα T_a είναι αρνητική σε ολόκληρο το απεικονιζόμενο πεδίο και κυμαίνεται από $-0,70$ έως $-0,08$ K. Η μεγαλύτερη μείωση εμφανίζεται τοπικά, ενώ στο μεγαλύτερο μέρος της στάθμης δώματος η μεταβολή παραμένει μικρή έως πολύ μικρή. Το αποτέλεσμα τεκμηριώνει ήπια και χωρικά διαφοροποιημένη μείωση της T_a στο σενάριο S3.

Η μεταβολή της T_a είναι σαφώς μικρότερη από τις αντίστοιχες μεταβολές της T_{mrt} και των βιοκλιματικών δεικτών. Επομένως, η μικροκλιματική απόκριση στη στάθμη δώματος δεν αξιολογείται αποκλειστικά από τη θερμοκρασία αέρα, αλλά απαιτεί συνδυαστική ανάγνωση με τις μεταβολές της T_{mrt} , του UTCI και του PET, οι οποίες παρουσιάζονται στη συνέχεια.

β) Χρονική εξέλιξη των μεταβολών (ΔT_a , ΔT_{mrt} , $\Delta UTCI$ και ΔPET) στο PO2

Η χρονική διάσταση της μεταβολής αποτυπώνεται στο Σχήμα 3.3.5.2, το οποίο παρουσιάζει την ημερήσια εξέλιξη των ΔT_a , ΔT_{mrt} και $\Delta UTCI$, καθώς και του ΔPET για τα τρία προφίλ χρηστών.



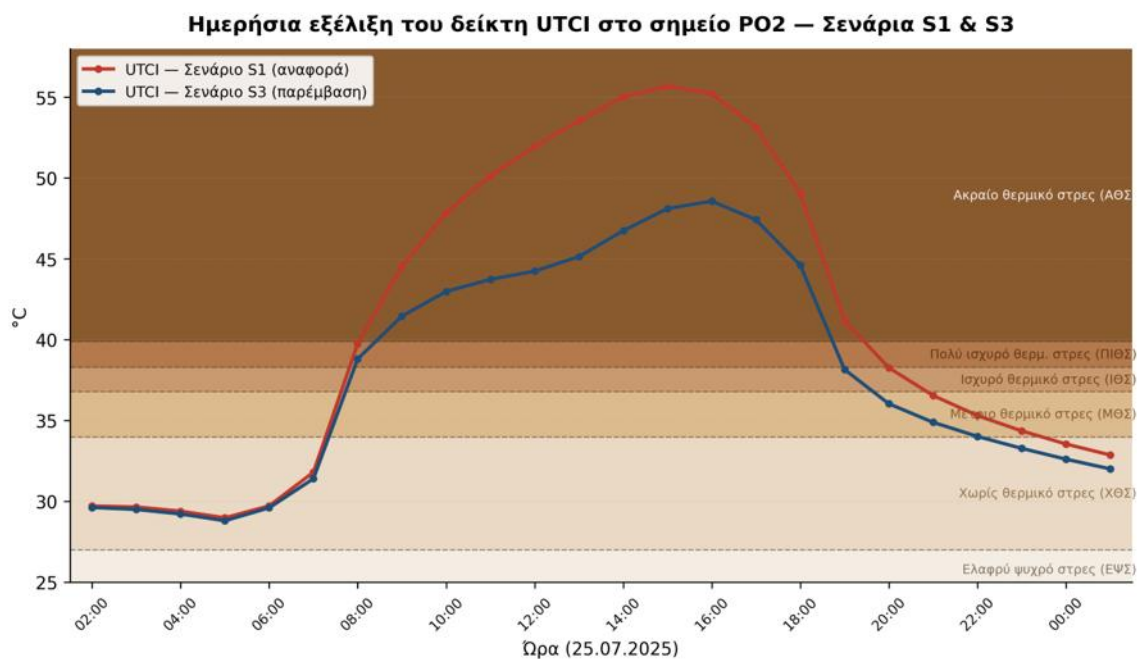
Σχήμα 3.3.5.2. Ημερήσια εξέλιξη των μεταβολών ΔTa , $\Delta Tmrt$, $\Delta UTCI$ και ΔPET για τα τρία προφίλ χρήστη στο σημείο PO2, μεταξύ των σεναρίων S3 και S1, στις 25.07.2025 και σε ύψος $z \approx 15$ m. Οι μεταβολές υπολογίζονται ως $\Delta = S3 - S1$ και εκφράζονται σε K· οι αρνητικές τιμές δηλώνουν μείωση. Πηγή: Ιδία επεξεργασία ωριαίων αποτελεσμάτων ENVI-met 5.8.0 / BIO-met.

Η χρονική εξέλιξη δείχνει ότι η μεγαλύτερη συνολική μεταβολή αφορά την $Tmrt$, η οποία μειώνεται έως και κατά $-28,57$ K στις 13:00 ($\Delta Tmrt = -28,57$ K στις 13:00). Την ίδια ώρα, ο $UTCI$ μειώνεται κατά $-8,40$ K ($\Delta UTCI = -8,40$ K στις 13:00), ενώ κατά το διάστημα 13:00–16:00 οι μειώσεις του PET για τα τρία προφίλ κυμαίνονται περίπου από $-3,0$ έως $-3,8$ K. Πρόσθετες και εντονότερες μειώσεις του PET καταγράφονται κατά την απογευματινή μετάβαση, με μέγιστες ωριαίες διαφορές στις 19:00 ίσες με $-12,61$ K για το προφίλ ενήλικα, $-12,11$ K για το προφίλ ηλικιωμένου και $-10,28$ K για το παιδικό προφίλ. Οι μεταβολές αυτές συμπίπτουν χρονικά με τη διαφοροποίηση των ακτινοβολιακών συνθηκών μεταξύ των δύο σεναρίων κατά τη μετάβαση προς τη σκίαση. Αντίθετα, η απόλυτη μεταβολή της Ta παραμένει μικρότερη από $0,8$ K σε όλο το εξεταζόμενο 24ωρο. Συνολικά, το διάγραμμα δείχνει ότι η συνολική απόκριση του S3 στη στάθμη δώματος εκφράζεται κυρίως μέσω της μείωσης της ακτινοβολιακής επιβάρυνσης και δευτερευόντως μέσω της μείωσης της θερμοκρασίας αέρα.

Οι χρωματικές ζώνες του σχήματος αποτελούν ενδεικτική οπτική ταξινόμηση του μεγέθους της μεταβολής και δεν συνιστούν κανονιστικά ή βιοκλιματικά κατώφλια. Οι καμπύλες ΔPET για τα προφίλ ενήλικα και ηλικιωμένου ταυτίζονται σχεδόν πλήρως σε

όλο το 24ωρο (διαφορές $< 0,05$ K) και δεν διακρίνονται οπτικά μεταξύ τους, ενώ το παιδικό προφίλ αποκλίνει στις 08:00 και κατά τη μετάβαση των 19:00–20:00.

Συγκριτική ημερήσια εξέλιξη του UTCI στα S1 και S3



Σχήμα 3.3.5.3. Ημερήσια εξέλιξη των μεταβολών UTCI στο σημείο PO2, μεταξύ των σεναρίων S3 και S1, στις 25.07.2025 και σε ύψος $z \approx 15$ m.

Πηγή: Ιδία επεξεργασία ωριαίων αποτελεσμάτων ENVI-met 5.8.0

γ) Συγκριτική αποτίμηση στην κοινή ώρα αναφοράς 16:00

Η ώρα 16:00 χρησιμοποιείται ως κοινή ώρα χωρικής σύγκρισης των σεναρίων S1 και S3, ώστε τα αποτελέσματα των χαρτών και των σημειακών τιμών να είναι άμεσα συγκρίσιμα. Ο Πίνακας 3.3.5.1 παρουσιάζει τις τιμές των μικροκλιματικών παραμέτρων και των βιοκλιματικών δεικτών στο PO2 κατά τη συγκεκριμένη ώρα.

Πίνακας 3.3.5.1. Συγκριτικές τιμές των T_a , T_{mrt} , UTCI και PET στο σημείο PO2 για τα σενάρια S1 και S3, στις 25.07.2025 και ώρα 16:00, σε ύψος $z \approx 15$ m. Η μεταβολή υπολογίζεται ως $\Delta = S3 - S1$.

Παράμετρος/δείκτης	S1 (°C)	S3 (°C)	Δ (K)
T_a	39,81	39,26	-0,55
T_{mrt}	95,17	73,12	-22,05
UTCI	55,23	48,57	-6,66
PET — ενήλικας	62,60	59,55	-3,05

Παράμετρος/δείκτης	S1 (°C)	S3 (°C)	Δ (K)
PET — ηλικιωμένος	63,41	60,38	-3,03
PET — παιδί	60,38	57,26	-3,12

Πηγή: Ιδία επεξεργασία αποτελεσμάτων ENVI-met 5.8.0 / BIO-met.

Στην κοινή ώρα αναφοράς των 16:00, η T_{mrt} μειώνεται κατά 22,05 K και ο UTCI κατά 6,66 K, ενώ η T_a μειώνεται κατά 0,55 K. Οι τιμές αυτές αποτελούν μεταβολές ίδιας ώρας, καθώς προκύπτουν από την άμεση σύγκριση S3–S1 στις 16:00. Δεν ταυτίζονται με τις διαφορές μεταξύ των τιμών αιχμής των δύο σεναρίων, οι οποίες παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.3.8.1 ως διαφορά τιμών αιχμής ($\Delta peak$). Οι μειώσεις του PET είναι παρόμοιες στα τρία προφίλ και κυμαίνονται από 3,03 έως 3,12 K. Η σύγκριση επιβεβαιώνει ότι το βασικό μικροκλιματικό όφελος του S3 στο PO2 εκφράζεται κυρίως μέσω της μείωσης της ακτινοβολιακής επιβάρυνσης και δευτερευόντως μέσω της μείωσης της θερμοκρασίας αέρα. Τα αποτελέσματα αφορούν το συνδυαστικό σενάριο S3 και δεν επιτρέπουν την απομόνωση της επιμέρους συνεισφοράς του εκτατικού φυτεμένου δώματος.

Οι τιμές αιχμής των δύο σεναρίων, οι οποίες δεν εμφανίζονται κατ' ανάγκη την ίδια ώρα, παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στον Πίνακα 3.3.8.1. Οι αντίστοιχες διαφορές αποδίδονται ως $\Delta peak$ και δεν αποτελούν ωριαίες μεταβολές κοινής χρονικής στιγμής.

Η λειτουργική αποτίμηση της στάθμης δώματος αναπτύσσεται στην Ενότητα 3.4.3.

3.3.6 Αποτελεσματικότητα της παρέμβασης για τις ευάλωτες ομάδες μέσω του δείκτη PET

Η μεταβολή του δείκτη PET υπολογίστηκε ως $\Delta PET = PET(S3) - PET(S1)$, ώστε να αποτυπωθεί η συνολική απόκριση του συνδυαστικού σεναρίου S3 σε σχέση με το σενάριο αναφοράς S1. Οι αρνητικές τιμές του ΔPET δηλώνουν μείωση της εκτιμώμενης θερμικής επιβάρυνσης στο S3, ενώ τιμές κοντά στο μηδέν αντιστοιχούν σε μικρή ή αμελητέα μεταβολή.

Καθώς τα τρία προφίλ αξιολογούνται με βάση τις ίδιες μικροκλιματικές εισροές σε κάθε ώρα και θέση, οι μεταξύ τους διαφοροποιήσεις στις τιμές PET προκύπτουν από την εφαρμογή των διαφορετικά παραμετροποιημένων προφίλ χρήστη στο BIO-met και από την αλληλεπίδρασή τους με τις μεταβαλλόμενες μικροκλιματικές συνθήκες.

Στο σημείο PO1 καταγράφεται μείωση του PET σχεδόν σε όλη τη διάρκεια της ημέρας και για τα τρία προφίλ. Η μεταβολή είναι περιορισμένη κατά τις πρώτες πρωινές ώρες, όταν οι τιμές ΔPET παραμένουν κοντά στο μηδέν, και εντείνεται από τις μεσημβρινές ώρες και μετά. Για τα προφίλ του ενήλικα και του ηλικιωμένου, η μεγαλύτερη μείωση καταγράφεται στις 16:00, με τιμές περίπου -12 K.

Για το παιδικό προφίλ, σημαντική μείωση καταγράφεται στις 19:00, με ΔPET περίπου $-9,2$ K. Η διαφορετική χρονική εξέλιξη δείχνει ότι η ίδια μεταβολή του μικροκλιματικού πεδίου δεν αποτυπώνεται με τον ίδιο τρόπο στα τρία παραμετροποιημένα προφίλ. Επομένως, το S3 οδηγεί σε μείωση του PET για όλα τα προφίλ, αλλά η ώρα και το μέγεθος της μεγαλύτερης καταγραφόμενης μείωσης διαφοροποιούνται μεταξύ τους. Η διαφοροποίηση αυτή δεν μπορεί, βάσει μόνο των αποτελεσμάτων PET, να αποδοθεί σε συγκεκριμένο φυσιολογικό μηχανισμό.

Οι τιμές ΔPET καταγράφουν χωρική και χρονική μείωση της εκτιμώμενης θερμικής επιβάρυνσης, χωρίς όμως να συνεπάγονται κατ' ανάγκη θερμικά άνετες τελικές συνθήκες. Για τον λόγο αυτό, η αποτελεσματικότητα του σεναρίου αξιολογείται με βάση τόσο τη μεταβολή ΔPET όσο και τις τελικές τιμές PET και τη διάρκεια παραμονής στις επιβαρυντικές θερμικές κατηγορίες.

Η μείωση του PET έχει ιδιαίτερη λειτουργική σημασία για την αξιολόγηση του παιδικού και του ηλικιωμένου προφίλ. Ωστόσο, το μέγεθος της ΔPET εκφράζει μεταβολή του δείκτη και δεν ισοδυναμεί άμεσα με ποσοτικοποιημένη φυσιολογική ωφέλεια ή με αποδεδειγμένη καταλληλότητα του χώρου για παραμονή. Η ευρύτερη ερμηνεία των διαφορών μεταξύ των προφίλ αναπτύσσεται στην Ενότητα 4.2.3.

Πίνακας 3.3.6.1. Μέγιστη μείωση του PET στο PO1 ανά προφίλ χρήστη, $\Delta PET = PET(S3) - PET(S1)$.

Προφίλ χρήστη	Ωρα μέγιστης μείωσης	Μέγιστη ΔPET	Ερμηνεία
Ενήλικος άνδρας	16:00	περίπου $-12,00$ K	Πολύ μεγάλη μείωση θερμικής επιβάρυνσης
Ηλικιωμένος	16:00	περίπου $-12,11$ K	Πολύ μεγάλη μείωση, κρίσιμη για εύαλτο προφίλ
Παιδί	19:00	περίπου $-9,22$ K	Μεγάλη απογευματινή μείωση λόγω διαφοροποιημένης θερμοφυσιολογικής απόκρισης

Προφίλ χρήστη	Ωρα μέγιστης μείωσης	Μέγιστη ΔΡΕΤ	Ερμηνεία
Παιδί	12:00	περίπου -8,00 K	Σημαντική μεσημβρινή μείωση

Πηγή: Ιδία επεξεργασία ωριαίων αποτελεσμάτων ENVI-met 5.8.0 / BIO-met / Leonardo για τα σενάρια S1 και S3.

Ο πίνακας συνοψίζει τις μέγιστες μειώσεις του δείκτη PET στο PO1 ανά ανθρωποκεντρικό προφίλ. Η μεγαλύτερη μείωση εμφανίζεται για τα προφίλ ενηλίκου και ηλικιωμένου στις 16:00, ενώ το παιδικό προφίλ παρουσιάζει ισχυρή αλλά χρονικά διαφοροποιημένη μείωση, κυρίως στις 12:00 και στις 19:00. Η διαφοροποίηση των μέγιστων μειώσεων PET δείχνει ότι η ίδια μικροκλιματική παρέμβαση δεν αποδίδει ταυτόσημη θερμοφυσιολογική απόκριση σε όλα τα προφίλ χρήστη.

Επομένως στις 19:00 το S3 μειώνει περισσότερο το PET του παιδιού, επειδή το S1 παραμένει πολύ επιβαρυνμένο, ενώ στο S3 το σημείο φαίνεται να αποφορτίζεται περισσότερο.

Η μεγαλύτερη μείωση του PET για το παιδικό προφίλ στις 19:00 υποδηλώνει ότι το σενάριο παρέμβασης δεν επιδρά μόνο κατά τις ώρες μέγιστης ηλιακής έκθεσης, αλλά και κατά την απογευματινή φάση θερμικής αποφόρτισης του χώρου. Η διαφορά αυτή πιθανόν συνδέεται με τη μείωση της ακτινοβολιακής επιβάρυνσης και της αποθηκευμένης θερμότητας στις επιφάνειες του σεναρίου S3, με αποτέλεσμα το σημείο να εμφανίζει ταχύτερη βελτίωση σε σχέση με το σενάριο S1.

Το S1 διατηρεί υψηλότερη θερμική επιβάρυνση κατά τις απογευματινές ώρες, ενώ στο S3 παρατηρείται ταχύτερη θερμική αποφόρτιση του σημείου, πιθανώς λόγω μειωμένης ακτινοβολιακής επιβάρυνσης και διαφοροποίησης της θερμικής συμπεριφοράς των επιφανειών.

Η διαφοροποίηση της χρονικής εξέλιξης του ΔΡΕΤ μεταξύ των προφίλ δεν αναιρεί τη συνολική αποτελεσματικότητα της παρέμβασης. Αντίθετα, αναδεικνύει ότι η ίδια μικροκλιματική μεταβολή μεταφράζεται σε διαφορετικό βαθμό θερμικής ανακούφισης ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του χρήστη. Για τον λόγο αυτό, η αξιολόγηση των παρεμβάσεων εξετάζεται χωριστά για ενήλικες, παιδιά και ηλικιωμένους.

Εξάλλου η διαφοροποίηση της χρονικής εξέλιξης του PET μεταξύ των τριών προφίλ χρηστών είναι μεθοδολογικά αναμενόμενη, καθώς ο PET βασίζεται στο ενεργειακό ισοζύγιο του ανθρώπινου σώματος και επηρεάζεται όχι μόνο από τις μικροκλιματικές παραμέτρους, αλλά και από τα ανθρωπομετρικά και βιοφυσικά χαρακτηριστικά του χρήστη. Στην παρούσα εργασία, οι διαφορές μεταξύ προφίλ ενήλικα, ηλικιωμένου και παιδιού ερμηνεύονται ως διαφορετική θερμοφυσιολογική απόκριση στις ίδιες μικροκλιματικές συνθήκες, υπό την προϋπόθεση ότι οι τιμές έχουν εξαχθεί από το ίδιο σημείο X/Y/Z, το ίδιο K-Level, τα ίδια σενάρια S1/S3 και τις ίδιες χρονικές στιγμές.

Το συνδυαστικό σενάριο S3 παρουσιάζει σαφή αποτελεσματικότητα στη μείωση του PET και της θερμικής επιβάρυνσης στο επιλεγμένο σημείο, με τη μεγαλύτερη βελτίωση να εντοπίζεται κατά τις απογευματινές ώρες. Η μείωση αυτή μπορεί να ερμηνευθεί ως ένδειξη περιορισμού της πιθανής θερμικής καταπόνησης των ευάλωτων χρηστών. Οι απόλυτες τιμές PET παραμένουν ωστόσο πάνω από το κατώφλι των 39,1 °C (Pantavou et al., 2014) κατά τις ώρες αιχμής.

3.3.7 Ποσοτική μεταβολή κατηγοριών θερμικού στρες

Η ποσοτική αποτίμηση της επίδρασης του συνδυαστικού σεναρίου S3 βασίστηκε στη σύγκριση των τιμών PET και UTCI μεταξύ των σεναρίων S1 και S3, σύμφωνα με τη σχέση $\Delta = S3 - S1$. Οι αρνητικές τιμές δηλώνουν μείωση της υπολογιζόμενης θερμικής επιβάρυνσης, ενώ οι θετικές τιμές δηλώνουν τοπική αύξηση. Η ερμηνεία πραγματοποιείται χωριστά για τους δύο δείκτες, καθώς ο PET ταξινομείται σε κατηγορίες θερμικής αίσθησης, ενώ ο UTCI σε κατηγορίες θερμικού στρες.

Στο σημείο PO1, η μεγαλύτερη μείωση του UTCI καταγράφεται στις 14:00 και ανέρχεται σε περίπου -6,7 K. Η μεταβολή αυτή αποτυπώνει ουσιαστική αποκλιμάκωση της θερμικής επιβάρυνσης κατά την ώρα αιχμής. Αντίστοιχα, οι μεγαλύτερες μειώσεις του PET στο PO1 εμφανίζονται κατά τις απογευματινές ώρες, κυρίως στο διάστημα 16:00–17:00, και προσεγγίζουν τα -12 K, ανάλογα με το εξεταζόμενο προφίλ χρήστη. Οι μεταβολές των προφίλ ενηλίκου και ηλικιωμένου είναι σχεδόν όμοιες, ενώ το παιδικό προφίλ παρουσιάζει διαφορετική χρονική απόκριση.

Η αριθμητική μείωση των δεικτών δεν συνεπάγεται αυτομάτως μετατόπιση σε ηπιότερη κατηγορία. Η αλλαγή κατηγορίας προκύπτει μόνο όταν οι απόλυτες τιμές των S1 και S3

βρίσκονται εκατέρωθεν ενός ορίου της αντίστοιχης κλίμακας ταξινόμησης. Επομένως, για τον PET εξετάζεται πιθανή μετάβαση σε ηπιότερη κατηγορία θερμικής αίσθησης, ενώ για τον UTCI σε ηπιότερη κατηγορία θερμικού στρες.

