Σχολή Εφαρμοσμένων Τεχνών και Βιώσιμου Σχεδιασμού

Περιβαλλοντικός Σχεδιασμός Πόλεων και Κτιρίων

Διπλωματική Εργασία

«Αξιολόγηση της επίδρασης της γεωμετρίας και της δενδροφύτευσης των αστικών φαραγγιών στη βελτίωση του μικροκλίματος»

Μαρία Χρύσα Παπαδοπούλου

Επιβλέπουσα: Αρετή Τσέλιου

Πάτρα, Ιούλιος 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 επίδρασης της γεωμετρίας και της δενδροφύτευσης των αστικών φαραγγιών στη βελτίωση του μικροκλίματος

«Μαρία Χρύσα Παπαδοπούλου

Επιτροπή Επίβλεψης Πτυχιακής / Διπλωματικης Εργασίας

Επιβλέπουσα Καθηγήτρια:
Αρετή Τσέλιου
Μέλος Σ.Ε.Π., Ελληνικό Ανοιχτό Πανεπιστήμιο

Συν-Επιβλέπων Καθηγητης:
Νικόλαος Ραψομανίκης

Πάτρα, Ιούλιος 2026

Στον αδερφό μου και στον πατέρα μου, που μου μετέδωσαν μια βαθύτερη ευαισθησία απέναντι στο φυσικό περιβάλλον και στον άνθρωπο, μια ματιά που αποτέλεσε την πραγματική αφετηρία της παρούσας εργασίας.

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία διερευνά την επίδραση της γεωμετρίας των αστικών φαραγγιών και της δενδροφύτευσης στη διαμόρφωση του μικροκλίματος και στη βελτίωση των θερμικών συνθηκών σε πυκνοδομημένη περιοχή μεσογειακού κλίματος. Ως περιοχή μελέτης επιλέχθηκε τμήμα της Νεάπολης Εξαρχείων στην Αθήνα, με έντονη κτιριακή πυκνότητα, υψηλούς λόγους ύψους προς πλάτος (H/W) και περιορισμένο αστικό πράσινο. Για την αξιολόγηση χρησιμοποιήθηκε το τρισδιάστατο μικροκλιματικό μοντέλο ENVI-met, με προσομοίωση εικοσιτετραώρου για τη 14η Ιουλίου 2025, ημέρα καύσωνα με μέγιστη θερμοκρασία 35,8 °C. Η ανάλυση επικεντρώθηκε στη δυνητική θερμοκρασία αέρα και στον δείκτη UTCI, σε ύψος πεζού, για δύο σενάρια: το Σενάριο 1 (υφιστάμενη κατάσταση) και το Σενάριο 2 (ενισχυμένη δενδροφύτευση). Στην υφιστάμενη κατάσταση οι φυτεμένες ζώνες λειτουργούν ως ψυχρές κηλίδες, με διαφορά θερμοκρασίας αέρα έως ~5 °C από τα αφύτευτα τμήματα, ενώ ο UTCI κατέγραψε ισχυρό έως ακραίο θερμικό στρες στις εκτεθειμένες οδούς. Στο σενάριο ενισχυμένης φύτευσης, η μέση μείωση της θερμοκρασίας αέρα και του δείκτη UTCI ανέρχεται σε ~0,6 °C, ενώ παρατηρείται τοπικά εντονότερη ψύξη στις πλέον σκιασμένες θέσεις και αισθητό περιορισμό της έκτασης του ακραίου θερμικού στρες κατά τις ώρες αιχμής του απογεύματος. Τα ευρήματα επιβεβαιώνουν ότι η στοχευμένη δενδροφύτευση αποτελεί αποτελεσματική στρατηγική μετριασμού της θερμικής επιβάρυνσης στο επίπεδο του πεζού.

Λέξεις – Κλειδιά

Χωροθέτηση δέντρων σε αστικό φαράγγι, ENVI-met, θερμική άνεση, UTCI, δενδροφύτευση, μεσογειακό κλίμα

"Evaluation of the impact of the geometry and tree planting of urban canyons on the improvement of the microclimate"

Maria Chrysa Papadopoulou

Abstract

This diploma thesis investigates the effect of urban canyon geometry and street tree planting on microclimate formation and on the improvement of thermal conditions in a densely built Mediterranean area. The study area is a section of the Neapoli Exarcheion district in Athens, characterised by high building density, high height-to-width (H/W) ratios and limited urban greenery. Thermal conditions were assessed using the three-dimensional microclimate model ENVI-met, through a 24-hour simulation of 14 July 2025, a heatwave day with a maximum temperature of 35.8 °C. The analysis focused on Potential Air Temperature and on the UTCI index, at pedestrian height, for two scenarios: Scenario 1 (existing condition) and Scenario 2 (enhanced tree planting). In the existing condition, planted zones act as cool spots, with air-temperature differences of up to ~5 °C relative to unplanted sections, while the UTCI recorded strong to extreme heat stress along the exposed streets. In the enhanced-planting scenario, the mean reduction of air temperature and the UTCI index reaches approximately 0.6 °C, with locally more pronounced cooling in the most shaded locations and a noticeable reduction in the extent of extreme heat stress during peak afternoon hours. These findings confirm that targeted tree planting constitutes an effective strategy for mitigating thermal stress at the pedestrian level.

Keywords

Tree location in urban canyon, ENVI-met, thermal comfort, UTCI, street trees, Mediterranean climate

Περίληψη 3
Abstract 5
Κατάλογος Εικόνων / Σχημάτων 7
Κατάλογος Πινάκων 9
Εισαγωγή 10
Σκοπός της εργασίας 14
Μεθοδολογία 15
Δομή της εργασίας 16
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΉ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ 17
1.1 Γενικό Πλαίσιο: Κλιματική Αλλαγή και οι Επιπτώσεις στο Αστικό Περιβάλλον 18
1.2. Θερμική Άνεση στο αστικό περιβάλλον 19
1.2.1. Βιοκλιματικοί Δείκτες 21
1.2.2. Δείκτης Αξιολόγησης PET (Physiologically Equivalent Temperature) 22
1.2.3. Δείκτης Αξιολόγησης UTCI (Universal Thermal Climate Index) 23
1.2.4. Η Σημασία της Ποιότητας του Αέρα και της Θερμικής Άνεσης στις Πόλεις 25
1.3. Το Αστικό Φαράγγι (Urban Canyon) ως Μικροκλιματική Μονάδα 25
1.3.1. Φαινόμενα στο Αστικό Φαράγγι - Θερμικό Περιβάλλον και ακτινοβολία 26
1.3.2. Χαρακτηριστικά Ροής Αέρα εντός Αστικού Φαραγγιού 27
1.3.3. Ο ρόλος της αναλογίας της οδού (Πλάτος/Υψος - Aspect Ratio) στην ηλιακή πρόσβαση και τον αερισμό 28
1.4. Ο Ρόλος της Δενδροστοιχίας στη Διαμόρφωση του Μικροκλίματος της Οδού 29
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ 31
2.1. Επιλογή Περιοχής Μελέτης 31
2.2 Ψηφιοποίηση των περιοχών μελέτης στο περιβάλλον του λογισμικού ENVI MET 38
2.2.1. Κλιματικά Δεδομένα 38
2.2.2 Λογισμικό ENVI-met 40
2.2.3. Αξιολόγηση Θερμικών συνθηκών 40
2.3 Κατασκευή Μοντέλου 41
2.3.1. Σενάριο 1: Υφιστάμενη Κατάσταση 41
2.3.2. Σενάριο 2: Ενίσχυση και αντικατάσταση της υφιστάμενης φυτοκάλυψης 44
2.3.3. Εκτέλεση της Προσομοίωσης 47
3. ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ 48
3.1. Σενάριο 1: Υφιστάμενη Κατάσταση 49
3.1.1. Δυνητική Θερμοκρασία Αέρα (Potential Air Temperature) 49

3.1.2. Universal Thermal Climate Index (UTCI) 51
3.2. Σενάριο 2: Ενίσχυση φυτοκάλυψης κατά μήκος των οδών 54
3.2.1. Δυνητική Θερμοκρασία Αέρα (Potential Air Temperature) 54
3.2.2. Universal Thermal Climate Index (UTCI) 56
3.3. Συγκριτική αξιολόγηση Σεναρίων 1 και 2 58
3.3.1. Συγκριτική Αξιολόγηση του δείκτη UTCI (ΔUTCI) 58
3.3.2. Αξιολόγηση Κεντρικού Σημείου Αναφοράς 61
4. ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ 64
4.1. Ερμηνεία Αποτελεσμάτων 65
4.2. Περιορισμοί της Έρευνας 66
Βιβλιογραφία 68

Κατάλογος Εικόνων / Σχημάτων

Εικόνα 1: Ενδεικτικό γράφημα: Σχέση θερμοκρασίας αέρα και επιπέδου θερμικής άνεσης (ASHRAE 55:2020) 9

Εικόνα 2: Ευρύτερη Περιοχή Μελέτης, Πηγή: Google Maps 22

Εικόνα 3: Εγγύτερη Περιοχή Μελέτης, Πηγή: Google Maps 23

Εικόνα 4: Αυτοψία Περιοχής (Ιπποκράτους) Πηγή: Προσωπικό Αρχείο 26

Εικόνα 5: Αυτοψία Περιοχής (Ιπποκράτους) Πηγή: Προσωπικό Αρχείο.....27

Εικόνα 6: Αυτοψία Περιοχής (Δεβενίων) Πηγή: Προσωπικό Αρχείο 27

Εικόνα 7: Αυτοψία Περιοχής (Ερεσού) Πηγή: Προσωπικό Αρχείο 28

Εικόνα 8: Ψηφιοποίηση Υφιστάμενης Περιοχής 2D, ENVI-met SPACES 5.9.0., Σενάριο 1, Πηγή: Προσωπικό Αρχείο 33

Εικόνα 9: Ψηφιοποίηση Περιοχής 3D ENVI-met SPACES 5.9.0., Σενάριο 1, Πηγή: Προσωπικό Αρχείο 33

Εικόνα 10: Ψηφιοποίηση Περιοχής 3D ENVI-met SPACES 5.9.0, (vegs and roads), Σενάριο 1, Πηγή: Προσωπικό Αρχείο 34

Εικόνα 11: Ψηφιοποίηση Περιοχής Morus Alba, ENVI-met SPACES 5.9.0, Σενάριο 2, Πηγή: Προσωπικό Αρχείο 36

Εικόνα 12: Ιδιότητες του προσαρμοσμένου φυτικού είδους «Κουτσουπιά», Simple Plants, ENVI-met DBManager 5.9.0, Σενάριο 2, Πηγή: Προσωπικό Αρχείο 37

Εικόνα 13: Γενικές Ρυθμίσεις που εισήχθησαν στην εφαρμογή ENVI-guide για τα Σενάρια 1,2 39

Εικόνα 14: Κλιματικά δεδομένα που εισήχθησαν στην εφαρμογή ENVI-guide για τα Σενάρια 1,2 39

Εικόνα 15: Χωρική κατανομή του βιοκλιματικού δείκτη PAT ανά δύο ώρες: (a) 10:00, (b) 12:00, (c) 14:00, (d) 16:00, (e) 18:00, (f) 20:00, Σενάριο 1 42

Εικόνα 16: Χωρική κατανομή του βιοκλιματικού δείκτη UTCI: (a) 10:00, (b) 12:00, (c) 14:00, (d) 16:00, (e) 18:00, (f) 20:00, Σενάριο 1 45

Εικόνα 17: Χωρική κατανομή του βιοκλιματικού δείκτη Potential Air Temperature: (a) 10:00, (b) 12:00, (c) 14:00, (d) 16:00, (e) 18:00, (f) 20:00, Σενάριο 2 47

Εικόνα 18:Χωρική κατανομή του βιοκλιματικού δείκτη UTCI: (a) 10:00, (b) 12:00, (c) 14:00, (d) 16:00, (e) 18:00, (f) 20:00, Σενάριο 2 49

Εικόνα 19:Χωρική κατανομή του βιοκλιματικού δείκτη DUTCI: (a) 10:00, (b) 12:00, (c) 14:00, (d) 16:00, (e) 18:00, (f) 20:00, Σενάριο 1 - Σενάριο 2 52

Εικόνα 20:Χρονική εξέλιξη του Potential Air Temperature και του UTCI στο σημείο αναφοράς (I=54, J=60), Σενάριο 1, Πηγή: Leonardo Map Explorer 54

Εικόνα 21. Εξαγωγή τιμών Potential Air Temperature και UTCI στο σημείο (I=54, J=60), Σενάριο 1, Πηγή: Leonardo Map Explorer 54

Εικόνα 22. Χρονική εξέλιξη του Potential Air Temperature και του UTCI στο σημείο αναφοράς (I=54, J=60), Σενάριο 2, Πηγή: Leonardo Map Explorer 54

Εικόνα 23. Εξαγωγή τιμών Potential Air Temperature και UTCI στο σημείο (I=54, J=60), Σενάριο 2, Πηγή: Leonardo Map Explorer 54

Εικόνα 24. Χωρική κατανομή του βιοκλιματικού δείκτη DUTCI: (d) 16:00, Σενάριο 1 - Σενάριο 2 58

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1: Πηγή: Höppe (1999); Matzarakis & Amelung (2008). Τυπικές τιμές για τυποποιημένο άτομο (άνδρας 35 ετών, 75 kg, 1.75 m, μεταβολικός ρυθμός 80 W/m², θερμική αντίσταση ένδυσης 0.9 clo) 13

Πίνακας 2: Jendritzky et al. (2012); Copernicus Climate Change Service (C3S) 15

Πίνακας 3: Πίνακας Κτιρίων ανά Ο.Τ. 24

Πίνακας 4: Βλάστηση ανά Οδό 25

Πίνακας 5: Κλιματικά δεδομένα Ιουλίου 2025, Περιφέρεια Αττικής, Πηγή: meteo.gr 29

Πίνακας 6: Κλιματικά Δεδομένα για την ημερομηνία 14.07.2025 (Σταθμός Αμπελόκηποι Αθηνών), Πηγή: meteo.gr 29

Πίνακας 7: Κωδικοί βλάστησης ανά οδό, Σενάριο 1 (υφιστάμενη κατάσταση), Πηγή: Προσωπικό Αρχείο 35

Πίνακας 8: Κωδικοί βλάστησης ανά οδό, Σενάριο 2 (ενισχυμένη φύτευση), Πηγή: Προσωπικό Αρχείο 37

Πίνακας 9: Ελάχιστη και μέγιστη τιμή ΔUTCI ανά ώρα, Πηγή: Προσωπικό αρχείο 53

Πίνακας 10: Σύγκριση Potential Air Temperature και UTCI στο κεντρικό σημείο αναφοράς (I=54, J=60) Σενάριο 1 & Σενάριο 2 73

Εισαγωγή

Η κλιματική αλλαγή αποτελεί μία από τις μεγαλύτερες προκλήσεις της σύγχρονης εποχής, επηρεάζοντας τη βιωσιμότητα των οικοσυστημάτων, την οικονομική ανάπτυξη και την ποιότητα ζωής του ανθρώπου. Συγκεκριμένα, η κλιματική αλλαγή αναφέρεται στις μακροχρόνιες μεταβολές των κλιματικών συνθηκών, οι οποίες προκύπτουν είτε από φυσικές διεργασίες είτε από εξωγενείς ανθρωπογενείς παρεμβάσεις (Vijayavenkataraman et al., 2012). Οι παγκόσμιες θερμοκρασίες έχουν αυξηθεί κατά περίπου 1.2°C από τα προβιομηχανικά επίπεδα, κυρίως λόγω των ανθρωπογενών εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου (European Environment Agency, 2024). Αυτή η αύξηση έχει ως αποτέλεσμα πιο συχνούς και έντονους καύσωνες, ξηρασίες και ακραία καιρικά φαινόμενα, τα οποία επηρεάζουν πολλαπλώς το φυσικό και δομημένο περιβάλλον. Τα ακραία κλιματικά και καιρικά φαινόμενα έχουν μεγαλύτερη βαρύτητα πλέον στο κομμάτι των επιστημών, των υπευθύνων χάραξης πολιτικής και των μέσων ενημέρωσης κυρίως καθότι έχουν καταστροφική επίδρασή σε διάφορους τομείς όπως το περιβάλλον, η οικονομία, η ενέργεια, η κοινωνία και ιδιαίτερα η ανθρώπινη υγεία (Easterling et al., 2000; IPCC, 2001; Changnon, 2003; IPCC, 2007).

Η Μεσόγειος, λόγω των κλιματικών της ιδιαιτεροτήτων, συγκαταλέγεται στις πιο ευάλωτες περιοχές του πλανήτη στις επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής (Founda & Giannakopoulos, 2009). Σχετικά μοντέλα προβλέπουν περαιτέρω αύξηση των θερμών ημερών και μείωση των βροχοπτώσεων, γεγονός που επιβαρύνει τις αστικές υποδομές και αυξάνει τη θερμική δυσφορία. Επιπλέον, η άνοδος της στάθμης της θάλασσας και η ερημοποίηση προβάλλουν ως μελλοντικοί κίνδυνοι για τη νότια Ευρώπη (Cramer et al., 2018).

Ένα σημαντικό ποσοστό του παγκόσμιου πληθυσμού κατοικεί πλέον σε ιδιαίτερα πυκνοδομημένες αστικές περιοχές, όπου η συνεχώς αυξανόμενη αστικοποίηση έχει συμβάλει στην εμφάνιση σοβαρών περιβαλλοντικών προκλήσεων (Gioia et al., 2021). Δεδομένου ότι οι πόλεις έχουν πρωταγωνιστικό ρόλο στο πρίσμα της κλιματικής αλλαγής, με ποσοστό άνω του 70% των παγκόσμιων εκπομπών CO_2 (Κλιματικά Ουδέτερες και Έξυπνες Πόλεις—Ευρωπαϊκή Επιτροπή κ.λπ.), έχουν αναπτυχθεί από την Ευρωπαϊκή Ένωση πολυάριθμες στρατηγικές με στόχο τη βιώσιμη αστική ανάπτυξη. Μερικές από τις πιο χαρακτηριστικές

πράξεις κρατών μελών, για την αποτροπή της κλιματικής αλλαγής είναι η συμφωνία των Παρισίων του 2015, το πρωτόκολλο του Κιότο του 1997, αλλά και το σύμφωνο της Λισσαβόνας του 2004. Οι επιδιώξεις που σχετίζονται με την επίτευξη κλιματικής ουδετερότητας ή με τη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων των αστικών περιοχών έχουν αποτυπωθεί σε σειρά στρατηγικών πρωτοβουλιών της ΕΕ (Στρατηγική Προσαρμογής της ΕΕ—Ευρωπαϊκή Επιτροπή κ.λπ. · Ευρωπαϊκή Αστική Πρωτοβουλία | EUI κ.λπ.). Αναλυτικότερα, τα επόμενα χρόνια αναμένονται έντονο κύμα καύσωνα στην Νότια Ευρώπη και κυρίως στις περιοχές αστικού ενδιαφέροντος, όπως προαναφέρθηκε.

Οι αλλαγές που επιφέρει το αστικό μικροκλίμα επηρεάζουν άμεσα την ανθρώπινη υγεία, με χαρακτηριστικά παραδείγματα τη ρύπανση της ατμόσφαιρας και την ενίσχυση του θερμικού στρες, ειδικά σε περιοχές που επηρεάζονται από το φαινόμενο της αστικής θερμικής νησίδας. Φαινόμενα όπως οι υψηλές νυχτερινές θερμοκρασίες κατά τους θερινούς μήνες και ο περιορισμένος φυσικός αερισμός έχουν ως αποτέλεσμα την αύξηση της θερμικής επιβάρυνσης και την επιδείνωση της ποιότητας ζωής των κατοίκων (Gioia et al., 2021). Η αύξηση της θερμοκρασίας επηρεάζει και την ποιότητα του αέρα και αποτελεί σημαντικό φαινόμενο της κλιματικής αλλαγής. Επομένως, τα ακραία κλιματικά φαινόμενα τα οποία επηρεάζουν σημαντικά την ποιότητα του αέρα και της ατμόσφαιρας, συνδέονται άμεσα με την ανθρώπινη υγεία. Ο συνδυασμός αυξημένων θερμοκρασιών, υψηλών συγκεντρώσεων ατμοσφαιρικών ρύπων και έντονης αστικής δόμησης συμβάλλει στη δημιουργία του φαινομένου της Αστικής Θερμικής Νησίδας, το οποίο προκαλεί συνθήκες δυσφορίας για τον γενικό πληθυσμό. Η Αστική Θερμική Νησίδα είναι ένα ευρέως διαδεδομένο φαινόμενο που παρουσιάζεται σε αστικό δομημένο περιβάλλον και επιδρά σημαντικά στην ανάπτυξη υψηλότερων θερμοκρασιών σε σχέση με άλλες κοντινές περιαστικές περιοχές. Συγκεκριμένα, η πυκνή δόμηση και η περιορισμένη παρουσία φυσικής βλάστησης στην ευρύτερη περιοχή της Αθήνας συντελούν στην ενίσχυση του φαινομένου της αστικής θερμικής νησίδας (ΑΘΝ).

Τρείς από τους κύριους παράγοντες που παίζουν καθοριστικό ρόλο στο φαινόμενο της αστικής θερμικής νησίδας είναι η γεωμετρία των κτιρίων και των αστικών δρόμων, η μείωση της ροής του αέρα στους αστικούς δρόμους και η μειωμένη εξατμισοδιαπνοή. (Oke, 1982; Oke et al., 1991). Επομένως η παρουσία της μορφολογίας του αστικού ιστού και ειδικότερα η γεωμετρία των οδών υπό τη μορφή αστικών φαραγγιών (urban canyon) επηρεάζει καθοριστικά τη

διακύμανση της θερμοκρασίας επιφανείας και τη θερμική συμπεριφορά του αστικού περιβάλλοντος.

Στην περίπτωση της Αθήνας, έχει τεκμηριωθεί ότι ο λόγος ύψους κτιρίων προς πλάτος οδού (H/W) παρουσιάζει στατιστικά σημαντική συσχέτιση με τη θερμοκρασία επιφανείας, με αρνητική σχέση κατά τη διάρκεια της ημέρας και θετική κατά τη νύχτα, γεγονός που αποδίδεται στον περιορισμό της ακτινοβολιακής απώλειας και στη μειωμένη δυνατότητα ψύξης μέσω μακρού κύματος κατά τις νυχτερινές ώρες (Agathangelidis, Cartalis & Santamouris, 2020). Το εύρημα αυτό αναδεικνύει τη σημασία της αστικής μορφολογίας και του αστικού φαραγγιού ως κρίσιμου παράγοντα στη διαμόρφωση του μικροκλίματος της πόλης, ιδιαίτερα σε περιοχές όπου τα χαρακτηριστικά του αστικού φαραγγιού είναι έντονα. Επίσης, η έλλειψη πρασίνου εντός των οδικών αξόνων περιορίζει τη δυνατότητα μείωσης της επιφανειακής θερμοκρασίας, καθιστώντας αναγκαία τη διερεύνηση της ενσωμάτωσης φυτεύσεων εντός των αστικών φαραγγιών ως στρατηγικής βελτίωσης του μικροκλίματος.

Οι μεταβολές στην θερμοκρασία αέρα (Tair) και συγκεκριμένα η αύξηση της φαίνεται να μετράει καθοριστικά στις αστικές περιοχές σε σύγκριση με περιαστικές περιοχές. Η πλειονότητα των μελετών παρουσιάζει ενδιαφέρον στην εμπειρία του χρήστη στον κατά μήκος άξονα, ιδιαίτερα κατά τους θερινούς μήνες, ενώ ερευνητικό κενό παρατηρείται στην διερεύνηση του κατακόρυφου άξονα σε μεταβατικές εποχές και ψυχρές περιόδους. Οι χαμηλές τιμές “albedo” που παρουσιάζουν τα υλικά της αστικής δόμησης ευνοούν την αυξημένη απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας από τα κτιριακά κελύφη και τις επιφάνειες του αστικού χώρου, ενώ η σταδιακή απώλεια της βλάστησης και ο περιορισμός της λανθάνουσας θερμικής ροής μέσω των διεργασιών εξατμισοδιαπνοής επιβαρύνουν περαιτέρω το τοπικό θερμικό ισοζύγιο (Tsoka et al., 2020).

Στον κτιριακό τομέα οι επιπτώσεις ακραίων καιρικών φαινομένων επηρεάζουν τόσο τις μεταβολές προδιαγραφών για την θέρμανση και την ψύξη ενός κτιρίου, όσο και τις μεταβλητές για την θερμική του άνεση. Ανακριβείς υπολογισμοί και αστοχίες που αφορούν την ενεργειακή κατανάλωση του κτιρίου παρουσιάζονται σε μελέτες καθότι δεν λαμβάνονται υπόψιν παράγοντες όπως (i) ποιότητα μέτρησης (ii) διάρκεια μέτρησης (iii) ακραία καιρικά φαινόμενα, (iv) η επιρροή της ενεργειακής κατανάλωσης του κτιρίου ως προς το μικροκλίμα. Σύμφωνα με αποτελέσματα πρόσφατης βιβλιογραφικής ανασκόπησης των Santamouris et al., η ενσωμάτωση δέντρων στους αστικούς δρόμους δύναται να επιφέρει σημαντική μείωση της

θερμοκρασίας του αέρα (Tair), με τις μέγιστες τιμές να κυμαίνονται από 0,1 °C έως 5,0 °C και τη μέση μέγιστη πτώση να προσεγγίζει τους 1,5 °C (Santamouris et al., 2017).

Σύμφωνα με τα ευρήματα των Chen et al., η αύξηση της φυτικής κάλυψης στο διπλάσιο σε αστική περιοχή της Μελβούρνης στην Αυστραλία δύναται να επιφέρει μείωση της μέσης ημερήσιας μέγιστης θερμοκρασίας κατά τους θερινούς μήνες της τάξης των 0,3 °C (Chen et al., 2013). Μελέτη σε αστικά πάρκα της Θεσσαλονίκης κατέδειξε ότι η σκίαση των δέντρων μπορεί να επιφέρει μέγιστη μείωση της θερμοκρασίας του αέρα κατά περίπου 24%, αύξηση της σχετικής υγρασίας κατά περίπου 41%, και μείωση του δείκτη δυσφορίας κατά περίπου 16% (Georgi & Zafiriadis, 2006).

