



**ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΚΡΗΤΗΣ**

**ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ**

**ΣΧΟΛΗ ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ  
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ**

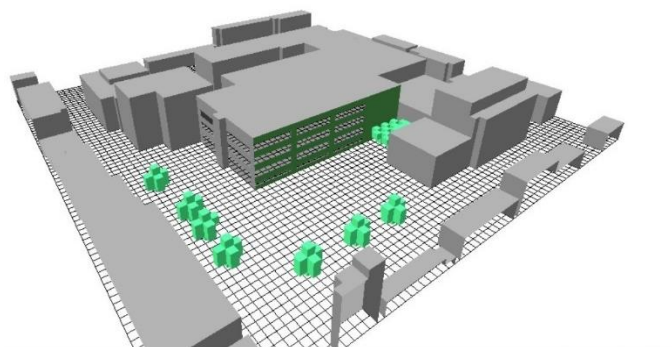
**Κατεύθυνση: Μηχανικών Περιβάλλοντος**

**ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΟΥ ΡΟΛΟΥ ΤΗΣ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΗΣ ΦΥΤΕΥΣΗΣ ΣΤΗ ΜΕΤΡΙΑΣΗ ΤΟΥ  
ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ ΤΗΣ ΑΣΤΙΚΗΣ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΝΗΣΙΔΑΣ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΗΣ

ΚΑΛΟΓΗΡΟΥ ΕΛΕΥΘΕΡΙΑΣ ΜΑΡΙΑΣ



ΧΑΝΙΑ , ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ 2025

«Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για μη κερδοσκοπικό σκοπό, εκπαιδευτικού ή ερευνητικού χαρακτήρα, με την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για άλλη χρήση θα πρέπει να απευθύνονται προς το συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Πολυτεχνείου Κρήτης».



**ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΚΡΗΤΗΣ**

**ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ**

**ΣΧΟΛΗ ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ  
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ**

**Κατεύθυνση: Μηχανικών Περιβάλλοντος**

**ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΟΥ ΡΟΛΟΥ ΤΗΣ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΗΣ ΦΥΤΕΥΣΗΣ ΣΤΗ ΜΕΤΡΙΑΣΗ ΤΟΥ  
ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ ΤΗΣ ΑΣΤΙΚΗΣ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΝΗΣΙΔΑΣ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΗΣ

ΚΑΛΟΓΗΡΟΥ ΕΛΕΥΘΕΡΙΑΣ ΜΑΡΙΑΣ

Τριμελής Επιτροπή:

Κολοκοτσά Διονυσία (επιβλέπουσα)  
Τσούτσος Θεοχάρης  
Γλυτσός Θεόδωρος

## Ευχαριστίες

Θα ήθελα να εκφράσω τις εγκάρδιες ευχαριστίες μου στην επιβλέπουσα καθηγήτριά μου, κα Κολοκοτσά Διονυσία, για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγησή της καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας. Η βαθιά γνώση της στο αντικείμενο και οι σημαντικές υποδείξεις της αποτελούν ακρογωνιαίους λίθους στη διαμόρφωση και ολοκλήρωση αυτής της εργασίας.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Θεόδωρο Γλυτσό και τον κ. Θεοχάρη Τσούτσο, για τον πολύτιμο χρόνο που αφιέρωσαν για τη διαδικασία αξιολόγησης της παρούσας μελέτης, ως μέλη της τριμελούς εξεταστικής επιτροπής.

Ένα μεγάλο ευχαριστώ στη Δρ. Μαυριγιαννάκη Αγγελική για την αμέριστη βοήθεια και διαθεσιμότητα της σε οτιδήποτε χρειαζόμουν σε όλα τα στάδια συγγραφής της παρούσας εργασίας. Η συμβολή της ήταν πολύτιμη και καθοριστική. Δε θα μπορούσα να μην ευχαριστήσω θερμά και τον Δρ. Νίκο Καμπέλη, για την ουσιαστική και άμεση βοήθειά του.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια και τους φίλους μου για τη στήριξη και συμπαράσταση που μου παρείχαν όλα αυτά τα χρόνια των σπουδών μου. Περισσότερο απ' όλους θα ήθελα να ευχαριστήσω τον αγαπητό μου αδερφό, Νικόλαο Καλογήρου. Η συνεχής του ενθάρρυνση και η απεριόριστη υποστήριξή του αποτέλεσαν καθοριστικούς παράγοντες στην ακαδημαϊκή μου πορεία.