Η χωρική ανάλυση δείχνει ότι οι μεγαλύτερες μειώσεις συγκεντρώνονται κυρίως στις ζώνες άμεσης παρέμβασης, όπου η πρόσθετη σκίαση και η βλάστηση περιορίζουν την ακτινοβολιακή έκθεση. Σε περιοχές χωρίς άμεση σκίαση ή με περιορισμένη επίδραση των παρεμβάσεων, οι μεταβολές είναι μικρότερες ή σχεδόν μηδενικές. Σε περιορισμένες θέσεις καταγράφονται μικρές τοπικές αυξήσεις του PET. Η μέγιστη τοπική αύξηση στο σύνολο των εξεταζόμενων προφίλ ανέρχεται περίπου σε +1,73 K και αφορά το προφίλ ενηλίκου, ενώ για το προφίλ ηλικιωμένου η αντίστοιχη μέγιστη τιμή είναι +1,70 K. Οι αυξήσεις αυτές αποτελούν τοπικές διαφοροποιήσεις και δεν αναιρούν τη συνολική τάση μείωσης στις άμεσα επηρεαζόμενες ζώνες.

Η μετάβαση από το S1 στο S3 δεν καταργεί τις υψηλές κατηγορίες θερμικής επιβάρυνσης κατά τις ώρες αιχμής, αλλά μειώνει την ένταση και, σε ορισμένες περιπτώσεις, τη διάρκεια της έκθεσης. Το συνδυαστικό σενάριο δημιουργεί τοπικές ζώνες χαμηλότερων τιμών PET και UTCI και μπορεί, όπου υπερβαίνονται τα αντίστοιχα κατώφλια, να οδηγήσει σε ηπιότερη κατηγορία θερμικής αίσθησης ή θερμικού στρες.

Πίνακας 3.3.7.1 Σύνοψη των μεγαλύτερων μεταβολών των δεικτών UTCI και PET μεταξύ των σεναρίων S3 και S1 στο σημείο PO1 και στο χωρικό πεδίο της στάθμης πεζού.

Δείκτης / θέση	Μέγιστη μεταβολή S3-S1	Ωρα	Ερμηνεία
UTCI στο PO1	περίπου -6,7 K	14:00	Σημαντική μείωση γενικής θερμικής καταπόνησης
PET στο PO1	έως περίπου -12 K	16:00-17:00	Ισχυρή μείωση ανθρωποκεντρικής θερμικής επιβάρυνσης
PET, τοπική δυσμενής μεταβολή	έως +1,73 K	τοπικά	Οριακή τοπική επιδείνωση, όχι γενική αποτυχία
PO2, S1 τιμές αιχμής UTCI	περίπου 55,7 °C	15:00	Ακραία θερμική επιβάρυνση στη στάθμη δώματος
PO2, S1 τιμές αιχμής PET ηλικιωμένου	περίπου 63,7 °C	15:00	Πολύ υψηλή / Ακραίο θερμικό στρες καταπόνηση για ευάλωτο προφίλ

Πηγή: Ιδία επεξεργασία ωριαίων αποτελεσμάτων από το ENVI-met 5.8.0 και το BIO-met, με χρήση του Leonardo για την εξαγωγή και απεικόνιση των δεδομένων.

Σημείωση: Η τιμή +1,73 K αφορά τη μέγιστη τοπική αύξηση του PET για το προφίλ ενηλίκου. Οι μεταβολές του PET διαφοροποιούνται ανά προφίλ χρήστη.

Τα στοιχεία για PO2 είναι χρήσιμα γιατί δείχνουν ότι στη στάθμη δώματος το S1 είχε πολύ υψηλές τιμές: UTCI περίπου 55,7 °C και PET έως περίπου 63,7 °C για ηλικιωμένο προφίλ.

Πίνακας 3.3.7.2. Διάρκεια υπέρβασης του ορίου «Ακραίου θερμικού στρες» βάσει UTCI (>39,9 °C) στα σημεία PO1 και PO2 για τα σενάρια S1 και S3.

Σημείο	UTCI extreme S1 >39,9 °C	UTCI extreme S3 >39,9 °C	Μεταβολή
PO1	6 ώρες	4 ώρες	-2 ώρες
PO2	11 ώρες	10 ώρες	-1 ώρα

Πηγή: Ιδία επεξεργασία ωριαίων αποτελεσμάτων από το ENVI-met 5.8.0 και το BIO-met.

Ο Πίνακας δείχνει ότι το S3 μειώνει όχι μόνο τις τιμές αιχμής, αλλά και τη διάρκεια υπέρβασης του ορίου του ακραίου θερμικού στρες. Η μείωση είναι εντονότερη στο PO1, όπου η διάρκεια υπέρβασης περιορίζεται από έξι σε τέσσερις ώρες. Στο PO2 η έκθεση παραμένει εκτεταμένη, με μείωση από έντεκα σε δέκα ώρες, λόγω της υπερυψωμένης και ακτινοβολιακά εκτεθειμένης θέσης. Συνεπώς, η παρέμβαση εμφανίζει μεγαλύτερη χρονική αποτελεσματικότητα στη στάθμη πεζού, χωρίς να εξαλείφει τις δυσμενείς συνθήκες στη στάθμη δώματος

3.3.8 Συγκεντρωτική αποτίμηση των τιμών αιχμής

Το συνδυαστικό σενάριο S3 δεν επιτρέπει την ποσοτική απομόνωση της συνεισφοράς κάθε επιμέρους παρέμβασης, καθώς οι τροποποιήσεις των υλικών επιφανειών, η πρόσθετη βλάστηση, τα στοιχεία σκίασης και οι παρεμβάσεις στα δώματα εφαρμόζονται συνδυαστικά. Ωστόσο, η σύγκρισή του με το σενάριο αναφοράς S1 δείχνει ότι η σημαντικότερη μεταβολή αφορά τον περιορισμό της ακτινοβολιακής επιβάρυνσης, ο οποίος αποτυπώνεται κυρίως στη μείωση της T_{mrt} και, κατ' επέκταση, στις τιμές των δεικτών PET και UTCI. Αντίθετα, η μεταβολή της T_a παραμένει περιορισμένη και δεν επαρκεί μόνη της για την ερμηνεία της μείωσης της θερμικής επιβάρυνσης.

Οι χάρτες άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας αποτυπώνουν τοπικές και όχι ομοιόμορφες ζώνες μείωσης της ακτινοβολιακής έκθεσης, κυρίως στις περιοχές ενισχυμένης σκίασης και

βλάστησης. Επομένως, η αποτελεσματικότητα του σεναρίου πρέπει να αξιολογείται χωρικά, σε συνάρτηση με τις θέσεις στις οποίες περιορίζεται η έκθεση των χρηστών.

Βάσει της μεσογειακά προσαρμοσμένης κλίμακας ταξινόμησης του UTCI για τη θερμική περίοδο, οι τιμές αιχμής του S3 εξακολουθούν να υπερβαίνουν το όριο των 39,9 °C και να εντάσσονται στην κατηγορία «ακραίο θερμικό στρες». Το S3 μειώνει, ωστόσο, την ένταση και τη διάρκεια της θερμικής επιβάρυνσης, χωρίς να εξαλείφει τις δυσμενείς συνθήκες κατά τις ώρες αιχμής.

Το S3 αξιολογείται ως δυνητικά εφαρμόσιμο σχεδιαστικό σενάριο μετριασμού της θερμικής επιβάρυνσης, υπό την προϋπόθεση λειτουργικής αναδιοργάνωσης και ανάκτησης μέρους των αρχικά ακάλυπτων υπαίθριων χώρων. Δεν αποτελεί κατασκευαστικά ώριμη μελέτη εφαρμογής, αλλά συγκριτικό σενάριο μέσω του οποίου διερευνάται το μικροκλιματικό όφελος από τον συνδυασμό τροποποιήσεων των υλικών επιφανειών, πρόσθετης βλάστησης, στοιχείων σκίασης και παρεμβάσεων στα δώματα.

Η αριθμητική τεκμηρίωση της σύγκρισης συνοψίζεται στις τιμές αιχμής των μικροκλιματικών παραμέτρων και των βιοκλιματικών δεικτών στα σημεία PO1 και PO2. Οι διαφορές μεταξύ των αιχμών των δύο σεναρίων αποδίδονται ως Δpeak. Επειδή οι αιχμές του S1 και του S3 δεν εμφανίζονται πάντοτε την ίδια ώρα, οι τιμές Δpeak δεν ταυτίζονται κατ' ανάγκην με τις ωριαίες μεταβολές μιας κοινής χρονικής στιγμής.

Πίνακας 3.3.8.1. Συγκεντρωτικές τιμές αιχμής των Ta, Tmrt, UTCI και PET στα σημεία PO1 και PO2 για τα σενάρια S1 και S3, στις 25.07.2025, σε ύψος z = 1,40 m για το PO1 και z ≈ 15 m για το PO2. Οι διαφορές στις τιμές αιχμών (Δpeak) υπολογίζονται ως S3peak – S1peak.

Σημείο	Δείκτης/Παράμετρος	S1 peak	Ώρα S1	S3 peak	Ώρα S3	Δpeak= S3peak – S1peak (K)
PO1	Ta	40,20 °C	15:00	39,31 °C	15:00	-0,89 K
PO1	Tmrt	71,27 °C	14:00	48,44 °C	13:00	-22,83 K
PO1	UTCI	48,39 °C	14:00	41,72 °C	14:00	-6,67 K
PO1	PET ενήλικα	59,48 °C	14:00	55,02 °C	14:00	-4,46 K

PO1	PET ηλικιωμένου	60,31 °C	14:00	55,37 °C	14:00	-4,94 K
PO1	PET παιδιού	57,20 °C	14:00	54,55 °C	14:00	-2,65 K
PO2	Ta	39,81 °C	16:00	39,26 °C	16:00	-0,55 K
PO2	Tmrt	97,63 °C	15:00	73,12 °C	16:00	-24,51 K
PO2	UTCI	55,68 °C	15:00	48,57 °C	16:00	-7,11 K
PO2	PET ενήλικα	62,89 °C	15:00	59,55 °C	16:00	-3,34 K
PO2	PET ηλικιωμένου	63,70 °C	15:00	60,38 °C	16:00	-3,32 K
PO2	PET παιδιού	60,67 °C	15:00	57,26 °C	16:00	-3,41 K

Πηγή: Ιδία επεξεργασία ωριαίων αποτελεσμάτων από το ENVI-met 5.8.0 και το BIO-met, με χρήση του Leonardo για την εξαγωγή και απεικόνιση των δεδομένων.

Σημείωση: Το Δpeak εκφράζει τη διαφορά μεταξύ των τιμών αιχμής των δύο σεναρίων. Όταν οι αιχμές του S1 και του S3 εμφανίζονται σε διαφορετικές ώρες, το Δpeak δεν αποτελεί μεταβολή της ίδιας χρονικής στιγμής. Όταν οι ώρες αιχμής συμπίπτουν, το Δpeak ισούται αριθμητικά με την ωριαία μεταβολή $\Delta(t)$ της συγκεκριμένης ώρας.

Σε όρους Δpeak, οι μεγαλύτερες απόλυτες διαφορές καταγράφονται στην Tmrt, με -22,83 K στο PO1 και -24,51 K στο PO2. Για τον UTCI, οι αντίστοιχες διαφορές είναι -6,67 K στο PO1 και -7,11 K στο PO2. Οι τιμές Δpeak του PET κυμαίνονται από -2,65 έως -4,94 K στα δύο σημεία και στα τρία εξεταζόμενα προφίλ, ενώ για την Ta περιορίζονται σε -0,89 K στο PO1 και -0,55 K στο PO2.

Στο PO2, οι τιμές Δpeak = -24,51 K για την Tmrt και Δpeak = -7,11 K για τον UTCI προκύπτουν από αιχμές που εμφανίζονται σε διαφορετικές ώρες: στις 15:00 για το S1 και στις 16:00 για το S3. Επομένως, δεν ερμηνεύονται ως μέγιστες ωριαίες μειώσεις κοινής χρονικής στιγμής. Κατά την κοινή ώρα αναφοράς των 16:00, οι αντίστοιχες μεταβολές στο PO2 είναι $\Delta Tmrt = -22,05$ K και $\Delta UTCI = -6,66$ K.

Οι διαφορές των τιμών αιχμής Δpeak, οι ωριαίες μεταβολές ίδιας ώρας Δ(t) και τα χωρικά ελάχιστα και μέγιστα των χαρτών αποτελούν διαφορετικά μεγέθη. Χρησιμοποιούνται συμπληρωματικά για την αποτίμηση της χρονικής και χωρικής απόκρισης του S3, αλλά δεν πρέπει να συγκρίνονται ως ισοδύναμα.

Παρά τη μείωση των τιμών αιχμής, οι μέγιστες τιμές του UTCI στο S3 εξακολουθούν να υπερβαίνουν το κατώφλι των 39,9 °C. Η μείωση των τιμών αιχμής, σε συνδυασμό με τη μείωση της διάρκειας υπέρβασης του ορίου του ακραίου θερμικού στρες που παρουσιάζεται στην Ενότητα 3.3.7, τεκμηριώνει μετρήσιμη αλλά περιορισμένη μικροκλιματική βελτίωση, χωρίς εξασφάλιση συνθηκών θερμικής άνεσης κατά τις ώρες αιχμής.

3.4 Σύνθεση αποτελεσμάτων

Η ενότητα αυτή συνθέτει τα βασικά ευρήματα της χωρικής και χρονικής ανάλυσης, με στόχο τη λειτουργική και σχεδιαστική αξιολόγηση του υπαίθριου νοσοκομειακού χώρου. Η σύνθεση δεν επαναλαμβάνει αναλυτικά τα αριθμητικά αποτελέσματα των προηγούμενων ενότητων, αλλά εστιάζει στη διάρκεια έκθεσης των διαφορετικών προφίλ χρηστών στις κατηγορίες της μεσογειακής κλίμακας PET, στη λειτουργική αποτίμηση της στάθμης δώματος και στη χωρική ιεράρχηση των ζωνών θερμικής προστασίας. Η διάρκεια έκθεσης εκφράζεται σε ώρες ανά κατηγορία PET και δεν ερμηνεύεται ως άμεσο όριο ασφαλούς ή ανεκτής παραμονής, καθώς η εργασία δεν υπολογίζει εξατομικευμένο χρόνο ασφαλούς έκθεσης.

3.4.1 Ποιοτική λειτουργική ερμηνεία των κατηγοριών PET

Όπως περιγράφηκε στην Ενότητα 2.8.2, η χρονική διάσταση της θερμικής επιβάρυνσης ποσοτικοποιείται μέσω του αριθμού των ωρών ανά κατηγορία της μεσογειακής κλίμακας PET και όχι μέσω συγκεκριμένων χρονικών ορίων παραμονής. Στην παρούσα ενότητα, οι κατηγορίες PET αξιοποιούνται αποκλειστικά για την ποιοτική και συγκριτική αποτίμηση της σχετικής λειτουργικής καταλληλότητας του υπαίθριου χώρου. Η αποτίμηση αυτή δεν αποτελεί ιατρικό, κλινικό ή κανονιστικό όριο.

Πίνακας 3.4.1.1 Ποιοτική αντιστοίχιση των κατηγοριών της μεσογειακής κλίμακας PET με τη σχετική λειτουργική καταλληλότητα του υπαίθριου χώρου. Η αντιστοίχιση χρησιμοποιείται αποκλειστικά για

τη συγκριτική ερμηνεία των αποτελεσμάτων και δεν αποτελεί ιατρικό, κλινικό ή κανονιστικό όριο. Η ποσοτική διάρκεια έκθεσης αποδίδεται μέσω του αριθμού ωρών ανά κατηγορία PET στην Ενότητα 3.4.2.

Κατηγορία PET κατά Pantavou et al. (2014)	Εύρος PET	Ποιοτική λειτουργική ερμηνεία
Ελαφρώς θερμή	$23,8 < PET \leq 31,2 \text{ }^{\circ}\text{C}$	Σχετικά ευνοϊκότερες συνθήκες σε σύγκριση με τις υψηλότερες κατηγορίες, με συνεκτίμηση της διάρκειας έκθεσης και των χαρακτηριστικών του χρήστη
Θερμή	$31,2 < PET \leq 39,1 \text{ }^{\circ}\text{C}$	Αυξημένη θερμική επιβάρυνση και περιορισμένη σχετική καταλληλότητα του χώρου, η παρουσία και η άμεση προσβασιμότητα σκιασμένων ή θερμικά προστατευμένων ζωνών αποκτά αυξημένη λειτουργική σημασία.
Πολύ θερμή	$PET > 39,1 \text{ }^{\circ}\text{C}$	Πολύ υψηλή θερμική επιβάρυνση και πολύ περιορισμένη σχετική καταλληλότητα του χώρου, ιδιαίτερα για χρήστες με αυξημένη θερμική ευαλωτότητα

Πηγή: Ιδία επεξεργασία, κατηγορίες PET κατά Pantavou et al. (2014).

Τα όρια των κατηγοριών PET εφαρμόζονται ενιαία στα τρία εξεταζόμενα προφίλ. Η διαφοροποίηση μεταξύ ενήλικα, ηλικιωμένου και παιδιού δεν προκύπτει από διαφορετικές κλίμακες ή χρονικά όρια, αλλά από τις αντίστοιχες υπολογισμένες τιμές PET και από τον αριθμό των ωρών κατά τις οποίες κάθε προφίλ εμπίπτει σε κάθε κατηγορία.

Η λειτουργική αποτίμηση αφορά τη συγκριτική ανάγνωση των αποτελεσμάτων της εξεταζόμενης ημέρας στα σημεία PO1 και PO2 και δεν αποτελεί κανονιστικό πρόγραμμα επιτρεπόμενης παραμονής.

Η ανώτερη κατηγορία της μεσογειακής κλίμακας PET περιλαμβάνει όλες τις τιμές πάνω από $39,1 \text{ }^{\circ}\text{C}$ και, συνεπώς, δεν διαφοροποιεί εσωτερικά τιμές διαφορετικής έντασης, όπως 40 και $60 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Για τον λόγο αυτό, η κατηγορική ταξινόμηση συμπληρώνεται από τις απόλυτες τιμές PET, τη μεταβολή ΔPET και τον αριθμό των ωρών ανά κατηγορία.

3.4.2 Χρονική κατανομή των ωριαίων τιμών PET στα σενάρια S1 και S3

Με εφαρμογή της μεθόδου που περιγράφηκε στην Ενότητα 2.8.2, οι ωριαίες τιμές PET των σεναρίων S1 και S3 ταξινομήθηκαν στις κατηγορίες της μεσογειακής κλίμακας των Pantavou et al. (2014), σύμφωνα με τα όρια του Πίνακα 2.8.1.1. Για κάθε προφίλ χρήστη και σημείο αναφοράς υπολογίστηκε ο αριθμός των ωρών που αντιστοιχεί στις κατηγορίες «ελαφρώς θερμή», «θερμή» και «πολύ θερμή». Η ανάλυση επιτρέπει τη σύγκριση της χρονικής διάρκειας της θερμικής επιβάρυνσης μεταξύ των δύο σεναρίων.

Σε όλα τα εξεταζόμενα προφίλ, σημεία και σενάρια, οι 24 ωριαίες τιμές PET είναι υψηλότερες από 23,8 °C. Συνεπώς, οι τρεις κατηγορίες που παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.4.2.1 καλύπτουν το σύνολο του εξεταζόμενου 24ώρου.

Πίνακας 3.4.2.1. Αριθμός ωρών ανά κατηγορία της μεσογειακής κλίμακας PET για τα προφίλ ενήλικα, ηλικιωμένου και παιδιού στα σημεία PO1 και PO2, στα σενάρια S1 και S3, για την 25η Ιουλίου 2025.

Θέση	Σενάριο	Προφίλ	Ελαφρώς θερμή: 23,8 < PET ≤ 31,2 °C	Θερμή: 31,2 < PET ≤ 39,1 °C	Πολύ θερμή: PET > 39,1 °C	Σύνολο
PO1	S1	Ενήλικας	6	8	10	24
PO1	S1	Ηλικιωμένος	5	8	11	24
PO1	S1	Παιδί	0	11	13	24
PO1	S3	Ενήλικας	6	10	8	24
PO1	S3	Ηλικιωμένος	6	10	8	24
PO1	S3	Παιδί	1	12	11	24
PO2	S1	Ενήλικας	5	5	14	24
PO2	S1	Ηλικιωμένος	5	5	14	24
PO2	S1	Παιδί	0	9	15	24
PO2	S3	Ενήλικας	5	7	12	24
PO2	S3	Ηλικιωμένος	5	7	12	24
PO2	S3	Παιδί	1	10	13	24

Πηγή: Ιδία επεξεργασία των ωριαίων αποτελεσμάτων PET του BIO-met για τα σημεία PO1 και PO2 στα σενάρια S1 και S3, με ταξινόμηση βάσει της μεσογειακής κλίμακας των Pantavou et al. (2014).

Στο S3 μειώνεται ο αριθμός των ωρών στην κατηγορία “πολύ θερμή” για όλα τα προφίλ και στα δύο σημεία αναφοράς. Στο PO1, οι ώρες με PET >39,1 °C μειώνονται από 10 σε 8 για το προφίλ ενήλικα, από 11 σε 8 για το προφίλ ηλικιωμένου και από 13 σε 11 για το παιδικό προφίλ. Το μεγαλύτερο χρονικό όφελος στο συγκεκριμένο σημείο καταγράφεται

στο προφίλ ηλικιωμένου, με μείωση κατά τρεις ώρες, η οποία αντιστοιχεί σε ποσοστό περίπου 27%.