Μέσα σε αυτό το πλαίσιο, η ενσωμάτωση φυτεύσεων κατά μήκος των οδικών αξόνων καθίσταται ιδιαίτερα σημαντική, καθώς μπορεί να συμβάλει στον περιορισμό της θερμικής επιβάρυνσης μέσω της παροχής σκίασης, της αύξησης της υγρασίας και της μεταβολής της ενεργειακής ισορροπίας των επιφανειών. Η αποδοτικότητα των φυτεύσεων εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό και από τη γεωμετρική μορφή του αστικού φαραγγιού, καθώς η πυκνότητα, το ύψος και η χωροθέτηση των δέντρων μέσα στη διατομή της οδού αλληλεπιδρούν με τον λόγο H/W, επηρεάζοντας τη συνολική τους λειτουργία και επίδραση (Agathangelidis et al., 2020). Κατά συνέπεια, η ολοκληρωμένη εξέταση τόσο της μορφολογίας του αστικού φαραγγιού όσο και των γραμμικών φυτεύσεων που αναπτύσσονται κατά μήκος των δρόμων κρίνεται αναγκαία για τον ορθό σχεδιασμό βιώσιμων και θερμικά ανθεκτικών αστικών περιοχών.

Σκοπός της εργασίας

Ο σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η αξιολόγηση της επίδρασης της μορφολογίας και της δενδροφύτευσης σε αστικό φαράγγι ως προς το μικροκλίμα μίας αστικής περιοχής. Ειδικότερα, η εργασία επιδιώκει να διερευνήσει τη συνεργιστική δράση του αστικού φαραγγιού και των χαρακτηριστικών της δενδροφύτευσης κατά μήκος των οδών του αστικού περιβάλλοντος, με στόχο την δημιουργία θερμικά άνετων εξωτερικών χώρων. Ως ερευνητικό κενό, παρατηρείται έλλειψη σε αρχεία κλιματικών δεδομένων που αφορούν την επίδραση της μορφολογίας και των γεωμετρικών χαρακτηριστικών μίας αστικής περιοχής εν συναρτήσει με τις ιδιαιτερότητες που δημιουργούνται στο μικροκλίμα.

Επισημαίνεται ότι τα ωριαία κλιματικά δεδομένα για αντίστοιχες δυναμικές προσομοίωσης ήταν δεδομένα κυρίως από περιαστικές περιοχές, σε αντίθεση με την παρούσα που διερευνά αντιπροσωπευτικές μικροκλιματικές παραμέτρους.

Η έρευνα εστιάζει στο μεσογειακό κλίμα της Ελλάδας, όπου τα ιδιαίτερα κλιματικά χαρακτηριστικά (υψηλή ηλιακή ακτινοβολία, χαμηλή υγρασία, ξηρά καλοκαίρια) απαιτούν ειδικευμένες προσεγγίσεις. Μέσω της διερεύνησης αυτής θα προκύψουν παρεμβάσεις με στόχο την αναβάθμιση της ποιότητας ζωής των ανθρώπων και την σωστή αξιοποίηση των δεδομένων.

Μεθοδολογία

Η μεθοδολογική προσέγγιση που εφαρμόστηκε για την εκπόνηση της συγκεκριμένης εργασίας βασίστηκε αφενός στη βιβλιογραφική ανασκόπηση, μέσω της μελέτης επιστημονικών άρθρων, συγγραμμάτων, διδακτορικών διατριβών και νομοθετικών κειμένων, και αφετέρου στην ανάλυση και αξιολόγηση δεδομένων, καθώς και των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από διαδικασίες μοντελοποίησης και προσομοίωσης.

Ειδικότερα, η εμπειρική προσέγγιση στηρίχθηκε στη χρήση του τρισδιάστατου μικροκλιματικού μοντέλου ENVI-met (έκδοση 5.9.0). Αρχικά, επιλέχθηκε η περιοχή μελέτης βάσει συγκεκριμένων κριτηρίων μορφολογίας του αστικού ιστού και ακολούθησε η αποτύπωση και ψηφιοποίησή της, με εισαγωγή των κτιριακών όγκων, των υλικών εδαφοκάλυψης και της υφιστάμενης βλάστησης σε τρισδιάστατο κάνναβο. Στη συνέχεια, εισήχθησαν τα μετεωρολογικά δεδομένα μιας χαρακτηριστικής ημέρας καύσωνα (14 Ιουλίου 2025) και πραγματοποιήθηκε προσομοίωση εικοσιτετραώρου του μικροκλίματος της περιοχής.

Για την αποτίμηση της επίδρασης της δενδροφύτευσης εξετάστηκαν δύο σενάρια: η υφιστάμενη κατάσταση (Σενάριο 1) και ένα σενάριο ενισχυμένης φύτευσης (Σενάριο 2). Η αξιολόγηση των θερμικών συνθηκών στηρίχθηκε στη δυνητική θερμοκρασία αέρα (Potential Air Temperature) και στον βιοκλιματικό δείκτη (Universal Thermal Climate Index - UTCI), σε ύψος πεζού και για χαρακτηριστικές ώρες της ημέρας. Τα παραγόμενα αποτελέσματα οπτικοποιήθηκαν σε χάρτες χωρικής κατανομής, επιτρέποντας τη συγκριτική ανάλυση των δύο σεναρίων και την ποσοτική εκτίμηση της συμβολής της βλάστησης στη βελτίωση του μικροκλίματος.

Δομή της εργασίας

Η παρούσα εργασία εξετάζει τον ρόλο της γεωμετρίας του αστικού φαραγγιού και της δενδροφύτευσης κατά μήκος των οδών στη διαμόρφωση του μικροκλίματος και στη βελτίωση των θερμικών συνθηκών στο αστικό περιβάλλον. Πέραν της εισαγωγής, αναπτύσσεται σε τέσσερα κεφάλαια, τα οποία περιλαμβάνουν τόσο τη θεωρητική θεμελίωση όσο και την εφαρμοσμένη ερευνητική ανάλυση.

Στην εισαγωγή παρουσιάζεται το γενικό πλαίσιο της έρευνας, με αναφορά στην κλιματική αλλαγή και τις επιπτώσεις της στο αστικό περιβάλλον, καθώς και στη σημασία της θερμικής άνεσης για τον αστικό χρήστη. Αναλύεται το φαινόμενο της Αστικής Θερμικής Νησίδας και του αστικού φαραγγιού, και αναφέρεται ο ρόλος της αστικής βλάστησης κατά μήκος των οδών ως μέσο βελτίωσης του μικροκλίματος. Παράλληλα, διατυπώνονται ο σκοπός της έρευνας, το κίνητρο, η μεθοδολογία και η δομή της εργασίας.

Στο πρώτο κεφάλαιο πραγματοποιείται η βιβλιογραφική ανασκόπηση. Εξετάζονται η κλιματική αλλαγή και οι επιπτώσεις της στο αστικό περιβάλλον, η έννοια της θερμικής άνεσης και οι παράγοντες που επηρεάζουν τη θερμική αίσθηση του χρήστη, καθώς και οι βασικοί βιοκλιματικοί δείκτες αξιολόγησης, με έμφαση στους PET και UTCI. Στη συνέχεια αναλύεται το αστικό φαράγγι ως μικροκλιματική μονάδα, τα ακτινοβολιακά και αεροδυναμικά φαινόμενα στο εσωτερικό του και η σημασία της αναλογίας ύψους προς πλάτος (aspect ratio) για την ηλιακή πρόσβαση και τον φυσικό αερισμό. Το κεφάλαιο ολοκληρώνεται με τον ρόλο της δενδροστοιχίας στη διαμόρφωση του μικροκλίματος της οδού.

Στο δεύτερο κεφάλαιο περιγράφεται αναλυτικά η μεθοδολογία της έρευνας. Παρουσιάζονται η διαδικασία επιλογής της περιοχής μελέτης, τα κριτήρια επιλογής και τα γεωμετρικά και χωρικά χαρακτηριστικά της, καθώς και η υφιστάμενη δόμηση και βλάστηση. Ακολουθεί η περιγραφή της ψηφιοποίησης του μοντέλου στο λογισμικό ENVI-met (κάναβος, υλικά εδαφοκάλυψης, βλάστηση) και η εισαγωγή των μετεωρολογικών δεδομένων της εξεταζόμενης ημέρας. Τέλος, παρουσιάζονται τα δύο σενάρια προσομοίωσης και οι παράμετροι αξιολόγησης των θερμικών συνθηκών (δυνητική θερμοκρασία αέρα και δείκτης UTCI).

Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης. Αναλύεται η χωρική κατανομή της δυνητικής θερμοκρασίας αέρα και του δείκτη UTCI και για τα δύο σενάρια, σε χαρακτηριστικές ώρες της ημέρας: αρχικά για το Σενάριο 1 (υφιστάμενη κατάσταση) και στη

συνέχεια για το Σενάριο 2 (ενισχυμένη δενδροφύτευση). Ακολουθεί η συγκριτική παρουσίαση των δύο σεναρίων, ώστε να αποτιμηθεί ποσοτικά η συμβολή της βλάστησης στη βελτίωση των θερμικών συνθηκών.

Στο τέταρτο κεφάλαιο πραγματοποιείται η συζήτηση των αποτελεσμάτων και τα κύρια συμπεράσματα, με ερμηνεία των ευρημάτων σε σχέση με τη γεωμετρία του φαραγγιού και τα χαρακτηριστικά της φύτευσης, σύγκριση με τη διεθνή βιβλιογραφία και αξιολόγηση των περιορισμών της έρευνας, ενώ προτείνονται κατευθύνσεις για μελλοντική έρευνα.

.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΉ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

1.1 Γενικό Πλαίσιο: Κλιματική Αλλαγή και οι Επιπτώσεις στο Αστικό Περιβάλλον

Η προσαρμογή στην κλιματική μετάβαση απαιτεί ολοκληρωμένο αστικό σχεδιασμό, με έμφαση στο πράσινο, την ενεργειακή αποδοτικότητα και τα βιώσιμα πρότυπα ανάπτυξης. Οι στρατηγικές οι οποίες συνδυάζουν φυσικές υποδομές, ψυχρά υλικά και μειωμένες εκπομπές λειτουργούν συμπληρωματικά για την ενίσχυση της ανθεκτικότητας των πόλεων. Οι πόλεις αποτελούν ένα κράμα γκρίζων, μπλε και πράσινων υποδομών οι οποίες αλληλοενεργούν με τις κυρίαρχες καιρικές συνθήκες, με αποτέλεσμα την τοπική αίσθηση του μικροκλίματος και της θερμικής άνεσης που βιώνουν οι κάτοικοι της πόλης. Αναλυτικότερα, τα γκρίζα στοιχεία αποτελούνται από σκληρές επιφάνειες, όπως οικιστικά και βιομηχανικά κτίρια, δρόμοι, επιχειρήσεις κοινής ωφέλειας και χώροι στάθμευσης, μπλε στοιχεία αποτελούν τα υδάτινα σώματα, λίμνες, ποτάμια, λίμνες και κανάλια νερού και πράσινα στοιχεία, δηλαδή δέντρα, θάμνοι και χόρτα σε χώρους πρασίνου και δρόμους. Στις περισσότερες πυκνοκατοικημένες πόλεις έχουν υπερισχύσει τα γκρίζα στοιχεία με απώλεια φυσικού οικοσυστήματος λόγω της ραγδαίας αύξησης του παγκόσμιου αστικού πληθυσμού, με αποτέλεσμα την άνευ προηγουμένου αύξηση του «γκρίζου» εις βάρος των «μπλε» και «πράσινων» υποδομών, ιδίως των δέντρων.

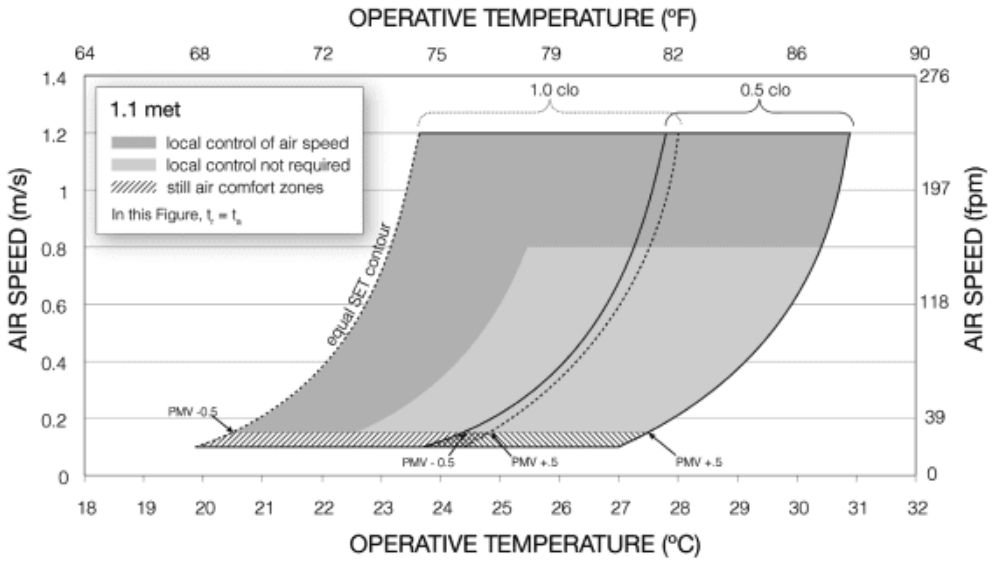
Σ Συγκεκριμένα, με αφορμή παλαιότερες έρευνες, όπως η μελέτη χαρακτηριστικών του καλοκαιριού του 2007 στην Αθήνα (Founda & Giannakopoulos, 2009), το οποίο ήταν το θερμότερο καλοκαίρι στην ιστορία των μετρήσεων του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών (ΕΑΑ) εκείνη την περίοδο, δόθηκε η ευκαιρία για την διερεύνηση των καλοκαιριών των επόμενων δεκαετιών. Η ανάλυσή αποκάλυψε ότι οι μέγιστες θερμοκρασίες που καταγράφηκαν στην Αθήνα παρουσιάζουν στενή ομοιότητα με θερμοκρασίες που προβλέπεται να επικρατούν προς το τέλος του αιώνα (2071–2100).

Σύμφωνα με έκθεση του Organization for Economic Cooperation and Development (OECD, 2014), η Αθήνα κατατάσσεται τέταρτη από το τέλος μεταξύ των πόλεων που εξετάστηκαν, διαθέτοντας μόλις 0,96 τ.μ. αστικού πρασίνου ανά κάτοικο. Η αναλογία αυτή συγκαταλέγεται

στις χαμηλότερες παγκοσμίως, καθώς είναι σχεδόν δέκα φορές μικρότερη από το ελάχιστο όριο των 9 τ.μ. ανά κάτοικο που προτείνει ο World Health Organization (WHO, 2010) για τις αστικές περιοχές.

1.2. Θερμική Άνεση στο αστικό περιβάλλον

Η προσέγγιση του ιδανικού αστικού μικροκλίματος έχει ως στόχο την καλύτερη ποιότητα ζωής των ανθρώπων, δηλαδή καλύτερη υγεία, φυσιολογία και ευεξία του χρήστη (Mayer; 1993). Η θερμική άνεση μπορεί να οριστεί ως η κατάσταση στην οποία το άτομο αισθάνεται ικανοποιημένο με τις θερμικές συνθήκες του περιβάλλοντος, χωρίς να επιθυμεί αλλαγές. (ASHRAE, 1981). Ο ορισμός της θερμικής άνεσης πηγάζει από τις προδιαγραφές του American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE) για εσωτερικούς χώρους, ενώ έχει εφαρμογή και στο υπαίθριο αστικό περιβάλλον, ωστόσο η πολυπλοκότητα του μικροκλίματος της πόλης καθιστά την έννοιά του πολυπαραγοντική.



Εικόνα 1. Ενδεικτικό γράφημα: Σχέση θερμοκρασίας αέρα και επιπέδου θερμικής άνεσης (ASHRAE 55:2020)

Η θερμική άνεση, από βιολογική άποψη, επιτυγχάνεται όταν η ποσότητα θερμότητας που παράγει το ανθρώπινο σώμα εξισορροπείται με τη θερμότητα που χάνει ή κερδίζει από το περιβάλλον, έτσι ώστε η θερμοκρασία του να παραμένει σταθερή στους 37°C. Αυτή η

θερμοκρασία επιτυγχάνεται όταν η θερμοκρασία περιβάλλοντος είναι κοντά στους 25°C. Σύμφωνα με (ASHRAE, 2020) περιοχή μεταξύ 22°C και 28°C αντιστοιχεί συνήθως σε αποδεκτή θερμική άνεση για τους περισσότερους ανθρώπους σε εξωτερικά περιβάλλοντα.

Οι συνεχώς αυξανόμενες θερμοκρασίες λόγω της κλιματικής αλλαγής και του φαινομένου της αστικής θερμικής νησίδας (Urban Heat Island – UHI) επιδεινώνουν τη θερμική δυσφορία, κυρίως στους θερινούς μήνες (Santamouris, 2020; Li et al., 2023). Η αστική θερμική νησίδα είναι το φαινόμενο που ουσιαστικά επηρεάζει την θερμική άνεση στις αστικές περιοχές, λόγω των υψηλών θερμοκρασιών, κάτι που δεν παρατηρείται στην περιαστικές περιοχές. Το φαινόμενο της αστικής θερμικής νησίδας μετριέται ως η μέγιστη διαφορά ανάμεσα στη θερμοκρασία της πόλης και στη θερμοκρασία της γύρω περιοχής, η οποία θεωρείται ως σημείο αναφοράς. Αυτή η διαφορά ονομάζεται ένταση της αστικής θερμικής νησίδας και ποικίλλει ανάλογα με το μέγεθος, τον πληθυσμό, την οικιστική και βιομηχανική ανάπτυξη της πόλης, την τοπογραφία, τα κατασκευαστικά υλικά, το κλίμα της περιοχής καθώς και τις εκάστοτε καιρικές συνθήκες (Oke, 2017). Σε αντίθεση με τις περιαστικές περιοχές, μέσα στην πόλη η έλλειψη βλάστησης και υδάτινων στοιχείων δεν διευκολύνει την ψύξη του περιβάλλοντος, με αποτέλεσμα να αυξάνεται η θερμοκρασία της ατμόσφαιρας. Η άνοδος αυτή οδηγεί σε μεγαλύτερη κατανάλωση ενέργειας, η οποία με τη σειρά της ενισχύει την περαιτέρω αύξηση του ενεργειακού ισοζυγίου λόγω των ανθρώπινων δραστηριοτήτων (όπως τα κτίρια, η κυκλοφορία των οχημάτων και η ίδια η ανθρώπινη δραστηριότητα). Στο αστικό περιβάλλον, οι παράγοντες αυτοί επηρεάζονται σημαντικά από τις αλλαγές στο μικροκλίμα των πόλεων, το οποίο διαμορφώνεται από τη γεωμετρία των κτιρίων, την αστική βλάστηση, την θερμοχωρητικότητα των οικοδομικών υλικών, τον χαμηλό συντελεστής ανάκλασης και τη μορφολογία του εδάφους (Oke, 2017;).

Παράγοντες που επηρεάζουν την θερμική αίσθηση του χρήστη

Οι αιτίες που οδηγούν στο φαινόμενο ταξινομούνται με βάση το αν μπορούν να τροποποιηθούν και με βάση τη διάρκειά τους. Έτσι, υπάρχουν βραχυπρόθεσμοι παράγοντες, όπως ο άνεμος και η νέφωση, μακροχρόνιοι, όπως το αστικό πράσινο, τα δομικά υλικά και η μορφή της πόλης, καθώς και παράγοντες που εμφανίζονται περιοδικά, όπως η ηλιακή ακτινοβολία και οι ανθρώπινες δραστηριότητες (Memon και συν., 2007).

1.2.1. Βιοκλιματικοί Δείκτες

Για την διερεύνηση της αστικής θερμικής άνεσης, οι βιοκλιματικοί δείκτες αποτελούν κρίσιμα εργαλεία αξιολόγησης, καθώς επιτρέπουν τη συστηματική ανασκόπηση των ευνοϊκών ή επιβαρυντικών συνθηκών διαβίωσης στο αστικό περιβάλλον. Ιδιαίτερα σε περιοχές με έντονη θερμική αστικοποίηση, οι δείκτες αυτοί συμβάλλουν στην κατανόηση της κατανομής του θερμικού στρες και της αλληλεπίδρασης φυσικών και ανθρωπογενών παραγόντων (Oke, 1987).

Οι βιοκλιματικοί δείκτες αποτελούν ποσοτικά εργαλεία που συνδυάζουν μετεωρολογικές μεταβλητές, όπως η θερμοκρασία αέρα (Tair), η υγρασία (Relative Humidity), η ταχύτητα του ανέμου (Wind Speed) και η ακτινοβολία (Mean Radiant Temperature / MRT) με στόχο την εκτίμηση της επίδρασης του κλίματος στον άνθρωπο, τα οικοσυστήματα και τις ανθρώπινες δραστηριότητες. Μέσω αυτών των δεικτών, οι σύνθετες φυσικές παράμετροι μετατρέπονται σε σαφές αρχείο για την μελέτης της θερμική άνεσης και αίσθησης, την καταπόνηση ή τις εν δυνάμει υγειονομικές επιπτώσεις των καιρικών συνθηκών (Höppe, 1999).

Παράλληλα, η εφαρμογή βιοκλιματικών δεικτών συνδέεται άμεσα με τη βιοκλιματική αρχιτεκτονική και τον βιώσιμο πολεοδομικό σχεδιασμό, δεδομένου ότι καθοδηγούν την ανάπτυξη στρατηγικών μείωσης ενεργειακής κατανάλωσης και βελτίωσης της θερμικής άνεσης μέσω κατάλληλων χωρικών διαμορφώσεων και παθητικών συστημάτων (Santamouris, 2013). Ουσιαστικά, οι δείκτες συνδέουν την μετεωρολογία με τις γενικότερες ανάγκες αστικού σχεδιασμού ώστε η σύνθεσή τους και ο σχεδιασμός τους να ανταποκρίνεται στις αντίστοιχες κλιματικές συνθήκες. Τελικά, οι βιοκλιματικοί δείκτες αφορούν. ενώ ένας γενικός όρος περιγράφει κάθε αριθμητικό μέγεθος το οποίο συνδυάζει μετεωρολογικές παραμέτρους ώστε να εκφράσει τις επιδράσεις του περιβάλλοντος στον άνθρωπο.

Σύμφωνα με βιβλιογραφική ανασκόπηση έχουν προταθεί αρκετοί βιοκλιματικοί δείκτες για τη μελέτη της θερμικής άνεσης και των επιπτώσεων του κλίματος στον άνθρωπο, οι οποίοι χρησιμοποιούνται σε διαφορετικά περιβάλλοντα και σκοπούς. Ενδεικτικά, μεταξύ αυτών συγκαταλέγονται ο Δείκτης Θερμικής Άνεσης (Thermal Comfort Index), ο Δείκτης Φορτίου Θερμότητας (Heat Stress Index), ο Δείκτης Ψύχους (Wind Chill Index), ο δείκτης Discomfort

Index και ο δείκτης Wet-Bulb Globe Temperature (WBGT), οι οποίοι επιτρέπουν την εκτίμηση των θερμικών συνθηκών σε υπαίθρια ή εργασιακά περιβάλλοντα.

Βιοκλιματικοί Δείκτες που διαμορφώνουν τη θερμική αίσθηση

Η χρήση βιοκλιματικών δεικτών που αφορούν τη θερμική αίσθηση είναι καθοριστική για την κατανόηση των συνεπειών της κλιματικής αλλαγής στην ανθρώπινη υγεία, καθώς καταγράφουν αυξημένες περιόδους θερμικού στρες και μεταβολές στην ποιότητα των συνθηκών διαβίωσης (Havenith & Fiala, 2015). Στη διεθνή βιβλιογραφία συναντάται πληθώρα βιοκλιματικών δεικτών. Παρ' όλα αυτά, όλοι αυτοί μπορούν να ομαδοποιηθούν σε δύο βασικές κατηγορίες, ήτοι ο PET (Physiologically Equivalent Temperature) και ο UTCI (Universal Thermal Climate Index).

Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι οι δύο δείκτες λειτουργούν καλύτερα στον συνδυασμό τους. Σύμφωνα με με διερεύνηση της κατάστασης, έδειξε ότι οι δείκτες PET, mPET και UTCI παρουσιάζουν σημαντική αύξηση θερμικής καταπόνησης στην αστική περιοχή σε σύγκριση με την προαστιακή, με τη μεγαλύτερη διαφοροποίηση κατά τη διάρκεια του χειμώνα και τις πιο ομοιόμορφες τιμές το καλοκαίρι, γεγονός που υπογραμμίζει την επιδείνωση των βιοθερμικών συνθηκών λόγω αστικής θερμικής νησίδας. Ο συνδυασμός των τριών δεικτών θεωρείται πολύτιμος για την ολοκληρωμένη εκτίμηση της εξωτερικής θερμικής άνεσης και για εφαρμογές στην αστική σχεδίαση και δημόσια υγεία (Pecelj et al., 2021).

1.2.2. Δείκτης Αξιολόγησης PET (Physiologically Equivalent Temperature)

Το PET αξιολογεί τη θερμοκρασία που προκαλεί τις ίδιες φυσιολογικές αντιδράσεις του ανθρώπινου σώματος σε διαφορετικές κλιματικές συνθήκες (Höppe, 1999), ενώ ο UTCI παρέχει μια ολοκληρωμένη εκτίμηση της θερμικής αίσθησης λαμβάνοντας υπόψη θερμοκρασία, υγρασία, άνεμο και ηλιακή ακτινοβολία (Jendritzky et al., 2012), γεγονός που τους καθιστά ιδανικούς για τη μελέτη θερμικής άνεσης σε αστικά φαράγγια και υπαίθριους χώρους.