## Περίληψη

Οι σύγχρονες μεγαλουπόλεις, αν και αποτελούν κέντρα ζωής και πολιτισμού, συχνά μετατρέπονται σε «θερμικές παγίδες» που επιβαρύνουν την καθημερινότητα των κατοίκων τους. Στην προσπάθεια να δημιουργηθούν πιο βιώσιμα αστικά περιβάλλοντα, οι πράσινοι τοίχοι προτείνονται ως μια απλή, αλλά ουσιαστική λύση που φέρνει τη φύση εκεί όπου λείπει περισσότερο. Η παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζει τον ρόλο της κατακόρυφης φύτευσης στη μείωση του φαινομένου της Αστικής Θερμικής Νησίδας (UHI), μέσω μελέτης περίπτωσης σε κτίριο που χρησιμοποιείται ως Parking στο κέντρο των Χανίων. Σκοπός της είναι η διερεύνηση της επίδρασης των πράσινων τοίχων στο αστικό μικρόκλιμα. Πραγματοποιείται αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας δύο τύπων πράσινων τοίχων (με υπόστρωμα και χωρίς υπόστρωμα) ως προς την επίδρασή τους στη θερμοκρασία αέρα, στη θερμοκρασία επιφάνειας και σε δείκτες θερμικής άνεσης. Για την προσομοίωση του αστικού μικροκλίματος χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό ENVI-met. Δημιουργήθηκαν τρεις προσομοιώσεις της αστικής περιοχής όπου βρίσκεται το υπό μελέτη κτίριο: η αρχική κατάσταση της περιοχής χωρίς πράσινο τοίχο και στη συνέχεια 2 παραλλαγές. Στην πρώτη παραλλαγή τοποθετήθηκε στο υπό μελέτη κτίριο πράσινος τοίχος με υπόστρωμα, ενώ στη δεύτερη πράσινος τοίχος χωρίς υπόστρωμα. Η διαδικασία της προσομοίωσης περιλάμβανε τον σχεδιασμό των μοντέλων της περιοχής, τη συλλογή και ενσωμάτωση μετεωρολογικών δεδομένων και, στη συνέχεια, την εξαγωγή των αποτελεσμάτων. Για την οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων χρησιμοποιήθηκε η εφαρμογή *Leonardo* του ENVI-met, μέσω της οποίας δημιουργήθηκαν χάρτες που αποτύπωσαν τις μεταβολές θερμοκρασίας και ακτινοβολίας. Παράλληλα, με την εφαρμογή *Bio-met*, υπολογίστηκαν βιομετεωρολογικοί δείκτες θερμικής άνεσης (PET, PMV/PPD, SET, UTCI) για διαφορετικές δημογραφικές ομάδες. Τα ευρήματα έδειξαν ότι η χρήση πράσινων τοίχων μειώνει σημαντικά τη θερμοκρασία του αέρα και των επιφανειών πάνω και κοντά στον τοίχο, με την παραλλαγή με υπόστρωμα να αποδίδει καλύτερα, ιδιαίτερα στις ώρες αιχμής της θερμοκρασίας. Και στις 2 παραλλαγές οι δείκτες θερμικής άνεσης παρουσιάζουν βελτίωση, ιδιαίτερα στις ευάλωτες δημογραφικές ομάδες (ηλικιωμένοι, παιδιά), συμβάλλοντας στη δημιουργία πιο ευχάριστων και βιώσιμων αστικών περιβαλλόντων. Η εργασία συμβάλλει στην κατανόηση του τρόπου με τον οποίο οι πράσινες υποδομές μπορούν να αντιμετωπίσουν το φαινόμενο UHI και να προσφέρουν πρακτικές λύσεις για τη βελτίωση της ποιότητας ζωής στις πόλεις.

**Λέξεις-κλειδιά:** Αστική Θερμική Νησίδα, αστικό μικρόκλιμα, Θερμικό στρες, κατακόρυφη φύτευση, πράσινοι τοίχοι, ENVI-met, θερμική άνεση, ανθεκτικότητα, βιώσιμες πόλεις

## **Abstract**

Modern cities, although centres of life and culture, often become "heat traps" that burden the daily lives of their citizens. In an effort to create more sustainable urban environments, green walls are proposed as a simple yet essential solution that brings nature to where it is most lacking. This thesis examines the role of green facades in reducing the Urban Heat Island (UHI) phenomenon, through a case study of a building used as a parking lot in the centre of Chania, Crete. The aim is to investigate the effect of green walls on the urban microclimate. An evaluation of the effectiveness of two types of green walls (with and without substrate) is carried out in terms of their effect on air temperature, surface temperature and thermal comfort indicators. For the simulation of the urban microclimate, ENVI-met software was used. Three simulations were created, regarding the urban area where the understudy building is located: the initial situation of the area without a green wall and then 2 variations. In the first variation a green wall with substrate was placed on the building, while in the second variation a green wall without substrate was placed. The simulation process included the design of the area models, the collection and integration of meteorological data and then the extraction of the results. The Leonardo application of ENVI-met was used to visualize the results, through which maps were created that captured temperature and radiation changes. In parallel, the Bio-met application was used to calculate biometeorological thermal comfort indicators (PET, PMV/PPD, SET, UTCI), for different demographic groups. The findings showed that the use of green walls significantly reduces air and surface temperatures on and adjacent to the wall, with the variation with substrate performing better, particularly during peak heat hours. In both variations thermal comfort indicators showed improvements, particularly for vulnerable demographic groups (elderly, children), contributing to the creation of more pleasant and sustainable urban environments. This thesis contributes to the understanding of how green infrastructure can address the UHI phenomenon and offer practical solutions to improve the quality of life in cities.

**Keywords:** Urban Heat Island, urban microclimate, heat stress, vertical planting, green walls, ENVI-met, thermal comfort, resilience, sustainable cities

## Περιεχόμενα

Ευχαριστίες .....	3
Περίληψη .....	4
Abstract .....	5
Κατάλογος Εικόνων .....	8
Κατάλογος Πινάκων .....	9
Κατάλογος Διαγραμμάτων .....	10
Στόχοι της εργασίας .....	11
1 Θεωρητικό υπόβαθρο .....	12
1.1 Αστική Θερμική Νησίδα (UHI).....	12
1.2 Ο ρόλος των πράσινων υποδομών στις πόλεις .....	12
1.3 Κατακόρυφη φύτευση .....	13
1.3.1 Τεχνικές κατακόρυφης φύτευσης.....	14
1.4 Θερμική Άνεση .....	18
1.4.1 Δείκτες θερμικής άνεσης .....	19
2 Μεθοδολογία .....	25
2.1 Περιοχή μελέτης και Κλίμα .....	26
2.2 Παρουσίαση του λογισμικού ENVI-met.....	29
2.2.1 Γενικά στοιχεία για το ENVI-met Headquarter 5.5.1 .....	29
2.2.2 Δομή του μοντέλου ENVI-met.....	31
2.2.3 Υπολογισμός βιομετεωρολογικών δεικτών μέσω του Bio-met .....	33
2.3 Σχεδιασμός και κατασκευή .....	37
2.3.1 Μοντελοποίηση της περιοχής στο λογισμικό ENVI-met. ....	37
2.4 Έναρξη της προσομοίωσης και ανάπτυξη παραλλαγών.....	42
2.4.1 Παραλλαγές.....	43
2.5 Επεξεργασία αποτελεσμάτων .....	46
3 Αποτελέσματα .....	48
3.1 Θερμοκρασία .....	49
3.1.1 Θερμοκρασία Αέρα .....	49
3.1.2 Θερμοκρασία Επιφάνειας Τοίχου .....	54
3.2 Ακτινοβολία.....	55
3.2.1 Ανακλώμενη ακτινοβολία βραχέων κυμάτων τοίχου .....	55
3.2.2. Ακτινοβολία μεγάλου μήκους κύματος που εκπέμπεται από την επιφάνεια του τοίχου .....	57