Στο PO2, το S3 επιφέρει μείωση κατά δύο ώρες στην κατηγορία «πολύ θερμή» και στα τρία προφίλ. Ειδικότερα, η διάρκεια της μειώνεται από 14 σε 12 ώρες για τα προφίλ ενήλικα και ηλικιωμένου και από 15 σε 13 ώρες για το παιδικό προφίλ. Το αποτέλεσμα τεκμηριώνει μετρήσιμη χρονική βελτίωση και στη στάθμη δώματος, όπου οι συνθήκες παραμένουν περισσότερο επιβαρυνμένες σε σύγκριση με το PO1.

Σε όλα τα εξεταζόμενα σημεία και σενάρια, το παιδικό προφίλ συγκεντρώνει περισσότερες ώρες στην κατηγορία «πολύ θερμή» και λιγότερες ώρες στην κατηγορία «ελαφρώς θερμή» σε σύγκριση με τα άλλα δύο προφίλ. Η διαφοροποίηση αυτή αποτυπώνει τη διαφορετική ανθρωποκεντρική απόκριση του συγκεκριμένου προφίλ στα ίδια μικροκλιματικά πεδία και δεν προκύπτει από την εφαρμογή διαφορετικών κατηγοριών ή χρονικών ορίων παραμονής.

Η χρονική κατανομή δείχνει ότι το S3 μετατοπίζει μέρος του 24ώρου από την κατηγορία “πολύ θερμή” προς χαμηλότερες κατηγορίες PET. Ο Πίνακας 3.4.2.1 τεκμηριώνει τη μείωση της διάρκειας της υψηλότερης κατηγορίας PET σε όλα τα προφίλ και στα δύο σημεία αναφοράς, με το μεγαλύτερο χρονικό όφελος να φτάνει τις τρεις ώρες, ή περίπου 27%, για το προφίλ ηλικιωμένου στο PO1. Σε συνδυασμό με τις απόλυτες τιμές PET και τις μεταβολές ΔPET που παρουσιάστηκαν στις προηγούμενες ενότητες, τα αποτελέσματα δείχνουν ότι το S3 περιορίζει τη διάρκεια και, τοπικά, την ένταση της θερμικής επιβάρυνσης. Η διαφοροποίηση των αποτελεσμάτων μεταξύ PO1 και PO2 εξετάζεται ειδικότερα στην Ενότητα 3.4.3.

3.4.3 Λειτουργική αποτίμηση της στάθμης PO2

Η χρονική ανάλυση της προηγούμενης ενότητας ανέδειξε μετρήσιμη βελτίωση της θερμικής επιβάρυνσης στη στάθμη δώματος υπό το συνδυαστικό σενάριο S3. Ειδικότερα, στο PO2 ο αριθμός των ωρών στην κατηγορία «πολύ θερμή» μειώνεται από 14 σε 12 ώρες για τα προφίλ ενήλικα και ηλικιωμένου και από 15 σε 13 ώρες για το παιδικό προφίλ. Η μείωση κατά δύο ώρες σε όλα τα προφίλ τεκμηριώνει τη θετική επίδραση των συνδυαστικών παρεμβάσεων στη χρονική διάρκεια της υψηλής θερμικής επιβάρυνσης.

Η λειτουργική σημασία της βελτίωσης ενισχύεται από τα αποτελέσματα της Ενότητας 3.3.5, σύμφωνα με τα οποία η μεταβολή της T_a παραμένει περιορισμένη, ενώ οι σημαντικότερες μειώσεις καταγράφονται στην T_{mrt} και στον UTCI. Το εύρημα δείχνει ότι το βασικό όφελος του S3 στη στάθμη δώματος είναι κυρίως ακτινοβολιακό. Επομένως, οι παρεμβάσεις περιορίζουν ουσιαστικά την ακτινοβολιακή φόρτιση και τη βιοκλιματική επιβάρυνση, χωρίς η αποτελεσματικότητά τους να εξαρτάται από αντίστοιχα μεγάλη μείωση της θερμοκρασίας αέρα.

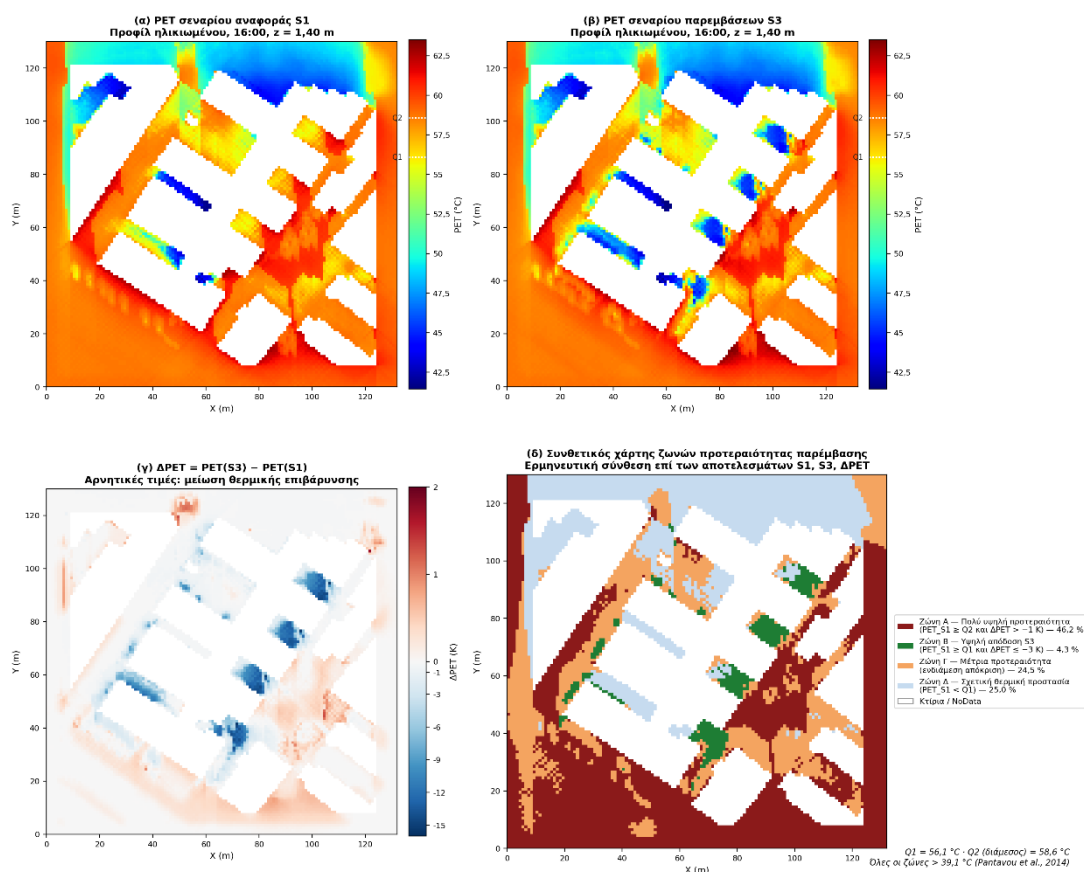
Παρά τη μετρήσιμη αυτή βελτίωση, οι 12–13 ώρες στην κατηγορία «πολύ θερμή» και οι υψηλές τιμές των δεικτών κατά τις ώρες αιχμής δεν τεκμηριώνουν συνθήκες πλήρους θερμικής άνεσης. Η συγκεκριμένη διαμόρφωση του S3 βελτιώνει τη μικροκλιματική συμπεριφορά του PO2, αλλά δεν τεκμηριώνει από μόνη της πλήρως θερμικά προστατευμένη ζώνη παραμονής. Ενδεχόμενη λειτουργική αξιοποίηση του δώματος απαιτεί πρόσθετη σκίαση, περιορισμό της άμεσης ακτινοβολιακής έκθεσης και κατάλληλη χωρική οργάνωση.

Το PO2 χρησιμοποιείται πρωτίτως ως συμπληρωματικό σημείο κατακόρυφης μικροκλιματικής διερεύνησης και όχι ως τεκμηριωμένος χώρος παραμονής. Ενδεχόμενη μελλοντική αξιοποίηση του δώματος θα απαιτούσε προηγούμενη τεχνική και στατική διερεύνηση, ασφαλή πρόσβαση και έλεγχο της συμβατότητας των προτεινόμενων διαμορφώσεων με τη λειτουργία του νοσοκομειακού συγκροτήματος.

3.4.4 Σύνθετη χωρική αποτίμηση θερμικής προστασίας και προτεραιοτήτων παρέμβασης

Η χρονική αποτίμηση των σημείων PO1 και PO2 συμπληρώνεται από τη χωρική ανάλυση του συνόλου του υπαίθριου πεδίου. Για τη λειτουργική αξιοποίηση των αποτελεσμάτων, τα πεδία PET του σεναρίου αναφοράς S1 και του συνδυαστικού σεναρίου παρεμβάσεων S3 συνδυάστηκαν στον σύνθετο χάρτη του Σχήματος 3.4.4.1. Ο χάρτης αφορά το προφίλ ηλικιωμένου χρήστη, την ώρα αναφοράς 16:00 της 25ης Ιουλίου 2025 και τη στάθμη πεζού $z = 1,40$ m. Δεν αποτελεί νέο υπολογιστικό αποτέλεσμα προσομοίωσης ENVI-met, αλλά ερμηνευτική χαρτογραφική σύνθεση των πεδίων PET(S1), PET(S3) και της χωρικής μεταβολής $\Delta PET = PET(S3) - PET(S1)$.

Χωρική ιεράρχηση παρεμβάσεων θερμικής προστασίας — Γ.Ν.Α. «Αλεξάνδρα»
Προφίλ ηλικιωμένου χρήστη · 25.07.2025 · 16:00 · z = 1,40 m



Σχήμα 3.4.4.1. Συνθετικός χάρτης χωρικής ιεράρχησης παρεμβάσεων θερμικής προστασίας για το προφίλ ηλικιωμένου χρήστη, στις 25.07.2025 και ώρα 16:00, στη στάθμη πεζού z = 1,40 m. Πάνελ (α): πεδίο PET στο σενάριο αναφοράς S1. Πάνελ (β): πεδίο PET στο συνδυαστικό σενάριο παρεμβάσεων S3, με κοινή χρωματική κλίμακα. Πάνελ (γ): χωρική μεταβολή ΔPET = PET(S3) – PET(S1), όπου οι αρνητικές τιμές δηλώνουν μείωση της θερμικής επιβάρυνσης. Πάνελ (δ): ερμηνευτικός χάρτης ζωνών προτεραιότητας παρέμβασης, βάσει των ποσοστημοριακών ορίων Q1 = 56,1 °C και Q2 = 58,6 °C της κατανομής PET(S1) και των κριτηρίων απόκρισης ΔPET. Το πάνελ (δ) δεν αποτελεί νέο αποτέλεσμα προσομοίωσης ENVI-met, αλλά σύνθεση των πάνελ (α)–(γ). Στις χρωματικές κλίμακες σημειώνονται τα όρια Q1 και Q2.

Πηγή: Ιδία επεξεργασία και χαρτογραφική σύνθεση των πεδίων PET(S1), PET(S3) και ΔPET του ENVI-met 5.8.0/BIO-met.

Τα δύο ανώτερα πάνελ επιτρέπουν την άμεση σύγκριση της χωρικής κατανομής του PET μεταξύ S1 και S3, καθώς χρησιμοποιούν κοινή χρωματική κλίμακα. Το πάνελ (γ) αποτυπώνει την ένταση και τη χωρική θέση των μεταβολών ΔPET, ενώ το πάνελ (δ)

μετατρέπει τη μικροκλιματική πληροφορία σε χωρική τυπολογία προτεραιοτήτων παρέμβασης.

Κατά την ώρα αναφοράς, όλες οι έγκυρες τιμές PET(S1) υπερβαίνουν το κατώφλι των 39,1 °C της μεσογειακής κλίμακας των Pantanou et al. (2014). Επομένως, ολόκληρο το εξεταζόμενο υπαίθριο πεδίο εντάσσεται στην κατηγορία «πολύ θερμή». Επειδή η κατηγορία αυτή δεν διαφοροποιεί εσωτερικά τιμές διαφορετικής έντασης, η σχετική χωρική ιεράρχηση πραγματοποιήθηκε μέσω ποσοστημοριακής ταξινόμησης της κατανομής PET(S1).

Η ταξινόμηση του πάνελ (δ) βασίζεται σε δύο συμπληρωματικά κριτήρια: στη σχετική ένταση της θερμικής επιβάρυνσης στο σενάριο αναφοράς PET(S1) και στη χωρική απόκριση των παρεμβάσεων ΔPET. Ως όρια της κατανομής PET(S1) χρησιμοποιήθηκαν το πρώτο τεταρτημόριο $Q1 = 56,1 \text{ }^{\circ}\text{C}$ και η διάμεσος $Q2 = 58,6 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Τα κατώφλια απόκρισης του ΔPET (-1 K και -3 K) δεν ορίζονται εκ νέου, αλλά αντιστοιχούν στα όρια των κλάσεων μεταβολής που εφαρμόζονται στους χάρτες ΔPET της Ενότητας 3.3.3. Τιμές $\Delta\text{PET} > -1 \text{ K}$ εμπίπτουν στις κλάσεις αμελητέας έως μικρής μεταβολής, ενώ τιμές $\Delta\text{PET} \leq -3 \text{ K}$ αντιστοιχούν στις κλάσεις μεγάλης και πολύ μεγάλης μείωσης. Με τον τρόπο αυτό, τα κριτήρια απόκρισης παραμένουν συνεπή με την ταξινόμηση που έχει ήδη εφαρμοστεί στη χωρική ανάλυση. Ο συνδυασμός ενός σχετικού κριτηρίου, δηλαδή των ποσοστημορίων της κατανομής PET(S1), με ένα απόλυτο κριτήριο, δηλαδή της μεταβολής ΔPET σε K, είναι σκόπιμος: το πρώτο αποτυπώνει τη σχετική θέση κάθε περιοχής εντός του εξεταζόμενου πεδίου, ενώ το δεύτερο τη φυσική ένταση της μεταβολής που επιφέρουν οι παρεμβάσεις. Επισημαίνεται, τέλος, ότι η σχετική κατάταξη των περιοχών ως προς τη θερμική επιβάρυνση παραμένει σταθερή, ενώ τα ακριβή όρια των ζωνών εξαρτώνται από την επιλεγόμενη μέθοδο ταξινόμησης. Η ταξινόμηση Α–Δ δεν αποτελεί νέα βιοκλιματική κλίμακα ούτε κανονιστικό σύστημα αξιολόγησης, αλλά εσωτερικό εργαλείο χωρικής ιεράρχησης για το συγκεκριμένο προφίλ, την εξεταζόμενη ώρα και το συγκεκριμένο υπολογιστικό πεδίο.

Ζώνη Α — Πολύ υψηλή προτεραιότητα: $\text{PET}(\text{S1}) \geq Q2$ και $\Delta\text{PET} > -1 \text{ K}$. Περιλαμβάνει περιοχές του θερμότερου μισού του πεδίου στις οποίες η απόκριση του S3 είναι περιορισμένη και απαιτείται περαιτέρω ενίσχυση των μέτρων θερμικής προστασίας.

Ζώνη Β — Υψηλή απόδοση S3: $PET(S1) \geq Q1$ και $\Delta PET \leq -3$ K. Περιλαμβάνει θύλακες σημαντικής θερμικής ανακούφισης, στους οποίους τεκμηριώνεται υψηλή αποτελεσματικότητα των εφαρμοζόμενων μέτρων κατά τη συγκεκριμένη ώρα.

Ζώνη Γ — Μέτρια προτεραιότητα: περιλαμβάνει όλα τα έγκυρα κελιά με $PET(S1) \geq Q1$ τα οποία δεν πληρούν τα κριτήρια των Ζωνών Α ή Β. Πρόκειται για περιοχές ενδιάμεσης απόκρισης, στις οποίες καταγράφεται περιορισμένη ή μέτρια μεταβολή του PET.

Ζώνη Δ — Σχετική θερμική προστασία: $PET(S1) < Q1$. Αντιστοιχεί στο ψυχρότερο τεταρτημόριο της κατανομής και περιλαμβάνει τις περιοχές με σχετικά χαμηλότερες τιμές PET κατά τη συγκεκριμένη ώρα αναφοράς.

Η Ζώνη Δ αποτελεί στατιστικά προσδιορισμένη περιοχή σχετικής θερμικής προστασίας και δεν ταυτίζεται κατ' ανάγκη με τις ζώνες άμεσης σκίασης. Δεν αποτελεί επίσης μόνιμο χαρακτηριστικό του χώρου, καθώς η ταξινόμηση αφορά αποκλειστικά την ώρα 16:00. Εξ ορισμού, η Ζώνη Δ καταλαμβάνει το 25,0% του πεδίου. Τα ποσοστά των Ζωνών Α, Β και Γ προκύπτουν από τον συνδυασμό των ορίων της κατανομής $PET(S1)$ και των κριτηρίων απόκρισης ΔPET . Η ποσοτική σύνοψη των ζωνών παρουσιάζεται στον Πίνακα 3.4.4.1.

Πίνακας 3.4.4.1. Ποσοτική σύνοψη των ζωνών προτεραιότητας παρέμβασης για το προφίλ ηλικιωμένου χρήστη, στις 25.07.2025 και ώρα 16:00, στη στάθμη πεζού $z = 1,40$ m. Τα $Q1 = 56,1$ °C και $Q2 = 58,6$ °C αντιστοιχούν στο πρώτο τεταρτημόριο και στη διάμεσο της κατανομής $PET(S1)$ εντός του υπολογιστικού πεδίου. Όλες οι ζώνες βρίσκονται πάνω από το κατώφλι 39,1 °C της μεσογειακής κλίμακας (Pantavou et al., 2014).

Ζώνη	Κριτήρια ταξινόμησης	Κελιά	% πεδίου	μ. $PET(S1)$ (°C)	μ. PET_{S3} (°C)	μ. ΔPET (K)
A	$PET(S1) \geq Q2$ και $\Delta PET > -1$ K	4.972	46,2 %	59,41	59,50	+0,09
B	$PET(S1) \geq Q1$ και $\Delta PET \leq -3$ K	461	4,3 %	58,59	50,02	-8,57
Γ	$PET(S1) \geq Q1$ και μη ένταξη στις Ζώνες Α ή Β	2.638	24,5 %	58,11	57,78	-0,33
Δ	$PET(S1) < Q1$	2.690	25,0 %	49,81	49,24	-0,57
Σύνολο	Έγκυρα κελιά πεδίου	10.761	100,0 %	56,66	56,11	-0,55

Πηγή: Ιδία επεξεργασία αποτελεσμάτων ENVI-met 5.8.0/BIO-met.

Από τα κελιά του θερμότερου μισού του πεδίου, δηλαδή εκείνα με $PET(S1) \geq Q2$, το 92,4% εντάσσεται στη Ζώνη Α και παρουσιάζει περιορισμένη απόκριση στο S3 κατά τη

συγκεκριμένη ώρα. Η μέση μεταβολή στη ζώνη αυτή είναι +0,09 K, ενώ η μέγιστη τοπική αύξηση ανέρχεται σε +1,70 K. Αντίθετα, η Ζώνη Β, η οποία καταλαμβάνει το 4,3% του πεδίου, εμφανίζει μέση μείωση PET κατά 8,57 K και μέγιστη τοπική μείωση κατά 15,36 K. Το αποτέλεσμα τεκμηριώνει ότι οι συνδυαστικές παρεμβάσεις μπορούν να δημιουργήσουν θύλακες ιδιαίτερα υψηλής θερμικής ανακούφισης, ενώ ο σύνθετος χάρτης εντοπίζει παράλληλα τις περιοχές στις οποίες απαιτείται περαιτέρω ενίσχυση ή ανασχεδιασμός των μέτρων.

Η αξία του συνθετικού χάρτη έγκειται στη μετάβαση από τη μικροκλιματική αξιολόγηση στη χωρική ιεράρχηση των παρεμβάσεων. Μέσω της σύνθεσης των πεδίων PET(S1), PET(S3) και ΔPET εντοπίζονται οι θερμικές εστίες που απαιτούν πρόσθετη παρέμβαση, οι θύλακες υψηλής απόδοσης του S3 και οι περιοχές σχετικής θερμικής προστασίας. Με τον τρόπο αυτό, τα αποτελέσματα της προσομοίωσης μετατρέπονται σε συγκεκριμένες κατευθύνσεις για τη στοχευμένη ενίσχυση της σκίασης, της φύτευσης και της θερμικής προστασίας του υπαίθριου νοσοκομειακού χώρου.

Κεφάλαιο 4: Συζήτηση

Το παρόν κεφάλαιο ερμηνεύει τα βασικά ευρήματα που παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 3 και τα συσχετίζει με τη διεθνή βιβλιογραφία για την υπαίθρια θερμική άνεση, τις βιοκλιματικές παρεμβάσεις, τις ευάλωτες ομάδες και τους νοσοκομειακούς υπαίθριους χώρους. Η συζήτηση εστιάζει στους μηχανισμούς που εξηγούν τη διαφοροποίηση μεταξύ του σεναρίου αναφοράς S1 και του συνδυαστικού σεναρίου παρέμβασης S3.

4.1 Σύνοψη και ερμηνεία των βασικών ευρημάτων

Οι διαφορές S3–S1 δείχνουν ότι η θερμική επιβάρυνση στον υπαίθριο χώρο του Γ.Ν.Α. «Αλεξάνδρα» δεν ερμηνεύεται επαρκώς μόνο μέσω της θερμοκρασίας αέρα. Η Τα αποτυπώνει το γενικό θερμικό υπόβαθρο της θερινής ημέρας, ενώ οι εντονότερες χωρικές διαφοροποιήσεις στη θερμική αίσθηση των χρηστών συνδέονται με το ακτινοβολιακό περιβάλλον και τη διαμόρφωση της σκίασης. Η σκίαση περιορίζει τοπικά την άμεση βραχέος κύματος ηλιακή ακτινοβολία και, κατ' επέκταση, την άμεση ηλιακή έκθεση του χρήστη. Η T_{mrt} αποτυπώνει ευρύτερα τη συνολική ακτινοβολιακή επιβάρυνση, καθώς ενσωματώνει τόσο τις βραχέος κύματος όσο και τις μακρού κύματος ακτινοβολιακές συνιστώσες, σε συνάρτηση με τη γεωμετρία και τις θερμικές ιδιότητες των γύρω επιφανειών.