PET (°C)	Θερμική Αίσθηση	Θερμικό Στρες	Κατηγορία

< 4	Πολύ κρύο	Ισχυρό ψυχρό στρες	8
4 – 8	Κρύο	Μέτριο ψυχρό στρες	7
8 – 13	Δροσερό	Ελαφρύ ψυχρό στρες	6
13 – 18	Ελαφρώς δροσερό	Ελαφρύ ψυχρό στρες	5
18 – 23	Άνετο	Χωρίς θερμικό στρες	4 (βέλτιστο)
23 – 29	Ελαφρώς θερμό	Ελαφρύ θερμικό στρες	3
29 – 35	Ζεστό	Μέτριο θερμικό στρες	2
35 – 41	Πολύ ζεστό	Ισχυρό θερμικό στρες	1
> 41	Καύσωνας	Ακραίο θερμικό στρες	0

Πίνακας 1. Πηγή: Höppe (1999); Matzarakis & Amelung (2008). Τυπικές τιμές για τυποποιημένο άτομο (άνδρας 35 ετών, 75 kg, 1.75 m, μεταβολικός ρυθμός 80 W/m², θερμική αντίσταση ένδυσης 0.9 clo)

1.2.3. Δείκτης Αξιολόγησης UTCI (Universal Thermal Climate Index)

Ο Δείκτης Universal Thermal Climate Index (UTCI) αποτελεί έναν από τους πλέον ολοκληρωμένους βιοκλιματικούς δείκτες που έχουν αναπτυχθεί για την αξιολόγηση της θερμικής καταπόνησης του ανθρώπου σε εξωτερικά περιβάλλοντα (Jendritzky et al., 2012). Αναπτύχθηκε στο πλαίσιο του ερευνητικού προγράμματος COST Action 730 της Ευρωπαϊκής Ένωσης, με στόχο τη δημιουργία ενός παγκόσμιως εφαρμόσιμου δείκτη που να υπερβαίνει τους περιορισμούς των προηγούμενων προσεγγίσεων (Błazejczyk et al., 2013).

Ο UTCI βασίζεται σε ένα πολυκλιματικό φυσιολογικό μοντέλο θερμορύθμισης (Fiala multi node model), το οποίο περιγράφει με ακρίβεια τις φυσιολογικές αντιδράσεις του ανθρωπίνου σώματος σε ένα ευρύ φάσμα κλιματικών συνθηκών (Jendritzky et al., 2012). Συγκεκριμένα ορίζεται ως η θερμοκρασία αναφοράς (°C) ενός τυποποιημένου περιβάλλοντος που προκαλεί την ίδια φυσιολογική απόκριση στον οργανισμό με το αντίστοιχο πραγματικό κλιματικό περιβάλλον. Το τυποποιημένο περιβάλλον ορίζεται ως ο χώρος χωρίς τον παράγοντα του ανέμου (ταχύτητα 0.5 m/s), με μέση ακτινοβολία ίση με την θερμοκρασία του αέρα και σχετική υγρασία 50%.

Οι μεταβλητές εισόδου για τον υπολογισμό του UTCI είναι τέσσερις: (α) η θερμοκρασία αέρα (Ta), (β) η Μέση Ακτινοβολιακή Θερμοκρασία (Mean Radiant Temperature, MRT), (γ) η ταχύτητα ανέμου σε ύψος 10m και (δ) η σχετική υγρασία (RH). Η ενσωμάτωση της MRT ως κύριας παραμέτρου καθιστά τον UTCI ιδιαίτερα κατάλληλο για αστικά περιβάλλοντα, όπου η ακτινοβολιακή φόρτιση από κτίρια, πεζοδρόμια και επιφάνειες αποτελεί τον κυρίαρχο παράγοντα θερμικής καταπόνησης (Błazejczyk et al., 2013). Σε αντίθεση με απλούς δείκτες, ο UTCI αξιοποιεί ταυτόχρονα και τις τέσσερις παραμέτρους που προαναφέρθηκαν, αποδίδοντας μία συνολική εικόνα των βιοκλιματικών συνθηκών.

Ο δείκτης UTCI οργανώνεται σε εννέα κατηγορίες θερμικού στρες, που εκτείνονται από το ακραίο ψυχρό (< −27°C) έως το ακραίο θερμό (> +46°C). Για τους σκοπούς της παρούσας εργασίας, η ανάλυση επικεντρώνεται στις κατηγορίες θερμικού στρες που παρατηρούνται κατά τους θερινούς μήνες στο αστικό περιβάλλον της Αθήνας, δηλαδή από το μέτριο (> +26°C) έως το ακραίο θερμικό στρες (> +46°C), κατηγορίες στις οποίες εντάσσεται η πλειονότητα των ημερών του Ιουλίου (Founda & Giannakopoulos, 2009).

Ο UTCI έχει επικυρωθεί διεθνώς κατάλληλο εργαλείο για συγκρίσεις μεταξύ σεναρίων και χωρικών θέσεων, σε πληθώρα κλιματικών ζωνών. Στα πλαίσιο μελετών ENVI – MET, ο UTCI υπολογίζεται αυτόματα για κάθε κελί του τρισδιάστατου πλέγματος και σε κάθε χρονική στιγμή, επιτρέποντας την χαρτογράφηση της χωρικής κατανομής του θερμικού στρες σε ύψος 1.00 - 1.8 m από το έδαφος, δηλαδή στο μέσο ύψος αναπνοής και θερμικής αίσθησης του πεζού (Bruse & Fleer, 1998).

UTCI (°C)	Κατηγορία θερμικού στρες
> +46	Ακραίο θερμικό στρες
+38 έως +46	Πολύ ισχυρό θερμικό στρες
+32 έως +38	Ισχυρό θερμικό στρες
+26 έως +32	Μέτριο θερμικό στρες
+9 έως +26	Χωρίς θερμικό στρες
+9 έως 0	Ελαφρύ ψυκτικό στρες

0 έως −13	Μέτριο ψυκτικό στρες
−13 έως −27	Ισχυρό ψυκτικό στρες
−27 έως −40	Πολύ ισχυρό ψυκτικό στρες

Πίνακας 2. Jendritzky et al. (2012); Copernicus Climate Change Service (C3S)

1.2.4. Η Σημασία της Ποιότητας του Αέρα και της Θερμικής Άνεσης στις Πόλεις

Η υποβάθμιση της θερμικής άνεσης συνδέεται με αυξημένο θερμικό στρες και επιπτώσεις στην υγεία (Basu, 2022). Στους εξωτερικούς αστικούς χώρους, οι κάτοικοι εκτίθενται σε υψηλές θερμοκρασίες, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε θερμική εξάντληση ή θερμοπληξία (World Health Organization, 2023). Αντίθετα, όταν επικρατούν άνετες θερμικές συνθήκες, μειώνεται η χρήση ενεργοβόρων συστημάτων δροσισμού, βελτιώνεται η ενεργειακή απόδοση και ενισχύεται η ποιότητα ζωής.

Σε ένα αστικό περιβάλλον, η θερμική άνεση δεν αποτελεί πλέον μόνο ζήτημα θερμοκρασίας ή ανέμου. Η ποιότητα του αέρα αναδύεται ως κρίσιμος παράγοντας της ευημερίας των χρηστών. ρευνα σε πάρκα πόλεων ανέδειξε ότι η συνδυασμένη επίδραση των θερμικών συνθηκών και της ρύπανσης του αέρα καθορίζει τόσο τις φυσιολογικές αντιδράσεις (π.χ. καρδιακή συχνότητα, ηλεκτροδερμική δραστηριότητα) όσο και την ψυχολογική εμπειρία των ατόμων (Lan et al., 2024). Συγκεκριμένα, διαπιστώθηκε ότι σε περιοχές όπου η συγκέντρωση των $PM_{2.5}$ ή άλλων αιωρούμενων σωματιδίων ήταν υψηλή, η υποκειμενική αντίληψη της θερμικής άνεσης μειωνόταν σημαντικά, ακόμη και υπό θερμοκρασιακές συνθήκες θεωρητικά άνετες. Επιπλέον, οι χρήστες υπαίθριων χώρων εμφάνιζαν μεγαλύτερη επιφυλακτικότητα ως προς τη διάρκεια παραμονής τους σε αυτούς. Τα ευρήματα υπογραμμίζουν την αλληλεπίδραση μεταξύ θερμικής άνεσης και ποιότητας ατμοσφαιρικού αέρα. Η επίτευξη ικανοποιητικών θερμικών συνθηκών δεν επαρκεί εάν η ατμόσφαιρα περιέχει υψηλά επίπεδα ρύπων που επηρεάζουν την αναπνευστική άνεση και τη συνολική αίσθηση ευεξίας των χρηστών.

1.3. Το Αστικό Φαράγγι (Urban Canyon) ως Μικροκλιματική Μονάδα

Το αστικό φαράγγι (urban canyon) αποτελεί θεμελιώδη μονάδα του αστικού περιβάλλοντος και ορίζεται ως ο χώρος που περιβάλλεται από δύο συνεχόμενα κτήρια διαχωρισμένα από έναν δρόμο (Oke, 1981; Agathangelidis et al., 2020). Αυτή η γεωμετρική διάταξη δημιουργεί ένα μικροπεριβάλλον με ιδιαίτερες φυσικές ιδιότητες που διαφοροποιούνται σημαντικά από τις συνθήκες των περιαστικών ανοικτών χώρων. Ο βαθμός αυτής της διαφοροποίησης καθορίζεται κυρίως από το λόγο όψης (aspect ratio, H/W), που ορίζεται ως ο λόγος του μέσου ύψους των κτηρίων (H) προς το πλάτος του δρόμου (W). Οι Agathangelidis et al. (2020) διαπίστωσαν σε συγκριτική αξιολόγηση 25 ευρωπαϊκών πόλεων, ότι αυτή η γεωμετρική παράμετρος επηρεάζει σημαντικά τη θερμοκρασία της επιφάνειας και του αέρα, ιδίως στο μεσογειακό κλίμα της Αθήνας. Ο λόγος της όψης χαρακτηρίζεται από ιδιότητα να παγιδεύει θερμική ενέργεια των υλικών και να περιορίζει τη διαφυγή της, ιδιαίτερα κατά τη διάρκεια μεσημεριανών ωρών όπου η ηλιακή ακτινοβολία είναι ακόμη κι απευθείας ή ανακλώμενη από τις κατακόρυφες επιφάνειες των κτηρίων.

Τα αστικά φαράγγια χαρακτηρίζονται επίσης από τις θερμοφυσικές ιδιότητες των επιφανειών που τα συγκροτούν, όπως η θερμική αγωγιμότητα, η χωρητικότητα και η ικανότητα απορρόφησης ηλιακής ακτινοβολίας των υλικών. Αυτές οι ιδιότητες, σε συνδυασμό με τη γεωμετρική διάταξη, καθορίζουν τη δυναμική ανταλλαγής θερμικής ενέργειας μεταξύ του φαραγγιού και του ανώτερου ατμοσφαιρικού στρώματος, γεγονός που τελικά αυξάνει την ένταση του φαινομένου της Αστικής Θερμικής Νησίδας (Urban Heat Island - UHI) .

1.3.1. Φαινόμενα στο Αστικό Φαράγγι - Θερμικό Περιβάλλον και ακτινοβολία

Ο θερμικός χαρακτήρας του αστικού φαραγγιού καθορίζεται πρωτίστως από τη σύνθετη ακτινοβολιακή δυναμική που λαμβάνει χώρα στο εσωτερικό του (Oke, 2006). Σε αντίθεση με τις ανοικτές επιφάνειες, όπου η ηλιακή ακτινοβολία προσπίπτει και απορροφάται ή ανακλάται κατά ένα μεγάλο μέρος προς τον ανοικτό ουράνιο θόλο, στο αστικό φαράγγι η ηλιακή ακτινοβολία δεν παραμένει απλώς, αλλά υπόκειται σε πολλαπλές ανακλάσεις και εκπομπές μεταξύ των κατακόρυφων επιφανειών των κτηρίων και του εδάφους. Αυτό το φαινόμενο,

γνωστό ως παγίδευση ακτινοβολίας (radiation trapping), δημιουργεί ένα ενισχυμένο ακτινοβολιακό περιβάλλον που αυξάνει σημαντικά τη θερμοκρασία του αέρα και των επιφανειών στο εσωτερικό του φαραγγιού.

Η ένταση του φαινομένου της παγίδευσης ακτινοβολίας εξαρτάται άμεσα από τονλόγο όψης και τις οπτικές ιδιότητες των επιφανειών. Μελέτες με χρήση του Urban Canyon Shortwave Trapping Index (STIc), ενός αδιάστατου δείκτη ποσοτικοποίησης της γεωμετρικά επαγόμενης συσσώρευσης βραχυκύματης ακτινοβολίας στο επίπεδο του πεζού, έδειξαν ότι ο δείκτης αυξάνεται τόσο με την ανακλαστικότητα των τοίχων όσο και με το βάθος του φαραγγιού, με τιμές που ξεπερνούν το 2 σε διαμορφώσεις υψηλής λευκαύγειας και υψηλού λόγου H/W. Η μέγιστη θερμική παγίδευση εντοπίζεται μεταξύ 11:00 και 14:00 τοπικής ώρας, συμπίπτοντας με την κορύφωση της ηλιακής γωνίας (Alexandrou et al., 2025)

Για το μεσογειακό κλίμα, όπου η ηλιακή ακτινοβολία τείνει να ξεπεράσει τα 800-1000 W/m² κατά τις μεσημεριανές ώρες του καλοκαιριού, αυτή η ακτινοβολιακή παγίδευση δημιουργεί ακόμη πιο έντονα θερμικά περιβάλλοντα (Santamouris et al., 2011).

Προκειμένου να κατανοηθεί η μεταφορά ενέργειας στο αστικό φαράγγι, είναι ανάγκη να αναγνωριστεί πρώτα ότι το θερμικό ισοζύγιο της περιοχής εξαρτάται από ισορροπία ανάμεσα στην ηλιακή ακτινοβολία (διευθέτηση και διάχυση), τη θερμική ακτινοβολία εκπομπής, και τη ροή θερμότητας στις δομές και στο έδαφος. Η Μέση Θερμική Ακτινοβολία (Mean Radiant Temperature, MRT) συνιστά τον κρίσιμο δείκτη για την αξιολόγηση του θερμικής ικανότητας ενός χώρου να εκθέτει τον ανθρώπινο σώμα σε θερμικό στρες (Matzarakis & Amelung, 2008). Στα αστικά φαράγγια, η MRT μπορεί να υπερβεί σημαντικά τη θερμοκρασία του αέρα, δημιουργώντας απαίσιες συνθήκες θερμικής άνεσης ακόμη και σε θερμοκρασίες αέρα που θεωρούνται ήπιες για ανοιχτούς χώρους.

1.3.2. Χαρακτηριστικά Ροής Αέρα εντός Αστικού Φαραγγιού

Η ροή του αέρα εντός των αστικών φαραγγιών επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από θερμικούς μηχανισμούς και από τη γεωμετρία του δομημένου περιβάλλοντος, γεγονός που συχνά οδηγεί σε απόκλιση από τη συμπεριφορά του υπερκείμενου ανέμου. Η άνιση ηλιακή ακτινοβόληση των αντικριστών όψεων των κτιρίων προκαλεί σημαντικές θερμοκρασιακές διαφορές, οι οποίες μπορούν να φτάσουν ή και να ξεπεράσουν τους 10°C, δημιουργώντας τοπικές ανοδικές ροές κατά μήκος των θερμότερων επιφανειών και καθοδικές ροές στις ψυχρότερες

(Σανταμούρης, 2008). Οι θερμικά επαγόμενες αυτές κυκλοφορίες καθίστανται ιδιαίτερα έντονες σε συνθήκες χαμηλής ταχύτητας υπερκείμενου ανέμου, όπου η δυναμική σύζευξη μεταξύ της ροής πάνω από το φαράγγι και της ροής στο εσωτερικό του είναι περιορισμένη.

Παράλληλα, η ροή του αέρα εντός του αστικού φαραγγιού χαρακτηρίζεται από την ανάπτυξη παροδικών δινών, κυρίως κοντά στις γωνίες και κατά μήκος του άξονα της οδού, οι οποίες καθορίζουν τη μεταφορά θερμότητας. Σε πολλές περιπτώσεις, η κατεύθυνση και η ένταση της ροής εντός του φαραγγιού διαφοροποιούνται ή ακόμη και αντιστρέφονται σε σχέση με τον άνεμο πάνω από αυτό, με αποτέλεσμα τη μειωμένη απομάκρυνση της θερμότητας και των ρύπων. Σύγχρονες μελέτες επισημαίνουν ότι, σε τέτοιες συνθήκες, η θερμική κυκλοφορία μπορεί να υπερισχύσει της μηχανικής εξαναγκασμένης ροής, επηρεάζοντας σημαντικά τον φυσικό αερισμό και τη θερμική άνεση στο επίπεδο του πεζού (Santamouris, 2020).

Τέλος, τα φαινόμενα ανάμιξης και συναγωγής εντός του αστικού φαραγγιού τείνουν να περιορίζουν την έντονη κατακόρυφη θερμοκρασιακή διαστρωμάτωση του αέρα. Ωστόσο, η αυξημένη επιφανειακή τραχύτητα και η μειωμένη ταχύτητα του ανέμου συχνά οδηγούν σε ανεπαρκή φυσικό αερισμό, ενισχύοντας τη θερμική επιβάρυνση και συμβάλλοντας στη διατήρηση υψηλών θερμοκρασιών στο αστικό μικροκλίμα (Santamouris, 2020).

1.3.3. Ο ρόλος της αναλογίας της οδού (Πλάτος/Υψος - Aspect Ratio) στην ηλιακή πρόσβαση και τον αερισμό

Η γεωμετρική αναλογία ύψους κτιρίων προς πλάτος οδού (H/W ή Aspect Ratio) αποτελεί την πλέον ευρέως χρησιμοποιούμενη παράμετρο για την ποσοτική περιγραφή της μορφολογίας του αστικού φαραγγιού (Oke, 1988). Ορίζεται ως ο αδιάστατος λόγος H/W, όπου H εκφράζει το μέσο ύψος των αντικριστών κτιρίων και W εκφράζει το πλάτος της οδού ανάμεσά τους. Ο λόγος πλάτος προς ύψος χρησιμοποιείται ευρέως για τη σύνδεση της αστικής μορφολογίας με μικροκλιματικές παραμέτρους.

Ο λόγος H/W επηρεάζει άμεσα δύο κρίσιμες φυσικές διεργασίες οι οποίες είναι η ηλιακή πρόσβαση εντός του φαραγγιού και η ικανότητα φυσικού αερισμού. Σε φαράγγια με υψηλό H/W (>1), η ηλιακή ακτινοβολία προσπίπτει μόνο σε τμήματα του εδαφοκαλύμματος για συγκεκριμένες ώρες της ημέρας, ενα στα φαράγγια με χαμηλό H/W (<0.5) η ηλιακή έκθεση είναι σχεδόν συνεχής (Oke, 1988). Κατά συνέπεια, τα βαθιά φαράγγια παγιδεύουν μεγαλύτερο

ποσοστό εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας λόγω των πολλαπλών ανακλάσεων και εκπομπών στις κατακόρυφες επιφάνειες των κτιρίων, αυξάνοντας την τοπική θερμοκρασία αέρα.

Σύμφωνα με Oke (1988), τα αστικά φαράγγια διαχωρίζονται σε τρεις κατηγορίες, ήτοι (α) ανοιχτό φαράγγι, όπου H/W < 0.5, (β) κανονικό φαράγγι (0.5 ≤ H/W ≤ 2.0) και (γ) βαθύ φαράγγι (H/W > 2.0). Στα βαθιά φαράγγια παρατηρούνται φαινόμενα που αυξάνουν την Αστική Θερμική Νησίδα (ΑΘΝ), όπως έντονη παγίδευση ακτινοβολίας, περιορισμένη ικανότητα αποβολής, θερμότητας μέσω μακροκυματικής ακτινοβολίας προς τον ουρανό ή και αυξημένη θερμική επιβάρυνση κατά τις νυχτερινές ώρες (Oke, 1982; Agathangelidis et al., 2020).

Η δομή της ροής του ανέμου εντός του φαραγγιού καθορίζονται από τον λόγο H/W. Αναλυτικότερα, σε ανοιχτά φαράγγια επικρατεί σκέδαση της ροής σε ατίθεση με τα κανονικά φαράγγια που σχηματίζεται ένας κυρίαρχος στρόβιλος (primary vortex) που ανακυκλοφορεί τον αέρα, ενώ σε βαθύ φαράγγι όπου αναπτύσσονται πολλαπλοί στρόβιλοι, ο αερισμός περιορίζεται ακόμη περισσότερο. Ως αποτέλεσμα των παραπάνω, με τον περιορισμό του αερισμού μειώνεται η μεταφορά θερμότητας με συναγωγή, επιδεινώνοντας τις θερμικές συνθήκες για τον χρήστη.

1.4. Ο Ρόλος της Δενδροστοιχίας στη Διαμόρφωση του Μικροκλίματος της Οδού

Η βλάστηση αποτελεί ένα από τα κύρια στοιχεία σύστασης στη διαμόρφωση του αστικού τοπίου των πόλεων. Ειδικότερα, τα τελευταία χρόνια έχει διαπιστωθεί ότι επηρεάζει τις μικροκλιματικές συνθήκες εντός αστικών περιοχών, με έντονες αναφορές στις δενδροφυτεύσεις (Lai et al., 2019).

Η δενδροστοιχία επιδρά στο μικροκλίμα της οδού μέσω τεσσάρων αλληλένδετων μηχανισμών. Καταρχάς, η παρουσία των δέντρων μειώνει την ταχύτητα του ανέμου (WS) στο εσωτερικό του φαραγγιού, περιορίζοντας τη μεταφορά θερμότητας με συναγωγή (Coutts et al., 2016). Παράλληλα, η φυλλική κόμη παρεμποδίζει σημαντικό μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας (SR)

που φτάνει στην υποκείμενη επιφάνεια κατά τη διάρκεια της ημέρας, λειτουργώντας ως φυσικό σκίαστρο (Shashua-Bar et al., 2012).

Πέρα από τη σκίαση, τα δέντρα μεταβάλλουν και τις θερμοϋγρομετρικές συνθήκες της οδού. Μέσω της σκίασης των επιφανειών και της εξατμισοδιαπνοής, μειώνουν τη θερμοκρασία του αέρα (AT) και αυξάνουν τη σχετική υγρασία (RH). Χαρακτηριστικά, σε επιτόπια έρευνα στην Αθήνα, κατά τη διάρκεια εξαιρετικά θερμής περιόδου, καταγράφηκε μέση ημερήσια μείωση της θερμοκρασίας αέρα από 0,5 έως 2,2 °C (Tsiros, 2010). Ο σημαντικότερος, ωστόσο, μηχανισμός δράσης είναι η μείωση της μέσης ακτινοβολιακής θερμοκρασίας (MRT) στο επίπεδο του πεζού, η οποία αποτελεί τον κυρίαρχο παράγοντα θερμικής καταπόνησης στο αστικό περιβάλλον. Σε οδό της Αθήνας, η μέγιστη τιμή του δείκτη PET κάτω από τα δέντρα ήταν χαμηλότερη κατά περίπου 10 °C σε σχέση με την ηλιαζόμενη πλευρά της οδού (Shashua-Bar et al., 2012)

Το εύρημα αυτό συμφωνεί με τα αποτελέσματα συστηματικής ανασκόπησης προσομοιώσεων ENVI-met, σύμφωνα με την οποία η προσθήκη δέντρων και θάμνων εντός αστικών φαραγγιών μπορεί να μειώσει τη μέγιστη θερμοκρασία αέρα κατά 0,2 °C έως 5,0 °C, με διάμεση τιμή περίπου 1,0 °C (Tsoka et al., 2020).

Μία από τις πιο βιώσιμες μεθόδους αντιμετώπισης της υπερθέρμανσης των αστικών περιοχών αποτελεί η φύτευση. Ωστόσο, πρέπει να επισημανθεί ότι τα δέντρα ενδέχεται να λειτουργούν και ως επιπρόσθετα εμπόδια στη ροή του ανέμου, ιδιαίτερα στο πλαίσιο του αστικού φαραγγιού, το οποίο από μόνο του αποτελεί καθοριστικό παράγοντα διαμόρφωσης της κίνησης του αέρα στο αστικό περιβάλλον, οδηγώντας σε μείωση της ταχύτητας του ανέμου και, κατ' επέκταση, σε περιορισμένη απομάκρυνση θερμότητας από τις αστικές επιφάνειες μέσω συναγωγής (Mochida et al., 2008). Παρά ταύτα, λαμβάνοντας υπόψη τόσο τα οφέλη όσο και τις πιθανές επιβαρύνσεις, η υφιστάμενη επιστημονική βιβλιογραφία συγκλίνει στο ότι η συνολική επίδραση των δέντρων είναι θετική, υπό την προϋπόθεση ότι η φύτευσή τους πραγματοποιείται βάσει στρατηγικού σχεδιασμού (Akbari, 2002, Ko, 2018).

Σε αντίστοιχη μελέτη μεσογειακού κλίματος, εξετάστηκαν δεκαεπτά αστικά φαράγγια της Θεσσαλονίκης με διαφορετικό προσανατολισμό και λόγο ύψους προς πλάτος (H/W από 0,6 έως 3,3), με βαθμονόμηση προσομοιώσεων ENVI-met βάσει επιτόπιων μετρήσεων. Η ανάλυση ανέδειξε ότι η γεωμετρία του φαραγγιού, τα υλικά των επιφανειών και η βλάστηση επηρεάζουν σημαντικά τη θερμοκρασία αέρα, την επιφανειακή θερμοκρασία και τη θερμική άνεση των πεζών, όπως αποτυπώνεται στον δείκτη PET (Chatzidimitriou & Axarli, 2017).