3.3 Δείκτες Θερμικής Άνεσης .....	58
3.3.1 Δείκτης PET.....	58
3.3.2 Δείκτες PMV/PPD .....	61
3.3.3 Δείκτης UTCI .....	63
3.3.4 Δείκτης SET.....	66
3.4 Ανακεφαλαίωση των αποτελεσμάτων και σύγκριση .....	68
4 Συμπεράσματα .....	69
5 Μελλοντικές Προοπτικές .....	70
Βιβλιογραφία .....	71
Βιβλιογραφία Διαδικτύου .....	74



## Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1 Ταξινόμηση πράσινων τοίχων ανάλογα με τα κατασκευαστικά τους χαρακτηριστικά (Manso & Castro-Gomes, 2015) .....	14
Εικόνα 2 : Άμεσος Πράσινος Τοίχος-Αναρριχώμενος Κισσός (Πηγή: <a href="http://www.thezhush.com">www.thezhush.com</a> ) .....	15
Εικόνα 3 Παράδειγμα έμμεσης πράσινης κάλυψης , Jakob Factory (Πηγή <a href="https://urbannext.net/">https://urbannext.net/</a> ) .	16
Εικόνα 4 Παράδειγμα Αρθρωτού Ζωντανού Τοίχου , Huntsville Alabama .....	17
(Πηγή : <a href="https://www.greenroofs.com/">https://www.greenroofs.com/</a> ) .....	17
Εικόνα 5 Πράσινος τοίχος , Sihlcity Ζυρίχη (Πηγή: <a href="https://www.greenroofs.com/">https://www.greenroofs.com/</a> ) .....	18
Εικόνα 6 Σχέση μεταξύ του δείκτη PMV και της Θερμικής Άνεσης (Jang κ.α. 2007) .....	22
Εικόνα 7 Γραφική Παράσταση του δείκτη PMV σε σχέση με το δείκτη PPD (Πηγή: εργαστηριακή άσκηση) .....	22
Εικόνα 8 Τοίχος του Πάρκινγκ όπου θα τοποθετηθεί η Πράσινη Πρόσοψη στην προσομοίωση (Πηγή: <a href="https://kydonparking.gr/">https://kydonparking.gr/</a> ) .....	26
Εικόνα 9 Κάτοψη της γειτονιάς που μοντελοποιήθηκε, το μεγάλο κτίριο στη μέση πρόκειται για το υπό μελέτη κτίριο (Πηγή: Google earth) .....	27
Εικόνα 10 Βασική διάταξη μοντέλου ENVi-met [Πηγή: <a href="http://www.envi-met.com">www.envi-met.com</a> ].....	31
Εικόνα 11 Εφαρμογές του ENVi-met [Screenshot από <a href="http://www.envi-met.com">www.envi-met.com</a> ].....	32
Εικόνα 12 Βοηθητικές εφαρμογές του ENVi-met [Screenshot από <a href="http://www.envi-met.com">www.envi-met.com</a> ].....	33
Εικόνα 13 Περιβάλλον Bio-met (Πηγή: προσωπική εργασία) .....	34
Εικόνα 14 Φόντο για την μοντελοποίηση (Πηγή: Προσωπικό Αρχείο).....	38
Εικόνα 15 Φωτογραφία επί της οδού Περίδου (Πηγή: Προσωπικό Αρχείο) .....	38
Εικόνα 16 Διαστάσεις μοντέλου (Πηγή: Προσωπικό Αρχείο).....	39
Εικόνα 17 (Πηγή: προσωπικό αρχείο).....	40
Εικόνα 18 Τρισδιάστατη μορφή του ολοκληρωμένου μοντέλου (Πηγή προσωπική εργασία) .....	41
Εικόνα 19 Προσθήκη ανοιγμάτων (Πηγή: προσωπική εργασία).....	41
Εικόνα 20 Μετεωρολογικά δεδομένα στο ENVIguide (Πηγή: προσωπική εργασία).....	42
Εικόνα 21 Πράσινη πρόσοψη με υπόστρωμα (Πηγή: προσωπική εργασία) .....	44
Εικόνα 22 Πράσινη πρόσοψη χωρίς υπόστρωμα (Πηγή: προσωπική εργασία).....	44
Εικόνα 23 Μοντελοποίηση Πράσινου Τοίχου (Πηγή: προσωπική εργασία) .....	46
Εικόνα 24 Περιβάλλον Leonardo (Πηγή: προσωπική εργασία) .....	47
Εικόνα 25 Επιλογή θέσης επιπέδου προβολής (Πηγή: Προσωπική εργασία).....	48
Εικόνα 26 Δυνητική Θερμοκρασία αέρα στις 2.00 μ.μ. στην αρχική γειτονιά.....	49
Εικόνα 27 Δυνητική Θερμοκρασία αέρα στις 2.00 μ.μ. στην Παραλλαγή 1 .....	50
Εικόνα 28 Δυνητική Θερμοκρασία αέρα στις 2.00 μ.μ. στην Παραλλαγή 2 .....	50
Εικόνα 29 Δυνητική Θερμοκρασία αέρα και θερμοκρασία αέρα μπροστά στα κτίρια στην αρχική γειτονιά στις 2.00 μ.μ. ....	51
Εικόνα 30 Δυνητική Θερμοκρασία αέρα και θερμοκρασία αέρα μπροστά στα κτίρια στην Παραλλαγή 1 στις 2.00 μ.μ. ....	51
Εικόνα 31 Δυνητική Θερμοκρασία αέρα και θερμοκρασία αέρα μπροστά στα κτίρια στην Παραλλαγή 2 στις 2.00 μ.μ. ....	52

## Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1 Εύρος των θερμικών δεικτών μέσης προβλεπόμενης ψήφου (PMV) και φυσιολογικής ισοδύναμης θερμοκρασίας (PET) για διαφορετικούς βαθμούς θερμικής αντίληψης και φυσιολογικής έντασης αντίστοιχα, με σταθερό μεταβολισμό 80 W, και αντίσταση ένδυσης 0,9 clo. (Matzarakis et al., 1999) .....	23
Πίνακας 2 Κύρια χαρακτηριστικά των πιο συχνά χρησιμοποιούμενων δεικτών σε μελέτες θερμικής αντίληψης εξωτερικών χώρων.(Potchter et al., 2018).....	24
Πίνακας 3 Μετεωρολογικά δεδομένα Ιουνίου 2023 [Πηγή <a href="http://www.meteo.gr">www.meteo.gr</a> ] .....	28
Πίνακας 4 Κλιματικά Δεδομένα περιόδου 1958-2010 για Σούδα Χανίων [Πηγή ΕΜΥ] .....	28
Πίνακας 5 Βασικά Χαρακτηριστικά των φυτών Funkia Hosta και Hedera Helix.....	45
Πίνακας 6 Σύγκριση της θερμοκρασίας αέρα μεταξύ των παραλλαγών .....	53
Πίνακας 7 Σύγκριση της ανακλώμενης ακτινοβολίας βραχέων κυμάτων τοίχου μεταξύ των παραλλαγών .....	56
Πίνακας 8 Σύγκριση Longwave emitted Radiation (W/m <sup>2</sup> ) μεταξύ των παραλλαγών .....	58

## Κατάλογος Διαγραμμάτων

Διάγραμμα 1 Σύγκριση της θερμοκρασίας αέρα μεταξύ των παραλλαγών κατά τη διάρκεια 24ωρης προσομοίωσης .....	53
Διάγραμμα 2 Θερμοκρασία επιφάνειας τοίχου (°C) .....	54
Διάγραμμα 3 Σύγκριση της ανακλώμενης ακτινοβολίας βραχέων κυμάτων τοίχου μεταξύ των παραλλαγών κατά τη διάρκεια 24ωρης προσομοίωσης .....	56
Διάγραμμα 4 Σύγκριση Longwave emitted Radiation (W/m <sup>2</sup> ) μεταξύ των παραλλαγών κατά τη διάρκεια του 24ωρης προσομοίωσης.....	57
Διαγράμματα 5, 6,7,8: Σύγκριση του δείκτη PET μεταξύ των παραλλαγών κατά τη διάρκεια 24ωρης προσομοίωσης για 4 διαφορετικές δημογραφικές ομάδες .....	59
Διαγράμματα 9,10,11,12 Σύγκριση του δείκτη PMV μεταξύ των παραλλαγών κατά τη διάρκεια 24ωρης προσομοίωσης για 4 διαφορετικές δημογραφικές ομάδες .....	61
Διαγράμματα 13,14,15,16 Σύγκριση του δείκτη UTCI μεταξύ των παραλλαγών κατά τη διάρκεια 24ωρης προσομοίωσης για 4 διαφορετικές δημογραφικές ομάδες .....	64
Διαγράμματα 17,18,19,20 Σύγκριση του δείκτη SET μεταξύ των παραλλαγών κατά τη διάρκεια 24ωρης προσομοίωσης για 4 διαφορετικές δημογραφικές ομάδες .....	66

## Στόχοι της εργασίας

Στις σύγχρονες πόλεις, όπου το πράσινο παραχωρεί τη θέση του στο τσιμέντο και την ασφαλτο, το φαινόμενο της Αστικής Θερμικής Νησίδας (Urban Heat Island - UHI) αποτελεί σημαντική περιβαλλοντική προκλήση.(Vardoulakis et al., 2013). Η έλλειψη πράσινων χώρων σε συνδυασμό με τη χρήση δομικών υλικών που συσσωρεύουν τη θερμότητα, οδηγούν σε σημαντική αύξηση της θερμοκρασίας σε σύγκριση με τις γύρω επαρχιακές περιοχές. Το φαινόμενο αυτό εντείνει τις συνέπειες της κλιματικής αλλαγής, επηρεάζει την ποιότητα ζωής των κατοίκων και αυξάνει τις ενεργειακές ανάγκες των κτιρίων, κυρίως κατά τους θερινούς μήνες.(Khan et al., 2022)

Η αναζήτηση αποτελεσματικών λύσεων αντιμετώπισης του φαινομένου είναι πλέον επιτακτική. Η βιοκλιματική αρχιτεκτονική και οι πράσινες υποδομές, όπως οι πράσινοι τοίχοι, αποτελούν βιώσιμες και φιλικές προς το περιβάλλον παρεμβάσεις, που μπορούν να βελτιώσουν σημαντικά το μικρόκλιμα των αστικών περιοχών και κατ' επέκταση να μετριάσουν το εν λόγω φαινόμενο. (Bowler et al., 2010) Οι πράσινοι τοίχοι, πέρα από την αισθητική τους αξία, έχουν τη δυνατότητα να βελτιώνουν τη θερμική άνεση των ανθρώπων και να μειώσουν την θερμοκρασία του αέρα. Παράλληλα, ενισχύουν τη βιοποικιλότητα, βελτιώνουν την ποιότητα του αέρα και αποτελούν μια στρατηγική παρέμβαση για την αειφορία των πόλεων.(Assimakopoulos et al., 2020)