Το σενάριο αναφοράς S1 χαρακτηρίζεται από υψηλό θερμικό υπόβαθρο, εκτεταμένη άμεση ηλιακή έκθεση και ανεπαρκή σκίαση σε κρίσιμες ζώνες κίνησης και πιθανής παραμονής. Οι ηλιοεκτεθειμένες επιφάνειες διαμορφώνουν περιοχές αυξημένης ακτινοβολιακής επιβάρυνσης, ενώ οι υφιστάμενες σκιαζόμενες ζώνες παρέχουν μόνο τοπική και περιορισμένη θερμική ανακούφιση. Η συνθήκη αυτή αποκτά ιδιαίτερη σημασία σε έναν νοσοκομειακό υπαίθριο χώρο, όπου οι χρήστες δεν περιορίζονται σε υγιείς ενήλικες, αλλά περιλαμβάνουν ηλικιωμένους, παιδιά, ασθενείς, συνοδούς και προσωπικό. Στο συνδυαστικό σενάριο S3, οι παρεμβάσεις στη φύτευση, στη σκίαση, στα υλικά επιφανειών και στα δώματα βελτιώνουν τις μικροκλιματικές συνθήκες κυρίως μέσω του περιορισμού της ακτινοβολιακής επιβάρυνσης. Η επίδραση είναι εντονότερη στις θέσεις όπου μειώνεται άμεσα η ηλιακή έκθεση και διαμορφώνονται χαμηλότερες τιμές T_{mrt} . Σε

περιοχές με περιορισμένη σκίαση ή με δυσμενή γεωμετρικά και αεροδυναμικά χαρακτηριστικά, η μικροκλιματική απόκριση παραμένει μικρότερη.

Οι παρεμβάσεις δεν λειτουργούν, επομένως, ως μηχανισμός ομοιόμορφης ψύξης του συνόλου του υπαίθριου χώρου. Η κύρια συμβολή τους έγκειται στη δημιουργία χωρικά εντοπισμένων μικροζωνών θερμικής ανακούφισης σε θέσεις κρίσιμες για την κίνηση, την αναμονή και τη σύντομη παραμονή. Η αξία των ζωνών αυτών δεν αποτιμάται μόνο μέσω της μέσης μεταβολής των βιοκλιματικών δεικτών, αλλά και μέσω της λειτουργικής τους θέσης μέσα στο πεδίο μελέτης. Η δυνατότητα ασφαλέστερης μετακίνησης ή ανεκτής σύντομης παραμονής εξαρτάται από το κατά πόσο οι ευνοϊκότερες μικροκλιματικές συνθήκες συμπίπτουν με τις πραγματικές διαδρομές και τις ζώνες χρήσης του νοσοκομείου. Υπό αυτή την έννοια, το S3 δεν συνιστά λύση πλήρους θερμικής άνεσης, αλλά στρατηγική μετριασμού της έκθεσης και ενίσχυσης της τοπικής θερμικής προστασίας.

Η χαμηλή ταχύτητα ανέμου εισόδου, η οποία αντιστοιχεί στις συνθήκες περιορισμένου αερισμού της εξεταζόμενης θερμής ημέρας, περιορίζει τον μηχανισμό συναγωγικής ψύξης και στα δύο σενάρια. Η μεταβολή της ταχύτητας ανέμου στα σημεία αξιολόγησης παραμένει αμελητέα (βλ. Ενότητα 3.3.1δ), γεγονός που δείχνει ότι ο αερισμός δεν αποτέλεσε τον κύριο μηχανισμό βελτίωσης του S3. Η καταγεγραμμένη μικροκλιματική απόκριση συνδέεται κυρίως με την ενίσχυση της σκίασης, τη μείωση της άμεσης ηλιακής έκθεσης και τη συνεπαγόμενη μείωση της T_{mrt} .

Η κατακόρυφη σύγκριση μεταξύ της στάθμης πεζού και της στάθμης δώματος, μέσω των σημείων PO1 και PO2, δείχνει ότι η υπερυψωμένη στάθμη δεν είναι αυτομάτως θερμικά ευνοϊκότερη. Παρότι η θερμοκρασία αέρα παραμένει σε παρόμοια τάξη μεγέθους ή εμφανίζεται οριακά χαμηλότερη, η αυξημένη θερμική επιβάρυνση στη στάθμη δώματος συνδέεται κυρίως με την εντονότερη ακτινοβολιακή έκθεση και τις υψηλότερες τιμές T_{mrt} . Χωρίς επαρκή σκίαση και κατάλληλη βιοκλιματική διαμόρφωση, το δώμα μπορεί να λειτουργήσει ως ζώνη αυξημένης θερμικής καταπόνησης και όχι ως χώρος ανακούφισης.

Τα προφίλ ενηλίκου, ηλικιωμένου και παιδιού εμφανίζουν διαφορετική υπολογιζόμενη θερμική επιβάρυνση, παρότι εκτίθενται στο ίδιο μικροκλιματικό πεδίο. Η διαφοροποίηση

των τιμών PET επιβεβαιώνει την ανάγκη ανθρωποκεντρικής αξιολόγησης, ιδίως σε νοσοκομειακούς υπαίθριους χώρους όπου συνυπάρχουν χρήστες με διαφορετικά ανθρωπομετρικά χαρακτηριστικά, διαφορετική διάρκεια έκθεσης και διαφορετικό βαθμό προσαρμοστικότητας. Τα αποτελέσματα δεν επιτρέπουν από μόνα τους την απόδοση των διαφορών σε συγκεκριμένο φυσιολογικό μηχανισμό, τεκμηριώνουν όμως ότι η χρήση ενός ενιαίου προφίλ δεν αποτυπώνει επαρκώς την ετερογένεια των χρηστών.

Πέρα από τις τιμές αιχμής των βιοκλιματικών δεικτών, κρίσιμη παράμετρο αποτελεί και η διάρκεια παραμονής σε δυσμενείς θερμικές κατηγορίες. Στους υπαίθριους χώρους νοσοκομείων, η θερμική επιβάρυνση δεν περιορίζεται σε στιγμιαίες συνθήκες, αλλά συνδέεται και με επαναλαμβανόμενα ή παρατεταμένα διαστήματα κίνησης, αναμονής και σύντομης παραμονής. Η αποτελεσματικότητα των παρεμβάσεων πρέπει, συνεπώς, να αξιολογείται τόσο ως προς τη μείωση των μέγιστων τιμών PET και UTCI όσο και ως προς τον περιορισμό της χρονικής έκθεσης των ευάλωτων χρηστών σε επιβαρυντικές θερμικές συνθήκες.

Το S3 μπορεί να θεωρηθεί δυνητικά εφαρμόσιμο σχεδιαστικό σενάριο μικροκλιματικής βελτίωσης για υπαίθριους χώρους νοσοκομείων σε μεσογειακό αστικό περιβάλλον, υπό την προϋπόθεση λειτουργικής αναδιοργάνωσης και ανάκτησης των αρχικά ακάλυπτων χώρων. Δεν αποτελεί άμεση τεχνική μελέτη εφαρμογής, αλλά μικροκλιματικά τεκμηριωμένη σχεδιαστική κατεύθυνση. Η παρέμβαση περιορίζει τη θερμική επιβάρυνση χωρίς να αναιρεί πλήρως τις δυσμενείς συνθήκες κατά τις ώρες αιχμής, επιβεβαιώνοντας ότι η θερμική προστασία των νοσοκομειακών υπαίθριων χώρων πρέπει να αντιμετωπίζεται ταυτόχρονα ως ζήτημα σχεδιαστικό, λειτουργικό και δημόσιας υγείας.

4.2 Σύνδεση με τη διεθνή βιβλιογραφία

Η ερμηνεία των ευρημάτων της παρούσας εργασίας αναπτύσσεται σε τρία επίπεδα. Πρώτον, τα αποτελέσματα συγκρίνονται με γενικές μελέτες αστικού μικροκλίματος, ώστε να τεκμηριωθούν οι μηχανισμοί της σκίασης, της βλάστησης, της T_{mrt} , της αστικής γεωμετρίας και των υλικών επιφανείας. Δεύτερον, συγκρίνονται με μελέτες που αφορούν νοσοκομειακούς ή υγειονομικούς υπαίθριους χώρους, ώστε να αναδειχθεί το ειδικό

ερευνητικό κενό. Τρίτον, συνδέονται με μελέτες για ευάλωτες ομάδες, ώστε να τεκμηριωθεί η ανάγκη διαφοροποιημένης ανθρωποκεντρικής αξιολόγησης.

4.2.1 Σύγκριση με γενικές μελέτες αστικού μικροκλίματος

Η κυριαρχία της ακτινοβολιακής συνιστώσας στα ευρήματα συμφωνεί με τη διεθνή βιβλιογραφία, η οποία αποδίδει τη θερμική άνεση στη συνδυασμένη επίδραση ακτινοβολίας, T_{mrt} , σκίασης, βλάστησης, υλικών και αστικής γεωμετρίας.

Η περιορισμένη μεταβολή της T_a μεταξύ S1 και S3, σε αντίθεση με την εντονότερη μεταβολή της T_{mrt} και των δεικτών PET και UTCI, επιβεβαιώνει ότι η βελτίωση του θερμικού περιβάλλοντος είναι κυρίως ακτινοβολιακού χαρακτήρα.

Η διαπίστωση αυτή είναι συμβατή με μελέτες που αναδεικνύουν τον καθοριστικό ρόλο της T_{mrt} στη διαμόρφωση της θερμικής αίσθησης σε υπαίθριους χώρους. Η μείωση της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας μέσω σκίασης περιορίζει την ακτινοβολιακή φόρτιση του ανθρώπινου σώματος και οδηγεί σε βελτίωση των βιοκλιματικών δεικτών. Για τον λόγο αυτό, η αποτελεσματικότητα των παρεμβάσεων δεν πρέπει να αξιολογείται μόνο με βάση τη μεταβολή της θερμοκρασίας αέρα, αλλά κυρίως με βάση τη μεταβολή της ακτινοβολιακής έκθεσης και της θερμικής αίσθησης του χρήστη.

Η χωρικά εστιασμένη βελτίωση που καταγράφεται στο S3 είναι συμβατή με τη βιβλιογραφία, σύμφωνα με την οποία οι παρεμβάσεις σκίασης και βλάστησης λειτουργούν ως στοχευμένες παρεμβάσεις τοπικών ζωνών ανακούφισης και όχι ως μηχανισμός ομοιόμορφης ψύξης. Η μικροκλιματική απόδοση εξαρτάται από τη θέση της παρέμβασης, τη σχέση της με τη σκίαση, τον αερισμό, τη γεωμετρία και την ακτινοβολιακή έκθεση.

Η σύγκριση με μεσογειακές εφαρμογές είναι ιδιαίτερα σημαντική για την παρούσα εργασία. Οι Tseliou et al. (2022) ανέδειξαν ότι συνδυαστικές παρεμβάσεις πρασίνου και υδάτινων στοιχείων μπορούν να βελτιώσουν τις συνθήκες θερμικής άνεσης κυρίως σε περιοχές άμεσης γειννίας με τις παρεμβάσεις. Αντίστοιχα, οι Tousi et al. (2025), σε μελέτη στην Αθήνα με χρήση ENVI-met και PET, έδειξαν ότι παρεμβάσεις βλάστησης και υδάτινων στοιχείων μπορούν να οδηγήσουν σε σημαντικές τοπικές μειώσεις του PET για ηλικιωμένους χρήστες. Τα ευρήματα αυτά είναι συμβατά με την παρούσα εργασία, όπου η μεγαλύτερη βελτίωση εμφανίζεται στις ζώνες όπου το S3 μειώνει άμεσα την ακτινοβολιακή έκθεση και ενισχύει τη σκίαση.

Το εύρημα αυτό ενισχύεται περαιτέρω αν ληφθεί υπόψη ότι η ταχύτητα ανέμου παραμένει εξαιρετικά χαμηλή στα σημεία αξιολόγησης PO1 και PO2 τόσο στο S1 (0,056 m/s και 0,080 m/s αντίστοιχα) όσο και στο S3 (0,058 m/s και 0,090 m/s), με αμελητέα μεταβολή μεταξύ σεναρίων.

Το μέγεθος της μέγιστης τοπικής μείωσης PET στην παρούσα εργασία (≈ 14 K) είναι άμεσα συγκρίσιμο με τα ανώτερα όρια που αναφέρουν οι Tousi et al. (2025) σε παρόμοιο πυκνοδομημένο αθηναϊκό περιβάλλον (2,17–14,55 K το απόγευμα, με μέγιστες τιμές που ξεπερνούν τους 14 K σε σκιασμένες ζώνες), τοποθετώντας το εύρημα στο ανώτερο φάσμα των αναφερόμενων τιμών της μεσογειακής βιβλιογραφίας για αντίστοιχες βιοκλιματικές παρεμβάσεις.

Ιδιαίτερη προσοχή απαιτείται στην ερμηνεία των υλικών υψηλής ανακλαστικότητας. Η βιβλιογραφία έχει δείξει ότι τα ψυχρά ή υψηλής λευκαύγειας υλικά δεν έχουν πάντοτε μονοσήμαντα θετική επίδραση στη θερμική άνεση του πεζού. Σε στενά αστικά φαράγγια, η αυξημένη ανακλαστικότητα μπορεί να ενισχύσει την ανακλώμενη ηλιακή ακτινοβολία προς τον χρήστη και να αυξήσει την T_{mrt} ή τον PET, ακόμη και αν μειώνεται η θερμοκρασία της επιφάνειας ή η θερμοκρασία αέρα (Erell et al., 2013). Η παρατήρηση αυτή είναι κρίσιμη για την παρούσα εργασία, καθώς οι παρεμβάσεις υλικών πρέπει να αξιολογούνται σε συνάρτηση με τη γεωμετρία, τη σκίαση και τη θέση του χρήστη, και όχι μόνο με βάση την ανακλαστικότητα του υλικού.

Η συγκριτική αποτύπωση των γενικών μελετών αστικού μικροκλίματος που αξιοποιούνται για την ερμηνεία των μηχανισμών της παρούσας εργασίας παρουσιάζεται στον Πίνακα 4.2.1.1.

Πίνακας 4.2.1.1. Σύνδεση των ευρημάτων της παρούσας εργασίας με γενικές μελέτες αστικού μικροκλίματος

Μελέτη	Πλαίσιο	Μέθοδος / δείκτες	Κύριο εύρημα	Σύνδεση με την παρούσα εργασία
Lai et al. (2019)	Ανασκόπηση στρατηγικών μετριασμού υπαίθριου θερμικού στρες	Συγκριτική βιβλιογραφική ανάλυση, PET	Η βλάστηση, η σκίαση και η αστική γεωμετρία έχουν ισχυρή επίδραση στη μείωση του PET	Τεκμηριώνει ότι οι μεγαλύτερες μειώσεις PET στο S3 συνδέονται κυρίως με σκίαση και T_{mrt}

Μελέτη	Πλαίσιο	Μέθοδος / δείκτες	Κύριο εύρημα	Σύνδεση με την παρούσα εργασία
Tseliou et al. (2022)	Μεσογειακός αστικός χώρος	Βιοκλιματική αξιολόγηση παρεμβάσεων	Οι παρεμβάσεις πρασίνου/νερού βελτιώνουν κυρίως τις ζώνες άμεσης επιρροής	Υποστηρίζει τη χωρικά εστιασμένη απόκριση του S3
Tseliou et al. (2023)	Πυκνοδομημένη περιοχή Αθήνας	ENVI-met, πράσινα δώματα / πράσινες όψεις	Οι συνδυαστικές πράσινες παρεμβάσεις μπορούν να βελτιώσουν το μικροκλίμα στη στάθμη πεζού	Συνδέεται με τη λογική του S3 ως συνδυαστικού σεναρίου
Tousi et al. (2025)	Νίκαια Αττικής, μεσογειακό αστικό περιβάλλον	ENVI-met, PET, ηλικιωμένοι χρήστες	Η βλάστηση και τα υδάτινα στοιχεία μειώνουν τοπικά τον PET	Παρέχει μεσογειακή/αθηναϊκή σύγκριση για PET και ευάλωτους χρήστες
Erell et al. (2013)	Αστικά φαράγγια σε θερμά κλίματα	Ανάλυση υλικών υψηλού albedo	Τα υλικά υψηλής ανακλαστικότητας μπορεί να αυξήσουν το ακτινοβολιακό φορτίο στη στάθμη πεζού	Τεκμηριώνει γιατί τα υλικά δεν αξιολογούνται μόνο με βάση το albedo

Πηγή: Ιδία επεξεργασία βάσει της βιβλιογραφικής επισκόπησης.

Η παρούσα μελέτη επιβεβαιώνει ότι η σκίαση, η βλάστηση, η αστική γεωμετρία και η T_{mrt} αποτελούν καθοριστικούς παράγοντες της υπαίθριας θερμικής άνεσης. Η διαφοροποίηση της παρούσας μελέτης έγκειται στο ότι οι μηχανισμοί αυτοί εξετάζονται σε υπαίθριο χώρο νοσοκομειακής υποδομής, όπου η θερμική επιβάρυνση συνδέεται άμεσα με ευάλωτους χρήστες και λειτουργικούς περιορισμούς.

4.2.2 Νοσοκομειακές και υγειονομικές μελέτες

Η σύγκριση με μελέτες υπαίθριων χώρων νοσοκομείων και υγειονομικών εγκαταστάσεων δείχνει ότι το σχετικό ερευνητικό πεδίο παραμένει περιορισμένο. Σε αντίθεση με τους γενικούς αστικούς υπαίθριους χώρους, οι νοσοκομειακοί υπαίθριοι χώροι λειτουργούν ζώνες κίνησης, αναμονής, σύντομης παραμονής και υποστήριξης της λειτουργίας της μονάδας υγείας. Για τον λόγο αυτό, η μικροκλιματική τους αξιολόγηση πρέπει να

συνδέεται όχι μόνο με τη θερμική άνεση, αλλά και με ζητήματα προσβασιμότητας, υγιεινής, ασφάλειας, λειτουργικής συνέχειας και προστασίας ευάλωτων χρηστών.

Η μελέτη της Elgheznavy (2024) είναι άμεσα συναφής, καθώς εξετάζει σε θερμό κλίμα στρατηγικές σκίασης σε υπαίθριους χώρους αναμονής νοσοκομείου Al-Nasr Specialized Hospital στο Port-Said, χρησιμοποιώντας δείκτες όπως η θερμοκρασία αέρα, ο PMV και ο PET. Η συνάφεια με την παρούσα εργασία έγκειται στην έμφαση στη σκίαση, στη χρήση του PET και στη λειτουργική σημασία των υπαίθριων χώρων αναμονής σε νοσοκομειακό περιβάλλον. Ωστόσο, δεν περιλαμβάνει ταυτόχρονη αξιολόγηση τριών ηλικιακών προφίλ χρηστών ούτε κατακόρυφη διερεύνηση σε στάθμη δώματος.

Η μελέτη των de Souza et al. (2023) στο Royal Darwin Hospital της Αυστραλίας αποτελεί συναφή νοσοκομειακή μελέτη περίπτωσης, καθώς εξετάζει παρεμβάσεις πρασίνου, βιοφιλικού σχεδιασμού και κλιματικής προσαρμογής σε υφιστάμενο νοσοκομειακό συγκρότημα. Παρότι δεν χρησιμοποιεί ENVI-met ούτε δείκτες PET/UTCI, ενισχύει τη βασική ερμηνεία ότι η σκίαση, η βλάστηση και η δημιουργία ψυχρότερων υπαίθριων χώρων έχουν σημασία για την ευεξία των χρηστών και τη λειτουργική ανθεκτικότητα των υποδομών υγείας.

Στις μελέτες που αξιοποιούν μικροκλιματική προσομοίωση, η εργασία των Mutlu et al. (2019) αποτελεί μία από τις πρώτες εφαρμογές του ENVI-met σε νοσοκομειακούς κήπους. Οι Zhen et al. (2024, 2025) διερευνούν υπαίθριους χώρους νοσοκομείων στην Κίνα, με τη μία μελέτη να βασίζεται σε μετρήσεις πεδίου και ερωτηματολόγια και την άλλη να αξιοποιεί ENVI-met για τη βελτιστοποίηση σχεδιαστικών λύσεων. Στην ευρωπαϊκή βιβλιογραφία, η Takácsné Zajacz et al., (2025) εξετάζει θεσμικούς κήπους στη Βουδαπέστη, συμπεριλαμβανομένων νοσοκομειακών κήπων, μέσω ENVI-met. Οι μελέτες αυτές επιβεβαιώνουν τη σημασία της μικροκλιματικής αξιολόγησης σε χώρους υγείας, αλλά διαφοροποιούνται από την παρούσα εργασία ως προς το κλιματικό πλαίσιο, την ανθρωποκεντρική παραμετροποίηση και την απουσία κατακόρυφης διερεύνησης.

Η μελέτη των Ahmad et al., (2026) στο Hospital São João στο Πόρτο είναι η πλησιέστερη μεθοδολογικά προς την παρούσα εργασία, καθώς αφορά υγειονομικό αστικό περιβάλλον σε μεσογειακό κλιματικό πλαίσιο, χρησιμοποιεί ENVI-met και αξιοποιεί τον δείκτη PET για την αξιολόγηση ηλικιωμένων χρηστών. Η μελέτη αυτή υποστηρίζει την ανάγκη

διαφοροποιημένης ανθρωποκεντρικής αξιολόγησης, αλλά δεν περιλαμβάνει ταυτόχρονη αξιολόγηση παιδικού, ηλικιωμένου και ενήλικου προφίλ ούτε κατακόρυφη διερεύνηση στη στάθμη δώματος. Επιπλέον, η επισήμανσή της για πιθανή αύξηση του PET από υλικά υψηλής ανακλαστικότητας σε στενά αστικά φαράγγια συνδέεται με τον μηχανισμό που αναλύθηκε στην Ενότητα 4.2.1.