Συνοψίζοντας, μεταξύ των διαθέσιμων στρατηγικών μετριασμού της αστικής υπερθέρμανσης είτε με τα ψυχρά υλικά, είτε με τροποποίηση της γεωμετρίας του αστικού ιστού είτε με ενσωμάτωση υδάτινων στοιχείων, η δενδροφύτευση αναδεικνύεται από τη βιβλιογραφία ως μία από τις πλέον βιώσιμες και αποδοτικές λύσεις βασισμένες στη φύση (nature-based solutions). Το πλεονέκτημά της έγκειται στο ότι δρα ταυτόχρονα μέσω πολλαπλών μηχανισμών: της σκίασης και της μείωσης της μέσης ακτινοβολιακής θερμοκρασίας (MRT), της εξατμισοδιαπνοής και της βελτίωσης της ποιότητας του αέρα, με άμεσο όφελος στη θερμική άνεση στο επίπεδο του πεζού. Η αποδοτικότητά της, ωστόσο, δεν είναι ανεξάρτητη από τη μορφολογία του φαραγγιού, καθώς η πυκνότητα, το ύψος και η χωροθέτηση των δέντρων αλληλεπιδρούν με τον λόγο H/W, καθορίζοντας τη συνολική τους επίδραση. Ως εκ τούτου, η στοχευμένη, βάσει σχεδιασμού δενδροφύτευση προτείνεται ως αποτελεσματική στρατηγική βελτίωσης του μικροκλίματος, ιδίως σε πυκνοδομημένες περιοχές μεσογειακού κλίματος με περιορισμένο αστικό πράσινο, όπως η περιοχή που εξετάζεται στην παρούσα εργασία.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

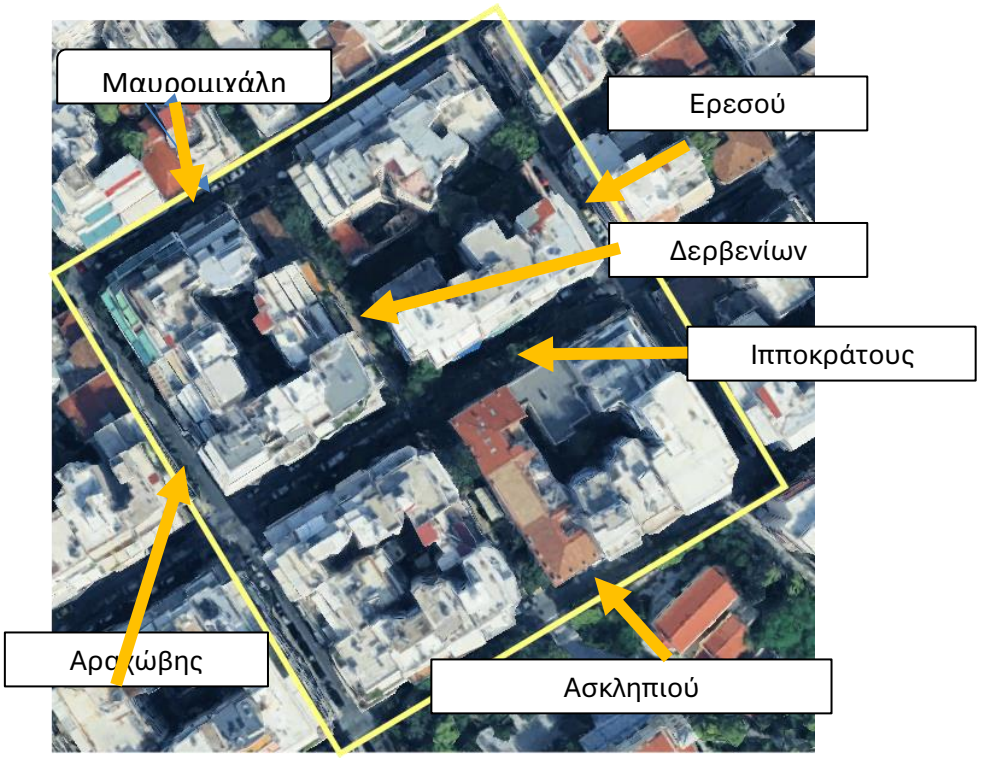
2.1. Επιλογή Περιοχής Μελέτης

Η επιλογή της περιοχής μελέτης πραγματοποιήθηκε με βάση συγκεκριμένα κριτήρια που αφορούν τόσο τα μορφολογικά χαρακτηριστικά του αστικού ιστού, όσο και την

αντιπροσωπευτικότητα της περιοχής ως προς τις συνθήκες που επιδιώκεται να εξετασθούν. Ο κεντρικός τομέας των Αθηνών είναι ο δεύτερος πιο πυκνοκατοικημένος τομέας σε όλη την Ευρώπη, με 10.436 άτ./km² (Eurostat, 2020). Συγχρόνως, μέσω της έκθεσης του OECD (Organization for Economic Cooperation and Development) του έτους 2014, αναφέρονται δεδομένα για το ποσοστό πρασίνου σε διάφορες πόλεις παγκοσμίως, εκ των οποίων περιλαμβάνεται και η Αθήνα που συγκαταλέγεται στην τέταρτη από το τέλος, με 0.96 τ.μ. πρασίνου ανά κάτοικο. Συγκριτικά, ο World Health Organization (2010) έχει ορίσει 9.00 τ.μ./κάτοικο, παράγοντας σχεδόν δέκα φορές μικρότερος από αυτόν της Αθήνας.



Εικόνα 2. Ευρύτερη Περιοχή Μελέτης, Πηγή: Google Maps



Εικόνα 3. Εγγύτερη Περιοχή Μελέτης, Πηγή: Google Maps

Αντικείμενο της παρούσας μελέτης αποτελεί συνοικία της Νεάπολης Εξαρχείων, στις οδούς Ιπποκράτους, Αραχώβης, Ασκληπιού, Ερεσού, Μαυρομιχάλη & Δερβενίων. Διοικητικά η περιοχή υπάγεται στην 1η δημοτική κοινότητα του Δήμου Αθηναίων, στην Περιφερειακή Ενότητα Αθηνών, της Περιφέρειας Αττικής.

Αναλυτικότερα εντοπίζεται στις γεωγραφικές συντεταγμένες 37.984°Β πλάτος και 23.738°Α μήκος και περιλαμβάνει τέσσερα οικοδομικά τετράγωνα (Ο.Τ. 71064, 71065, 71070, 71071), που οριοθετούνται από τις οδούς Ιπποκράτους, Αραχώβης, Ασκληπιού, Ερεσού, Μαυρομιχάλη και Δερβενίων. Καταγράφηκαν συνολικά 26 κτίρια, εκ των οποίων τα 22 βρίσκονται σε πρόσοψη επί των οδών, ενώ εντοπίζονται κάποια κτίσματα στο εσωτερικό των ακάλυπτων χώρων. Το δομημένο περιβάλλον χαρακτηρίζεται από έντονη κτιριακή πυκνότητα: 14 από τα 26 κτίρια φτάνουν τους 6 ορόφους (~19 m), ενώ τα υπόλοιπα 7 κτίρια αναπτύσσονται σε 5 ορόφους (~16 m), διαμορφώνοντας μέσο ύψος 15,8 m για το σύνολο του αποθέματος.

Τα περισσότερα κτίρια είναι συμβατικής κατασκευής, ήτοι από οπλισμένο σκυρόδεμα και πλήρωση οπτοπλινθοδομών ηλικίας ~ 40 ετών, με ελάχιστες εξαιρέσεις παλαιότερων και

νεοκλασσικών κτιρίων με κεκλιμένες κεραμοσκεπές. Ως προς τη χρήση, υπερτερεί η οικιστική και μικτή χρήση (ισόγεια καταστήματα ή γραφεία με χρήση κατοικίας ή γραφείων στην ανωδομή), χαρακτηριστικό του κεντρικού τομέα Αθηνών.

ΟΤ	Θέση	Όροφοι	Ύψος (m)
71064	Πρόσοψη	6	19
71064	Πρόσοψη	5	16
71064	Πρόσοψη	6	19
71064	Πρόσοψη	6	19
71064	Πρόσοψη	6	19
71064	Πρόσοψη	5	16
71064	Πρόσοψη	6	19
71064	Εσωτερικό	2	7
71065	Πρόσοψη	6	19
71065	Πρόσοψη	5	16
71065	Πρόσοψη	6	19
71065	Πρόσοψη	6	19
71065	Εσωτερικό	2	7
71065	Εσωτερικό	1	4
71071	Πρόσοψη	6	19
71071	Πρόσοψη	5	16
71071	Πρόσοψη	6	19
71071	Πρόσοψη	5	16
71071	Πρόσοψη	6	19
71071	Πρόσοψη	5	16
71070	Πρόσοψη	6	19
71070	Πρόσοψη	5	16
71070	Πρόσοψη	3	10
71070	Πρόσοψη	6	19
71070	Πρόσοψη	6	19
71070	Εσωτερικό	1	4

Πίνακας 3. Πίνακας Κτιρίων ανά Ο.Τ.

Χαρακτηριστικό γνώρισμα της περιοχής μελέτης αποτελεί η περιμετρική δόμηση των οικοδομικών τετραγώνων, η οποία δημιουργεί περίκλειστες εσωτερικές αυλές (ακάλυπτους χώρους). Οι αυλές αυτές, γνωστές στη διεθνή βιβλιογραφία ως "enclosed urban courtyards", αποτελούν ιδιαίτερα μικροκλιματικά περιβάλλοντα: δέχονται περιορισμένη ηλιακή ακτινοβολία λόγω σκίασης από τα περιμετρικά κτίρια, ενώ η γεωμετρία τους (λόγος H/W > 2)

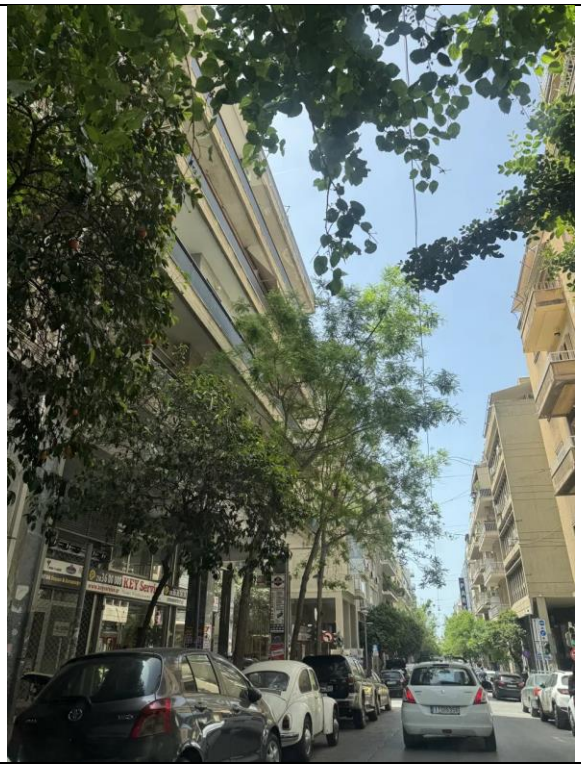
συμβάλλει στη διατήρηση χαμηλότερης θερμοκρασίας αέρα κατά τις ώρες αιχμής, με ταυτόχρονη παγίδευση θερμότητας κατά τις νυχτερινές ώρες (Lizana et al., 2022; Ali-Toudert & Mayer, 2007). Σύμφωνα με τον Oke (1988), η παγίδευση ηλιακής ακτινοβολίας εντός περίκλειστων αστικών κοιλοτήτων ενισχύεται σημαντικά, όταν ο λόγος H/W υπερβαίνει την τιμή 2.0, συνθήκη που πληρούται στους ακάλυπτους της παρούσας περιοχής μελέτης.

Η φύτευση της περιοχής είναι περιορισμένη τόσο σε αριθμό όσο και σε ποικιλία ειδών. Η υπάρχουσα βλάστηση αποτελείται κυρίως από νερατζιές, μουριές, φίκους, πλατάνους και αλμπίτσιες. Τα είδη αυτά θεωρούνται ανθεκτικά μεν στις αστικές συνθήκες, αλλά δεν επαρκούν για να καλύψουν τις ανάγκες σκίασης, βιοποικιλότητας και αισθητικής αναβάθμισης του δημόσιου χώρου.

Οδός	Είδος Βλάστησης	Ύψος	Ποσότητα
Ιπποκράτους	*Δέντρο πυκνής κόμης*	~10μ	21
Ιπποκράτους	*Νερατζιά (Citrus aurantium)*	~5-7μ	16
Δερβενίων	*Φίκοι σε παρτέρια - Θάμνος - Μικτή βλάστηση*	~2-4μ	16
Δερβενίων	*Πλάτανος /Ακακία (Platanus/Robinia)*	~10μ	1
Αραχώβης	*Νερατζιά (Citrus aurantium)*	~2-10μ	4

Μαυρομιχάλη	*Νερατζιά (Citrus aurantium)*	~2-10μ	12
Ερεσού	*Φίκος (Ficus microcarpa)*	~5μ	2

Πίνακας 4. Βλάστηση ανά Οδό



Εικόνα 4. Αυτοψία Περιοχής (Ιπποκράτους) Πηγή: Προσωπικό Αρχείο



Εικόνα 5. Αυτοψία Περιοχής (Ιπποκράτους) Πηγή: Προσωπικό Αρχείο



Εικόνα 6. Αυτοψία Περιοχής (Δεβενίων) Πηγή: Προσωπικό Αρχείο



Εικόνα 7. Αυτοψία Περιοχής (Ερεσού) Πηγή: Προσωπικό Αρχείο

2.2 Ψηφιοποίηση των περιοχών μελέτης στο περιβάλλον του λογισμικού ENVI MET

Σε αυτή την ενότητα περιγράφεται η διαδικασία ψηφιοποίησης της περιοχής μελέτης στο περιβάλλον του τρισδιάστατου μικροκλιματικού μοντέλου ENVI-met V 5.9.0 και γίνεται αναφορά στα στοιχεία που εισήχθησαν στις εφαρμογές του λογισμικού, ώστε να πραγματοποιηθεί η ψηφιοποίηση και η προσομοίωση. Για την εκτέλεση της προσομοίωσης, για τη φύτευση, τα κτίρια, τα υλικά των επιφανειών και τα λοιπά στοιχεία του αστικού περιβάλλοντος χρησιμοποιήθηκαν τα παρεχόμενα από τις βάσεις δεδομένων υλικά του προγράμματος, προσαρμοσμένα στις συνθήκες της υπό μελέτης περιοχής της Νεάπολης Εξαρχείων. Τόσο τα κτίρια της περιοχής μελέτης, όσο και τα όμορα κτίρια των οικοδομικών τετραγώνων παρουσιάστηκαν ως απλοποιημένοι όγκοι, χωρίς εξώστες, έρκερ ή οποιαδήποτε άλλη αρχιτεκτονική προεξοχή, καθώς η παρούσα εργασία αποσκοπεί στη μελέτη του μικροκλίματος που διαμορφώνεται εντός των αστικών φαραγγιών και στον τρόπο με τον οποίο αυτό επηρεάζεται από τη γεωμετρία των οδών και τη δενδροφύτευση κατά μήκος αυτών. Ακολούθησε η τοποθέτηση των υλικών εδαφοκάλυψης και της βλάστησης, τα οποία αποτυπώθηκαν και ψηφιοποιήθηκαν σύμφωνα με την υφιστάμενη κατάσταση της περιοχής.

2.2.1. Κλιματικά Δεδομένα

Η Αθήνα χαρακτηρίζεται από μεσογειακό κλίμα (κλιματική ζώνη Csa κατά Köppen–Geiger), με ήπιους βροχερούς χειμώνες και θερμά ξηρά καλοκαίρια, υψηλή ηλιακή ακτινοβολία και χαμηλή σχετική υγρασία κατά τη διάρκεια του θέρους. Οι θερινοί μήνες χαρακτηρίζονται από κυρίαρχους βορειοανατολικούς ανέμους (ετησίες), ενώ τα φαινόμενα καύσωνα παρατηρούνται σε αυξανόμενη συχνότητα τις τελευταίες δεκαετίες (Founda & Giannakopoulos, 2009).

Η μέγιστη θερμοκρασία στην Ελλάδα κατά τη Δευτέρα 14 Ιουλίου ξεπέρασε τους 40 °C, με υψηλότερη καταγεγραμμένη τιμή τους 40,6 °C στη Σκάλα Μεσσηνίας, ενώ ακολούθησαν η Σπάρτη με 39,3 °C και η Γόρτυνα Ηρακλείου με 38,9 °C. Από το σύνολο των 531 ενεργών μετεωρολογικών σταθμών, το 12% κατέγραψε θερμοκρασίες άνω των 37 °C, ενώ σε ποσοστό 36% των σταθμών η θερμοκρασία υπερέβη τους 35 °C. Η μέση μέγιστη θερμοκρασία της ημέρας ανήλθε στους 33,3 °C, παρουσιάζοντας άνοδο κατά 1,0 °C σε σχέση με την προηγούμενη ημέρα (Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών/meteo.gr, 2025).

Θερμοκρασία (°C)					**Άνεμος**		**Υγρασία**
Μέση	Ελάχιστη	Μέση Ελάχιστη	Μέγιστη	Μέση Μέγιστη	Ένταση (km/h)	Διεύθυνση	Σχετική Υγρασία (%)
27.0	16.0	22.5	42.8	32.6	2.1	ENE	48

Πίνακας 5. Κλιματικά δεδομένα Ιουλίου 2025, Περιφέρεια Αττικής, Πηγή: meteo.gr

Μέση Θερμοκρασία (°C)	27.0
Ελάχιστη Θερμοκρασία (°C)	26.5
Ώρα	6:20
Μέγιστη Θερμοκρασία (°C)	35.8
Ώρα	15:40
Ένταση Ανέμου	5.3
Διεύθυνση Ανέμου	ENE

Πίνακας 6. Κλιματικά Δεδομένα για την ημερομηνία 14.07.2025 (Σταθμός Αμπελόκηποι Αθηνών), Πηγή: meteo.gr

Κατά την 14η Ιουλίου 2025, ο σταθμός των Αμπελοκήπων κατέγραψε μέση ημερήσια θερμοκρασία 35,8°C. Η ελάχιστη θερμοκρασία των 26,5°C παρατηρήθηκε στις 06:20, ενώ η μέγιστη των 35,8°C καταγράφηκε στις 15:40. Η ένταση του ανέμου ανήλθε σε 5,3 km/h με κυρίαρχη διεύθυνση ΑΒΑ (ENE).

2.2.2 Λογισμικό ENVI-met

Το ENVI-met αποτελεί τρισδιάστατο μοντέλο μικροκλίματος που αναπτύσσεται με τη χρήση κανάβου τριών αξόνων (x, y, z) και προσομοιώνει την αλληλεπίδραση των στοιχείων του αστικού περιβάλλοντος κτιριακοί όγκοι, υλικά εδαφοκάλυψης, βλάστηση κ.α. με τις επικρατούσες κλιματικές συνθήκες. Μέσω εισαγωγής δεδομένων του δομημένου περιβάλλοντος και των κλιματικών παραμέτρων, το λογισμικό εξάγει αποτελέσματα για μεταβλητές όπως η θερμοκρασία αέρα, η σχετική υγρασία και η ταχύτητα ανέμου, βασισμένο στους νόμους της θερμοδυναμικής και της μηχανικής ρευστών (Bruse & Fleer, 1998). Η αξιοπιστία του ως εργαλείου προσομοίωσης κλιματικών δεδομένων σε δομημένο περιβάλλον έχει επιβεβαιωθεί μέσω συγκρίσεων προσομοιωμένων και μετρούμενων δεδομένων, με ικανοποιητική ακρίβεια σε διαφορετικές κλιματικές συνθήκες (Chatzidimitriou & Axarli, 2017).

Το περιβάλλον του λογισμικού οργανώνεται σε διακριτές εφαρμογές που αντιστοιχούν στα διαδοχικά στάδια της προσομοίωσης. Στο SPACES κατασκευάζεται το τρισδιάστατο μοντέλο της περιοχής μελέτης, με εισαγωγή κτιριακών όγκων, υλικών επιφανειών και βλάστησης. Μέσω του ENVI-guide εισάγονται τα κλιματικά δεδομένα και ορίζονται η ημερομηνία, η ώρα έναρξης και η διάρκεια της προσομοίωσης, με εφαρμογή της μεθόδου μετεωρολογικής επιβολής Simple Forcing. Ο υπολογιστικός πυρήνας του μοντέλου εκτελεί την αριθμητική επίλυση της προσομοίωσης, ενώ τα παραγόμενα αποτελέσματα οπτικοποιούνται σε χάρτες χωρικής κατανομής για κάθε εξεταζόμενη παράμετρο και ώρα της ημέρας (Huttner & Bruse, 2009).

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε η έκδοση V5.9.0 του ENVI-met για την προσομοίωση του μικροκλίματος της περιοχής Νεάπολης Εξαρχείων, αρχικά για την υφιστάμενη κατάσταση, ενώ στην συνέχεια σε σενάριο σύγκρισης με νέα βλάστηση.

2.2.3. Αξιολόγηση Θερμικών συνθηκών

Για την εκτίμηση των θερμικών συνθηκών της περιοχής μελέτης αξιολογείται σύμφωνα με τις ενδείξεις θερμοκρασίας του αέρα (Potential Air Temperature) και του Παγκόσμιου Δείκτη Θερμικού Κλίματος (Universal Thermal Climate Index, UTCI). Αναλυτικότερα για την αξιολόγηση των θερμικών συνθηκών χρησιμοποιούνται ως παράμετροι αξιολόγησης οι

αποδεκτές θερμοκρασίες σε μεσογειακό κλίμα που κυμαίνονται από 26 °C εώς 32 °C για την θερμή περίοδο.

Ο δείκτης UTCI αποτελεί την θερμική αίσθηση και την θερμική άνεση ενός χρήστη στο αντίστοιχο περιβάλλον.

Ο δείκτης UTCI αποτελεί την θερμική αίσθηση και την θερμική άνεση ενός χρήστη στο αντίστοιχο περιβάλλον. Βάσει της κλίμακας των εννέα κατηγοριών που παρουσιάστηκε στην ενότητα 1.2.3 (Jendritzky et al., 2012, Błazejczyk et al., 2013), για τους σκοπούς της παρούσας εργασίας η ανάλυση επικεντρώνεται στις κατηγορίες που αναμένεται να εμφανιστούν κατά τους θερινούς μήνες στο αστικό περιβάλλον της Αθήνας. Συγκεκριμένα, εκτιμάται ότι οι συνθήκες κυμαίνονται από το μέτριο θερμικό στρες (UTCI > 26°C) έως το ακραίο θερμικό στρες (UTCI > 46°C), με ιδιαίτερο ενδιαφέρον να παρουσιάζουν οι ώρες αιχμής της ημέρας, κατά τις οποίες η ηλιακή ακτινοβολία και η θερμοκρασία αέρα λαμβάνουν τις μέγιστες τιμές τους.

2.3 Κατασκευή Μοντέλου

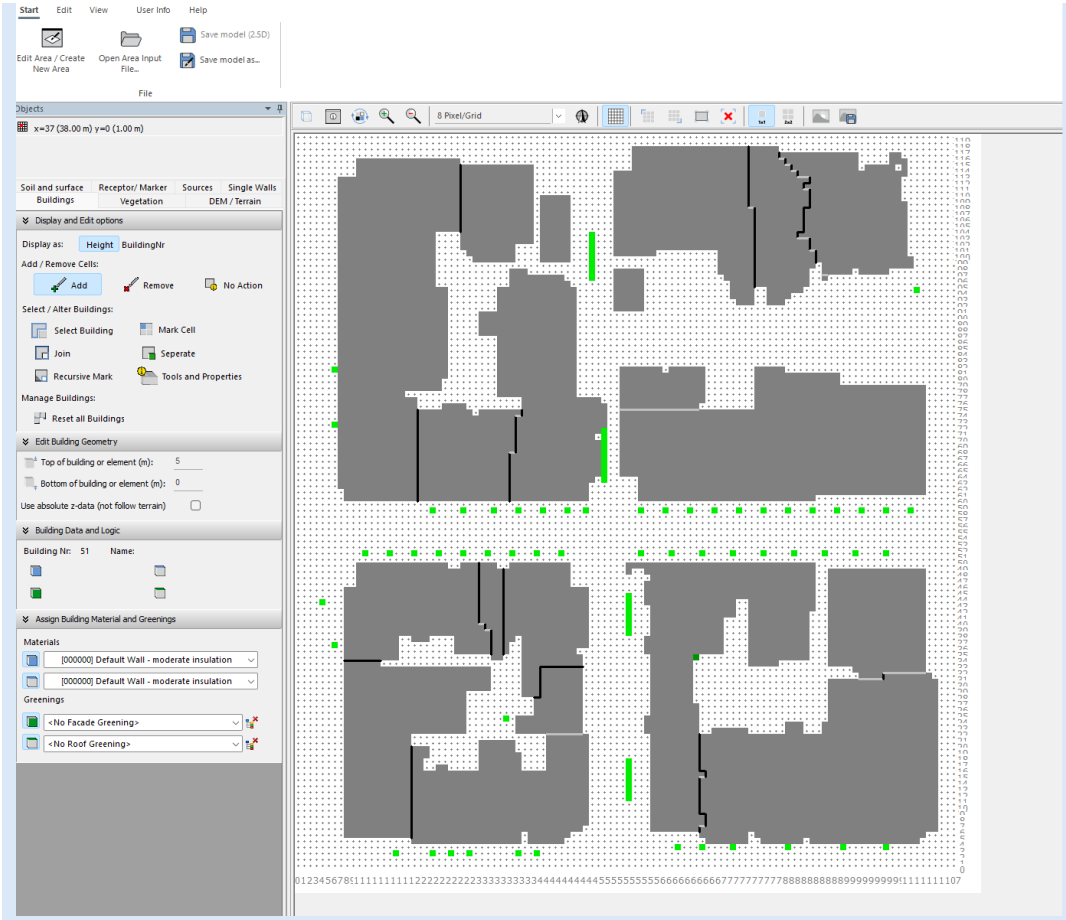
Πριν την έναρξη της ψηφιοποίησης, ορίστηκαν τα βασικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά του μοντέλου. Η περιοχή μελέτης αποδόθηκε σε κάνναβο 108 × 120 κελιών κατά τους οριζόντιους άξονες xx΄ και yy΄, με χωρική ανάλυση 1,00 m ανά κελί, ενώ κατά τον κατακόρυφο άξονα zz΄ χρησιμοποιήθηκαν 40 επίπεδα με ανάλυση 2,00 m, καλύπτοντας συνολική οριζόντια έκταση 108 × 120 m. Η απόκλιση μεταξύ του γεωγραφικού και του μοντελοποιούμενου Βορρά ανήλθε σε 56,20°. Τα φυτά αποδόθηκαν στο μοντέλο βάσει ύψους και πυκνότητας φυλλώματος, χωρίς διαφοροποίηση ανά βοτανικό είδος, πράγμα το οποίο αποτελεί συνήθη απλοποίηση στη βιβλιογραφία (Bruse & Fleer, 1998).