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι να διερευνήσει τα οφέλη των πράσινων τοίχων στο αστικό μικρόκλιμα. Πιο συγκεκριμένα, θα εξεταστεί η αποτελεσματικότητα των πράσινων τοίχων στον μετριασμό του φαινομένου της αστικής θερμικής νησίδας. Κατ' επέκταση, η μελέτη επιδιώκει να αξιολογήσει τις επιπτώσεις της προσθήκης ενός φυτεμένου τοίχου στους δείκτες θερμικής άνεσης. Ο τελικός στόχος είναι να δοθούν συστάσεις με βάση τα δεδομένα σχετικά με την εφαρμογή πράσινων πρωτοβουλιών σε αστικές περιοχές για τη βελτίωση της αστικής βιωσιμότητας.

## **1 Θεωρητικό υπόβαθρο**

### **1.1 Αστική Θερμική Νησίδα (UHI)**

Ο όρος Αστική θερμική νησίδα , ή αλλιώς UHI από τα αρχικά των λέξεων Urban Heat Island, περιγράφει ένα φαινόμενο, κατά το οποίο οι τιμές της θερμοκρασίας του αέρα σε περιοχές υψηλής οικοδομικής πυκνότητας, δηλαδή στις αστικές περιοχές, είναι συνήθως υψηλότερες από αυτές των γύρω αγροτικών περιοχών (Khan et al., 2022). Οι αλλαγές της επιφάνειας της γης στις πόλεις, που σχετίζονται με τα υλικά και την πυκνότητα δόμησης, επηρεάζουν την αποθήκευση και την μεταφορά της θερμότητας μέσω ακτινοβολίας (Vardoulakis et al., 2013). Το φαινόμενο αυτό τεκμηριώθηκε για πρώτη φορά από τον Howard το 1883 και αποτελεί το πιο επικυρωμένο φαινόμενο της κλιματικής αλλαγής καθώς και το ισχυρότερο χαρακτηριστικό της αστικοποίησης . Η υψηλότερη διαφορά θερμοκρασίας αέρα μεταξύ αστικών και αγροτικών περιοχών καθορίζει την ένταση της αστικής θερμικής νησίδας (UHI). Η άνοδος της θερμοκρασίας του αέρα αυξάνει τη ζήτηση ενέργειας για ψύξη των κτιρίων, η οποία οδηγεί σε υψηλότερες εκπομπές ρύπων. Σε γενικές γραμμές, μεταξύ των κύριων μηχανισμών που συμβάλλουν στο φαινόμενο UHI είναι η γεωμετρία των κτιρίων και των δρόμων, οι θερμικές και οπτικές ιδιότητες των υλικών που χρησιμοποιούνται στον αστικό ιστό, η ανθρωπογενής θερμότητα καθώς και η έλλειψη φύτευσης στις πόλεις. Το φαινόμενο μπορεί επίσης να επηρεαστεί από την ατμοσφαιρική ρύπανση και τα αερολύματα (Vardoulakis et al., 2013).

### **1.2 Ο ρόλος των πράσινων υποδομών στις πόλεις**

Η ύπαρξη πράσινων υποδομών στις πόλεις αποτελεί ένα σημαντικό εργαλείο για την αντιμετώπιση περιβαλλοντικών, κοινωνικών και οικονομικών προκλήσεων. Ως “πράσινες” ορίζονται οι υποδομές που βασίζονται στη φύση, όπως οι πράσινες στέγες και οι πράσινοι τοίχοι στα κτίρια, τα αστικά δάση , τα πάρκα, καθώς και η ύπαρξη δέντρων και πράσινου στα πεζοδρόμια .Οι πράσινες υποδομές επιτυγχάνουν τη βιωσιμότητα των πόλεων κυρίως μειώνοντας τις θερμοκρασίες σε τοπικό επίπεδο. Η ύπαρξη αστικού πράσινου προσφέρει σκίαση και ανακούφιση από τις υψηλές θερμοκρασίες, καθώς και βελτίωση της ποιότητας του αέρα, ιδιαίτερα σε πυκνοκατοικημένες περιοχές, όπου τα δομικά υλικά (πχ ασφαλτός) επιδεινώνουν το φαινόμενο UHI (Bowler et al., 2010). Επιπλέον, μέσω της αύξησης των πράσινων υποδομών βελτιώνεται η διαχείριση των όμβριων υδάτων, μειώνοντας τον κίνδυνο πλημμυρών. Ταυτόχρονα, ενισχύεται η βιοποικιλότητα, καθώς αρκετές πράσινες αστικές υποδομές αποτελούν καταφύγιο για ζώα και φυτά, ακόμη και σε περιοχές έντονης αστικοποίησης. Ως επακόλουθο, η ενσωμάτωση πράσινων υποδομών στις πόλεις συνεισφέρει στη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας, αφού μειώνει τις ανάγκες για ψύξη σε κτίρια μέσω της φυσικής σκίασης και της θερμομόνωσης (Gill et al., 2007). Τα κοινωνικά και ψυχολογικά οφέλη που απορρέουν από την ύπαρξη πράσινων υποδομών στις μεγαλουπόλεις είναι εξίσου σημαντικά. Η πρόσβαση σε πράσινους χώρους συνδέεται με τη βελτίωση της ψυχικής υγείας, την αύξηση της φυσικής δραστηριότητας και τη δημιουργία

ισχυρότερων κοινοτήτων. Η εντατική ενσωμάτωσή του πράσινου στον πολεοδομικό σχεδιασμό μπορεί να μεταμορφώσει την ποιότητα ζωής στις σύγχρονες πόλεις (van den Berg et al., 2010).