Η συγκριτική αποτύπωση των παραπάνω μελετών παρουσιάζεται στον Πίνακα 4.2.2.1. Ο πίνακας δεν εξισώνει διαφορετικές μεθοδολογικές προσεγγίσεις, αλλά αποτυπώνει τον βαθμό συνάφειας κάθε μελέτης με τις βασικές παραμέτρους της παρούσας εργασίας.

Πίνακας 4.2.2.1. Συγκριτική αποτύπωση της παρούσας εργασίας έναντι συναφών νοσοκομειακών και υγειονομικών μελετών μικροκλιματικής αξιολόγησης

Μελέτη	Νοσοκομειακό / υγειονομικό πλαίσιο	Κλίμα / χώρος	ENVI-met	Δείκτες	Συνάφεια με την παρούσα εργασία	Διαφοροποίηση
Παρούσα εργασία (2026)	Γ.Ν.Α. «Αλεξάνδρα», υπαίθριοι χώροι νοσοκομείου	Αθήνα, μεσογειακό αστικό περιβάλλον	Ναι	PET ανά προφίλ χρήστη, UTCI ως τυποποιημένος δείκτης, PO1-PO2	Τρία προφίλ PET, κύρια αξιολόγηση στη στάθμη πεζού και συμπληρωματική διερεύνηση στη στάθμη δώματος, σύγκριση S1-S3 και μεσογειακά προσαρμοσμένες κλίμακες ταξινόμησης.	—
Elghezni et al. (2024)	Υπαίθριος χώρος αναμονής νοσοκομείου	Port-Said, θερμό κλίμα	Όχι / δεν τεκμηριώνεται ως ENVI-met	Ta, PMV, PET	Σκίαση, δέντρα, υπαίθρια αναμονή, θεραπευτικό περιβάλλον	Χωρίς τρία προφίλ και χωρίς δώμα
de Souza et al. (2023)	Royal Darwin Hospital,	Αυστραλία, τροπικό κλίμα	Όχι	Θερμογραφία, WBGT / θερμική	Πράσινο, σκίαση, βιοφιλικός σχεδιασμός,	Χωρίς ENVI-met, PET/UTCI

Μελέτη	Νοσοκομειακό / υγειονομικό πλαίσιο	Κλίμα / χώρος	ENVI-met	Δείκτες	Συνάφεια με την παρούσα εργασία	Διαφοροποίηση
	νοσοκομειακό συγκρότημα			τεκμηρίωση πεδίου	κλιματική προσαρμογή	και πολυπροφίλ ή ανάλυση
Mutlu et al. (2019)	Νοσοκομειακοί κήποι	Τουρκία	Ναι	Βιοκλιματική αξιολόγηση	Πρώιμη εφαρμογή ENVI-met σε νοσοκομειακούς κήπους	Χωρίς τρία ηλικιακά προφίλ και χωρίς δώμα
Zhen et al. (2024)	Υπαιθριοί χώροι νοσοκομείου	Xi'an, Κίνα	Όχι	Μετρήσεις πεδίου, ερωτηματολόγια	Διάκριση ασθενών και υγιών χρηστών	Χωρίς ENVI-met και χωρίς τρία ηλικιακά προφίλ
Zhen et al. (2025)	Υπαιθριοί χώροι νοσοκομείου	Shaanxi People's Hospital, Xi'an	Ναι	Μικροκλιματική αξιολόγηση / βελτιστοποίηση	Σύγχρονη ENVI-met εφαρμογή σε νοσοκομειακό υπαίθριο χώρο	Χωρίς τρία προφίλ και χωρίς στάθμη δώματος
Takácsné Zajacz (2025)	Θεσμικοί κήποι, μεταξύ αυτών και νοσοκομειακοί	Βουδαπέστη, κεντροευρωπαϊκό κλίμα	Ναι	Μικροκλιματική αξιολόγηση	Θεσμικοί/νοσοκομειακοί κήποι	Όχι μεσογειακό κλίμα, χωρίς πολυπροφίλ ή ανάλυση
Ahmad et al. (2026)	Hospital São João / υγειονομικό αστικό περιβάλλον	Πόρτο, μεσογειακό πλαίσιο	Ναι	PET, ηλικιωμένοι	Πλησιέστερη μεθοδολογικά ως προς ENVI-met, PET και ηλικιωμένους χρήστες	Χωρίς παιδικό προφίλ, χωρίς τρία προφίλ ταυτόχρονα και χωρίς δώμα

Πηγή: Ιδία επεξεργασία βάσει της βιβλιογραφικής επισκόπησης.

Στο πλαίσιο των μελετών που εξετάστηκαν, δεν εντοπίστηκε εφαρμογή που να συγκεντρώνει ταυτόχρονα το σύνολο των χαρακτηριστικών της παρούσας εργασίας: νοσοκομειακό υπαίθριο χώρο σε πυκνοδομημένο μεσογειακό περιβάλλον, διαφοροποιημένη αξιολόγηση ηλικιακών προφίλ, κατακόρυφη διερεύνηση στη στάθμη πεζού και δώματος και εφαρμογή μεσογειακά προσαρμοσμένες κλίμακες ταξινόμησης PET και UTCI.

Η παρούσα εργασία, επομένως, δεν διαφοροποιείται επειδή χρησιμοποιεί απλώς ένα διαδεδομένο εργαλείο μικροκλιματικής προσομοίωσης, αλλά επειδή συνδυάζει το εργαλείο αυτό με ένα ειδικό λειτουργικό περιβάλλον, δηλαδή τον υπαίθριο χώρο νοσοκομείου, με διαφοροποιημένη ανθρωποκεντρική αξιολόγηση και με κατακόρυφη μικροκλιματική διερεύνηση. Η συμβολή της έγκειται στην ανάδειξη των προϋποθέσεων και των ορίων της βιοκλιματικής αναβάθμισης σε πυκνοδομημένο, ακτινοβολιακά επιβαρυνόμενο και λειτουργικά σύνθετο νοσοκομειακό περιβάλλον.

4.2.3 Ευάλωτες ομάδες

Η βιβλιογραφία για τη θερμική άνεση των ευάλωτων ομάδων δείχνει ότι η ηλικία, η θερμορρυθμιστική ικανότητα, η μεταβολική δραστηριότητα και τα ανθρωπομετρικά χαρακτηριστικά επηρεάζουν τη θερμοφυσιολογική απόκριση του ανθρώπου υπό τις ίδιες μικροκλιματικές συνθήκες. Για τον λόγο αυτό, η αξιολόγηση των υπαίθριων χώρων υγειονομικών υποδομών με βάση αποκλειστικά ένα τυποποιημένο προφίλ ενήλικα δεν επαρκεί για την αποτύπωση της θερμικής επιβάρυνσης παιδιών και ηλικιωμένων.

Η ανάγκη χωριστής αξιολόγησης του παιδικού προφίλ υποστηρίζεται από μελέτες που εξετάζουν τη θερμική ευαλωτότητα των παιδιών. Οι Bar-Or (1980), Tsuzuki-Hayakawa et al. (1995), Falk και Dotan (2008) και Vanos (2015) αναδεικνύουν διαφοροποιήσεις σε σχέση με τους ενήλικες ως προς τη θερμορρύθμιση, τη σχέση επιφάνειας σώματος προς μάζα, τη συμπεριφορική προσαρμογή και την ικανότητα αναγνώρισης του θερμικού κινδύνου. Επομένως, η παιδική έκθεση σε δυσμενείς υπαίθριες θερμικές συνθήκες δεν μπορεί να θεωρείται απλώς μικρογραφία της αντίστοιχης έκθεσης ενός ενήλικα.

Ιδιαίτερα χρήσιμη για την παρούσα εργασία είναι η μελέτη των Gkaidatzi et al. (2022) σε σχολική αυλή υπό μεσογειακές συνθήκες. Παρότι δεν αφορά νοσοκομειακό περιβάλλον, αξιοποιεί μικροκλιματική προσομοίωση με ENVI-met 5.8.0 και τον δείκτη PET για την

αξιολόγηση βιοκλιματικών παρεμβάσεων σε υπαίθριο χώρο παιδικής χρήσης. Τα αποτελέσματά της δείχνουν ότι η σκίαση, η βλάστηση και η κατάλληλη επιλογή υλικών μπορούν να βελτιώσουν τις συνθήκες θερμικής άνεσης των παιδιών, κυρίως στις ζώνες άμεσης επιρροής των παρεμβάσεων. Το εύρημα αυτό είναι συμβατό με την παρούσα εργασία, στην οποία η βελτίωση του S3 εμφανίζεται ως χωρικά εστιασμένη μείωση της θερμικής επιβάρυνσης και όχι ως ομοιόμορφη ψύξη του συνόλου του πεδίου.

Η σημασία της διαφοροποίησης ανά δημογραφικό προφίλ υποστηρίζεται και από τους Tousi et al. (2024), οι οποίοι εξέτασαν τη θερμική καταπόνηση σε υπαίθριους χώρους κατά τη διάρκεια μεσογειακού καύσωνα μέσω των δεικτών PET και UTCI, λαμβάνοντας υπόψη διαφορετικά προφίλ ηλικίας και φύλου. Η μελέτη αυτή ενισχύει τη μεθοδολογική επιλογή της παρούσας εργασίας να μην περιοριστεί σε έναν τυπικό ενήλικο χρήστη, αλλά να εξετάσει διακριτά προφίλ ενήλικα, ηλικιωμένου και παιδιού. Η διαφοροποίησή της παρούσας έρευνας έγκειται στην εφαρμογή αυτής της ανθρωποκεντρικής αξιολόγησης σε υπαίθριο χώρο νοσοκομειακής υποδομής, σε συνδυασμό με σενάρια βιοκλιματικής αναβάθμισης και συμπληρωματική κατακόρυφη διερεύνηση στη στάθμη πεζού και δώματος.

Ως προς τους ηλικιωμένους, η σχετική βιβλιογραφία αναδεικνύει μειωμένη ικανότητα θερμορύθμισης, αυξημένο καρδιοαναπνευστικό φορτίο και μεγαλύτερη ευαισθησία σε παρατεταμένη θερμική έκθεση. Οι Kenny et al. (2010) και Balmain et al. (2018) τεκμηριώνουν τη φυσιολογική βάση της αυξημένης ευαλωτότητας των ηλικιωμένων σε συνθήκες θερμικού στρες. Συμπληρωματικά, οι Tousi et al. (2025) παρέχουν μεσογειακή αστική σύγκριση μέσω ENVI-met και PET με έμφαση σε ηλικιωμένους χρήστες, ενώ οι Ahmad et al. (2026) υποστηρίζουν τη σημασία της ειδικής αξιολόγησής τους σε υγειονομικό αστικό περιβάλλον.

Οι διαφοροποιήσεις των τιμών PET μεταξύ ενήλικα, ηλικιωμένου και παιδιού δείχνουν ότι το ίδιο μικροκλιματικό πεδίο δεν οδηγεί σε ισοδύναμη εκτίμηση θερμικής επιβάρυνσης. Το εύρημα στηρίζει τη χωριστή αξιολόγηση των τριών προφίλ, χωρίς όμως να συνεπάγεται ότι ένα από αυτά εμφανίζει συστηματικά τη μέγιστη τιμή PET σε όλες τις ώρες και σε όλες τις εξεταζόμενες θέσεις.

Η χρονική ανάλυση στο PO1 αναδεικνύει ειδικότερα ότι η σχέση μεταξύ του παιδικού και του ενήλικου προφίλ μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια της ημέρας. Στο σενάριο αναφοράς S1, στις 12:00 ο PET του παιδικού προφίλ ανέρχεται σε 50,7 °C, έναντι 43,2 °C για τον ενήλικα, ενώ στις 19:00 οι αντίστοιχες τιμές είναι 51,6 °C και 42,9 °C. Οι αποκλίσεις ανέρχονται περίπου σε +7,5 K και +8,7 K αντίστοιχα, ενώ κατά την ώρα της ημερήσιας αιχμής η σχέση αντιστρέφεται και το παιδικό προφίλ εμφανίζει χαμηλότερη τιμή από τα προφίλ του ενήλικα και του ηλικιωμένου. Η μεταβαλλόμενη αυτή απόκλιση αποτυπώνει τη διαφορετική απόκριση των παραμετροποιημένων χαρακτηριστικών του παιδικού προφίλ στις μεταβαλλόμενες ωριαίες μικροκλιματικές συνθήκες. Δεν μπορεί, ωστόσο, να αποδοθεί αιτιωδώς σε συγκεκριμένο φυσιολογικό μηχανισμό μόνο βάσει των αποτελεσμάτων PET, χωρίς πρόσθετη φυσιολογική ή πειραματική ανάλυση.

Αντίστοιχη χρονική διαφοροποίηση παρατηρείται και κατά τη σύγκριση των σεναρίων S1 και S3. Στο PO1, η μεγαλύτερη μείωση του PET για τον ενήλικα και τον ηλικιωμένο καταγράφεται στις 16:00, με τιμές περίπου -12,00 K και -12,11 K αντίστοιχα. Για το παιδικό προφίλ καταγράφεται επίσης σημαντική μείωση κατά τις απογευματινές ώρες, με τιμή περίπου -9,22 K στις 19:00 (Πίνακας 3.3.6.1). Η διαφορετική χρονική μορφή της απόκρισης του παιδικού προφίλ δεν τεκμηριώνει από μόνη της μετατόπιση της θερμικής ανακούφισης λόγω συγκεκριμένης θερμορυθμιστικής λειτουργίας. Δείχνει, όμως, ότι η αποτελεσματικότητα του συνδυαστικού σεναρίου δεν αποτυπώνεται με τον ίδιο τρόπο σε όλα τα ανθρωποκεντρικά προφίλ και ότι η αξιολόγησή της πρέπει να περιλαμβάνει ολόκληρη την ημερήσια εξέλιξη και όχι μόνο μία ώρα αιχμής.

Η διάκριση αυτή είναι κρίσιμη για τους υπαίθριους χώρους νοσοκομείων, όπου συνυπάρχουν ασθενείς, συνοδοί, ηλικιωμένοι, παιδιά και προσωπικό με διαφορετικές δυνατότητες προσαρμογής, κινητικότητας και αποφυγής της έκθεσης. Παρότι η κατηγορία των ασθενών δεν προσομοιώθηκε ως ενιαίο ανθρωποκεντρικό προφίλ λόγω της κλινικής και λειτουργικής ετερογένειάς της, η παρουσία της ενισχύει την ανάγκη εφαρμογής αρχών προληπτικής θερμικής προστασίας. Συνεπώς, ο σχεδιασμός δεν πρέπει να βασίζεται αποκλειστικά στις μέσες τιμές ή στο προφίλ ενός τυπικού ενήλικα, αλλά να λαμβάνει υπόψη τις περισσότερες ευάλωτες κατηγορίες χρηστών, τη διάρκεια έκθεσής τους σε

επιβαρυντικές θερμικές συνθήκες και τη δυνατότητα πρόσβασής τους σε συνεχείς σκιασμένες διαδρομές και προστατευμένες ζώνες αναμονής και σύντομης παραμονής.

4.3 Περιορισμοί της μελέτης και όρια εφαρμογής του S3

Το S3 αξιολογείται ως στοχευμένο σενάριο μετριασμού και όχι ως τελική μελέτη εφαρμογής· η διάκριση αυτή οριοθετεί τους περιορισμούς που ακολουθούν. Η παρούσα μελέτη βασίζεται σε μια θερμή ημέρα, συγκεκριμένη γεωμετρική αναπαράσταση και συγκεκριμένες παραμετροποιήσεις του μοντέλου ENVI-met 5.8.0 /BIO-met. Τα αποτελέσματα είναι κατάλληλα κυρίως για τη συγκριτική αξιολόγηση των σεναρίων S1 και S3 και όχι για πλήρη κλιματολογική περιγραφή της περιοχής.

Λόγω του ντετερμινιστικού χαρακτήρα του ENVI-met και της απουσίας συστηματικής ανάλυσης ευαισθησίας, δεν αποτιμήθηκε το εύρος αβεβαιότητας που συνδέεται με κρίσιμες παραμέτρους εισόδου, όπως οι οπτικές και θερμοφυσικές ιδιότητες των υλικών, τα χαρακτηριστικά της βλάστησης και η υγρασία του εδάφους.

Η παραμετροποίηση των οριακών μετεωρολογικών συνθηκών βασίστηκε σε πραγματικές ωριαίες καταγραφές του μετεωρολογικού σταθμού Αμπελοκήπων του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών, με συμπληρωματική αξιοποίηση της σχετικής υγρασίας από το αρχείο EPW Athens. Δεν πραγματοποιήθηκε ανεξάρτητη επικύρωση των προσομοιωμένων τιμών T_a και T_{mrt} με επιτόπιες μετρήσεις εντός της περιοχής μελέτης. Ο περιορισμός αυτός αναγνωρίζεται ως κατεύθυνση μελλοντικής έρευνας στην Ενότητα 5.2.3.

Επιπλέον, η ανθρωποκεντρική διαφοροποίηση των χρηστών αποτυπώθηκε κυρίως μέσω του PET, ο οποίος υπολογίστηκε για τα προφίλ ενηλίκου, ηλικιωμένου και παιδιού. Ο UTCI χρησιμοποιήθηκε συμπληρωματικά ως ενιαίος δείκτης αναφοράς θερμικού στρες, καθώς εκ του ορισμού του δεν παραμετροποιείται ανά ηλικιακό ή δημογραφικό προφίλ.

Η διερεύνηση στη στάθμη δώματος έχει συμπληρωματικό χαρακτήρα και δεν αποτελεί πλήρη αξιολόγηση βατού χώρου παραμονής. Η ανάλυση αποτυπώνει τη θερμική συμπεριφορά της συγκεκριμένης στάθμης και τη συνολική μικροκλιματική απόκριση του συνδυαστικού σεναρίου S3 στο PO2, χωρίς να επιτρέπει την ποσοτική απομόνωση της συνεισφοράς του εκτατικού φυτεμένου δώματος από τις λοιπές παρεμβάσεις του

σεναρίου. Παράλληλα, δεν εξετάζονται ζητήματα προσβασιμότητας, ασφάλειας, στατικής επάρκειας, χρήσης ή λειτουργικής ένταξης στον νοσοκομειακό χώρο. Επομένως, η πιθανή αξιοποίηση των δωματίων ως υπαίθριων χώρων αναμονής, ανάπαυσης ή θεραπευτικής υποστήριξης απαιτεί πρόσθετη τεχνική, στατική, λειτουργική και βιοκλιματική τεκμηρίωση.

Τέλος, η εργασία δεν ενσωματώνει παραμέτρους ατμοσφαιρικής ρύπανσης ούτε εξετάζει διακριτά τη συνεισφορά κάθε επιμέρους παρέμβασης του S3. Η επιλογή αυτή δεν αναιρεί την αξιοπιστία της συγκριτικής αξιολόγησης S3–S1, αλλά περιορίζει τη δυνατότητα πλήρους περιβαλλοντικής αποτίμησης του υπαίθριου χώρου. Επιπλέον, το σημείο PO1 εξετάζεται ως δυνητικά ανακτήσιμος υπαίθριος χώρος (βλ. Ενότητα 2.2.5)· η παραδοχή αυτή εφαρμόζεται ενιαία στα σενάρια S1 και S3 και δεν επηρεάζει τη συγκριτική εγκυρότητα, οριοθετεί ωστόσο τα ευρήματα του PO1 ως σχεδιαστικού χαρακτήρα. Τέλος, τα προφίλ PET παραμετροποιήθηκαν με σταθερό φύλο (άρρεν), ώστε να απομονωθεί η επίδραση της ηλικίας από εκείνη του φύλου· η διερεύνηση προφίλ διαφορετικού φύλου ή ειδικών κατηγοριών χρηστών, όπως οι έγκυες, προτείνεται ως κατεύθυνση μελλοντικής έρευνας. Οι περιορισμοί αυτοί διαμορφώνουν κατευθύνσεις μελλοντικής έρευνας, οι οποίες παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στην Ενότητα 5.2.3.

4.4 Αποτίμηση της συμβολής της εργασίας

Η συμβολή της παρούσας εργασίας αποτιμάται σε συνάρτηση με το ερευνητικό κενό που διατυπώθηκε στην Ενότητα 1.9 και με τις μελέτες που εξετάστηκαν συγκριτικά στην Ενότητα 4.2. Δεν έγκειται απλώς στη χρήση των εργαλείων ENVI-met και BIO-met, αλλά στον συνδυασμό χωρικής και χρονικής μικροκλιματικής αξιολόγησης, υπολογισμού του PET για τρία διακριτά προφίλ χρήστη, συμπληρωματικής χρήσης του UTCI ως τυποποιημένου δείκτη θερμικού στρες, σύγκρισης του σεναρίου αναφοράς S1 με το συνδυαστικό σενάριο παρέμβασης S3 και ερμηνείας των αποτελεσμάτων βάσει μεσογειακά προσαρμοσμένων κλιμάκων ταξινόμησης. Η κύρια αξιολόγηση πραγματοποιείται στη στάθμη πεζού και συμπληρώνεται από τη διερεύνηση στη στάθμη δώματος, προσδίδοντας κατακόρυφη διάσταση στην ανάλυση.