2.3.1. Σενάριο 1: Υφιστάμενη Κατάσταση

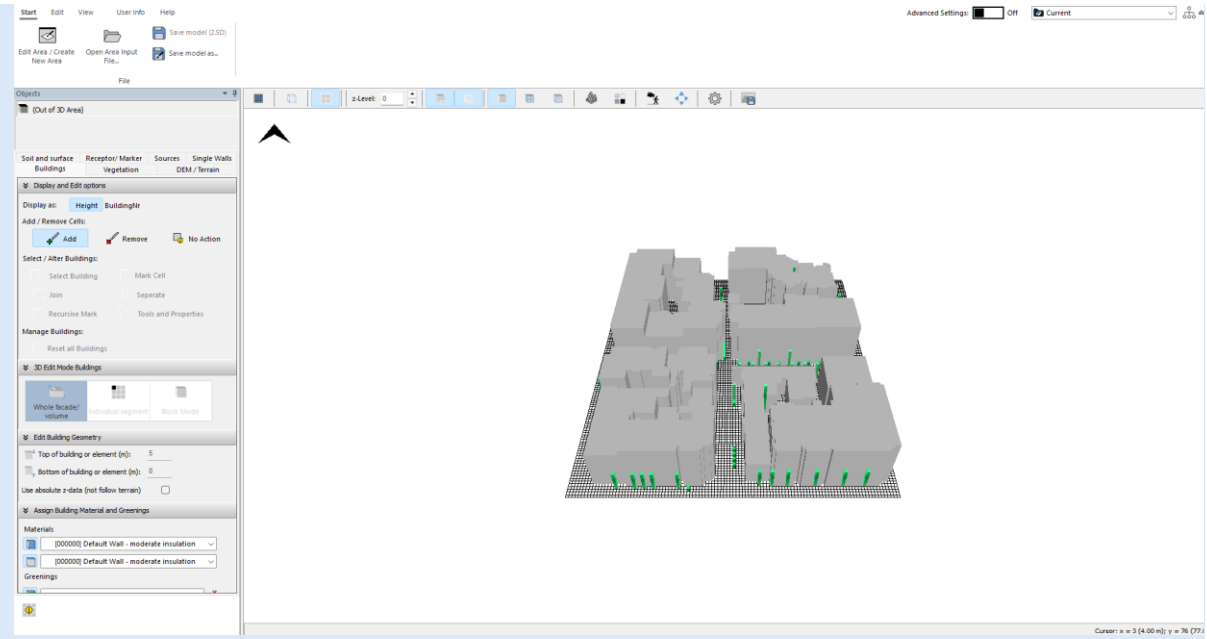
Το σενάριο 1 αφορά την υφιστάμενη κατάσταση. Για την κατασκευή των κτιριακών όγκων τοποθετήθηκε ορθοφωτογραφία της περιοχής ως υπόβαθρο στον κάνναβο, επιτρέποντας την ακριβή χαρτογράφηση των δομημένων στοιχείων. Μέσω της ενότητας Buildings εισήχθησαν οι κτιριακοί όγκοι των τεσσάρων οικοδομικών τετραγώνων (Ο.Τ. 71064, 71065, 71070, 71071), καθώς και των όμορων κτιρίων, με εξατομικευμένη καταχώριση ύψους για κάθε κτίριο

βάσει του Πίνακα 3 (βλ. παραπάνω). Τα κτίρια κυμαίνονται από 1 έως 6 ορόφους (~3,2 m ανά όροφο) και αποδόθηκαν ως απλοποιημένοι ορθογωνικοί όγκοι, χωρίς αρχιτεκτονικές λεπτομέρειες όπως εξώστες, ανοίγματα ή προεξοχές.

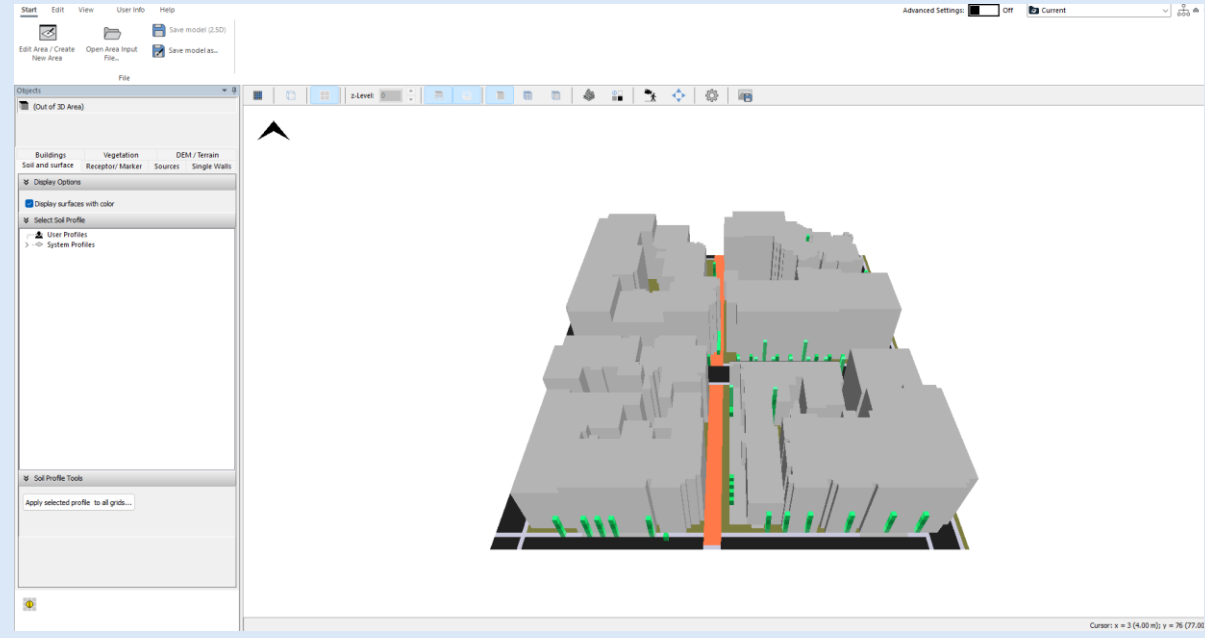
Ακολούθησε η ανάθεση υλικών εδαφοκάλυψης μέσω της ενότητας Soil and Surface. Για τα οδοστρώματα των οδών Ιπποκράτους, Αραχώβης, Ασκληπιού, Μαυρομιχάλη και Ερεσού εφαρμόστηκε το υλικό «Asphalt Road» (0200ST), ενώ για τα πεζοδρόμια και τον πεζόδρομο Δερβενίων επιλέχθηκε το «Brick road/Red stones (0200KK). Όμορα κτίρια, υλικά και φύτευση του ευρύτερου περιβάλλοντος λήφθηκαν υπόψη για τη δημιουργία ρεαλιστικού περιβάλλοντος προσομοίωσης. Στην Εικόνα (8) παρουσιάζεται το μοντέλο σε δισδιάστατη μορφή ενώ στις Εικόνες (9), (10) σε τρισδιάστατη στην πρώτη. Συγκεκριμένα στην τρισδιάστατη μορφή, τα πράσινα στοιχεία αποτελούν τα στοιχεία βλάστησης. Τα υλικά εδαφοκάλυψης απεικονίζονται είτε με μαύρο (άσφαλτος), είτε με γκρι (πλάκες πεζοδρομίου), είτε με πορτοκαλί (κυβόλιθοι), ενώ τα γκρί τους κτιριακούς όγκους.



Εικόνα 8. Ψηφιοποίηση Υφιστάμενης Περιοχής 2D, ENVI-met SPACES 5.9.0., Σενάριο 1, Πηγή: Προσωπικό Αρχείο



Εικόνα 9. Ψηφιοποίηση Περιοχής 3D ENVI-met SPACES 5.9.0., Σενάριο 1, Πηγή: Προσωπικό Αρχείο



Εικόνα 10. Ψηφιοποίηση Περιοχής 3D ENVI-met SPACES 5.9.0, (vegs and roads), Σενάριο 1, Πηγή: Προσωπικό Αρχείο

Για λόγους πληρότητας και αναπαραγωγιμότητας του μοντέλου, στον Πίνακα 7 παρουσιάζονται οι κωδικοί ENVI-met που αντιστοιχούν στα φυτικά στοιχεία της υφιστάμενης κατάστασης, ανά οδό, όπως προέκυψαν από το αρχείο του μοντέλου.

Οδός	Κωδικός EnviMet	Ποσότητα
Ιπποκράτους	0000T0	21
Ιπποκράτους	0100H4	16
Δερβενίων	0201H2	16
Δερβενίων	0000T1	1
Αραχώβης	0000T1	2
Αραχώβης	0000H2	2
Μαυρομιχάλη	0000T1	11
Μαυρομιχάλη	0100H2	1
Ερεσού	0100H4	1
Ερεσού	0000T1	1

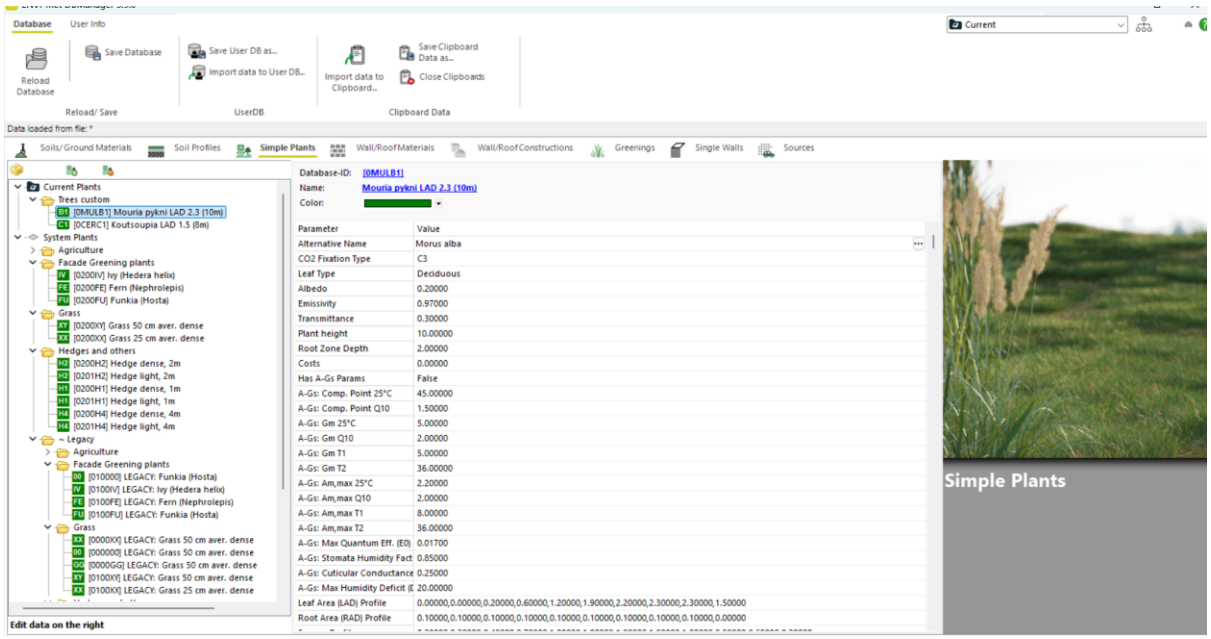
Πίνακας 7. Κωδικοί βλάστησης ανά οδό, Σενάριο 1 (υφιστάμενη κατάσταση), Πηγή: Προσωπικό Αρχείο

2.3.2. Σενάριο 2: Ενίσχυση και αντικατάσταση της υφιστάμενης φυτοκάλυψης

Το Σενάριο Β διατηρεί ως βάση την ψηφιοποίηση του Σεναρίου 1 (κτίρια, υλικά εδαφοκάλυψης, γεωμετρία κανάβου) και παρεμβαίνει αποκλειστικά στην κατά μήκος βλάστηση, με στόχο την ποσοτική εκτίμηση του σεναρίου μιας ενισχυμένης δενδροφύτευσης. Βασικό άξονα αποτελεί η ενίσχυση της πυκνότητας φυλλώματος (Leaf Area Density, LAD) των ειδών που χρησιμοποιήθηκαν.

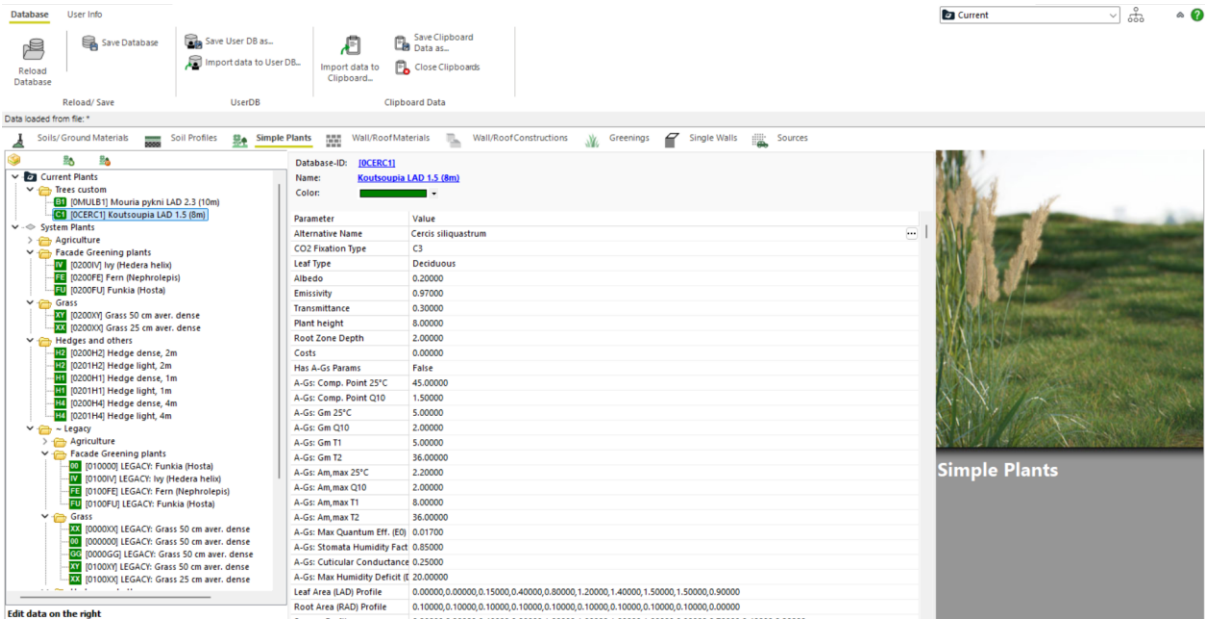
Κατά τον σχεδιασμό του Σεναρίου Β, δημιουργήθηκαν νέα φυτά, με LAD μεταξύ 2,0 και 2,5 2,0 και 2,5 m^2/m^3, ώστε η σκίαση και η πυκνότητα φυλλώματος να προσεγγίζουν συνθήκες πυκνής δενδροφύτευσης. Τα προκαθορισμένα είδη της βάσης δεδομένων Simple Plants του ENVI-met, ωστόσο, δεν υπερέβαιναν τη μέγιστη τιμή LAD 1,25 m^2/m^3, καθιστώντας αναγκαία τη δημιουργία νέων, προσαρμοσμένων φυτικών ειδών (custom plants).

Το πρώτο είδος, η μουριά (Morus alba), επιλέχθηκε λόγω της ταχείας ανάπτυξης, της πυκνής και ευρείας κόμης της και της ευρύτατης χρήσης της ως δέντρου οδών στο αστικό περιβάλλον της Αθήνας. Η μουριά διαθέτει ιδιότητες που την καθιστούν ιδιαίτερα αποτελεσματική στην παροχή σκίασης. Ορίστηκε ύψος 10 m και μέγιστη τιμή LAD 2,3 m^2/m^3.



Εικόνα 11. Ψηφιοποίηση Περιοχής Morus Alba, ENVI-met SPACES 5.9.0, Σενάριο 2, Πηγή: Προσωπικό Αρχείο

Το δεύτερο είδος, η κουτσουπιά (Cercis siliquastrum), επιλέχθηκε ως αυτοφυές είδος της ελληνικής χλωρίδας με καλή προσαρμογή στις μεσογειακές κλιματικές συνθήκες (υψηλή ανθεκτικότητα σε ξηρασία, χαμηλές απαιτήσεις άρδευσης), καθώς και λόγω του μετριότερου μεγέθους της. Η κουτσουπιά είναι κατάλληλη για στενότερους οδικούς άξονες όπου ο διαθέσιμος χώρος φύτευσης είναι περιορισμένος. Ορίστηκε ύψος 8 m και μέγιστη τιμή LAD 1,5 m^2/m^3.



Εικόνα 12. Ιδιότητες του προσαρμοσμένου φυτικού είδους «Κουτσουπιά», Simple Plants, ENVI-met DBManager 5.9.0, Σενάριο 2, Πηγή: Προσωπικό Αρχείο

Οδός	Κωδικός EnviMet	Ποσότητα	Είδος Βλάστησης / LAD φυλλώματος
Ιπποκράτους	0MULB1	38	2,3
Δερβενίων	0201H2	16	0,55
Δερβενίων	0100H4	24	1,25
Δερβενίων	0100H2	8	1,25
Δερβενίων	0MULB1	2	2,3
Δερβενίων	0CERC1	1	1,5
Αραχώβης	0CERC1	20	1,5
Ερεσού	0CERC1	13	1,5
Ερεσού	0MULB1	17	2,3
Μαυρομιχάλη	0CERC1	15	1,5
Μαυρομιχάλη	0MULB1	11	2,3

Μαυρομιχάλη	1	1,25
Ασκληπιού	12	2,3
Ακληπιού	1	0,55

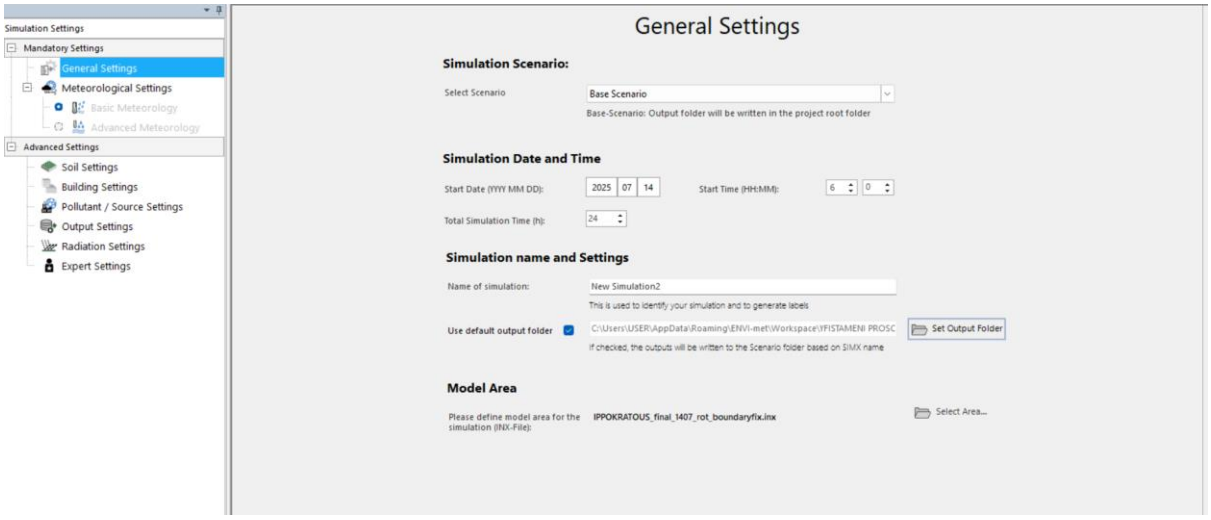
Πίνακας 8. Κωδικοί βλάστησης ανά οδό, Σενάριο 2 (ενισχυμένη φύτευση), Πηγή: Προσωπικό Αρχείο

2.3.3. Εκτέλεση της Προσομοίωσης

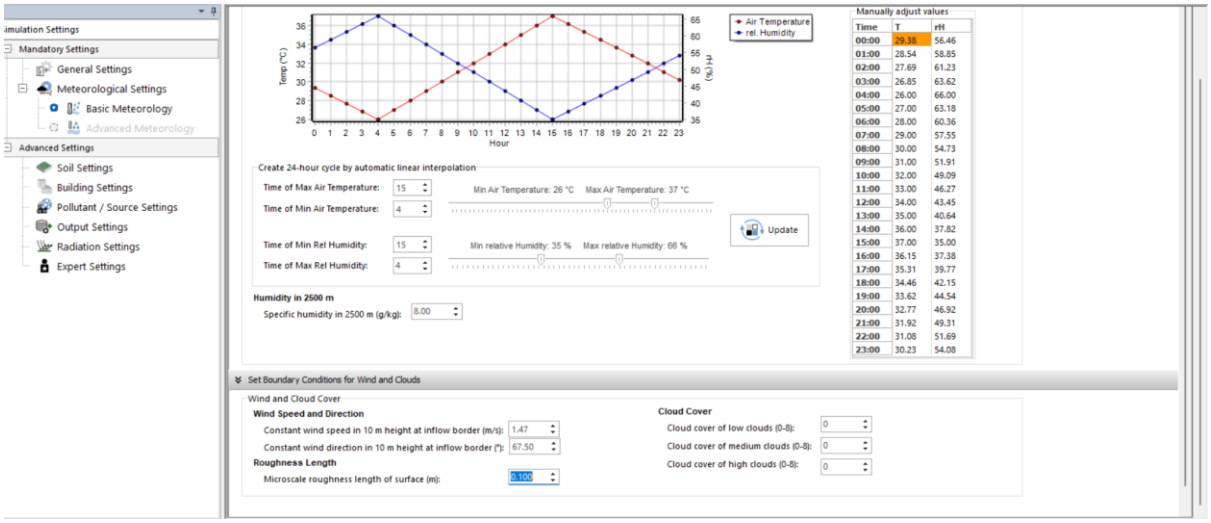
Η υλοποίηση της αριθμητικής προσομοίωσης στο περιβάλλον του ENVI-met ακολουθεί μια σειρά σταδίων, τα οποία αντιστοιχούν σε επιμέρους εφαρμογές του λογισμικού. Αφού ολοκληρωθεί η κατασκευή του τρισδιάστατου μοντέλου στο SPACES, το επόμενο βήμα αφορά τον καθορισμό των κλιματικών συνθηκών μέσω της εφαρμογής ENVI-guide, όπου εισάγονται τα μετεωρολογικά δεδομένα της ημέρας αναφοράς και ορίζονται τα χρονικά όρια της προσομοίωσης.

Στην παρούσα εργασία, η προσομοίωση ξεκίνησε στις 14.07.2025, ώρα 06:00:00, με συνολική διάρκεια 24 ωρών. Ως μέθοδος μετεωρολογικής επιβολής επιλέχθηκε η Simple Forcing. Τα κλιματικά δεδομένα της περιοχής ελήφθησαν από τον Πίνακα 6 (2.2.1.) από το meteo.gr (meteo.gr) τον σταθμό Αμπελοκήπων των Αθηνών. Η ταχύτητα ανέμου στα 10m ύψους στο όριο εισροής του μοντέλου τέθηκε σταθερή στα 1.47 m/s, με διεύθυνση 67.5° (ΑΒΑ). Η μέγιστη θερμοκρασία αντιστοιχεί στους 35,8 °C, ενώ η ελάχιστη στους 26,5 °C.

Με την ολοκλήρωση της παραμετροποίησης, η προσομοίωση εκτελείται υπολογιστικά μέσω του ENVI-core, παράγοντας ωριαία αρχεία εξόδου (60 λεπτών) για κάθε μεταβλητή του μικροκλίματος. Στην παρούσα εργασία εκτελέστηκαν δύο ανεξάρτητες προσομοιώσεις, αντίστοιχες των δύο υπό εξέταση σεναρίων εκ των οποίων η μία αφορά την υφιστάμενη κατάσταση δενδροφύτευσης και άκομα μία για το σενάριο σύγκρισης με εμπλουτισμένη φύτευση.



Εικόνα 13. Γενικές Ρυθμίσεις που εισήχθησαν στην εφαρμογή ENVI-guide για τα Σενάρια 1,2



Εικόνα 14. Κλιματικά δεδομένα που εισήχθησαν στην εφαρμογή ENVI-guide για τα Σενάρια 1,2

3. ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται και αναλύονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για τα δύο σενάρια που εξετάστηκαν. Η αξιολόγηση του θερμικού περιβάλλοντος πραγματοποιείται μέσω χαρτών χωρικής κατανομής που δημιουργήθηκαν στο εργαλείο Leonardo, για τις δύο παραμέτρους αξιολόγησης, δηλαδή την δυνητική θερμοκρασία αέρα (Potential Air Temperature) και τον βιοκλιματικό δείκτη UTCI. Οι χάρτες απεικονίζουν τη

διακύμανση των παραμέτρων στο ύψος του πεζού (k=3, z=1,4 m) για έξι αντιπροσωπευτικές ώρες της 14ης Ιουλίου 2025 (10:00, 12:00, 14:00, 16:00, 18:00 και 20:00). Αρχικά παρουσιάζεται η υφιστάμενη κατάσταση (Σενάριο 1) και στη συνέχεια το σενάριο ενίσχυσης της φυτοκάλυψης (Σενάριο 2). Η θερμοκρασία αέρα αξιολογείται ως προς το εύρος αποδεκτών συνθηκών σε μεσογειακό κλίμα (26°C – 32°C) (Tseliou et al., 2016) για τη θερμή περίοδο, ενώ ο δείκτης UTCI ως προς τις κατηγορίες θερμικού στρες που παρουσιάστηκαν στην ενότητα 1.2.3.