### 1.3 Κατακόρυφη φύτευση

Ο όρος “Πράσινος τοίχος” αναφέρεται σε όλους τους τύπους φύτευσης κάθετων επιφανειών, όπως προσόψεις κτιρίων, εξωτερικοί τοίχοι κλπ. Οι δύο πιο ευρέως χρησιμοποιούμενοι όροι είναι η *Πράσινη Πρόσοψη*, Green Façade (GF) και *Ζωντανός Τοίχος*, Living Wall (LW) (Assimakopoulos et al., 2020).

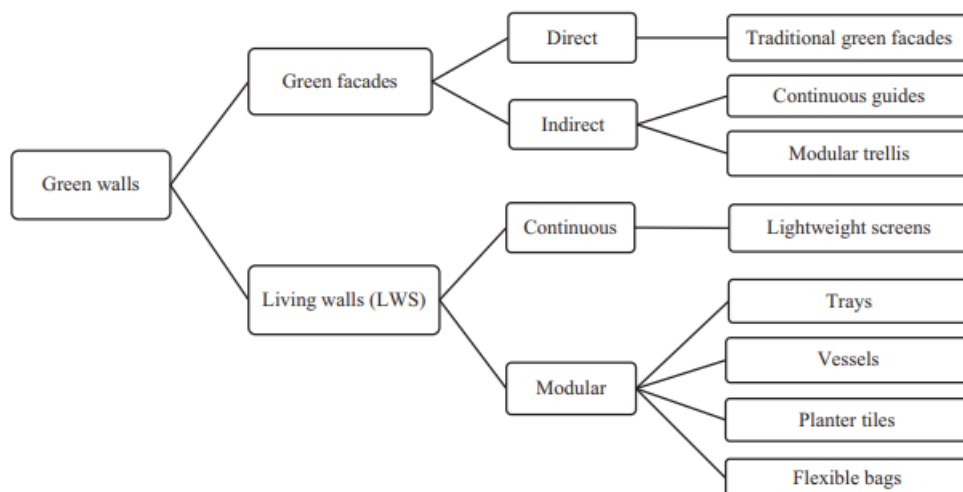
Ιστορικά, τα συστήματα κατακόρυφης φύτευσης χρησιμοποιούνται εδώ και αιώνες για αισθητικούς λόγους. Αξιοσημείωτο παράδειγμα κατακόρυφης φύτευσης στην αρχαιότητα αποτέλεσαν οι Κρεμαστοί Κήποι της Βαβυλώνας. Ακόμα, στις μεσογειακές περιοχές τα αμπέλια αποτέλεσαν μια πρώιμη μορφή πράσινης πρόσοψης προσφέροντας σκίαση, δροσιά αλλά και οικονομικές απολαβές από την παραγωγή των καρπών. Τα τελευταία χρόνια, ωστόσο, οι πράσινες προσόψεις χρησιμοποιούνται κυρίως για τα περιβαλλοντικά, οικονομικά και κοινωνικά πλεονεκτήματα που προσφέρουν. Στη δεκαετία του 1980 οι Bartfelder & Köhler ξεκίνησαν τις αρχικές ερευνητικές δραστηριότητες σχετικά με τις οικολογικές λειτουργίες του πράσινου των προσόψεων, θέτοντας έτσι τις βάσεις για μια καινοτόμο γραμμή έρευνας. Πιο πρόσφατα, η ανάπτυξη συστημάτων πράσινων τοίχων αποτελεί την τελευταία τεχνολογική πρόοδο στον τομέα της επένδυσης τοίχων. Αυτός ο τύπος τοίχου πρωτοστάτησε από τον Patrick Blanc, ο οποίος ανέφερε το “Mur Vegetal”, χρησιμοποιώντας το πρώτο υδροπονικό σύστημα για πράσινους τοίχους, το 1994 (Medl et al., 2017).

Σε αστική κλίμακα οι πράσινοι τοίχοι, όσο και οι πράσινες στέγες, συμβάλλουν στην ενσωμάτωση της βλάστησης στο αστικό περιβάλλον, χωρίς να καταλαμβάνουν χώρο στο επίπεδο του δρόμου. Στην πραγματικότητα, η κάλυψη των κτιρίων με βλάστηση, όταν εφαρμόζεται σε μεγάλη αστική κλίμακα, μπορεί να βελτιώσει το περιβάλλον συμβάλλοντας στην αστική βιοποικιλότητα, τη διαχείριση των όμβριων υδάτων, την ποιότητα του αέρα, τη μείωση της θερμοκρασίας και τον μετριασμό του φαινομένου της θερμικής νησίδας (Manso & Castro-Gomes, 2015). Ταυτόχρονα, η εφαρμογή συστημάτων πράσινου μπορεί να έχει, εκτός από τις περιβαλλοντικές πτυχές, κοινωνικά και οικονομικά οφέλη. Τα συστήματα αυτά ενθαρρύνουν την άνθιση των αστικών περιοχών, έχουν θεραπευτικό αποτέλεσμα προξενώντας ψυχολογική ευεξία μέσω της παρουσίας της βλάστησης, βελτιώνουν την εικόνα των πόλεων, αυξάνουν την αξία των ακινήτων και λειτουργούν ως συμπληρωματική θερμική και ακουστική προστασία. Οι πράσινοι τοίχοι έχουν μεγαλύτερες δυνατότητες από τις πράσινες στέγες, λαμβάνοντας υπόψη ότι στα αστικά κέντρα η έκταση των πράσινων προσόψεων μπορεί να είναι διπλάσια από το εδάφος των κτιρίων. Τα συστήματα πράσινων βελτιώνουν το μικρόκλιμα παρέχοντας μόνωση το χειμώνα και σκίαση με δροσιστικό αποτέλεσμα λόγω εξάτμισης (από την επιφάνεια των φυτών) το καλοκαίρι. Η βλάστηση απορροφά την ηλιακή ακτινοβολία και η εξατμισοδιαπνοή μειώνει την επίδρασή της, οδηγώντας σε αυξημένα επίπεδα υγρασίας και χαμηλότερες επιφανειακές θερμοκρασίες σε σύγκριση με τις σκληρές επιφάνειες. Πρόσφατες μελέτες αποδεικνύουν ότι οι πράσινοι τοίχοι ελέγχουν την αύξηση αλλά και τις απώλειες θερμότητας, ενισχύοντας