Η προσέγγιση αυτή επιτρέπει την αποτίμηση της θερμικής επιβάρυνσης ως χωρικά και χρονικά διαφοροποιημένου φαινομένου, το οποίο επηρεάζεται και από τις παραμέτρους του εξεταζόμενου προφίλ χρήστη. Παράλληλα, συνδέει τη μικροκλιματική προσομοίωση με τη χωρική ιεράρχηση των παρεμβάσεων και με τη λειτουργική σημασία των ζωνών κίνησης, αναμονής και σύντομης παραμονής στο νοσοκομειακό περιβάλλον. Στο εύρος των πηγών που εξετάστηκαν δεν εντοπίστηκε μελέτη με τον ίδιο συνδυασμό χαρακτηριστικών, χωρίς η διαπίστωση αυτή να συνιστά απόλυτο ισχυρισμό μοναδικότητας. Η θεωρητική, μεθοδολογική και εφαρμοσμένη συμβολή της εργασίας, καθώς και τα όρια μεταφοράς της προσέγγισης σε άλλες περιπτώσεις, αποτιμώνται αναλυτικά στην Ενότητα 5.2.2.

Κεφάλαιο 5. Συμπεράσματα, προτάσεις για εφαρμογή και μελλοντική έρευνα

Το παρόν κεφάλαιο συνοψίζει τα βασικά συμπεράσματα της έρευνας και διατυπώνει τις προτάσεις που προκύπτουν για την εφαρμογή των ευρημάτων και την περαιτέρω επιστημονική διερεύνηση. Σε σύνδεση με τις θεσμικές και πολιτικές προσεγγίσεις προσαρμογής των υποδομών υγείας στην αύξηση της θερμοκρασίας που αναπτύχθηκαν στην Ενότητα 1.8, τα αποτελέσματα της μελέτης αποκτούν ευρύτερη σημασία, καθώς συμβάλλουν στην τεκμηριωμένη ενίσχυση της ανθεκτικότητας των υπαίθριων νοσοκομειακών χώρων ως τμημάτων κρίσιμων αστικών υποδομών. Υπό το πρίσμα αυτό, η μικροκλιματική αναβάθμιση δεν περιορίζεται στη βελτίωση της θερμικής άνεσης, αλλά υποστηρίζει την ασφαλή λειτουργία και την κλιματική ανθεκτικότητα των μονάδων υγείας απέναντι στις αυξανόμενες θερμικές πιέσεις.

5.1 Συμπεράσματα

A. Σενάριο αναφοράς S1

Το σενάριο αναφοράς S1 χαρακτηρίζεται από υψηλή θερμική επιβάρυνση, η οποία συνδέεται κυρίως με την αυξημένη ακτινοβολιακή έκθεση, την υψηλή T_{mrt} και την περιορισμένη σκίαση σε κρίσιμες ζώνες του υπαίθριου νοσοκομειακού χώρου. Η ανάλυση ανέδειξε εκτεταμένες περιοχές πολύ υψηλού θερμικού στρες κατά τις ώρες υψηλής ηλιακής φόρτισης. Το φαινόμενο αυτό αποδίδεται στη μορφολογία του πυκνοδομημένου ιστού, στην περιορισμένη φυσική σκίαση, στις θερμοαπορροφητικές επιφάνειες και στις ασθενείς συνθήκες αερισμού στο επίπεδο του πεζού. Οι συνθήκες αυτές επηρεάζουν τη λειτουργικότητα του χώρου ως ζώνης κίνησης, στάσης και σύντομης παραμονής των χρηστών.

B. Μηχανισμός βελτίωσης στο σενάριο S3

Η συγκριτική αξιολόγηση του S3 έδειξε σημαντική μείωση της θερμικής επιβάρυνσης στις ζώνες εφαρμογής των παρεμβάσεων. Στους χάρτες χωρικής μεταβολής της κοινής ώρας αναφοράς των 16:00, οι μέγιστες τοπικές μειώσεις φτάνουν περίπου τα -14 K για τον PET και τα $-40,86\text{ K}$ για την T_{mrt} , κυρίως σε θέσεις άμεσης σκίασης. Οι τιμές αυτές είναι

συγκρίσιμες με υψηλές τιμές απόδοσης που αναφέρονται στη διεθνή και μεσογειακή βιβλιογραφία (Tsoka et al., 2018· Çelik & Tunçer, 2024· Battista et al., 2016).

Σε επίπεδο σημείων αναφοράς, οι διαφορές μεταξύ των τιμών αιχμής των δύο σεναρίων αποδίδονται ως $\Delta peak$. Για την T_{mrt} καταγράφονται $\Delta peak = -22,83$ K στο PO1 και $\Delta peak = -24,51$ K στο PO2, ενώ για τον UTCI οι αντίστοιχες τιμές είναι $-6,67$ K και $-7,11$ K. Οι τιμές αυτές δεν αποτελούν όλες μεταβολές κοινής χρονικής στιγμής. Ειδικότερα, στο PO2 οι αιχμές του S1 και του S3 εμφανίζονται στις 15:00 και στις 16:00, αντίστοιχα. Κατά την κοινή ώρα αναφοράς των 16:00, οι μεταβολές ίδιας ώρας στο PO2 είναι $\Delta T_{mrt} = -22,05$ K και $\Delta UTCI = -6,66$ K. Παράλληλα, η διάρκεια υπέρβασης του ορίου $UTCI > 39,9$ °C περιορίζεται από 6 σε 4 ώρες στο PO1 και από 11 σε 10 ώρες στο PO2.

Η χωρική επίδραση του S3 είναι εντονότερη στις θέσεις άμεσης σκίασης και εξασθενεί βαθμιαία με την απόσταση από τις παρεμβάσεις. Σε χρονική κλίμακα, η μεγαλύτερη ωφέλεια καταγράφεται κατά τις θερμικά δυσμενέστερες απογευματινές ώρες, κυρίως στο διάστημα 15:00–18:00, με τη ΔPET να φτάνει περίπου τα -12 K για το προφίλ ηλικιωμένου χρήστη στο PO1. Η χρονική αυτή σύμπτωση ενισχύει τη σημασία των παρεμβάσεων για όσους χρειάζεται να κινηθούν, να αναμείνουν ή να παραμείνουν σύντομα στον χώρο κατά τις ώρες αυξημένης θερμικής επιβάρυνσης. Σε περιορισμένες χωρικές ζώνες καταγράφονται οριακές θετικές μεταβολές των δεικτών. Η χωρική εμφάνιση των μεταβολών αυτών παρουσιάζεται στις Ενότητες 3.3.1–3.3.3 και ερμηνεύεται σε συνάρτηση με τη γεωμετρία, τη σκίαση, τον αερισμό και τις ιδιότητες των επιφανειών στην Ενότητα 4.2.1. Η περιορισμένη έκτασή τους δεν αναιρεί τη συνολικά θετική απόκριση του S3.

Γ. Σημείο PO1 και σενάριο S3

Στο PO1 το S3 οδηγεί σε σαφή μείωση της θερμικής επιβάρυνσης, με τις μεγαλύτερες μειώσεις PET κατά τις μεσημβρινές και απογευματινές ώρες. Η μείωση αυτή μπορεί να περιορίσει την πιθανή θερμική καταπόνηση των χρηστών κατά τις κρίσιμες ώρες έκθεσης, χωρίς όμως να αναιρεί την ανάγκη προσεκτικής επιλογής ωρών παραμονής στον χώρο.

Δ. Σημείο PO2 — στάθμη $z = 15$ m

Η συμπληρωματική κατακόρυφη διερεύνηση στο PO2 αποτύπωσε τη συνολική μικροκλιματική απόκριση του συνδυαστικού σεναρίου S3 στη στάθμη δώματος. Η

καταγραφόμενη βελτίωση είναι συμβατή με τη βιβλιογραφία για τη δυνητική συμβολή των πράσινων δωματίων στη μικροκλιματική βελτίωση πυκνοδομημένων αστικών περιοχών (Tseliou et al., 2023), χωρίς όμως να επιτρέπει την ποσοτική απομόνωση της επίδρασής τους από τις λοιπές παρεμβάσεις του S3.

Η αξιοποίηση των δωματίων ως χώρων παραμονής προϋποθέτει ολοκληρωμένο βιοκλιματικό σχεδιασμό και πρόσθετη τεχνική τεκμηρίωση για πρόσβαση, ασφάλεια και στατική επάρκεια. Η προοπτική αυτή εντάσσεται στις κατευθύνσεις μελλοντικής έρευνας της Ενότητας 5.2.3.

Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι οι υπερυψωμένες στάθμες μπορούν να εμφανίζουν ιδιαίτερα υψηλή ακτινοβολιακή επιβάρυνση. Επομένως, δεν πρέπει να θεωρούνται αυτομάτως κατάλληλοι χώροι παραμονής χωρίς πρόσθετη σκίαση, ακτινοβολιακή προστασία και ειδικό μικροκλιματικό έλεγχο.

Ε. Ευάλωτες ομάδες

Τα τρία ανθρωποκεντρικά προφίλ εμφανίζουν διαφορετική θερμική καταπόνηση, παρότι εκτίθενται στο ίδιο μικροκλιματικό πεδίο. Ιδιαίτερη σημασία έχει το εύρημα για το παιδικό προφίλ (αναλύεται διεξοδικά στο 3.4.2): η αυξημένη ευαλωτότητα των παιδιών δεν εκδηλώνεται ως υψηλότερη μέγιστη τιμή PET, αλλά ως έλλειψη επαρκώς δροσερών ζωνών στον υπαίθριο χώρο. Η ελάχιστη τιμή PET για το παιδικό προφίλ (45,91 °C) είναι σημαντικά υψηλότερη από εκείνη των άλλων προφίλ (περίπου 41 °C), με μικρότερο εύρος ημερήσιας μεταβολής (13,88 K έναντι 20–21 K). Επομένως, το βιοκλιματικό σχεδιαστικό κριτήριο για παιδιά πρέπει να επικεντρώνεται στη δημιουργία περισσότερων και καλύτερα κατανεμημένων ζωνών θερμικής ανακούφισης σε ολόκληρο τον χώρο, και όχι μόνο στη μείωση των ακραίων τιμών σε σημεία αιχμής. Συνολικά, η διαφοροποίηση των προφίλ δείχνει ότι οι ίδιες μικροκλιματικές συνθήκες μπορούν να αποδώσουν διαφορετική θερμοφυσιολογική απόκριση.

ΣΤ. Συνολική αποτελεσματικότητα και όρια εφαρμογής του S3

Το συνδυαστικό σενάριο S3 αποτελεί αποτελεσματική στρατηγική βιοκλιματικού μετριασμού της θερμικής επιβάρυνσης σε υπαίθριο νοσοκομειακό χώρο μεσογειακού αστικού περιβάλλοντος, χωρίς να εξασφαλίζει πλήρη θερμική άνεση κατά τις ώρες αιχμής. Η αποτελεσματικότητά του προκύπτει από τη συνδυαστική δράση της φύτευσης, της

σκίασης, της βελτίωσης των υλικών επιφανειών και των παρεμβάσεων στα δώματα, καθώς και από τη χωρική στόχευση των μέτρων στις πλέον επιβαρυνμένες ζώνες λειτουργικής σημασίας.

Το S3 περιορίζει την ένταση και τη διάρκεια της θερμικής επιβάρυνσης, χωρίς να καταργεί πλήρως τις ακραίες συνθήκες θερμικού στρες. Η βελτίωση αυτή μπορεί να συμβάλει στον περιορισμό της πιθανής θερμικής καταπόνησης των ευάλωτων χρηστών, ιδίως στις θέσεις όπου οι παρεμβάσεις σκίασης, φύτευσης και τροποποίησης των υλικών μειώνουν την άμεση ηλιακή έκθεση και τη συνολική ακτινοβολιακή επιβάρυνση. Η θερμική προστασία μπορεί να ενισχυθεί περαιτέρω όταν οι σχεδιαστικές παρεμβάσεις συνδέονται με επιχειρησιακά μέτρα διαχείρισης καυσώνων, όπως τα Σχέδια Δράσης για τη Ζέστη και την Υγεία (Heat-Health Action Plans), τα οποία αναπτύχθηκαν στην Ευρώπη μετά τον καύσωνα του 2003 (Matthies et al., 2008).

Τα αριθμητικά μεγέθη των μειώσεων που καταγράφηκαν πρέπει να ερμηνεύονται εντός του συγκεκριμένου πεδίου εφαρμογής, δηλαδή του Γ.Ν.Α. «Αλεξάνδρα» και της ιδιαίτερης αστικής μορφολογίας του. Δεν αποτελούν καθολικά μεταβιβάσιμες τιμές για κάθε υπαίθριο νοσοκομειακό χώρο, καθώς επηρεάζονται από τη γεωμετρία του αστικού ιστού, τον προσανατολισμό, τη σχέση ύψους/πλάτους, τα υλικά επιφανειών, τη βλάστηση και τις τοπικές μετεωρολογικές συνθήκες. Η αναλυτική αποτίμηση της μεθοδολογικής και εφαρμοσμένης συμβολής της εργασίας παρουσιάζεται στην Ενότητα 5.2.2.

Το πλαίσιο αυτό συνδυάζει ποσοτική, χωρική και ανθρωποκεντρική αξιολόγηση της θερμικής επιβάρυνσης υπαίθριων νοσοκομειακών χώρων και της πιθανής θερμικής καταπόνησης ευάλωτων χρηστών. Μπορεί έτσι να υποστηρίξει μελλοντικές παρεμβάσεις κλιματικής προσαρμογής σε αντίστοιχες υποδομές υγείας, ιδίως σε πυκνοδομημένα μεσογειακά αστικά περιβάλλοντα. Υπό αυτή την έννοια, οι βιοκλιματικές παρεμβάσεις δεν αξιολογούνται μόνο ως τεχνικά μέτρα μείωσης δεικτών, αλλά ως μέρος μιας ευρύτερης στρατηγικής προσαρμογής, η οποία ενισχύει την προστασία, την προσβασιμότητα και τη λειτουργική ποιότητα των υπαίθριων χώρων υγείας υπό αυξανόμενες θερμικές πιέσεις.

5.2 Προτάσεις για εφαρμογή και κατευθύνσεις μελλοντικής έρευνας

Τα ευρήματα επιτρέπουν τη διατύπωση συγκεκριμένων κατευθύνσεων για τον σχεδιασμό, την αναβάθμιση και τη διαχείριση υπαίθριων χώρων νοσοκομειακών συγκροτημάτων και, ευρύτερα, αστικών υποδομών υγείας. Οι κατευθύνσεις αυτές βασίζονται στη διαπιστωμένη επίδραση του αστικού μικροκλίματος στη θερμική άνεση, στην έκθεση των χρηστών σε θερμικό στρες και στη λειτουργική και περιβαλλοντική ποιότητα των χώρων υγείας. Παράλληλα, η μελέτη αναδεικνύει τη χρησιμότητα της μικροκλιματικής προσομοίωσης ως εργαλείου υποστήριξης τεκμηριωμένων αποφάσεων σχεδιασμού και διαμορφώνει τη βάση για περαιτέρω ερευνητική διερεύνηση.

Η συμβολή της εργασίας επεκτείνεται στη δυνατότητα σύνδεσης της μικροκλιματικής προσομοίωσης με τον ευρύτερο χωρικό και λειτουργικό σχεδιασμό των υποδομών υγείας. Η ανάλυση σε επίπεδο νοσοκομειακού υπαίθριου χώρου μπορεί να λειτουργήσει ως παράδειγμα εφαρμοσμένης τεκμηρίωσης για χρήσεις υψηλής κοινωνικής ευαισθησίας. Το μεθοδολογικό πλαίσιο που αναπτύχθηκε μπορεί να υποστηρίξει μελλοντικές προσεγγίσεις σχεδιασμού που ενσωματώνουν κριτήρια θερμικής άνεσης, κλιματικής ανθεκτικότητας και προστασίας ευάλωτων χρηστών, χωρίς να υποκαθιστά τα θεσμοθετημένα εργαλεία πολεοδομικού και τεχνικού σχεδιασμού.

5.2.1 Συνοπτικές εφαρμοστικές κατευθύνσεις

Οι σχεδιαστικές και λειτουργικές κατευθύνσεις δείχνουν ότι η θερμική προστασία των υπαίθριων νοσοκομειακών χώρων πρέπει να βασίζεται σε χωρικά στοχευμένες παρεμβάσεις και όχι σε γενικευμένες ή αποσπασματικές διαμορφώσεις. Προτεραιότητα πρέπει να δίνεται στις ζώνες κίνησης, στάσης και αναμονής, όπου η έκθεση των χρηστών είναι συχνότερη, λειτουργικά αναγκαία ή αφορά ευάλωτες ομάδες.

Κεντρικός άξονας των εφαρμοστικών κατευθύνσεων είναι η μείωση της ακτινοβολιακής επιβάρυνσης μέσω συνεχών σκιασμένων διαδρομών, προστατευμένων σημείων αναμονής, στοχευμένης φύτευσης και κατάλληλης επιλογής υλικών επιφανειών. Τα αποτελέσματα της εργασίας δείχνουν ότι η θερμοκρασία αέρα μεταβάλλεται περιορισμένα, ενώ οι μεγαλύτερες βελτιώσεις συνδέονται με τη μείωση της T_{mrt} και τη βελτίωση των τιμών UTCI και PET. Οι παρεμβάσεις πρέπει, συνεπώς, να αξιολογούνται κυρίως ως προς τον περιορισμό της ακτινοβολιακής έκθεσης και όχι μόνο βάσει της μεταβολής της θερμοκρασίας αέρα.

Ιδιαίτερη προσοχή απαιτείται στις ζώνες υψηλής T_{mrt} και αυξημένης άμεσης βραχέος κύματος ηλιακής ακτινοβολίας, καθώς και στους υπερυψωμένους χώρους και στα δώματα. Η συμπληρωματική διερεύνηση στο PO2 έδειξε ότι τα δώματα δεν πρέπει να θεωρούνται αυτομάτως κατάλληλοι χώροι παραμονής ή θερμικής ανακούφισης χωρίς πρόσθετη σκίαση, τεχνική διερεύνηση, ασφαλή πρόσβαση, λειτουργική ένταξη και συνολικό έλεγχο του ακτινοβολιακού περιβάλλοντος.

Οι κατευθύνσεις αυτές ευθυγραμμίζονται με τους στόχους του κλιματικού σχεδιασμού του Δήμου Αθηναίων για τον περιορισμό της αστικής θερμικής νησίδας και την προστασία των ευάλωτων ομάδων. Ειδικότερα, η εφαρμογή σκίασης, η ενίσχυση της φύτευσης και η βελτίωση των υλικών επιφανειών μπορούν να συμβάλουν στη μείωση της τοπικής θερμικής επιβάρυνσης και στην ενίσχυση της κλιματικής ανθεκτικότητας χώρων υψηλής λειτουργικής και κοινωνικής σημασίας, όπως οι υποδομές υγείας (Αθηναίων, 2022).

Συνολικά, οι εφαρμοστικές κατευθύνσεις της εργασίας υποστηρίζουν μια ολοκληρωμένη στρατηγική θερμικής προστασίας, η οποία συνδυάζει σκίαση, φύτευση, κατάλληλα υλικά, ανάκτηση λειτουργικά κρίσιμων υπαίθριων χώρων και μικροκλιματική τεκμηρίωση των παρεμβάσεων. Η στρατηγική αυτή δεν υποκαθιστά την απαιτούμενη τεχνική μελέτη εφαρμογής, αλλά παρέχει τεκμηριωμένη βάση για τον σχεδιασμό, την ιεράρχηση και τη μελλοντική ωρίμανση παρεμβάσεων κλιματικής προσαρμογής σε υπαίθριους χώρους νοσοκομείων.

5.2.2 Συμβολή της εργασίας

Σε συνέχεια του ερευνητικού κενού που διατυπώθηκε στην Ενότητα 1.9 και εξετάστηκε συγκριτικά στην Ενότητα 4.2.2, η παρούσα διπλωματική εργασία συμβάλλει στη συστηματική διερεύνηση της θερμικής επιβάρυνσης στους υπαίθριους χώρους νοσοκομείων. Το πεδίο αυτό παραμένει λιγότερο μελετημένο σε σύγκριση με άλλες κατηγορίες αστικών υπαίθριων χώρων, όπως οι πλατείες, τα πάρκα και οι αστικές χαράδρες. Η έρευνα εφαρμόζει μικροκλιματική προσομοίωση σε υφιστάμενο νοσοκομειακό συγκρότημα, το Γ.Ν.Α. «Αλεξάνδρα», το οποίο εντάσσεται σε πυκνοδομημένο μεσογειακό αστικό περιβάλλον και εξυπηρετεί χρήστες με διαφορετικό βαθμό θερμικής ευαλωτότητας.

Στο εύρος των πηγών που εξετάστηκαν κατά τη βιβλιογραφική ανασκόπηση, δεν εντοπίστηκε μελέτη με τον ίδιο συνδυασμό χαρακτηριστικών. Η παρούσα εφαρμογή συνδυάζει τη διερεύνηση νοσοκομειακού υπαίθριου χώρου σε πυκνοδομημένο μεσογειακό περιβάλλον, τη χρήση των εργαλείων ENVI-met 5.8.0 και BIO-met, την αξιολόγηση διαφορετικών ηλικιακών προφίλ, τη σύγκριση του σεναρίου αναφοράς S1 με το συνδυαστικό σενάριο παρέμβασης S3, την ανάλυση στη στάθμη πεζού και στη στάθμη δώματος και την ερμηνεία των αποτελεσμάτων PET και UTCI βάσει μεσογειακά προσαρμοσμένων κλιμάκων ταξινόμησης. Η διαπίστωση αυτή περιορίζεται στο εύρος της συγκεκριμένης βιβλιογραφικής ανασκόπησης και δεν συνιστά απόλυτο ισχυρισμό μοναδικότητας.