3.1. Σενάριο 1: Υφιστάμενη Κατάσταση

3.1.1. Δυνητική Θερμοκρασία Αέρα (Potential Air Temperature)

Στην Εικόνα 15 (a–f) παρουσιάζεται η χωρική κατανομή της δυνητικής θερμοκρασίας αέρα (Potential Air Temperature) στο ύψος του πεζού (k=3 και z=1.4), για τις έξι ώρες της 14ης Ιουλίου 2025: (a) 10:00, (b) 12:00, (c) 14:00, (d) 16:00, (e) 18:00 και (f) 20:00. Κατά τη διάρκεια της ημέρας οι τιμές κυμαίνονται συνολικά από περίπου 31,8°C έως 38,7°C, υπερβαίνοντας δηλαδή για το μεγαλύτερο μέρος του εικοσιτετραώρου τις αποδεκτές θερμικές συνθήκες (26°C–32°C). Η χωρική κατανομή της δυνητικής θερμοκρασίας του αέρα εμφανίζει ομοιότητες με εκείνη του δείκτη UTCI, καθώς και οι δύο παράμετροι επηρεάζονται από την ηλιακή ακτινοβολία. Ωστόσο το εύρος διαφοροποίησης της θερμοκρασίας αέρα παραμένει σαφώς μικρότερο, γεγονός που αποδίδεται στην ανάμειξη του αέρα εντός του φαραγγιού.

Στις 10:00 (Εικόνα 15a) η θερμοκρασία κυμαίνεται από περίπου 31,8°C έως 36,0°C, παρουσιάζοντας από τις μεγαλύτερες χωρικές διαφοροποιήσεις της ημέρας (~4,2°C). Οι χαμηλότερες τιμές αναπτύσσονται κατά μήκος του κεντρικού δενδροφυτευμένου άξονα της Ιπποκράτους και στο εσωτερικό των ακάλυπτων χώρων των οικοδομικών τετραγώνων, όπου η βλάστηση και η σκίαση περιορίζουν τη θέρμανση. Αντιθέτως, οι υψηλότερες τιμές παρατηρούνται στην περιφέρεια του πεδίου και ιδιαίτερα στο ανατολικό όριο (Ερεσού), το οποίο είναι εκτεθειμένο τόσο στην προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία όσο και στην προσήνεμη ροή ΑΒΑ.
Στις 12:00 (Εικόνα 15b) η θερμοκρασία έχει αυξηθεί κατά περίπου 2,5°C, με τιμές από 33,7°C έως 38,1°C. Δεν επικρατούν πλέον συνθήκες θερμικής άνεσης σε κανένα τμήμα της περιοχής

μελέτης. Ο δενδροφυτευμένος άξονας και οι εσωτερικές αυλές διατηρούνται συγκριτικά ψυχρότεροι, ενώ το ανατολικό όριο παρατηρείται ναι είναι η θερμότερη ζώνη.

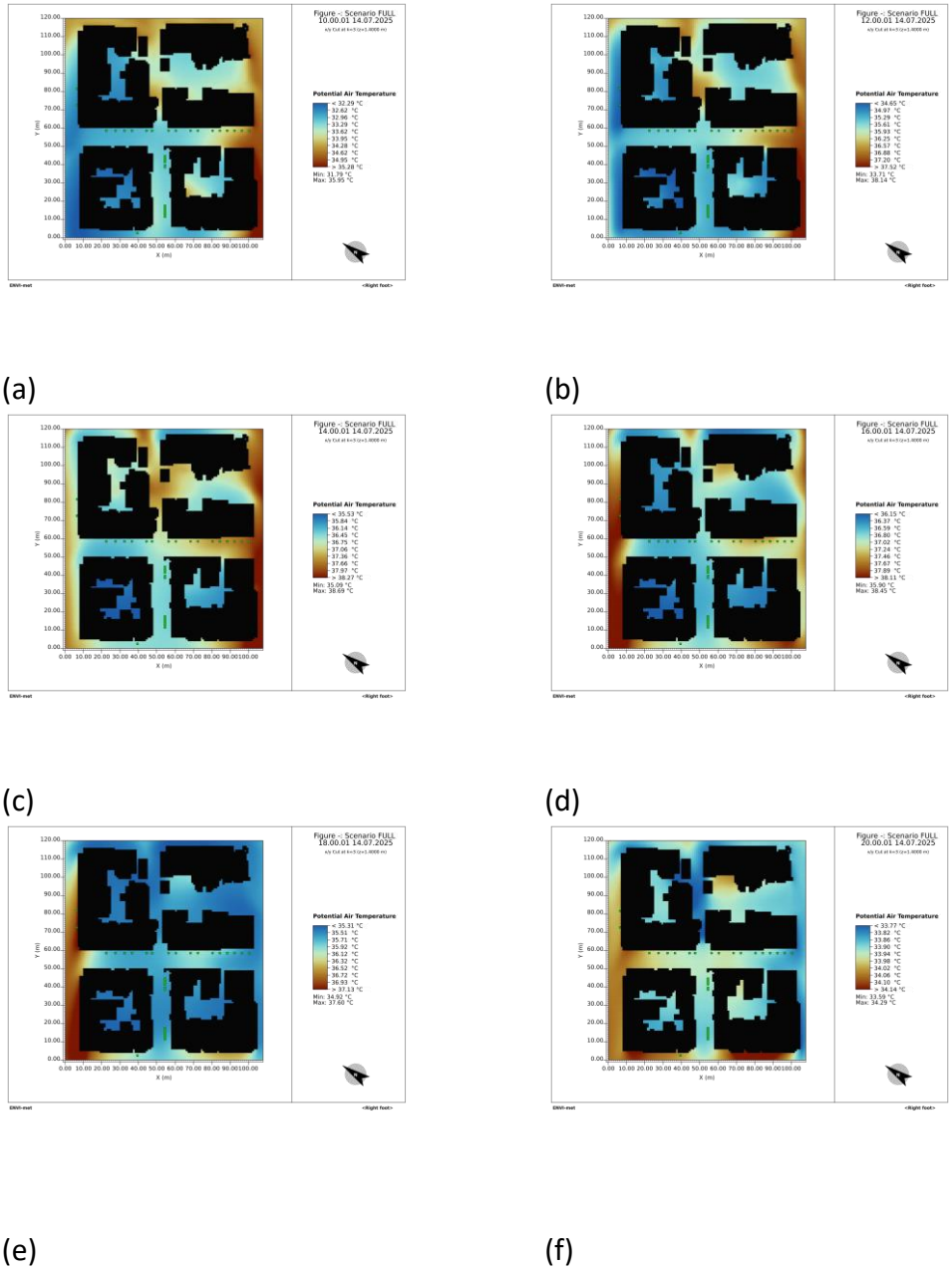
Στις 14:00 (Εικόνα 15c) σημειώνεται η μέγιστη θερμοκρασία της ημέρας, με τιμές από 35,1°C έως 38,7°C. Οι υψηλότερες τιμές εντοπίζονται στις εκτεθειμένες περιφερειακές ζώνες και κατά μήκος των ηλιαζόμενων τμημάτων των οδών.

Στις 16:00 (Εικόνα 15d) οι τιμές κυμαίνονται από 35,9°C έως 38,5°C. Το εύρος μειώνεται (~2,5°C), καθώς ολόκληρη η περιοχή έχει θερμανθεί ομοιόμορφα και ακόμη και η ελάχιστη τιμή είναι αυξημένη. Η εντονότερη θέρμανση εμφανίζεται στα ανατολικά και στις γωνίες του πεδίου όπου εντοπίζεται η οδός Ερεσού και δυτικά (Αραχώβης), ενώ τμήματα της Ιπποκράτους και της Δερβενίων παραμένουν κατά 1–2°C ψυχρότερα σε σχέση με την περιφέρεια.

Στις 18:00 (Εικόνα 15e) ξεκινά η ψύξη, με τις τιμές να μειώνονται σε 34,9°C έως 37,6°C. Μια θερμότερη ζώνη παραμένει κατά μήκος του δυτικού ορίου (Αραχώβης), η οποία αποδίδεται στην απόδοση της αποθηκευμένης θερμότητας των επιφανειών, ενώ το εσωτερικό των φαραγγιών και οι αυλές έχουν ψυχθεί προς τους 35°C.

Στις 20:00 (Εικόνα 15f) το πεδίο εμφανίζεται σχεδόν ομοιόμορφο, με τιμές από 33,6°C έως 34,3°C και χωρικό εύρος μόλις ~0,7°C, υποδηλώνοντας τη νυχτερινή ομογενοποίηση του θερμικού πεδίου. Παρατηρείται ότι η θερμότερη ζώνη παραμένει κατά μήκος του δυτικού ορίου, ενώ κάποιοι εσωτερικοί ακάλυπτοι χώροι εμφανίζονται ελαφρώς θερμότεροι από την ανοιχτή οδό.

Συνολικά, η δενδροφύτευση και η σκίαση του φαραγγιού αποτυπώνονται σε μια παρόμοια κατάσταση τη διάρκεια της ημέρας, ωστόσο οι διαφορές στη θερμοκρασία αέρα παραμένουν περιορισμένες (~2°C), καθώς ο αέρας αναμειγνύεται εντός του φαραγγιού. Η χωρική διαφοροποίηση μεγιστοποιείται τις πρωινές ώρες (~3°C) και ουσιαστικά διαφοροποιείται τη νύχτα (~0,4°C).



Εικόνα 15. Χωρική κατανομή του βιοκλιματικού δείκτη PAT ανά δύο ώρες: (a) 10:00, (b) 12:00, (c) 14:00, (d) 16:00, (e) 18:00, (f) 20:00, Σενάριο 1

3.1.2. Universal Thermal Climate Index (UTCI)

Στην Εικόνα 16 (a–f) παρουσιάζεται η χωρική κατανομή του βιοκλιματικού δείκτη UTCI στο ύψος του πεζού (~1,4 m), για τις έξι αντιπροσωπευτικές ώρες της 14ης Ιουλίου 2025: (a) 10:00, (b) 12:00, (c) 14:00, (d) 16:00, (e) 18:00 και (f) 20:00. Κατά τη διάρκεια της ημέρας ο δείκτης παραμένει εντός των κατηγοριών ισχυρού έως ακραίου θερμικού στρες (UTCI > 32°C), με τις τιμές να κυμαίνονται συνολικά από περίπου 29,5°C έως 51,0°C. Σε αντίθεση με τη δυνητική

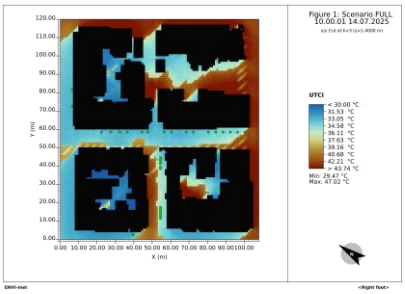
θερμοκρασία αέρα, ο UTCI εμφανίζει μεγαλύτερο χωρικό εύρος. Οι ψυχρότερες ζώνες αναπτύσσονται συστηματικά κατά μήκος του δενδροφυτευμένου άξονα της Ιπποκράτους, ενώ οι υψηλότερες τιμές εντοπίζονται στις εκτεθειμένες περιφερειακές οδούς και ιδιαίτερα στο ανατολικό όριο, δηλαδή στην οδό Ερεσού.

Στις 10:00 (Εικόνα 16a) ο δείκτης παρουσιάζει τη μεγαλύτερη χωρική διαφοροποίηση της ημέρας, με τιμές από 29,5°C έως 47,0°C. Στις σκιασμένες και δενδροφυτευμένες ζώνες, ο δείκτης παραμένει ακόμη στην κατηγορία του μέτριου θερμικού στρες (26–32°C), αποτελώντας τις πλέον ανεκτές συνθήκες που καταγράφονται στη διάρκεια του εικοσιτετραώρου. Αντιθέτως, οι εκτεθειμένες περιφερειακές ζώνες, και ιδιαίτερα το ανατολικό και βορειοανατολικό όριο (Ερεσού) που δέχεται απευθείας την πρωινή ηλιακή ακτινοβολία, εισέρχονται ήδη σε συνθήκες πολύ ισχυρού έως ακραίου θερμικού στρες.
Στις 12:00 (Εικόνα 16b) ο δείκτης κυμαίνεται από 31,9°C έως 47,5°C. Το μεγαλύτερο μέρος της περιοχής εμπίπτει στην κατηγορία του πολύ ισχυρού θερμικού στρες (38–46°C), ενώ συνθήκες ακραίου στρες εμφανίζονται μόνο σημειακά. Ο δενδροφυτευμένος άξονας και οι εσωτερικές αυλές διατηρούνται συγκριτικά ψυχρότεροι, παραμένοντας στην κατηγορία του ισχυρού στρες, ενώ οι εκτεθειμένες οδοί και η περιφέρεια του πεδίου καταγράφουν τις υψηλότερες τιμές.
Στις 14:00 (Εικόνα 16c) οι τιμές αυξάνονται σε 33,3°C έως 48,3°C, με τη μέση τιμή του πεδίου να φθάνει τους ~43°C. Επικρατούν ευρέως συνθήκες πολύ ισχυρού θερμικού στρες, ενώ η έκταση του ακραίου στρες (>46°C) αυξάνεται σημαντικά στο ~16%, καταλαμβάνοντας τις πλήρως ηλιαζόμενες περιφερειακές ζώνες. Ψυχρές κυλίδες χαμηλότερου στρες διατηρούνται σχεδόν αποκλειστικά σε τμήμα της Ιπποκράτους και της Μαυρομιχάλης, ενώ υπάρχουν κάποιες ψυχρές στους ακάλυπτους χώρους.
Στις 16:00 (Εικόνα 16d) καταγράφεται η μέγιστη τιμή του δείκτη για ολόκληρο το εικοσιτετράωρο (51,0°C), παρά το γεγονός ότι η μέση τιμή του πεδίου είναι χαμηλότερη από εκείνη των 14:00. Η αντίφαση αυτή οφείλεται στη γεωμετρία και στη χαμηλότερη γωνία του ήλιου το πεδίο εμφανίζει τη μεγαλύτερη αντίθεση της ημέρας, καθώς εκτεταμένα τμήματα των οδών έχουν εισέλθει στην σκίαση, ενώ οι εναπομείνασες εκτεθειμένες και περιφερειακές ζώνες θερμαίνονται έντονα. Ως αποτέλεσμα, η έκταση του ακραίου θερμικού στρες (>46°C) μεγιστοποιείται, ενώ αυξάνεται και η έκταση του ισχυρού στρες. Η ώρα αυτή αποτελεί μια κρίσιμη ώρα για τη θερμική επιβάρυνση του πεζού.

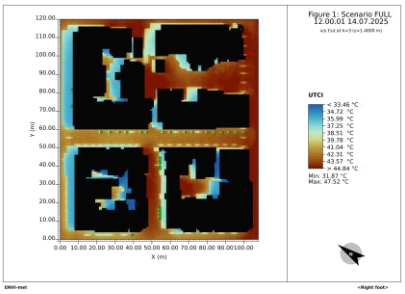
Στις 18:00 (Εικόνα 16e) ξεκινά η αποκλιμάκωση, με τις τιμές να μειώνονται σε 33,1°C έως 47,5°C και τη μέση τιμή να υποχωρεί στους ~38°C. Μια θερμότερη ζώνη παραμένει κατά μήκος του δυτικού ορίου, η οποία αποδίδεται στην αποθηκευμένης θερμότητας των επιφανειών.

Στις 20:00 (Εικόνα 16f) το θερμικό πεδίο μειώνεται, με τις τιμές να συγκλίνουν στο στενό εύρος 31,7°C–36,1°C. Ορισμένοι εσωτερικοί ακάλυπτοι χώροι καταγράφουν υψηλότερες τιμές σε σχέση με τις οδούς (παγίδευση της θερμότητας του φαραγγιού).

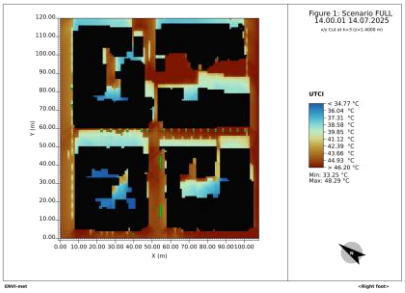
Συνολικά, στο σενάριο 1 ο δείκτης UTCI υποδηλώνει διαρκή θερμική καταπόνηση του πεζού καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας, με συνθήκες που κυμαίνονται από μέτριο έως ακραίο θερμικό στρες. Η υπάρχουσα δενδροφύτευση και η σκίαση του φαραγγιού αποτυπώνονται σε μια συνεπή ψυχρή διάταξη κατά μήκος του άξονα της Ιπποκράτους και στους ακάλυπτους χώρους. Ωστόσο, η περιορισμένη χωρική έκταση αυτής της δενδροφύτευσης αναδεικνύει την ανάγκη ενίσχυσης της φυτοκάλυψης, υπόθεση η οποία διερευνάται στο Σενάριο 2.



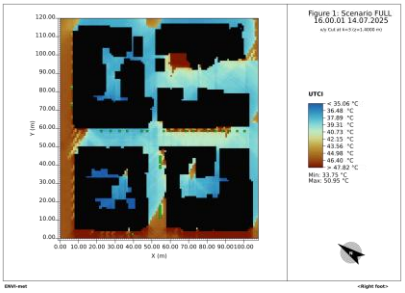
(a)



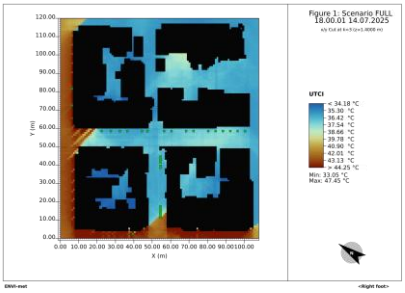
(b)



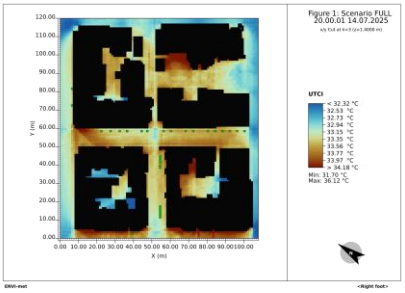
(c)



(d)



(e)



(f)

Εικόνα 16. Χωρική κατανομή του βιοκλιματικού δείκτη UTCI: (a) 10:00, (b) 12:00, (c) 14:00, (d) 16:00, (e) 18:00, (f) 20:00, Σενάριο 1

3.2. Σενάριο 2: Ενίσχυση φυτοκάλυψης κατά μήκος των οδών

3.2.1. Δυνητική Θερμοκρασία Αέρα (Potential Air Temperature)

Στην Εικόνα 17 (a–f) παρουσιάζεται η χωρική κατανομή της δυνητικής θερμοκρασίας αέρα στο Σενάριο 2 (ενίσχυση φυτοκάλυψης), στο ύψος του πεζού (k=3 και z=1.4), για τις ίδιες έξι ώρες της 14ης Ιουλίου 2025. Καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας οι τιμές κυμαίνονται συνολικά από περίπου 31,4°C έως 38,2°C. Η χωρική κατανομή διατηρεί τα βασικά χαρακτηριστικά του Σεναρίου 1, ψυχρότερος ο κεντρικός άξονας της Ιπποκράτους και οι ακάλυπτοι χώροι, θερμότερη η περιφέρεια και ιδιαίτερα το ανατολικό όριο (Ερεσού), ωστόσο σε όλη την περιοχή οι τιμές είναι συστηματικά χαμηλότερες, λόγω της πυκνότερης δενδροφύτευσης και της εκτεταμένης σκίασης που αυτή προσφέρει κατά μήκος των οδών.

Στις 10:00 (Εικόνα 17a) η θερμοκρασία κυμαίνεται από 31,4°C έως 35,5°C. Οι χαμηλότερες τιμές αναπτύσσονται κατά μήκος της Ιπποκράτους, και στο εσωτερικό των ακάλυπτων χώρων, ενώ οι υψηλότερες περιορίζονται στο εκτεθειμένο ανατολικό όριο (Ερεσού).

Στις 12:00 (Εικόνα 17b) η θερμοκρασία αυξάνεται σε 33,2°C έως 37,7°C. Ο κεντρικός άξονας και οι αυλές διατηρούνται συγκριτικά ψυχρότεροι, ενώ το ανατολικό όριο αναδεικνύεται ως η θερμότερη ζώνη.

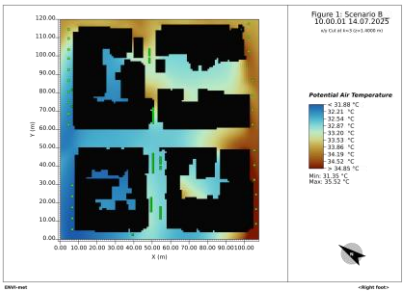
Στις 14:00 (Εικόνα 17c) σημειώνεται η μέγιστη θερμοκρασία της ημέρας, με τιμές από 34,4°C έως 38,2°C, σε συμφωνία με την ημερήσια μέγιστη θερμοκρασία αέρα. Οι υψηλότερες τιμές εντοπίζονται στις εκτεθειμένες περιφερειακές ζώνες και στα ηλιαζόμενα τμήματα των οδών.

Στις 16:00 (Εικόνα 17d) οι τιμές κυμαίνονται από 35,1°C έως 37,7°C, με το εύρος να μειώνεται καθώς η περιοχή έχει θερμανθεί ομοιόμορφα. Ο δενδροφυτευμένος άξονας παραμένει εμφανώς ψυχρότερος σε σχέση με την περιφέρεια.

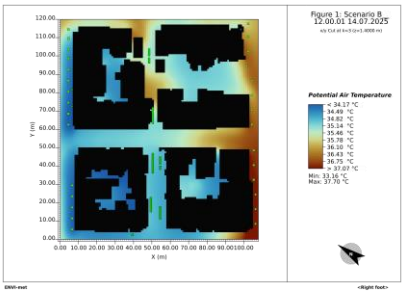
Στις 18:00 (Εικόνα 17e) ξεκινά η ψύξη, με τιμές από 34,2°C έως 36,9°C. Μια θερμότερη ζώνη παραμένει κατά μήκος του δυτικού ορίου, λόγω της απόδοσης της αποθηκευμένης θερμότητας των επιφανειών.

Στις 20:00 (Εικόνα 17f) το πεδίο εμφανίζεται σχεδόν ομοιόμορφο, με τιμές από 32,9°C έως 33,7°C και χωρικό εύρος μόλις ~0,7°C, υποδηλώνοντας τη νυχτερινή ομογενοποίηση του θερμικού πεδίου.

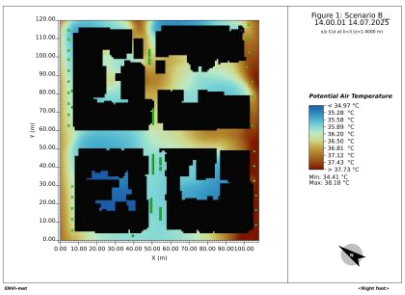
Συγκριτικά με την υφιστάμενη κατάσταση (Σενάριο 1), η ενίσχυση της φυτοκάλυψης επιφέρει μείωση της δυνητικής θερμοκρασίας αέρα σε ολόκληρη σχεδόν την περιοχή, καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας. Η μείωση κυμαίνεται από ~0,5°C το μεσημέρι έως ~0,7°C το απόγευμα (μέγιστη τοπική μείωση ~0,9°C στις 16:00). Το εύρος του πεδίου αναλογικά αντιστοιχεί και σε σχετικά μικρό μέγεθος της μεταβολής.



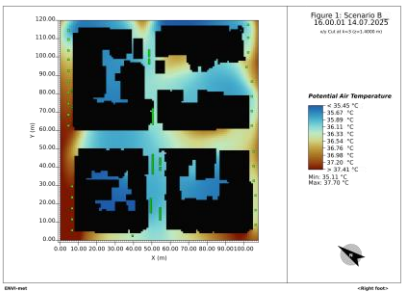
(a)



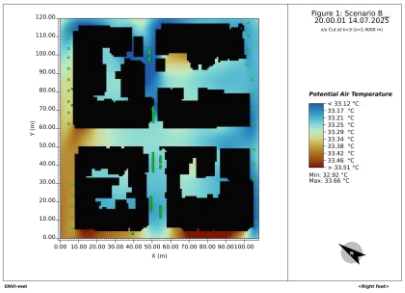
(b)



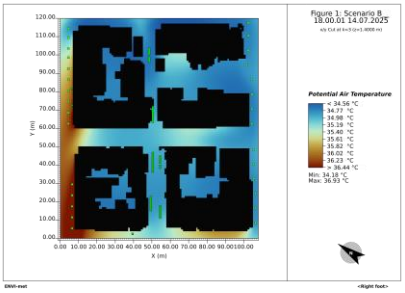
(c)



(d)



(e)



(f)

Εικόνα 17. Χωρική κατανομή του βιοκλιματικού δείκτη Potential Air Temperature: (a) 10:00, (b) 12:00, (c) 14:00, (d) 16:00, (e) 18:00, (f) 20:00, Σενάριο 2

3.2.2. Universal Thermal Climate Index (UTCI)

Στην Εικόνα 18 (a–f) παρουσιάζεται η χωρική κατανομή του δείκτη UTCI στο Σενάριο 2, στο ύψος του πεζού (k=3 και z=1.4), για τις ίδιες έξι ώρες της 14ης Ιουλίου 2025. Καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας οι τιμές κυμαίνονται συνολικά από περίπου 29,5°C έως 50,3°C, διατηρώντας το χαρακτηριστικά μεγάλο χωρικό εύρος του δείκτη που οφείλεται στην κυριαρχία της Μέσης Θερμοκρασίας Ακτινοβολίας. Η κατανομή ακολουθεί το ίδιο μοτίβο με την υφιστάμενη κατάσταση, ψυχρότερος ο δενδροφυτευμένος άξονας της Ιπποκράτους και οι σκιασμένοι ακάλυπτοι χώροι, θερμότερη η περιφέρεια και το ανατολικό όριο, ωστόσο η ενίσχυση της φυτοκάλυψης περιορίζει αισθητά την έκταση των δυσμενέστερων κατηγοριών θερμικού στρες.

Στις 10:00 (Εικόνα 18a) ο δείκτης κυμαίνεται από 29,5°C έως 47,0°C, παρουσιάζοντας τη μεγαλύτερη χωρική διαφοροποίηση της ημέρας. Στις σκιασμένες και δενδροφυτευμένες ζώνες ο δείκτης παραμένει στην κατηγορία του μέτριου θερμικού στρες. Οι ακραίες συνθήκες περιορίζονται στις εκτεθειμένες περιφερειακές ζώνες.