τη θερμική άνεση στους εσωτερικούς χώρους και μειώνοντας τις ενεργειακές απαιτήσεις για θέρμανση ή ψύξη. (De Oliveira Santos et al., 2024; Manso & Castro-Gomes, 2015). Επιπλέον, οι πράσινοι τοίχοι παρέχουν και δευτερεύοντα οφέλη, όπως η βελτίωση της ποιότητας του αέρα μέσω το φιλτράρισμα των ρύπων, η μειωμένη κατανάλωση ενέργειας για ψύξη και η βελτιωμένη αισθητική των πόλεων. Τα οφέλη αυτά ευθυγραμμίζονται με τους ευρύτερους στόχους της βιώσιμης αστικής ανάπτυξης και της ανθεκτικότητας (Karimi et al., 2022).

### 1.3.1 Τεχνικές κατακόρυφης φύτευσης

Οι κύριες τεχνικές κατακόρυφης φύτευσης ,αποτυπώνονται στην εικόνα 1.



Εικόνα 1 Ταξινόμηση πράσινων τοίχων ανάλογα με τα κατασκευαστικά τους χαρακτηριστικά (Manso & Castro-Gomes, 2015)

#### Πράσινη Πρόσοψη:

-Άμεση Πράσινη Κάλυψη:

Περιλαμβάνει φυτά που αναπτύσσονται απευθείας στην επιφάνεια του τοίχου (Αναρριχώμενα Φυτά) χρησιμοποιώντας τους φυσικούς μηχανισμούς αναρρίχησής τους (ρίζες, βλαστούς). Αυτή η μέθοδος απαιτεί χαμηλή συντήρηση και είναι πιο οικονομική, αλλά το σχέδιο εξαρτάται από τον τύπο των φυτών και μπορεί να χρειαστεί υποστηρικτικές δομές.



Εικόνα 2 : Άμεσος Πράσινος Τοίχος-Αναρριχώμενος Κισσός (Πηγή:[www.thezhush.com](http://www.thezhush.com))

-Έμμεση Πράσινη Κάλυψη:

Χρησιμοποιεί μια υποστηρικτική δομή (π.χ. καλώδια, πλέγματα) για να καθοδηγεί και να στηρίζει τα αναρριχώμενα φυτά. Τα φυτά ριζώνουν είτε στο έδαφος είτε σε δοχεία σε διάφορα ύψη, παρέχοντας ευελιξία στον σχεδιασμό και μεγαλύτερο έλεγχο στην ανάπτυξη των φυτών.





Εικόνα 3 Παράδειγμα έμμεσης πράσινης κάλυψης , Jakob Factory (Πηγή <https://urbannext.net/>)

### Συστήματα Ζωντανών Τοίχων

-Συνεχείς Πράσινοι Τοίχοι:

Χρησιμοποιεί ένα συνεχές στρώμα υλικού καλλιέργειας διασκορπισμένο στην επιφάνεια του τοίχου. Τα φυτά ριζώνουν απευθείας σε αυτό το υλικό, δημιουργώντας μια ενιαία πράσινη εμφάνιση στον τοίχο. Παρέχει υψηλή αισθητική αξία και ποικιλία φυτών, αλλά είναι συνήθως πιο δαπανηρή και περίπλοκη στην εγκατάσταση και συντήρηση.



Εικόνα 4 Παράδειγμα Αρθρωτού Ζωντανού Τοίχου , Huntsville Alabama

(Πηγή : <https://www.greenroofs.com/>)

#### -Αρθρωτοί

Περιλαμβάνει τη χρήση αρθρωτών πάνελ ή δοχείων που περιέχουν τα φυτά και το υλικό καλλιέργειας. Αυτά τα πάνελ προσαρτώνται στην επιφάνεια του τοίχου. Αυτή η τεχνική επιτρέπει μια ευρεία γκάμα φυτικών ειδών και μπορεί να δημιουργήσει πυκνούς, σύνθετους πράσινους τοίχους με υψηλό επίπεδο ελέγχου του σχεδιασμού της φύτευσης. Απαιτεί πιο σύνθετα συστήματα άρδευσης και τακτική συντήρηση.