Η βασική μεθοδολογική συμβολή της εργασίας έγκειται στη διαμόρφωση ενός πολυπαραμετρικού πλαισίου αξιολόγησης, το οποίο συνδυάζει τη χωρική κατανομή των μικροκλιματικών παραμέτρων, τη χρονική εξέλιξη των βιοκλιματικών δεικτών και τη διαφοροποιημένη ανθρωποκεντρική αξιολόγηση μέσω του PET. Ο UTCI αξιοποιείται συμπληρωματικά ως ενιαίος δείκτης αναφοράς θερμικού στρες, ενώ ο PET υπολογίζεται διακριτά για τα επιλεγμένα προφίλ χρήστη. Με την προσέγγιση αυτή, η θερμική επιβάρυνση δεν αντιμετωπίζεται ως ενιαία και ομοιόμορφη κατάσταση, αλλά ως φαινόμενο που διαφοροποιείται χωρικά, χρονικά και ανάλογα με τις παραμέτρους του εξεταζόμενου χρήστη.

Ιδιαίτερη μεθοδολογική συνεισφορά αποτελεί η παράλληλη εξέταση των προφίλ ενηλίκου, ηλικιωμένου και παιδιού υπό το ίδιο μικροκλιματικό πεδίο. Η προσέγγιση αυτή έδειξε ότι η θερμική επιβάρυνση ενός νοσοκομειακού υπαίθριου χώρου δεν αποδίδεται πλήρως όταν η αξιολόγηση βασίζεται αποκλειστικά σε ένα τυπικό ενήλικο προφίλ, καθώς οι υπολογιζόμενες τιμές PET διαφοροποιούνται ανάλογα με τις ανθρωπομετρικές και βιοφυσικές παραμέτρους που εισήχθησαν στο BIO-met για κάθε προφίλ. Παράλληλα, η συνεκτίμηση της διάρκειας έκθεσης στις υψηλότερες κατηγορίες PET συμπληρώνει την αξιολόγηση των στιγμιαίων τιμών αιχμής και αναδεικνύει τη χρονική διάσταση της θερμικής επιβάρυνσης.

Η κύρια αξιολόγηση στη στάθμη πεζού, σε συνδυασμό με τη συμπληρωματική σύγκριση στη στάθμη δώματος, προσθέτει κατακόρυφη διάσταση στη διερεύνηση. Τα

αποτελέσματα έδειξαν ότι ένα υπερυψωμένο επίπεδο δεν μπορεί να θεωρείται αυτομάτως θερμικά ευνοϊκότερο, καθώς η ακτινοβολιακή έκθεση και η μέση ακτινοβολούμενη θερμοκρασία μπορούν να διαμορφώσουν δυσμενείς συνθήκες ακόμη και όταν η θερμοκρασία αέρα παραμένει σε παρόμοια τάξη μεγέθους. Η διαπίστωση αυτή είναι χρήσιμη για νοσοκομειακά συγκροτήματα στα οποία τα δώματα εξετάζονται ως δυνητικές επιφάνειες βιοκλιματικής παρέμβασης και, μόνο υπό πρόσθετες προϋποθέσεις ασφάλειας, προσβασιμότητας, λειτουργικής ένταξης και θερμικής προστασίας, ως πιθανοί χώροι παραμονής.

Σε εφαρμοσμένο επίπεδο, η εργασία παρέχει τεκμηριωμένη βάση για τη χωρική ιεράρχηση παρεμβάσεων θερμικής προστασίας. Η σύγκριση του σεναρίου αναφοράς S1 με το συνδυαστικό σενάριο S3 ανέδειξε ότι οι παρεμβάσεις δεν επιφέρουν ομοιόμορφη ψύξη στο σύνολο του πεδίου, αλλά δημιουργούν χωρικά εντοπισμένες ζώνες θερμικής ανακούφισης. Η εφαρμοστική τους αξία εξαρτάται, επομένως, από τη χωροθέτησή τους σε σχέση με τις λειτουργικά κρίσιμες ζώνες κίνησης, αναμονής και σύντομης παραμονής, καθώς και από τη γεωμετρία, τη σκίαση, το ακτινοβολιακό περιβάλλον και τις συνθήκες αερισμού του χώρου.

Η σύνθετη χωρική αποτίμηση που αναπτύχθηκε στην παρούσα εργασία, με βάση τα πεδία PET(S1), PET(S3) και ΔPET, μπορεί να λειτουργήσει ως ενδιάμεσο μεθοδολογικό εργαλείο μεταξύ της θερμικής χαρτογράφησης και της προκαταρκτικής διατύπωσης μετρήσιμων κριτηρίων σχεδιασμού. Στη συγκεκριμένη εφαρμογή, η σύνθεση αφορά το προφίλ ηλικιωμένου χρήστη, την ώρα αναφοράς των 16:00 και τη στάθμη πεζού. Η συνεξέταση της απόλυτης τιμής του PET στο σενάριο αναφοράς και της αποτελεσματικότητας του S3 μέσω του ΔPET επιτρέπει τον εντοπισμό τόσο των θερμικά επιβαρυνμένων ζωνών όσο και των περιοχών όπου οι παρεμβάσεις εμφανίζουν μεγαλύτερη ή μικρότερη απόδοση. Σε μελλοντικές εφαρμογές, η μέθοδος θα μπορούσε να υποστηρίξει την προκαταρκτική διαμόρφωση και τον έλεγχο διαφοροποιημένων κριτηρίων σκίασης, πράσινης κάλυψης ή άλλων μέτρων θερμικής προστασίας ανά ζώνη θερμικού κινδύνου. Για την εξαγωγή δεσμευτικών απαιτήσεων θα απαιτούνταν εφαρμογή σε περισσότερες περιπτώσεις μελέτης, έλεγχος ευαισθησίας, επιτόπια επικύρωση και σύνδεση με το ισχύον θεσμικό και τεχνικό πλαίσιο. Η χωρική αποτίμηση θα μπορούσε επίσης να συμπληρωθεί

με αποτελέσματα UTCI και ΔUTCI, με επιτόπιες μετρήσεις και με δεδομένα θερμικής χαρτογράφησης ευρύτερης κλίμακας.

Η μεθοδολογική προσέγγιση μπορεί να αξιοποιηθεί ως βάση για αντίστοιχες μελέτες σε άλλες υγειονομικές υποδομές μεσογειακών πόλεων, υπό την προϋπόθεση ότι η γεωμετρία, οι χρήσεις, οι κλιματικές συνθήκες και οι λειτουργικοί περιορισμοί παραμετροποιούνται ειδικά για κάθε περίπτωση. Υπό αυτή την έννοια, η εργασία συνδέει τη θεωρητική τεκμηρίωση της υπαίθριας θερμικής άνεσης και της κλιματικής ευαλωτότητας με την εφαρμοσμένη μικροκλιματική αξιολόγηση, τη διαφοροποιημένη εξέταση των χρηστών και τη χωρική ιεράρχηση των παρεμβάσεων σε ένα πραγματικό νοσοκομειακό περιβάλλον. Το προτεινόμενο πλαίσιο είναι προσαρμόσιμο και δυνητικά μεταβιβάσιμο, αλλά δεν υποκαθιστά τα θεσμοθετημένα εργαλεία χωρικού και τεχνικού σχεδιασμού, την επιτόπια επικύρωση ή την απαιτούμενη τεχνική μελέτη εφαρμογής.

5.2.3 Κατευθύνσεις μελλοντικής έρευνας

Η παρούσα εργασία παρέχει τη βάση για περαιτέρω έρευνα στη μικροκλιματική αξιολόγηση των υπαίθριων χώρων υγειονομικών υποδομών. Οι προτεινόμενες κατευθύνσεις οργανώνονται σε πέντε θεματικές δέσμες, οι οποίες αφορούν τη βελτίωση της μεθοδολογικής αξιοπιστίας, τη διεύρυνση των εξεταζόμενων σεναρίων, την ενίσχυση της ανθρωποκεντρικής διάστασης, την ολοκληρωμένη διεπιστημονική αξιολόγηση και τη μεταφορά της μεθοδολογίας σε ευρύτερες χωρικές κλίμακες.

Μια πρώτη κατεύθυνση αφορά την ενίσχυση της μεθοδολογικής ακρίβειας και της αξιοπιστίας του μοντέλου. Η επικύρωση των αποτελεσμάτων με επιτόπιες μετρήσεις θερμοκρασίας αέρα, σχετικής υγρασίας, ταχύτητας ανέμου, ακτινοβολιακών παραμέτρων και επιφανειακών θερμοκρασιών θα παρείχε δεδομένα σε επίπεδο ανθρώπινης κλίμακας και θα υποστήριζε τη βαθμονόμηση και την επαλήθευση του ENVI-met. Οι μετρήσεις θα μπορούσαν να πραγματοποιηθούν σε σταθερά και κινητά σημεία, με όργανα αναφοράς ή με δίκτυα αισθητήρων χαμηλού κόστους, υπό την προϋπόθεση προηγούμενης βαθμονόμησής τους. Παράλληλα, απαιτείται συστηματική ανάλυση ευαισθησίας ως προς κρίσιμες παραμέτρους εισόδου, όπως η ηλιακή ανακλαστικότητα και οι θερμοφυσικές ιδιότητες των υλικών, ο δείκτης φυλλικής επιφάνειας, τα χαρακτηριστικά της βλάστησης και η υγρασία του εδάφους. Η προσέγγιση αυτή θα επέτρεπε την εκτίμηση του εύρους

αβεβαιότητας των αποτελεσμάτων και θα ενίσχυε την αξιοπιστία των συγκριτικών συμπερασμάτων.

Στον ίδιο μεθοδολογικό άξονα εντάσσεται η διακριτή αξιολόγηση των επιμέρους παρεμβάσεων. Η αυτόνομη προσομοίωση της αλλαγής των υλικών, της ενίσχυσης της φύτευσης, της εφαρμογής σκίασης και των παρεμβάσεων στα δώματα θα επέτρεπε την απομόνωση της συνεισφοράς κάθε στρατηγικής. Θα μπορούσε επίσης να υποστηρίξει την ιεράρχηση των παρεμβάσεων ως προς τη μικροκλιματική τους αποτελεσματικότητα, χωρίς η συνολική απόκριση να αποδίδεται αδιακρίτως στο συνδυαστικό σενάριο.

Μια δεύτερη κατεύθυνση αφορά τη διεύρυνση των εξεταζόμενων σεναρίων και των κλιματικών συνθηκών. Πέρα από το συνδυαστικό σενάριο της παρούσας εργασίας, θα μπορούσαν να αξιολογηθούν εναλλακτικές μορφές σκίασης, όπως πέργκολες, στέγαστρα και ελαφρές κατασκευές, διαφορετικοί τύποι βλάστησης και τιμές δείκτη φυλλικής επιφάνειας, μεγαλύτερα ποσοστά φυτοκάλυψης, εναλλακτικές διατάξεις δενδροφύτευσης και διαφορετικοί συνδυασμοί υλικών επιφανειών. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι λύσεις άμεσου περιορισμού της ηλιακής έκθεσης, όπως τα συνεχή σκιασμένα δίκτυα κίνησης και οι στοχευμένες γραμμικές, ομαδικές ή πλεγματικές φυτεύσεις.

Η αξιολόγηση θα μπορούσε επίσης να επεκταθεί σε καύσωνες πολλαπλών ημερών, σε νυχτερινές συνθήκες αστικής θερμικής νησίδας, σε διαφορετικές εποχές και σε περισσότερες ώρες της ημέρας. Με τον τρόπο αυτό θα μπορούσε να εξεταστεί η χρονική σταθερότητα της αποτελεσματικότητας των παρεμβάσεων. Η εφαρμογή μελλοντικών κλιματικών σεναρίων RCP ή SSP, ανάλογα με το χρησιμοποιούμενο κλιματικό σύνολο δεδομένων, θα επέτρεπε επιπλέον την αξιολόγηση της ανθεκτικότητας των προτεινόμενων λύσεων σε μεσοπρόθεσμο και μακροπρόθεσμο ορίζοντα.

Μια τρίτη κατεύθυνση εστιάζει στην ανθρωποκεντρική διάσταση της αξιολόγησης. Η ενσωμάτωση ερωτηματολογίων θερμικής αίσθησης (Thermal Sensation Vote, TSV) και θερμικής προτίμησης (Thermal Preference Vote, TPV) θα μπορούσε να συνδέσει τις αντικειμενικές μικροκλιματικές παραμέτρους με την υποκειμενική εμπειρία ασθενών, συνοδών και προσωπικού. Η σύνδεση αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική για τις ευάλωτες ομάδες, στις οποίες η σχέση μεταξύ περιβαλλοντικής έκθεσης, φυσιολογικής επιβάρυνσης και αντιληπτής δυσφορίας δεν είναι πάντοτε γραμμική.

Η περαιτέρω εξειδίκευση των προφίλ χρήστη θα μπορούσε να περιλάβει ηλικιωμένους με περιορισμένη κινητικότητα, άτομα με μειωμένη θερμορυθμιστική ικανότητα και ασθενείς με συγκεκριμένες παθήσεις ή θεραπευτικές αγωγές. Λόγω του μαιευτικού και γυναικολογικού χαρακτήρα του Γ.Ν.Α. «Αλεξάνδρα», θα μπορούσαν επίσης να εξεταστούν έγκυες, λεχώνες, νεογνά και βρέφη. Η ανάπτυξη τέτοιων προφίλ προϋποθέτει, ωστόσο, κατάλληλα φυσιολογικά δεδομένα και ανεξάρτητη επιστημονική επικύρωση και δεν μπορεί να βασιστεί μόνο σε απλή μεταβολή των παραμέτρων του BIO-met. Συμπληρωματικά, η συστηματική παρατήρηση των διαδρομών, των σημείων στάσης, των περιοχών παραμονής και των ζωνών αποφυγής θα επέτρεπε τη σύνδεση των προσομοιωμένων συνθηκών με την πραγματική χρήση και τη λειτουργικότητα του χώρου. Μια τέταρτη κατεύθυνση αφορά την ολοκληρωμένη και διεπιστημονική αξιολόγηση. Σε νοσοκομειακά συγκροτήματα με αυξημένη κυκλοφοριακή επιβάρυνση, η συνδυασμένη εξέταση θερμικών συνθηκών και ποιότητας αέρα, μέσω παραμέτρων όπως τα PM₁₀, PM_{2.5}, NO₂ και O₃, θα παρείχε πληρέστερη εικόνα της συνολικής περιβαλλοντικής έκθεσης. Η συνεξέταση αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική σε χώρους όπου συγκεντρώνονται άτομα με αυξημένη αναπνευστική ή καρδιαγγειακή ευαισθησία.

Τα φυτεμένα δώματα θα μπορούσαν να μελετηθούν τόσο ως τεχνικές επιφάνειες μικροκλιματικής βελτίωσης όσο και ως δυνητικοί χώροι ανάπαυσης ή θεραπευτικής υποστήριξης. Η αξιολόγησή τους θα πρέπει να περιλαμβάνει διαφορετικούς τύπους φύτευσης και σκίασης, καθώς και ζητήματα προσβασιμότητας, ασφάλειας, στατικής επάρκειας, συντήρησης και λειτουργικής ένταξης. Στους χώρους αυτούς, επιτόπιες μετρήσεις του δείκτη WBGT θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν ως συμπληρωματικό επιχειρησιακό μέτρο θερμικής καταπόνησης, χωρίς να θεωρούνται αριθμητικά ισοδύναμες με τους δείκτες PET και UTCI ή με τη μεταβλητή T_{mrt} .

Η σύνδεση της μικροκλιματικής με την ενεργειακή προσομοίωση των κτιρίων θα επέτρεπε την ποσοτική αποτίμηση της επίδρασης της σκίασης, της βλάστησης, των ψυχρών υλικών και των φυτεμένων δωματίων στα ψυκτικά φορτία. Με τον τρόπο αυτό θα μπορούσαν να συνεξεταστούν η εξωτερική θερμική επιβάρυνση, η ενεργειακή λειτουργία των κτιρίων και η αστική θερμική νησίδα. Μια πολυκριτηριακή ανάλυση κόστους-οφέλους θα μπορούσε, επιπλέον, να αξιολογήσει τις παρεμβάσεις ως προς το κόστος κατασκευής και

συντήρησης, τη λειτουργική συμβατότητα, την προσβασιμότητα, την ασφάλεια, την εξοικονόμηση ενέργειας και τη συμβολή τους στη δημόσια υγεία και στην επιχειρησιακή ανθεκτικότητα των μονάδων υγείας.

Μια πέμπτη κατεύθυνση αφορά τη μεταφερσιμότητα της μεθοδολογίας και τη διεύρυνση της εφαρμογής της σε κλίμακα πόλης. Η εφαρμογή της σε περισσότερα νοσοκομεία της Αθήνας και άλλων μεσογειακών πόλεων, με διαφορετική αστική μορφολογία, προσανατολισμό, ηλικία κατασκευής, ποσοστό φύτευσης και χαρακτήρα νοσηλείας, θα επέτρεπε τον έλεγχο της γενικευσιμότητας των ευρημάτων. Παράλληλα, μια πολυκλιμακική προσέγγιση θερμικής χαρτογράφησης θα μπορούσε να συνδέσει τη μικροκλιματική ανάλυση του νοσοκομειακού συγκροτήματος με την ευρύτερη θερμική γεωγραφία της πόλης.

Τα δεδομένα παρατήρησης της Γης και ειδικότερα η θερμοκρασία επιφάνειας γης (Land Surface Temperature, LST) μπορούν να υποστηρίξουν τον αρχικό εντοπισμό εκτεταμένων θερμών ζωνών, χωρίς να υποκαθιστούν την ανθρωποκεντρική αξιολόγηση σε επίπεδο πεζού. Η συμπληρωματική χρήση δικτυωμένων αισθητήρων θα παρείχε δεδομένα τοπικής επαλήθευσης, ενώ οι δείκτες PET και UTCI θα επέτρεπαν την αποτίμηση της θερμικής επιβάρυνσης με βάση συνδυασμένες μικροκλιματικές μεταβλητές. Η συνεξέταση κοινωνικών και δημογραφικών δεικτών τρωτότητας θα μπορούσε να υποστηρίξει τη μετάβαση από τη χαρτογράφηση της θερμικής έκθεσης σε ολοκληρωμένη χωρική αποτίμηση του θερμικού κινδύνου (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2022; Keramitsoglou et al., 2013).

Η αντιμετώπιση του υψηλού υπολογιστικού κόστους αποτελεί επίσης κρίσιμη προϋπόθεση για την εφαρμογή της μεθόδου σε μεγαλύτερες χωρικές και χρονικές κλίμακες. Μοντέλα μηχανικής μάθησης τύπου υποκατάστασης ή εξομοιωτή (surrogate ή emulator models), εκπαιδευμένα σε αποτελέσματα αριθμητικών προσομοιώσεων, θα μπορούσαν να εκτιμούν μεταβλητές και δείκτες θερμικής επιβάρυνσης με χαμηλότερο υπολογιστικό κόστος. Πρόσφατες εφαρμογές δείχνουν ότι τέτοιες προσεγγίσεις μπορούν να υποστηρίξουν τη χαρτογράφηση των PET και UTCI σε υψηλή χωρική ανάλυση και για εκτεταμένες χρονικές περιόδους. Η αξιοποίησή τους προϋποθέτει επαρκές σύνολο

δεδομένων εκπαίδευσης, ανεξάρτητη επικύρωση και σαφή αποτίμηση της αβεβαιότητας των προβλέψεων.

Η εφαρμογή της μεθοδολογίας σε περισσότερες περιπτώσεις θα μπορούσε, μετά από κατάλληλη επικύρωση, να υποστηρίξει τη διαμόρφωση ενδεικτικών κριτηρίων θερμικής προστασίας. Τέτοια κριτήρια θα μπορούσαν να αφορούν ελάχιστα ποσοστά σκιασμένων διαδρομών, ζώνες προτεραιότητας παρέμβασης ή στόχους περιορισμού της διάρκειας έκθεσης σε υψηλές κατηγορίες θερμικής επιβάρυνσης. Η διατύπωση δεσμευτικών ορίων ή μέγιστων αποδεκτών τιμών για ευάλωτους χρήστες θα απαιτούσε, ωστόσο, ευρύτερη εμπειρική τεκμηρίωση, κλινική και επιδημιολογική συσχέτιση και σύνδεση με τα αρμόδια θεσμικά και τεχνικά πρότυπα.

Συνολικά, η μικροκλιματική αναβάθμιση των υπαίθριων χώρων υγειονομικών υποδομών αποτελεί σημαντική συνιστώσα της κλιματικής ανθεκτικότητας. Η παρούσα εργασία παρέχει μια τεκμηριωμένη αφετηρία για τη συστηματικότερη ενσωμάτωση της μικροκλιματικής διάστασης στον σχεδιασμό, στην αξιολόγηση και στη διαχείριση των δημόσιων υποδομών υγείας στις μεσογειακές πόλεις. Υπό συνθήκες αυξανόμενης θερμικής πίεσης, η αξιολόγηση των νοσοκομειακών υπαίθριων χώρων μπορεί να υποστηρίξει την ασφαλέστερη, λειτουργικότερη και περισσότερο ανθεκτική προσαρμογή των μονάδων υγείας.