Στις 12:00 (Εικόνα 18b) οι τιμές αυξάνονται σε 31,7°C έως 47,2°C. Επικρατεί το πολύ ισχυρό θερμικό στρες.

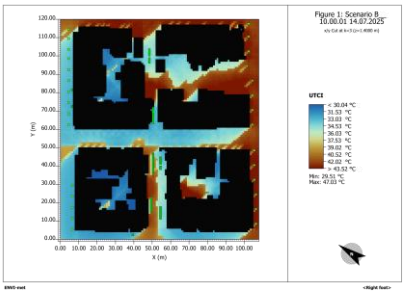
Στις 14:00 (Εικόνα 18c) οι τιμές κυμαίνονται από από 33,0°C έως 47,8°C. Οι ψυχρότερες ζώνες διατηρούνται στους πυκνά δενδροφυτευμένους χώρους.

Στις 16:00 (Εικόνα 18d) καταγράφεται η μέγιστη τιμή του δείκτη για το εικοσιτετράωρο (50,3°C). Όπως και στην υφιστάμενη κατάσταση, το πεδίο εμφανίζει τη μεγαλύτερη χωρική

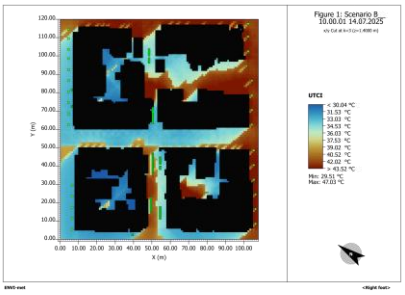
αντίθεση της ημέρας, με αρκετά σκιασμένα τμήματα να συνυπάρχουν με έντονα ηλιαζόμενες περιφερειακές ζώνες.

Στις 18:00 (Εικόνα 18e) ξεκινά η αποκλιμάκωση, με τιμές από 32,6°C έως 47,2°C. Το πεδίο μετατοπίζεται σε λιγότερο θερμή κατάσταση, η οποία με την αρχή απουσίας το ήλιου εκλείπει. Στις 20:00 (Εικόνα 18f) το θερμικό πεδίο ομογενοποιείται, με τιμές στο στενό εύρος 31,3°C–35,7°C.

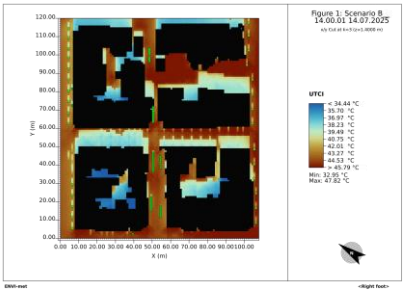
Οι ελάχιστες και μέγιστες τιμές του πεδίου, όπως παρουσιάστηκαν παραπάνω, αποτυπώνουν τη συνολική διακύμανση της θερμοκρασίας αέρα και του δείκτη UTCI, χωρίς ωστόσο να αποδίδουν τη χωρική κατανομή της επίδρασης της δενδροφύτευσης. Για την ποσοτική αποτίμηση της συμβολής του Σεναρίου 2 σε επίπεδο κελιού, υπολογίστηκε η διαφορά ΔUTCI = Σενάριο 1 − Σενάριο 2, όπως παρουσιάζεται αναλυτικά στην ενότητα 3.3.



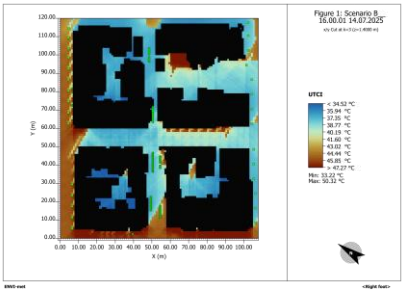
(a)



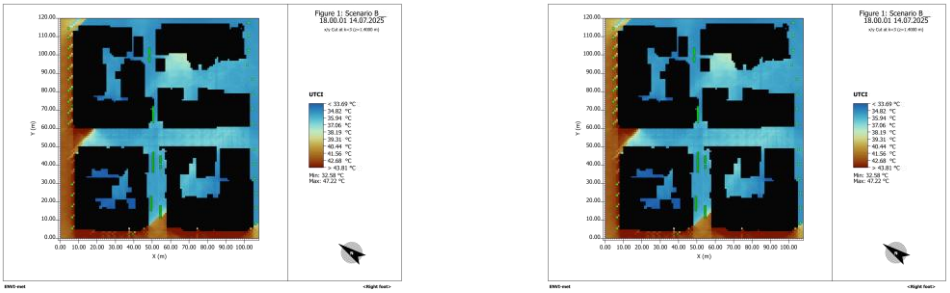
(b)



(c)



(d)



(e) (f)

Εικόνα 18. Χωρική κατανομή του βιοκλιματικού δείκτη UTCI: (a) 10:00, (b) 12:00, (c) 14:00, (d) 16:00, (e) 18:00, (f) 20:00, Σενάριο 2

3.3. Συγκριτική αξιολόγηση Σεναρίων 1 και 2

3.3.1. Συγκριτική Αξιολόγηση του δείκτη UTCI (ΔUTCI)

Για την ποσοτική αποτίμηση της συμβολής της ενισχυμένης φύτευσης, υπολογίστηκε η διαφορά του δείκτη UTCI μεταξύ των δύο σεναρίων σε ύψος πεζού (k=3), ως ΔUTCI = Σενάριο 1 − Σενάριο 2. Οι θετικές τιμές υποδηλώνουν μείωση του θερμικού στρες, δηλαδή ψύξη που αποδίδεται στην επιπλέον δενδροφύτευση, ενώ οι αρνητικές τιμές αντιστοιχούν σε τοπική αύξηση. Στην Εικόνα 19 παρουσιάζεται η χωρική κατανομή του ΔUTCI για τις αντιπροσωπευτικές ώρες της ημέρας, ενώ στον Πίνακα 6 συνοψίζονται οι αντίστοιχες μέσες και μέγιστες τιμές.

Η ψύξη δεν κατανέμεται ομοιόμορφα αλλά συγκεντρώνεται κατά μήκος των οδών όπου προστέθηκε βλάστηση, με τις εντονότερες τιμές να εμφανίζονται στον πεζόδρομο της Δερβενίων και στα δενδροφυτευμένα τμήματα της Ιπποκράτους. Η επιπλέον βλάστηση μειώνει ελαφρά τη θερμοκρασία του αέρα σε ολόκληρη την περιοχή, με αποτέλεσμα να ωφελούνται και θέσεις που δεν σκιάζονται άμεσα, ή σκιάζονται σε μικρότερο βαθμό. Παράλληλα, στις θέσεις που σκιάζονται από τα νέα δέντρα η ηλιακή ακτινοβολία περιορίζεται δραστικά, με αποτέλεσμα ο δείκτης UTCI να μειώνεται εκεί κατά περισσότερους από 3 °C

Στις 10:00 (Εικόνα 19a) η επίδραση είναι χωρικά ανομοιογενής. Η τοπική μείωση φτάνει τους 6,29 °C σε σημεία όπου η νέα βλάστηση σκιάζει αποτελεσματικά, ωστόσο εμφανίζονται και

εκτεταμένες ζώνες μικρής ή μηδενικής μεταβολής. Παρατηρείται ότι η γωνία του ηλίου είναι χαμηλή, λόγω της πρωινής ώρας, με αποτέλεσμα οι σκιές να είναι πλάγιες ως προς την δενδροφύτευση.

Στις 12:00 (Εικόνα 19b) η κατανομή ομογενοποιείται και η ψύξη ακολουθεί το δίκτυο των δενδροφυτευμένων οδών, με μέγιστη τοπική τιμή 4,34 °C. Ο ήλιος πλησιάζει την κατακόρυφη γωνία του, ενώ οι σκιές συγκεντρώνονται κάτω από τις κόμες των δένδρων και η επίδραση της φύτευσης φαίνεται εντονότερη.

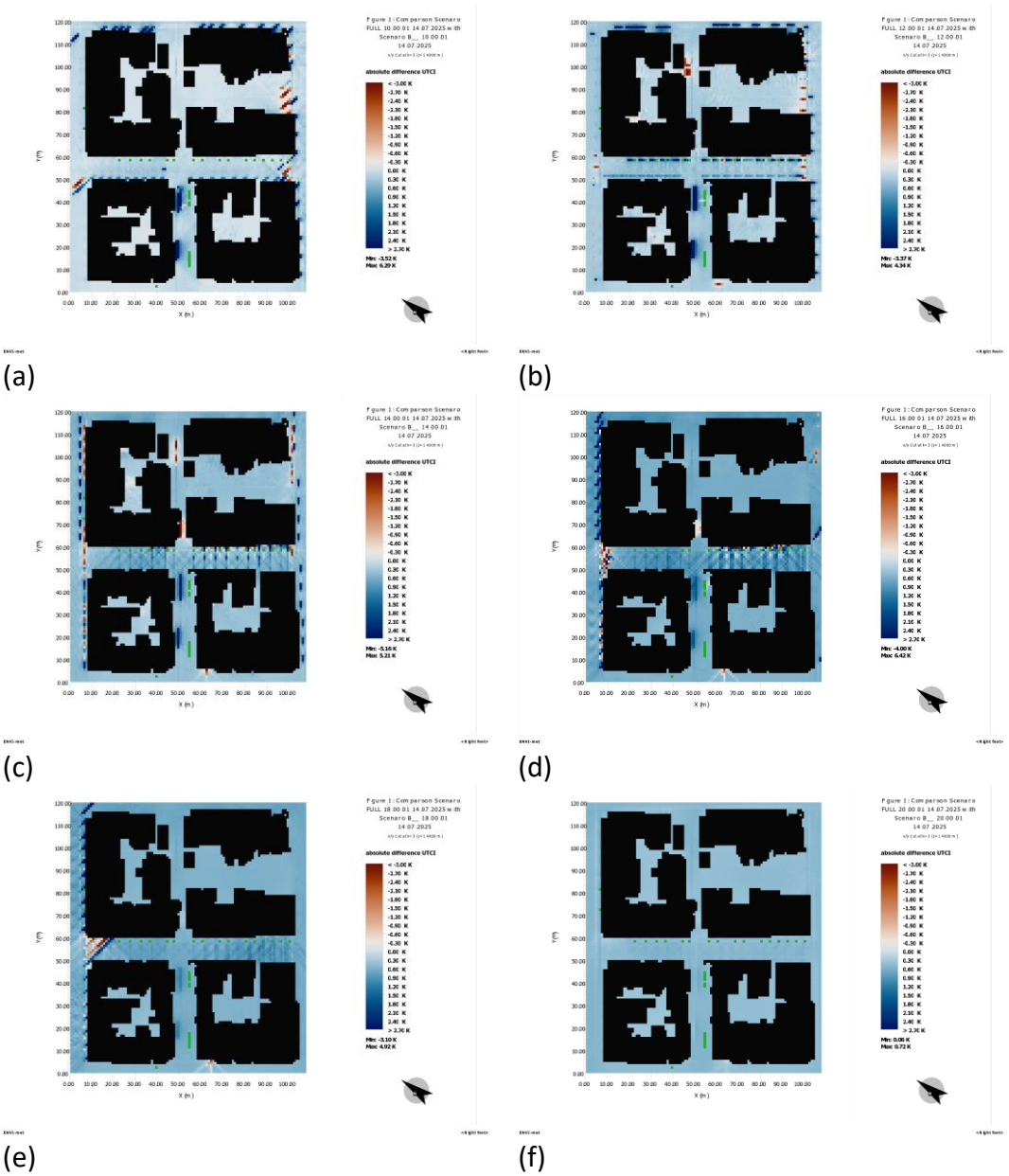
Στις 14:00 (Εικόνα 19c) η τοπική μείωση φτάνει τους 5,21 °C. Την ίδια ώρα καταγράφεται και η εντονότερη τοπική αύξηση της ημέρας (−5,16 °C), σε συγκεκριμένα σημεία όπου η αναδιάταξη της σκίασης λόγω των νέων δέντρων επιδρά η οποία περιορίζεται σε ελάχιστα μεμονωμένα κελιά. Η αύξηση αυτή δεν οφείλεται σε απώλεια σκίασης αλλά στην θέση της του ηλίου και την γωνία του την συγκεκριμένη ώρα.

Στις 16:00 (Εικόνα 19d) η επίδραση της φύτευσης αυξάνεται, τόσο σε ένταση όσο και σε έκταση. Η μέγιστη τοπική μείωση ανέρχεται σε 6,42 °C ενώ οι ζώνες έντονης ψύξης εκτείνονται πλέον κατά μήκος του συνόλου των δενδροφυτευμένων οδών. Ο ήλιος πλέον έχει χαμηλότερη θέση, άρα και γωνία, με αποτέλεσμα οι σκιές των δέντρων να επιμηκύνονται κατά τον άξονα των οδών και να διευρύνει την ωφελούμενη επιφάνεια. Η ώρα αυτή, που ταυτίζεται και με την κορύφωση της θερμικής επιβάρυνσης στο Σενάριο 1, αναδεικνύεται ως εκείνη με το μεγαλύτερο όφελος από την παρέμβαση.

Στις 18:00 (Εικόνα 19e) το όφελος παραμένει εκτεταμένο, με τοπικές μειώσεις έως 4,92 °C. Η επίδραση αποδίδεται πλέον όχι μόνο στην άμεση σκίαση αλλά και στη μικρότερη θερμότητα που έχουν αποθηκεύσει οι σκιασμένες επιφάνειες κατά τη διάρκεια της ημέρας.

Στις 20:00 (Εικόνα 19f) το πεδίο ομογενοποιείται πλήρως. Οι τιμές του ΔUTCI περιορίζονται σε πολύ στενό εύρος (0,06 έως 0,72 °C) και είναι θετικές σε ολόκληρη την περιοχή, χωρίς σημεία τοπικής αύξησης. Λόγω της απουσίας ηλιακής ακτινοβολίας, η διαφορά μεταξύ των σεναρίων δεν οφείλεται σε σκίαση αλλά στη μικρότερη θερμότητα που έχει συσσωρευτεί στις επιφάνειες κατά τη διάρκεια της ημέρας.

Οι αρνητικές τιμές που εμφανίζονται σε ορισμένα σημεία των χαρτών αντιστοιχούν σε τοπικά σημεία επιδείνωσης των συνθηκών με πιθανές αιτίες της μετατόπιση του πεδίου σκίασης, στην τοπική παρεμπόδιση της ροής του αέρα από τις πυκνότερες κόμες ή στην μείωση του συντελεστή θέασης ουρανού. Σημειώνεται ότι τα σημεία αυτά είναι χωρικά περιορισμένα και δεν αναιρούν το συνολικό όφελος της παρέμβασης.



Εικόνα 19. Χωρική κατανομή του βιοκλιματικού δείκτη DUTCI: (a) 10:00, (b) 12:00, (c) 14:00, (d) 16:00, (e) 18:00, (f) 20:00, Σενάριο 1 - Σενάριο 2

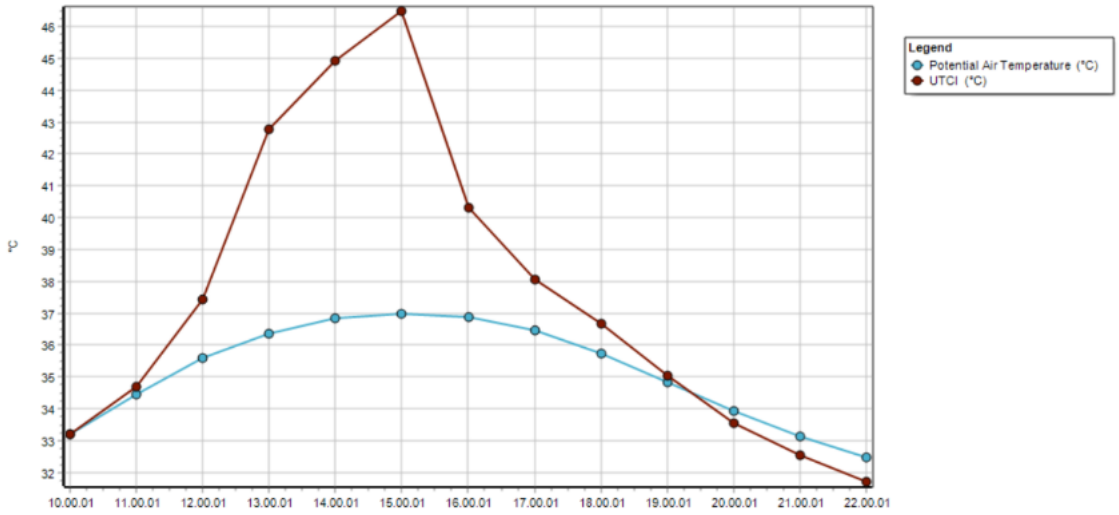
Ώρα	Ελάχιστη τιμή ΔUTCI	Μέγιστη τιμή ΔUTCI

10:00	-3,52	6,29
12:00	-3,3	4,34
14:00	-5,16	5,21
16:00	-4,00	6,42
18:00	-3,10	4,92
20:00	0,06	0,72

Πίνακας 9. Ελάχιστη και μέγιστη τιμή ΔUTCI ανά ώρα

3.3.2. Αξιολόγηση Κεντρικού Σημείου Αναφοράς

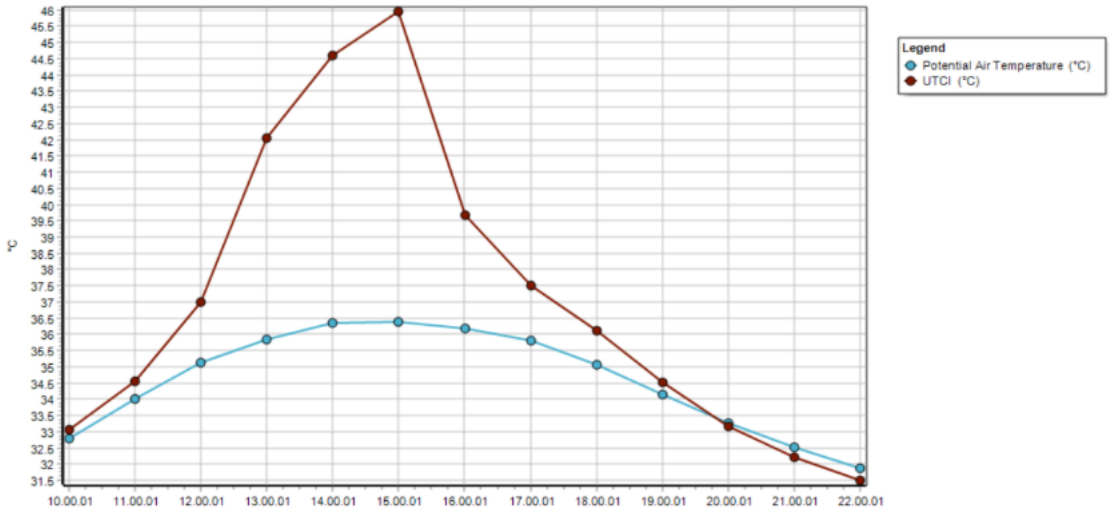
Για την παροχή ουδέτερης σημειακής αναφοράς, ανεξάρτητα από τα τοπικά φαινόμενα σκίασης μεμονωμένων δέντρων, εξετάστηκε επιπρόσθετα η χρονική εξέλιξη της Potential Air Temperature και του δείκτη UTCI σε ένα κεντρικό σημείο αναφοράς (I=54, J=60, k=3), το οποίο αντιστοιχεί στο γεωμετρικό κέντρο της περιοχής μελέτης, εκτός άμεσης γειτνίασης με συγκεκριμένη οδό. Στον Πίνακα 10 παρουσιάζονται οι τιμές Potential Air Temperature και UTCI στο εν λόγω σημείο, για τα δύο εξεταζόμενα σενάρια, καθώς και η υπολογιζόμενη διαφορά τους (ΔT, ΔUTCI) ανά ώρα. Οι εικόνες 20 και 21 αφορούν τις γραφικές και αριθμητικές μεταβολές για το Σενάριο 1, ενώ οι εικόνες 22 και 23 αντίστοιχα για το Σενάριο 2.



Εικόνα 20. Χρονική εξέλιξη του Potential Air Temperature και του UTCI στο σημείο αναφοράς (I=54, J=60), Σενάριο 1, Πηγή: Leonardo Map Explorer

Time /Variable	Date	Time	Potential Air Temperatur	UTCI (°C)
10.00.01 14.07.2025	14.07.2025	10.00.01	33.187	33.195
11.00.01 14.07.2025	14.07.2025	11.00.01	34.438	34.696
12.00.01 14.07.2025	14.07.2025	12.00.01	35.606	37.423
13.00.01 14.07.2025	14.07.2025	13.00.01	36.346	42.787
14.00.01 14.07.2025	14.07.2025	14.00.01	36.844	44.917
15.00.01 14.07.2025	14.07.2025	15.00.01	36.988	46.489
16.00.01 14.07.2025	14.07.2025	16.00.01	36.876	40.323
17.00.01 14.07.2025	14.07.2025	17.00.01	36.455	38.076
18.00.01 14.07.2025	14.07.2025	18.00.01	35.743	36.665
19.00.01 14.07.2025	14.07.2025	19.00.01	34.829	35.051
20.00.01 14.07.2025	14.07.2025	20.00.01	33.923	33.556
21.00.01 14.07.2025	14.07.2025	21.00.01	33.126	32.531
22.00.01 14.07.2025	14.07.2025	22.00.01	32.471	31.712

Εικόνα 21. Εξαγωγή τιμών Potential Air Temperature και UTCI στο σημείο (I=54, J=60), Σενάριο 1, Πηγή: Leonardo Map Explorer



Εικόνα 22. Χρονική εξέλιξη του Potential Air Temperature και του UTCI στο σημείο αναφοράς (I=54, J=60), Σενάριο 2, Πηγή: Leonardo Map Explo o 2

Time /Variable	Date	Time	Potential Air Temperatur	UTCI (°C)
10.00.01 14.07.2025	14.07.2025	10.00.01	32.788	33.08
11.00.01 14.07.2025	14.07.2025	11.00.01	34.013	34.557
12.00.01 14.07.2025	14.07.2025	12.00.01	35.151	36.984
13.00.01 14.07.2025	14.07.2025	13.00.01	35.832	42.064
14.00.01 14.07.2025	14.07.2025	14.00.01	36.355	44.611
15.00.01 14.07.2025	14.07.2025	15.00.01	36.403	45.951
16.00.01 14.07.2025	14.07.2025	16.00.01	36.197	39.689
17.00.01 14.07.2025	14.07.2025	17.00.01	35.797	37.504
18.00.01 14.07.2025	14.07.2025	18.00.01	35.062	36.104
19.00.01 14.07.2025	14.07.2025	19.00.01	34.14	34.54
20.00.01 14.07.2025	14.07.2025	20.00.01	33.263	33.163
21.00.01 14.07.2025	14.07.2025	21.00.01	32.52	32.214
22.00.01 14.07.2025	14.07.2025	22.00.01	31.881	31.506

Εικόνα 23. Εξαγωγή τιμών Potential Air Temperature και UTCI στο σημείο (I=54, J=60), Σενάριο 2, Πηγή: Leonardo Map Explorer

Παρατηρείται ότι, σε αντίθεση με ορισμένα σημεία επί συγκεκριμένων οδών, το κεντρικό σημείο αναφοράς εμφανίζει σταθερά θετικό ΔUTCI σε όλες τις εξεταζόμενες ώρες, με τιμές

που κυμαίνονται από 0,12°C (10:00) έως 0,63°C (16:00). Η διακύμανση αυτή είναι συνεπής, όχι έντονη, με τη μέση μείωση UTCI που καταγράφηκε στο σύνολο της περιοχής μελέτης στο 3.3.1., υποδεικνύοντας ότι το εν λόγω σημείο αντιπροσωπεύει την τυπική, μη ακραία, επίδραση της πρόσθετης δενδροφύτευσης.

4. ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

4.1. Ερμηνεία Αποτελεσμάτων

Συνοψίζοντας, η εργασία εξέτασε την ίδια γειτονιά, την ίδια ημέρα καύσωνα (14.07.2025) και τις ίδιες καιρικές συνθήκες, σε δύο εκδοχές: τη υφιστάμενη κατάσταση της (Σενάριο 1) και μια εκδοχή με ενισχυμένη φύτευση, (Σενάριο 2). Ο στόχος ήταν να διερευνηθεί η εμπειρία του χρήστη στην υφιστάμενη κατάσταση και στην περίπτωση ενίσχυσης της βλάστησης.

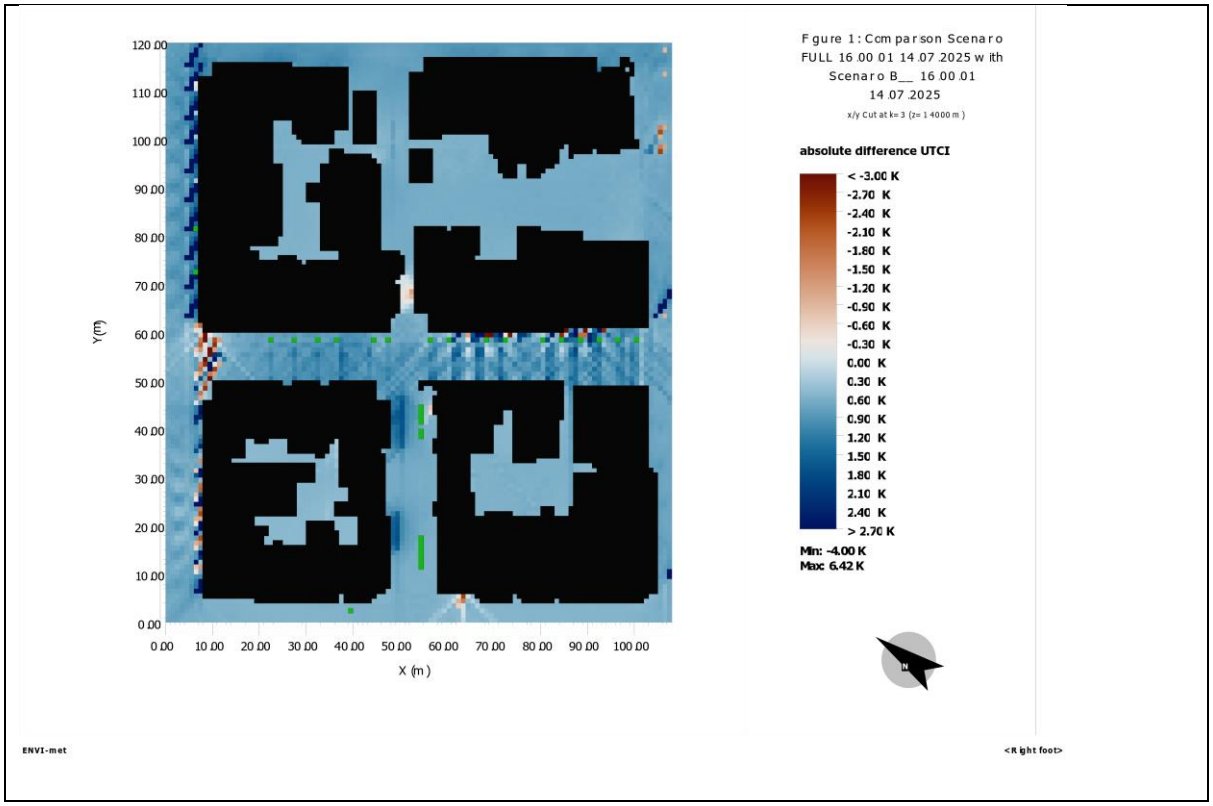
Σύμφωνα με τα παραπάνω, παρατηρήθηκε και επιβεβαιώθηκε η βελτίωση των συνθηκών της θερμικής άνεσης, κυρίως ανά σημεία. Στα σημεία όπου αναπτύχθηκε πράγματι σκίαση από την πρόσθετη βλάστηση, η τοπική μείωση του UTCI ξεπερνά συστηματικά τους 3°C, φτάνοντας έως 6,42°C στις 16:00. Η μείωση του δείκτη UTCI στο γεωμετρικό κέντρο μελέτης είναι σταθερή (~0,6°C). Η βιβλιογραφία επισημαίνει ότι η δενδροστοιχία δρα ταυτόχρονα ως μηχανισμός δροσισμού, κυρίως μέσω σκίασης και της εξατμισοδιαπνοής και ως πρόσθετο εμπόδιο στη ροή του ανέμου εντός του φαραγγιού, μειώνοντας περαιτέρω την ταχύτητά του και περιορίζοντας την απομάκρυνση θερμότητας μέσω συναγωγής.

Στην περίπτωση της παρούσας εργασίας, το φαινόμενο αυτό ενδέχεται να εξηγεί εν μέρει γιατί η ενισχυμένη φύτευση στη Δερβενίων, όπου ο λόγος H/W είναι ήδη υψηλός και ο αερισμός εγγενώς ασθενής, δεν απέδωσε αναλογικά μεγαλύτερο όφελος σε σχέση με τις πιο ανοιχτές οδούς. Παράλληλα τοποθετήθηκαν κυρίως παρτέρια με χαμηλές φυτεύσεις (θάμνοι) στην ψηφιοποίηση, ως υφίσταται. Καθώς ο αερισμός στα βαθιά φαράγγια υπολείπεται ήδη σημαντικά, η πρόσθετη μείωση της ταχύτητας του ανέμου λόγω της πυκνότερης βλάστησης περιορίζει το μερίδιο ψύξης που θα μπορούσε να αποδοθεί σε φυσική συναγωγή, αφήνοντας τη σκίαση ως σχεδόν αποκλειστικό μηχανισμό βελτίωσης. Αντίθετα, σε φαράγγια μετριότερου λόγου H/W, όπως η Ιπποκράτους, η αρχική δυνατότητα ανακυκλοφορίας αέρα παραμένει λειτουργική ακόμη και μετά την πύκνωση της βλάστησης, επιτρέποντας τη συνύπαρξη και των δύο μηχανισμών δροσισμού.

Η αποτελεσματικότητα των δενδροφυτεύσεων δεν αποτελεί ανεξάρτητη μεταβλητή, αλλά συνάρτηση της γεωμετρίας του αστικού φαραγγιού (λόγος H/W). (Agathangelidis et al. 2020)

Η αλληλεπίδραση ύψους, πυκνότητας και θέσης των δέντρων καθορίζει τη μικροκλιματική τους επίδραση, καθώς σε στενά φαράγγια μπορεί να εγκλωβίζεται θερμότητα.

Στην σύγκριση των Σεναριών 1 & 2, του δείκτη UTCI, φαίνεται η κορύφωση του οφέλους στις 16:00 η οποία συνδέεται τη χαμηλότερη γωνία του απογευματινού ηλιασμού και δε με την με την σκίαση των ηλιαζόμενων ζωνών. Υπό αυτές τις συνθήκες, η επιπλέον σκίαση από τα δέντρα αποδίδει τη μέγιστη ψύξη.



Εικόνα 24. Χωρική κατανομή του βιοκλιματικού δείκτη DUTCI: (d) 16:00, Σενάριο 1 - Σενάριο 2

Η τάξη μεγέθους της παρατηρούμενης ψύξης, καθώς και το φαινόμενο της νυχτερινής αντιστροφής, επιβεβαιώνονται και από τους Giangrande et al. (2025), οι οποίοι εξέτασαν την Piazzetta San Michele Arcangelo στο Lecce της Ιταλίας. Στην πόλη επικρατεί θερμό μεσογειακό κλίμα, στην ίδια κλιματική ζώνη με την Αθήνα. Χρησιμοποιώντας το μοντέλο ENVI-met, συνέκριναν δύο σενάρια τα οποία αφορούσαν την υφιστάμενη κατάσταση της πλατείας με δέντρα και ένα υποθετικό σενάριο πανομοιότυπο με το πρώτο αλλά χωρίς καμία βλάστηση. Δομικά είναι ανάλογο με τη σύγκριση Σεναρίου 1 και Σεναρίου 2 της παρούσας εργασίας, με αντεστραμμένη ωστόσο τη φορά της σύγκρισης. Βρήκαν μέση μείωση

θερμοκρασίας αέρα έως -0,52°C στις πιο θερμές ώρες (10:00–16:00) λόγω της παρουσίας δέντρων, με αντίστοιχη μείωση του δείκτη UTCI και του ποσοστού θερμικού στρες έως και 43% στις 10:00 και στις 16:00. Αντίθετα, τις νυχτερινές ώρες η παρουσία δέντρων περιόρισε την ακτινοβολιακή ψύξη, οδηγώντας σε ελαφρά αύξηση της θερμοκρασίας. Αυτό το φαινόμενο παρατηρήθηκε στην παρούσα εργασία στις αυλές και τα φυτεμένα τμήματα κατά τις βραδινές ώρες.

Αντίστοιχα, οι Tseliou et al. (2022) εξέτασαν την πλατεία Συντάγματος στο κέντρο της Αθήνας, έναν ανοιχτό χώρο χωρίς τη στενότητα και τους υψηλούς λόγους H/W που χαρακτηρίζουν τις οδούς της Νεάπολης Εξαρχείων. Η ανασκόπηση γίνεται σε κοντινή με την παρούσ ημέρα καύσωνα (15.10.2010), αξιολογώντας τους δείκτες PET και UTCI. Μεταξύ των σεναρίων που εξετάστηκαν περιλαμβάνονταν δύο σενάρια αμιγούς αύξησης της δενδροκάλυψης της πλατείας, συγκεκριμένα κατά 10% και 25% αντίστοιχα ως προς την υφιστάμενη κατάσταση.

Και στις δύο περιπτώσεις αμιγούς δενδροφύτευσης, η βελτίωση των δεικτών ήταν υπαρκτή αλλά όχι επαρκής ώστε να μεταβάλει τη θερμική κατηγορία αξιολόγησης, τόσο το PET όσο και το UTCI παρέμειναν στην ίδια κατηγορία θερμικού στρες με την υφιστάμενη κατάσταση. Αντίθετα, μόνο το σενάριο που συνδύαζε δενδροφύτευση με πρόσθετες παρεμβάσεις, όπου έγινε αύξηση επιφανειών χλωροτάπητα και νερού πέτυχε αλλαγή κατηγορίας και προσέγγισε τον στόχο βελτίωσης που είχαν θέσει οι ίδιοι οι συγγραφείς. Οι Tseliou et al. (2022) σχολιάζουν ρητά ότι η αμιγής προσθήκη δέντρων προκάλεσε μικρές μόνο μειώσεις στις τιμές των δεικτών κατά τη διάρκεια της ημέρας, χωρίς να επιτύχει βελτίωση της ημερήσιας κατηγορίας αξιολόγησής τους.

Το εύρημα αυτό ενισχύει την ερμηνεία της παρούσας εργασίας. Ακόμη και σε έναν ανοιχτό χώρο, όπου ο αέρας κινείται πιο ελεύθερα σε σχέση με ένα στενό φαράγγι, η προσθήκη δέντρων από μόνη της δεν επαρκούσε για να αλλάξει αισθητά τη θερμική αίσθηση. Αυτό δείχνει ότι ο περιορισμένος αντίκτυπος της δενδροφύτευσης που παρατηρήθηκε στην παρούσα εργασία δεν οφείλεται μόνο στη γεωμετρία του αστικού φαραγγιού. Αντανακλά γενικότερα, τα όρια που έχει η δενδροφύτευση όταν εφαρμόζεται αυτούσια, χωρίς άλλες συμπληρωματικές παρεμβάσεις αστικής ανάπλασης.

4.2. Περιορισμοί της Έρευνας

Η παρούσα εργασία απομόνωσε τη μεταβλητή της δενδροφύτευσης, διατηρώντας σταθερά όλα τα υπόλοιπα στοιχεία του αστικού ιστού στην υφιστάμενη κατάστασή τους, συμπεριλαμβανομένων των υλικών οδοστρώματος (άσφαλτος, κυβόλιθων κ.α.). Τα υλικά αυτά διατηρήθηκαν αμετάβλητα και στα δύο σενάρια, ώστε η καταγραφόμενη διαφορά να αποδίδεται αποκλειστικά στη βλάστηση.

Η επιλογή αυτή, αν και μεθοδολογικά απαραίτητη για την καθαρή αποτίμηση της δενδροφύτευσης, αφήνει εκτός εξέτασης ένα σημαντικό μέρος του διαθέσιμου δυναμικού μικροκλιματικής βελτίωσης. Τα υλικά υψηλότερης ανακλαστικότητας απορροφούν συστηματικά λιγότερη ηλιακή ακτινοβολία σε σχέση με σκουρόχρωμες επιφάνειες όπως η άσφαλτος, γεγονός που συμβάλλει στη μείωση της επιφανειακής θερμοκρασίας και αποτελεί συμπληρωματική στρατηγική μετριασμού της αστικής θερμικής νησίδας (ΑΘΝ) σε σχέση με τη δενδροφύτευση, η οποία ωστόσο παραμένει η πλέον αποτελεσματική μεμονωμένη παρέμβαση.

Ειδικά στην περιοχή μελέτης, όπου η Δερβενίων είναι ήδη διαμορφωμένη με κυβόλιθους και όχι με άσφαλτο, μια μελλοντική έρευνα θα μπορούσε να συγκρίνει το υφιστάμενο υλικό της με εναλλακτικά υψηλότερης ανακλαστικότητας, ενώ στις υπόλοιπες οδούς (Ιπποκράτους, Αραχώβης, Μαυρομιχάλη, Ερεσού) η άσφαλτος παραμένει το κυρίαρχο υλικό και συνεπώς το σημείο με το μεγαλύτερο αναξιοποίητο περιθώριο παρέμβασης. Ωστόσο, όπως επισημαίνεται και στη βιβλιογραφία, η επίδραση των ψυχρών υλικών περιορίζεται σημαντικά σε στενά, καθότι τα βαθιά φαράγγια παγιδεύουν μεγαλύτερο ποσοστό εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας λόγω των πολλαπλών ανακλάσεων και εκπομπών στις κατακόρυφες επιφάνειες των κτιρίων, αυξάνοντας την τοπική θερμοκρασία αέρα γεγονός που θα μπορούσε να εξηγήσει γιατί το όφελος μιας τέτοιας παρέμβασης αναμένεται μεγαλύτερο στις πλήρως εκτεθειμένες, ηλιαζόμενες οδούς και ζώνες της περιφέρειας (Ερεσού, Αραχώβης) παρά στα ήδη σκιασμένα, βαθιά φαράγγια (Δερβενίων).

Συνολικά, ένα σενάριο ολοκληρωμένης αστικής ανάπλασης που θα συνδύαζε την ενισχυμένη δενδροφύτευση με αντικατάσταση υλικών δαπέδου, θα μπορούσε ενδεχομένως να αποδώσει

αθροιστικά σε μεγαλύτερο όφελος από αυτό που καταγράφηκε στην παρούσα εργασία, ιδίως στις περιφερειακές, μη σκιασμένες οδούς όπου η δενδροφύτευση από μόνη της εμφάνισε τη μικρότερη επίδραση.

4.2. Προτάσεις για Μελλοντική Έρευνα

Με βάση τα ευρήματα και τους περιορισμούς που αναλύθηκαν παραπάνω, προκύπτουν αρκετές κατευθύνσεις για μελλοντική διερεύνηση.

Αρχικά, μια μελλοντική μελέτη θα μπορούσε να συνδυάσει την ενισχυμένη δενδροφύτευση με αντικατάσταση υλικών οδοστρώματος υψηλότερης ανακλαστικότητας, ιδίως στις πλήρως εκτεθειμένες περιφερειακές οδούς (Ερεσού, Αραχώβης) όπου, όπως προέκυψε στο Σενάριο 2, η βλάστηση από μόνη της είχε τη μικρότερη επίδραση. Ένα τέτοιο σενάριο ολοκληρωμένης αστικής ανάπλασης θα επέτρεπε την ποσοτική αποτίμηση του αθροιστικού οφέλους ψυχρών υλικών και φύτευσης. Αντίστοιχη συνεργιστική δράση παρατήρησαν και οι Tseliou et al. (2022) στην πλατεία Συντάγματος, όπου ο συνδυασμός στρατηγικών μετριασμού (δενδροφύτευση, νερό, χλωροτάπητας) απέδωσε σαφώς μεγαλύτερη βελτίωση της θερμικής αίσθησης από τη μεμονωμένη παρέμβαση δενδροφύτευσης.

Επίσης, κρίνεται σκόπιμη η διερεύνηση εναλλακτικής διάταξης και πυκνοτήτας δενδροφύτευσης, πέραν της απλής αύξησης του LAD που εξετάστηκε στην παρούσα εργασία. Το εύρημα ότι η αποτελεσματικότητα της φύτευσης στη Δερβενίων περιορίστηκε λόγω του ήδη υψηλού λόγου H/W συνάδει με αντίστοιχη παρατήρηση των Silva et al. (2025) σε δύο αστικά φαράγγια της Λισαβόνας και συγκεκριμένα στο φαράγγι με υψηλότερο H/W και περιορισμένο χώρο φύτευσης, τα δέντρα λειτούργησαν εν μέρει ως ανεμοφράκτης, μειώνοντας την αποτελεσματικότητα του μετριασμού σε σχέση με το πιο ανοιχτό φαράγγι. Αναφέρεται ότι τα δέντρα τοποθετήθηκαν μόνο εκεί που υπήρχε έντονη παρουσία του δείκτη UTCI., ενώ τονίζεται ότι η κατάλληλη απόσταση μεταξύ δέντρων και μεταξύ δέντρων και των κτιρίων αποτελεί κρίσιμη παράμετρο σχεδιασμού για την αποφυγή ανεπιθύμητου εμποδισμού του ανέμου.

Ακόμη, δεδομένου ότι η αποτελεσματικότητα της φύτευσης στην παρούσα εργασία βρέθηκε να εξαρτάται από τον λόγο H/W του φαραγγιού, μελλοντική έρευνα θα μπορούσε να εξετάσει συστηματικά την αλληλεπίδραση δενδροφύτευσης και γεωμετρίας σε φαράγγια διαφορετικού

βάθους. Οι Chatzidimitriou and Axarli (2017), εξετάζει 17 φαράγγια με λόγο H/W από 0,6 έως 3,3 και διαπιστώθηκε ότι τα βαθιά φαράγγια ήταν θερμικά πιο άνετα από τα πλατιά κατά το μεσημέρι και το απόγευμα, αποδίδοντας το εύρημα στην αυτόνομη σκίαση που παρέχει η ίδια η γεωμετρία. Το εύρημα αυτό ενισχύει την ερμηνεία που δόθηκε για τη Δερβενίων δηλαδή σε ένα ήδη σκιασμένο βαθύ φαράγγι και το πρόσθετο όφελος της δενδροφύτευσης περιορίζεται από τον ήδη ασθενή αερισμό, ενώ η γεωμετρία από μόνη της παρέχει σημαντικό μέρος της θερμικής προστασίας.

Επισημαίνεται ότι η παρούσα εργασία περιορίστηκε σε μία ημέρα καύσωνα. Θα ήταν χρήσιμη η επέκταση της προσομοίωσης σε περισσότερες ημέρες και εποχές, ώστε να αποτιμηθεί η ετήσια συμπεριφορά του μικροκλίματος, συμπεριλαμβανομένου του φαινομένου της νυχτερινής αντιστροφής που παρατηρήθηκε στις φυτεμένες ζώνες.

Τέλος, τονίζεται ότι η επικύρωση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης με επιτόπιες μετρήσεις πεδίου (πχ φορητό μετεωρολογικό σταθμό) θα ενίσχυε την αξιοπιστία των ευρημάτων, κατά το πρότυπο άλλων μελετών στην περιοχή της Αθήνας.

Βιβλιογραφία

Agathangelidis, I., Cartalis, C., & Santamouris, M. (2020). Urban morphological controls on surface thermal dynamics: A comparative assessment of major European cities with a focus on Athens, Greece. Climate, 8(11), 131. https://doi.org/10.3390/cli8110131

Akbari, H. (2002). Shade trees reduce building energy use and CO2 emissions from power plants. Environmental Pollution, 116(Suppl. 1), S119–S126.

Ali-Toudert, F., & Mayer, H. (2006). Numerical study on the effects of aspect ratio and orientation of an urban street canyon on outdoor thermal comfort in hot and dry climate. Building and Environment, 41(2), 94–108.

ASHRAE. (2020). ANSI/ASHRAE Standard 55-2020: Thermal environmental conditions for human occupancy. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.

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.

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.

Changnon, S. A. (2003). Shifting economic impacts from weather extremes in the United States: A result of societal changes, not climate change? Climatic Change, 63(1–2), 91–96.

Chatzidimitriou, A., & Axarli, K. (2017). Street canyon geometry effects on microclimate and comfort; a case study in Thessaloniki. Procedia Environmental Sciences, 38, 643–650. https://doi.org/10.1016/j.proenv.2017.03.144

Coutts, A. M., White, E. C., Tapper, N. J., Beringer, J., & Livesley, S. J. (2016). Temperature and human thermal comfort effects of street trees across three contrasting street canyon environments. Theoretical and Applied Climatology, 124(1–2), 55–68.

Cramer, W., Guiot, J., Fader, M., Garrabou, J., Gattuso, J.-P., Iglesias, A., Lange, M. A., Lionello, P., Llasat, M. C., Paz, S., Peñuelas, J., Snoussi, M., Toreti, A., Tsimplis, M. N., &

Xoplaki, E. (2018). Climate change and interconnected risks to sustainable development in the Mediterranean. Nature Climate Change, 8(11), 972–980. https://doi.org/10.1038/s41558-018-0299-2

Easterling, D. R., Meehl, G. A., Parmesan, C., Changnon, S. A., Karl, T. R., & Mearns, L. O. (2000). Climate extremes: Observations, modeling, and impacts. Science, 289(5487), 2068–2074. https://doi.org/10.1126/science.289.5487.2068

European Environment Agency. (2024). Climate change indicators – temperature. https://www.eea.europa.eu

Feng, L., Shuai, L., Zhou, Y., Zhang, X., & Sun, J. (2024). Improving the green space arrangement in residential areas from the perspective of tree leaf temperature utilizing scenario simulation in ENVI-met. Science of the Total Environment, 918, 170650. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.170650

Founda, D., & Giannakopoulos, C. (2009). The exceptionally hot summer of 2007 in Athens, Greece—Synoptic climatology and impacts. Atmospheric Environment, 43(22–23), 3659–3670. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2009.04.037

Giangrande, F., Pappaccogli, G., Cesari, R., Esposito, A., Emmanuel, R., Ippolito, F., & Buccolieri, R. (2025). Modelling the outdoor thermal benefit of urban trees: A case study in Lecce, Italy. Environmental and Earth Science Proceedings, 34, 8. https://doi.org/10.3390/eesp2025034008

Gioia, C., Noro, M., & Cecere, C. (2021). Urban microclimate and human thermal stress: A review of impacts and mitigation strategies. Urban Climate, 36, 100789. https://doi.org/10.1016/j.uclim.2021.100789

Hao, T., Zhao, Q., & Huang, J. (2023). Optimization of tree locations to reduce human heat stress in an urban park. Urban Forestry & Urban Greening, 86, 128017. https://doi.org/10.1016/j.ufug.2023.128017

Havenith, G., & Fiala, D. (2015). Thermal indices and thermophysiological modeling for heat stress. Comprehensive Physiology, 6(1), 255–302.

Höppe, P. (1999). The physiological equivalent temperature – a universal index for the biometeorological assessment of the thermal environment. International Journal of Biometeorology, 43, 71–75.

Huttner, S., & Bruse, M. (2009). Numerical modelling of the urban climate – A preview on ENVI-met 4.0. In Proceedings of the Seventh International Conference on Urban Climate (ICUC-7), Yokohama, Japan.

Intergovernmental Panel on Climate Change. (2001). Climate change 2001: The scientific basis. Cambridge University Press.

Intergovernmental Panel on Climate Change. (2007). Climate change 2007: The physical science basis. Cambridge University Press.

Jendritzky, G., de Dear, R., & Havenith, G. (2012). UTCI—Why another thermal index? International Journal of Biometeorology, 56(3), 421–428.

Ko, Y. (2018). Trees and vegetation for residential energy conservation: A critical review for evidence-based urban greening in North America. Urban Forestry & Urban Greening, 34, 318–335. https://doi.org/10.1016/j.ufug.2018.07.021

Lai, D., Liu, W., Gan, T., Liu, K., & Chen, Q. (2019). A review of mitigating strategies to improve the thermal environment and thermal comfort in urban outdoor spaces. Science of the Total Environment, 661, 337–353.

Lizana, J., López-Cabeza, V. P., Renaldi, R., Diz-Mellado, E., Rivera-Gómez, C., & Galán-Marín, C. (2022). Integrating courtyard microclimate in building performance to mitigate extreme urban heat impacts. Sustainable Cities and Society, 78, 103590. https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103590

Matzarakis, A., & Amelung, B. (2008). Physiological equivalent temperature as indicator for impacts of climate change on thermal comfort of humans. In M. C. Thomson, R. Garcia-Herrera, & M. Beniston (Eds.), Seasonal forecasts, climatic change and human health (Advances in Global Change Research, Vol. 30, pp. 161–172). Springer.

Mayer, H. (1993). Urban bioclimatology. Experientia, 49(11), 957–963. https://doi.org/10.1007/BF02125642

Mochida, A., Tabata, Y., Iwata, T., & Yoshino, H. (2008). Examining tree canopy models for CFD prediction of wind environment at pedestrian level. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 96(10–11), 1667–1677.

Oke, T. R. (1982). The energetic basis of the urban heat island. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 108(455), 1–24. https://doi.org/10.1002/qj.49710845502

Oke, T. R. (1987). Boundary layer climates (2nd ed.). Routledge.

Oke, T. R., Mills, G., Christen, A., & Voogt, J. A. (2017). Urban climates. Cambridge University Press.

Pecelj, M., Matzarakis, A., Vujadinović, M., Radovanović, M., Vagić, N., Đurić, D., & Cvetkovic, M. (2021). Temporal analysis of urban-suburban PET, mPET and UTCI indices in Belgrade (Serbia). Atmosphere, 12(7), 916.

Santamouris, M. (2020). Recent progress on urban overheating and heat island research. Integrated assessment of the energy, environmental, vulnerability and health impact. Synergies with the global climate change. Energy and Buildings, 207, 109482.

Shashua-Bar, L., Tsiros, I., & Hoffman, M. (2012). Passive cooling design options to ameliorate thermal comfort in urban streets of a Mediterranean climate (Athens) under hot summer conditions. Building and Environment, 57, 110–119.

Silva, T., Matias, M., Girotti, C., Vasconcelos, J., & Lopes, A. (2025). Heat stress mitigation by exploring UTCI hotspots and enhancing thermal comfort through street trees. Theoretical and Applied Climatology, 156, 162. https://doi.org/10.1007/s00704-025-05400-7

Tseliou, A., Tsiros, I. X., Nikolopoulou, M., & Papadopoulos, G. (2016). Outdoor thermal sensation in a Mediterranean climate (Athens): The effect of selected microclimatic parameters. Architectural Science Review, 59(3), 190–202.

Tseliou, A., Koletsis, I., Pantavou, K., Thoma, E., Lykoudis, S., & Tsiros, I. X. (2022). Evaluating the effects of different mitigation strategies on the warm thermal environment of an urban square in Athens, Greece. Urban Climate, 44, 101217. https://doi.org/10.1016/j.uclim.2022.101217

Tsiros, I. X. (2010). Assessment and energy implications of street canyon microclimates and human thermal comfort in outdoor space over rural, urban and semi-urban terrain for a city of southern Europe. Renewable Energy, 35(8), 1866–1869.

Tsoka, S., Tsikaloudaki, A., & Theodosiou, T. (2020). 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

VijayaVenkataraman, S., Iniyan, S., & Goic, R. (2012). A review of climate change, mitigation and adaptation. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 16(1), 878–897. https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.09.009

Υπέθυνη Δήλωση Συγγραφεά:

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 πνευματικά δικαιώματα τρίτων και δεν είναι προϊόν μερικής ή ολικής αντιγραφής, οι πηγές δε που χρησιμοποιήθηκαν περιορίζονται στις βιβλιογραφικές αναφορές και μόνον.