Βιβλιογραφία

- Ahmad, M. I., Klinmalee, R., Corvacho, H., Gaspar, F., Conceição, P., Cruz, S., Batista, L., Rocha, C., Alves, F., Ribeiro, A. S. N., Ramos, R. J. G., Lameira, G., Martins, A., Fernandes, A. S., da Silva, J. B., Figueiredo, T., Midão, L., Alcântara, L., Mimoso, I., & Costa, E. (2026). Outdoor Thermal Comfort of Older People in Vulnerable Urban Areas in a Warming World: Evidence from Porto, Portugal. *Urban Science*, 10(5), 249. <https://doi.org/10.3390/urbansci10050249>
- Akbari, H., Pomerantz, M., & Taha, H. (2001). Cool surfaces and shade trees to reduce energy use and improve air quality in urban areas. *Solar Energy*, 70(3), 295–310. [https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(00\)00089-X](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(00)00089-X)
- Allen, J. G., & Marr, L. C. (2020). Recognizing and controlling airborne transmission of SARS-CoV-2 in indoor environments. In *Indoor Air* (Vol. 30, Number 4, pp. 557–558). John Wiley and Sons Inc. <https://doi.org/10.1111/ina.12697>
- ASHRAE. (2023). *ANSI/ASHRAE Standard 55- Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy*.
- Balmain, B. N., Sabapathy, S., Louis, M., & Morris, N. R. (2018). Aging and Thermoregulatory Control: The Clinical Implications of Exercising under Heat Stress in Older Individuals. *BioMed Research International*, 2018(1), 8306154. <https://doi.org/10.1155/2018/8306154>
- Bar-Or, O. (1980). Climate and the Exercising Child - A Review. *International Journal of Sports Medicine*, 1(2), 53–65. <https://doi.org/10.1055/s-2008-1034631>
- Bastin, J.-F., Clark, E., Elliott, T., Hart, S., van den Hoogen, J., Hordijk, I., Ma, H., Majumder, S., Manoli, G., Maschler, J., Mo, L., Routh, D., Yu, K., Zohner, C. M., & Crowther, T. W. (2019). Understanding climate change from a global analysis of city analogues. *PLOS ONE*, 10, e0217592. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0217592>
- Błazejczyk, K., Jendritzky, G., Bröde, P., Fiala, D., Havenith, G., Epstein, Y., Psikuta, A., & Kampmann, B. (2013). An introduction to the Universal thermal climate index (UTCI). *Geographia Polonica*, 86(1), 5–10. <https://doi.org/10.7163/GPol.2013.1>

- Bröde, P., Fiala, D., Błażejczyk, K., Holmér, I., Jendritzky, G., Kampmann, B., Tinz, B., & Havenith, G. (2012). Deriving the operational procedure for the Universal Thermal Climate Index (UTCI). *International Journal of Biometeorology*, 56(3), 481–494. <https://doi.org/10.1007/s00484-011-0454-1>
- Bruse, M. (2025). *ENVI-met* (5.8.0; 5.8.0). ENVI-met GmbH. <https://www.envi-met.com>
- Bruse, M., & Fleer, H. (1998). Simulating surface-plant-air interactions inside urban environments with a three dimensional numerical model. *Environmental Modelling & Software*, 13(3–4), 373–384. [https://doi.org/10.1016/S1364-8152\(98\)00042-5](https://doi.org/10.1016/S1364-8152(98)00042-5)
- Carroll, C., Higgs, J., McCray, S., & Utter, J. (2024). Implementation and Impact of Health Care Gardens: A Systematic Scoping Review. *Journal of Integrative and Complementary Medicine*, 30(5), 431–449. <https://doi.org/10.1089/jicm.2023.0212>
- Climate Central. (2012). *Urban Heat Islands*. <https://www.climatecentral.org/climate-matters/urban-heat-islands>
- Cohen-Shacham, E., Walters, G., Janzen, C., & Maginnis, S. (2016). *Nature-based Solutions to address global societal challenges*. IUCN. <https://doi.org/10.2305/IUCN.CH.2016.13.en>
- Commission, E. (2021). *Forging a climate-resilient Europe — the new EU Strategy on Adaptation to Climate Change (COM(2021) 82 final)*. European Commission.
- Cooper Marcus, C., & Barnes, M. (1999). *Healing Gardens: Therapeutic Benefits and Design Recommendations*. John Wiley & Sons.
- Copernicus Climate Change Service (C3S). (2024). *European State of Climate 2024*. <https://climate.copernicus.eu/esotc/2024>
- Directive (EU) 2024/1275 of the European Parliament and of the Council of 24 April 2024 on the Energy Performance of Buildings (Recast) (EPBD) (2024).
- Expertise France. (2025). *expirtice 24EL02-O.5 Report 27_Climate Change and Resilience Interventions_2026 05 04_EL*.
- Falk, B., & Dotan, R. (2008). Children’s thermoregulation during exercise in the heat: a revisit. *Applied Physiology, Nutrition, and Metabolism*, 33(2), 420–427. <https://doi.org/10.1139/H07-185>

- Fanger. (1970). *Thermal Comfort: Analysis and Applications in Environmental Engineering* (McGraw-Hill, Ed.).
- Founda, D., & Santamouris, M. (2017). Synergies between Urban Heat Island and Heat Waves in Athens (Greece), during an extremely hot summer (2012). *Scientific Reports*, 7. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-11407-6>
- Galanaki, E., Giannaros, C., Kotroni, V., Lagouvardos, K., & Papavasileiou, G. (2022). Spatio-Temporal Analysis of Heatwaves Characteristics in Greece from 1950 to 2020. *Climate*, 11(1), 5. <https://doi.org/10.3390/cli11010005>
- Höppe, P. (1999a). The physiologically equivalent temperature - A universal index for the biometeorological assessment of the thermal environment. *International Journal of Biometeorology*, 43(2), 71 – 75. <https://doi.org/10.1007/s004840050118>
- Höppe, P. (1999b). The physiologically equivalent temperature - A universal index for the biometeorological assessment of the thermal environment. *International Journal of Biometeorology*, 43(2), 71–75. <https://doi.org/10.1007/s004840050118>
- Huttner, S., & Bruse, M. (2009). Numerical modeling of the urban climate – a preview on ENVI-met 4.0. *The Seventh International Conference on Urban Climate (ICUC-7)*. <https://www.envi-met.com>
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2022). *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/>
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2023). *Climate Change 2023: Synthesis Report*. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/>
- International Organization for Standardization. (2005). *ISO 7730: 2005*.
- Jendritzky, G., de Dear, R., & Havenith, G. (2012). UTCI-Why another thermal index? *International Journal of Biometeorology*, 56(3), 421–428. <https://doi.org/10.1007/s00484-011-0513-7>
- Kassomenos, P. A., Dimitriou, K., & Paschalidou, A. K. (2013). Human health damage caused by particulate matter PM10 and ozone in urban environments: the case of Athens, Greece. *Environmental Monitoring and Assessment*, 185(8), 6933–6942. <https://doi.org/10.1007/s10661-013-3076-8>

- Katsouyanni, K., Trichopoulos, D., Zavitsanos, X., & Touloumi, G. (1988). THE 1987 ATHENS HEATWAVE. *The Lancet*, 332(8610), 573. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(88\)92699-2](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(88)92699-2)
- Kenny, G. P., Yardley, J., Brown, C., Sigal, R. J., & Jay, O. (2010). Heat stress in older individuals and patients with common chronic diseases. *CMAJ*, 182(10), 1053–1060. <https://doi.org/10.1503/cmaj.081050>
- Keramitsoglou, I., Kiranoudis, C. T., Ceriola, G., Weng, Q., & Rajasekar, U. (2011). Identification and analysis of urban surface temperature patterns in Greater Athens, Greece, using MODIS imagery. *Remote Sensing of Environment*, 115(12), 3080–3090. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.06.014>
- Keramitsoglou, I., Kiranoudis, C. T., Maiheu, B., De Ridder, K., Daglis, I. A., Manunta, P., & Paganini, M. (2013). Heat wave hazard classification and risk assessment using artificial intelligence fuzzy logic. *Environmental Monitoring and Assessment*, 185(10), 8239–8258. <https://doi.org/10.1007/s10661-013-3170-y>
- Khodakarami, J., & Nasrollahi, N. (2012). Thermal comfort in hospitals – A literature review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(6), 4071–4077. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.03.054>
- Lenzholzer, S., Klemm, W., & Vasilikou, C. (2018). Qualitative methods to explore thermo-spatial perception in outdoor urban spaces. *Urban Climate*, 23, 231–249. <https://doi.org/10.1016/J.UCLIM.2016.10.003>
- Matthies, Franziska., Bickler, G., Cardenosa Marin, N., & Hales, S. (2008). *Heat-health action plans : guidance*. World Health Organization, Europe.
- Matzarakis, A., & Mayer, H. (1991). The extreme heat wave in Athens in July 1987 from the point of view of human biometeorology. *Atmospheric Environment. Part B. Urban Atmosphere*, 25(2), 203–211. [https://doi.org/10.1016/0957-1272\(91\)90055-J](https://doi.org/10.1016/0957-1272(91)90055-J)
- Matzarakis, A., Mayer, H., & Iziomon, M. G. (1999). Applications of a universal thermal index: physiologically equivalent temperature. *International Journal of Biometeorology*, 43(2), 76–84. <https://doi.org/10.1007/s004840050119>

- Matzarakis, A., Rutz, F., & Mayer, H. (2010). Modelling radiation fluxes in simple and complex environments: Basics of the RayMan model. *International Journal of Biometeorology*, 54(2), 131–139. <https://doi.org/10.1007/s00484-009-0261-0>
- Morawska, L., & Cao, J. (2020). Airborne transmission of SARS-CoV-2: The world should face the reality. *Environment International*, 139. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.105730>
- Nazish, A., Abbas, K., & Sattar, E. (2024). Health impact of urban green spaces: a systematic review of heat-related morbidity and mortality. *BMJ Open*, 14(9). <https://doi.org/10.1136/bmjopen-2023-081632>
- Nieberler-Walker, K., Desha, C., Bosman, C., Roiko, A., & Caldera, S. (2023). Therapeutic Hospital Gardens: Literature Review and Working Definition. *HERD: Health Environments Research & Design Journal*, 16(4), 260–295. <https://doi.org/10.1177/19375867231187154>
- Nikolopoulou, M., & Steemers, K. (2003). Thermal comfort and psychological adaptation as a guide for designing urban spaces. *Energy and Buildings*, 35(1), 95–101. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(02\)00084-1](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(02)00084-1)
- Oke, T. R. (1995). *Boundary Layer Climates* (2nd ed.). Routledge.
- Organization, W. H. (2020). *WHO GUIDANCE FOR CLIMATE-RESILIENT AND ENVIRONMENTALLY SUSTAINABLE HEALTH CARE FACILITIES*. <https://www.who.int/publications/item/9789240012226>
- Pantavou, K., Santamouris, M., Asimakopoulos, D., & Theoharatos, G. (2014). Empirical calibration of thermal indices in an urban outdoor Mediterranean environment. *Building and Environment*, 80, 283–292. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.06.001>
- Pantavou, K., Theoharatos, G., Santamouris, M., & Asimakopoulos, D. (2013). Outdoor thermal sensation of pedestrians in a Mediterranean climate and a comparison with UTCI. *Building and Environment*, 66, 82–95. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.02.014>
- Paschalidou, A. K., Kassomenos, P., & Karanikola, P. (2015). Disaggregating the contribution of local dispersion and long-range transport to the high PM10 values

- measured in a Mediterranean urban environment. *Science of The Total Environment*, 527–528, 119–125. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2015.04.094>
- Peel, M. C., Finlayson, B. L., & McMahon, T. A. (2007). Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. *Hydrology and Earth System Sciences*, 11(5), 1633–1644. <https://doi.org/10.5194/hess-11-1633-2007>
- Pereira, P. F. da C., Broday, E. E., & Xavier, A. A. de P. (2020). Thermal comfort applied in hospital environments: A literature review. In *Applied Sciences (Switzerland)* (Vol. 10, Number 20, pp. 1–22). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/app10207030>
- Regulation (EU) 2024/1991 of the European Parliament and of the Council of 24 June 2024 on Nature Restoration (Nature Restoration Law) (2024).
- Santamouris, M. (2013). Using cool pavements as a mitigation strategy to fight urban heat island — A review of the actual developments. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 26, 224–240. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.05.047>
- Santamouris, M. (2015). Analyzing the heat island magnitude and characteristics in one hundred Asian and Australian cities and regions. *Science of The Total Environment*, 512–513, 582–598. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2015.01.060>
- Santamouris, M., & Asimakopoulos, D. (1996). *Passive Cooling of Buildings*. James & James Science Publishers.
- Skoog, J., Fransson, N., & Jagemar, L. (2005). Thermal environment in Swedish hospitals: Summer and winter measurements. *Energy and Buildings*, 37(8), 872–877. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2004.11.003>
- Soltanifard, H., & Amani-Beni, M. (2025). The cooling effect of urban green spaces as nature-based solutions for mitigating urban heat: insights from a decade-long systematic review. *Climate Risk Management*, 49, 100731. <https://doi.org/10.1016/j.crm.2025.100731>
- Spagnolo, J. C., & de Dear, R. J. (2003). A field study of thermal comfort in outdoor and semi-outdoor environments in subtropical Sydney Australia. *Building and Environment*, 38(5), 721–738. [https://doi.org/10.1016/S0360-1323\(02\)00209-3](https://doi.org/10.1016/S0360-1323(02)00209-3)

- Takácsné Zajacz, V., Gecséné Tar, I., Reith, A., Tuffaha, A., Takács, K., Mikházi, Z., & Sallay, Á. (2025). Measuring Local Climate Effects of Institutional Gardens in Budapest. *Land*, 14(9), 1768. <https://doi.org/10.3390/land14091768>
- Thom, J. K., Coutts, A. M., Broadbent, A. M., & Tapper, N. J. (2016). The influence of increasing tree cover on mean radiant temperature across a mixed development suburb in Adelaide, Australia. *Urban Forestry & Urban Greening*, 20, 233–242. <https://doi.org/10.1016/J.UFUG.2016.08.016>
- Toparlar, Y., Blocken, B., Maiheu, B., & van Heijst, G. J. F. (2017). A review on the CFD analysis of urban microclimate. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 80, pp. 1613–1640). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.248>
- Tousi, E., Mela, A., & Tseliou, A. (2024). Thermal Stress in Outdoor Spaces During Mediterranean Heatwaves: A PET and UTCI Analysis of Different Demographics. *Urban Science*, 8(4). <https://doi.org/10.3390/urbansci8040193>
- Tousi, E., Mela, A., & Tseliou, A. (2025). Nature-Based Urbanism for Enhancing Senior Citizens' Outdoor Thermal Comfort in High-Density Mediterranean Cities: ENVI-met Findings. *Urban Science*, 9(5). <https://doi.org/10.3390/urbansci9050152>
- Tousi, E., Tseliou, A., Mela, A., Sinou, M., Kanetaki, Z., & Jacques, S. (2024). Exploring Thermal Discomfort during Mediterranean Heatwaves through Softscape and Hardscape ENVI-Met Simulation Scenarios. *Sustainability (Switzerland)*, 16(14). <https://doi.org/10.3390/su16146240>
- Tseliou, A., Melas, E., Mela, A., & Tsiros, I. (2023). Evaluating the effects of green roofs and green façade as an urban heat island adaptation strategy. *E3S Web of Conferences*, 436. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202343601018>
- Tseliou, A., & Tsiros, I. X. (2016). Modeling urban microclimate to ameliorate thermal sensation conditions in outdoor areas in Athens (Greece). *Building Simulation*, 9(3), 251–267. <https://doi.org/10.1007/s12273-016-0270-y>
- Tsoka, S. P., Tsikaloudaki, K. G., & Theodosiou, T. G. (2018). Analyzing the ENVI-met microclimate model's performance and assessing cool materials and urban vegetation applications—A review. *Sustainable Cities and Society*, 43, 55–76. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.08.009>

- Tsuzuki-Hayakawa, K., Tochihara, Y., & Ohnaka, T. (1995). Thermoregulation during heat exposure of young children compared to their mothers. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, 72(1–2), 12–17. <https://doi.org/10.1007/BF00964108>
- Ulrich, R. S., Zimring, C., Zhu, X., DuBose, J., Seo, H.-B., Choi, Y.-S., Quan, X., & Joseph, A. (2008). A Review of the Research Literature on Evidence-Based Healthcare Design. *HERD: Health Environments Research & Design Journal*, 1(3), 61–125. <https://doi.org/10.1177/193758670800100306>
- United Nations. (2015). *Sustainable Development Goal11:Sustainable Cities and Communities*. <https://unstats.un.org/sdgs/>
- United Nations, D. of E. and S. A. P. D. (2025). *World Urbanization Prospects 2025 Summary of Results*. <https://population.un.org/wup/>
- United Nations Office for Disaster Risk Reduction. (2015). *Sendai Framework for Disaster Risk Reduction 2015–2030*. UNDRR.
- United Nations Population Division, D. of E. and S. A. (2025). *World Urbanization Prospects 2025 Summary of Results*. <https://population.un.org/wup/>
- van Hoof, J., Soebarto, V., Ayalon, L., Marston, H. R., Zander, K. K., Dikken, J., & Kazak, J. K. (2025). Ten questions concerning older people and a sustainable built environment. *Building and Environment*, 274. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2025.112742>
- Vanos, J. K. (2015). Children’s health and vulnerability in outdoor microclimates: A comprehensive review. *Environment International*, 76, 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2014.11.016>
- Wei, H., Bai, X., & Lu, Q. (2025). Urban cooling and energy-saving effects of nature-based solutions across types and scales. *Nature Cities*. <https://doi.org/10.1038/s44284-025-00349-0>
- World Health Organization. (2018). *Heat-health actions plans: Guidance*. <https://who.int/europe/publications/i/item/WHO-EURO-2018-3481-43240-60600>

- World Health Organization. (2020). *WHO GUIDANCE FOR CLIMATE-RESILIENT AND ENVIRONMENTALLY SUSTAINABLE HEALTH CARE FACILITIES*.
<https://www.who.int/publications/item/9789240012226>
- World Health Organization Regional Office for Europe. (2021). *Heat and health in the WHO European Region: updated evidence for effective prevention*. WHO Regional Office for Europe. <https://www.who.int/europe/publications/i/item/9789289055406>
- Yuan, F., Yao, R., Sadrizadeh, S., Li, B., Cao, G., Zhang, S., Zhou, S., Liu, H., Bogdan, A., Croitoru, C., Melikov, A., Short, C. A., & Li, B. (2022). Thermal comfort in hospital buildings – A literature review. In *Journal of Building Engineering* (Vol. 45). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.103463>
- Zhen, M., Xia, W., Sun, G., Huang, C., & Ji, J. (2025). Optimized design of hospital open space based on outdoor thermal comfort: The case of Shaanxi People's Hospital in China. *Energy and Buildings*, 337, 115703.
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2025.115703>
- Zhen, M., Zhou, J., He, Y., Geng, Z., Shang, D., Zhang, M., & Nan, K. (2024). Study on thermal comfort and optimization strategies in outdoor open spaces of hospitals in cold regions of China during summer. *Urban Climate*, 58.
<https://doi.org/10.1016/j.uclim.2024.102135>
- Αθηναίων, Δ. (2022). *Σχέδιο Δράσης για το Κλίμα*. Δήμος Αθηναίων.
<https://www.cityofathens.gr/wp-content/uploads/2022/08/schedio-gia-tin-klimatiki-allagi-9-6-2022.pdf>
- Γενική Γραμματεία Χωρικού Σχεδιασμού και Αστικού Περιβάλλοντος. (2024). *Πλατφόρμα Συμμετοχής: Τοπικά και Ειδικά Πολεοδομικά Σχέδια (ΤΠΣ/ΕΠΣ)*. Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας (ΥΠΕΝ). <https://polsxedia.ypen.gov.gr/>
- Κύρος, Γ., & Λαγουβάρδος, Κ. (2024, July 26). *Καύσωνας Ιουλίου 2024: Εμμονή υψηλών θερμοκρασιών στα αστικά κέντρα*. https://meteo.gr/article_view.cfm?entryID=3329
- Λαγουβάρδος, Κ., Κωλέτσης, Ι., & Κύρος, Γ. (2023, July 28). *Αποτίμηση του πρόσφατου κύματος καύσωνα*. https://meteo.gr/article_view.cfm?entryID=2857#google_vignette
- Λαγουβάρδος, Κ., Ντάφης, Σ., & Κύρος, Γ. (2024, July 25). *2023&2024: Συγκρίνοντας τους δύο πρόσφατους καύσωνες*. https://meteo.gr/article_view.cfm?entryID=3328

«Αθανασία Βαβίτσα», «Αξιολόγηση της θερμικής άνεσης και στρατηγικές βελτιστοποίησης στους εξωτερικούς χώρους νοσοκομείων αστικών περιοχών με Μεσογειακό κλίμα υπό συνθήκες κλιματικής κρίσης»

Νόμος 4662/2020: Εθνικός Μηχανισμός Διαχείρισης Κρίσεων Και Αντιμετώπισης Κρίσεων, Pub. L. 4662, Εφημερίδα της Κυβερνήσεως (ΦΕΚ Α 27/07.02.2020) (2020).

Περιφέρεια Αττικής. (2022). *Περιφερειακό Σχέδιο για την Προσαρμογή στην Κλιματική Αλλαγή (ΠεΣΠΚΑ) Αττικής*. Περιφέρεια Αττικής.
https://www.patt.gov.gr/koinonia/perivallon/pespka/pespka_kentriki/

Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας. (2016). *Εθνική Στρατηγική για την Προσαρμογή στην Κλιματική Αλλαγή (ΕΣΠΚΑ)*. Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας.

Υπεύθυνη Δήλωση Συγγραφέα:

Δηλώνω ρητά ότι, σύμφωνα με το άρθρο 8 του Ν. 1599/1986 και τα άρθρα 2,4,6 παρ. 3 του Ν. 1256/1982, η παρούσα εργασία αποτελεί αποκλειστικά προϊόν προσωπικής εργασίας και δεν προσβάλλει κάθε μορφής

«Αθανασία Βαβίτσα», «Αξιολόγηση της θερμικής άνεσης και στρατηγικές βελτιστοποίησης στους εξωτερικούς χώρους νοσοκομείων αστικών περιοχών με Μεσογειακό κλίμα υπό συνθήκες κλιματικής κρίσης»

πνευματικά δικαιώματα τρίτων και δεν είναι προϊόν μερικής ή ολικής αντιγραφής, οι πηγές δε που χρησιμοποιήθηκαν περιορίζονται στις βιβλιογραφικές αναφορές και μόνον.