Εικόνα 5 Πράσινος τοίχος , Sihcity Ζυρίχη (Πηγή: <https://www.greenroofs.com/>)

Ανάλογα με τις ανάγκες και τους στόχους του εκάστοτε έργου, κάθε μία από αυτές τις τεχνικές προσφέρει διαφορετικά πλεονεκτήματα καθώς και προκλήσεις.(Manso & Castro-Gomes, 2015)

#### 1.4 Θερμική Άνεση

Η θερμική άνεση αναφέρεται στην υποκειμενική αίσθηση ευχαρίστησης ή ικανοποίησης από τις θερμοκρασιακές συνθήκες ενός χώρου. Επηρεάζεται από παράγοντες όπως η θερμοκρασία του αέρα, η υγρασία, η κυκλοφορία του αέρα, η θερμική ακτινοβολία, καθώς και από ατομικές συνθήκες όπως η ένδυση και η σωματική δραστηριότητα. Σύμφωνα με την Αμερικανική Επιστημονική Εταιρία Θέρμανσης Ψύξης και Κλιματισμού (American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning), το πρότυπο ASHRAE 55, ορίζει τη θερμική άνεση ως "την κατάσταση κατά την οποία οι περισσότεροι άνθρωποι σε έναν συγκεκριμένο χώρο αισθάνονται άνετα με το θερμικό περιβάλλον"(www.ashrae.org). Η διασφάλιση της θερμικής άνεσης είναι ζωτικής σημασίας στον σχεδιασμό κτιρίων και συστημάτων κλιματισμού, καθώς επηρεάζει την υγεία και την απόδοση των ατόμων που χρησιμοποιούν τον χώρο. (Chrenko, 1967)

Ως εξωτερική θερμική άνεση, ορίζεται η κατάσταση κατά την οποία ένα άτομο αισθάνεται θερμικά ουδέτερο σε έναν υπαίθριο χώρο, παρά την έκθεση σε φυσικές και μικροκλιματικές συνθήκες. Επηρεάζεται από περιβαλλοντικούς παράγοντες, όπως η θερμοκρασία του αέρα, η σχετική υγρασία, η ταχύτητα και η κατεύθυνση του ανέμου, η ηλιακή και θερμική ακτινοβολία, αλλά και από ανθρωπογενείς παράγοντες, όπως η σκίαση, η βλάστηση, η χρήση ανακλαστικών ή ψυχρών υλικών, καθώς και το αστικό ανάγλυφο (Nikolopoulou & Steemers, 2003). Οι ατομικές συνθήκες, όπως ο ρουχισμός και η σωματική δραστηριότητα, επηρεάζουν επίσης την αντίληψη της θερμικής άνεσης.

Ο σχεδιασμός των αστικών υπαίθριων χώρων με στόχο τη βελτίωση της εξωτερικής θερμικής άνεσης μπορεί να συμβάλει στη μείωση του φαινομένου της αστικής θερμικής νησίδας και να ενθαρρύνει τη χρήση των δημόσιων χώρων (Nikolopoulou & Steemers, 2003). Επιπλέον, η ενσωμάτωση πρασίνου, όπως οι πράσινοι τοίχοι, έχει αποδειχθεί ότι βελτιώνει τις μικροκλιματικές συνθήκες και αυξάνει την ευημερία των κατοίκων (Kolokotroni et al., 2016).

#### **1.4.1 Δείκτες θερμικής άνεσης**

Η αντίληψη της θερμικής άνεσης μπορεί να διαφέρει μεταξύ ατόμων που βρίσκονται στον ίδιο χώρο. Παρά το γεγονός ότι τα όργανα μέτρησης μπορεί να δείχνουν τις ίδιες κλιματικές συνθήκες σε δύο περιοχές, τα άτομα μπορούν να βιώνουν διαφορετικά επίπεδα θερμικής άνεσης. Επομένως, η αξιολόγηση της απαιτεί, εκτός από τις κλιματικές μετρήσεις, και τις υποκειμενικές εκτιμήσεις των ανθρώπων που ζουν στους χώρους αυτούς. Η ικανοποίηση με το θερμικό περιβάλλον είναι μια σύνθετη και σε μεγάλο βαθμό υποκειμενική αντίδραση σε πολλές αλληλοεπιδρώμενες μεταβλητές, οι οποίες περιλαμβάνουν τα φυσικά χαρακτηριστικά του περιβάλλοντος, το είδος του ρουχισμού, το επίπεδο σωματικής δραστηριότητας, καθώς και δημογραφικά χαρακτηριστικά όπως το φύλο, η ηλικία και η υγεία. (Γλυτσός Θ κ.α., Εργαστηριακές Σημειώσεις)

Η ανταπόκριση του ανθρώπου σε θερμά ή ψυχρά περιβάλλοντα εξαρτάται κυρίως από τη συνδυαστική επίδραση της μέσης θερμοκρασίας ακτινοβολίας, της περιβαλλοντικής θερμοκρασίας, της σχετικής υγρασίας, της ταχύτητας του ανέμου, καθώς και από τον τύπο του ντυσίματος και την ένταση της δραστηριότητας. Η κατανόηση της επίδρασης αυτών των μεταβλητών στη θερμική άνεση έχει οδηγήσει στην ανάπτυξη θερμικών δεικτών και κλιμάκων που αναδεικνύουν πώς οι συνδυασμοί αυτών των παραγόντων επηρεάζουν την άνεση. Έχουν γίνει αρκετές προσπάθειες να ενσωματωθούν αυτοί οι παράγοντες σε έναν ενιαίο δείκτη, ο οποίος θα προσδιορίζει το επίπεδο θερμικής άνεσης και θα αποτελεί μια συνολική μέτρηση της ποιότητας του περιβάλλοντος. Διάφοροι δείκτες έχουν αναπτυχθεί με διαφορετικές προσεγγίσεις, αναλόγως των συνθηκών εφαρμογής, της προτεραιότητας που



δίνεται σε κάθε παράγοντα, και των μεθόδων υπολογισμού των θερμικών ανταλλαγών (Κοτσίρης, Γ , 2007; Chrenko, 1967).

### Δείκτης PMV

Οι πιο δημοφιλής δείκτες για την θερμική άνεση είναι οι PMV (Predicted Mean Vote) και PPD (Predicted Percentage of Dissatisfied People) και αναπτύχθηκαν από τον Povl Ole Fanger και .Το 1970 δημοσίευσε το βιβλίο με τίτλο "Θερμική Άνεση". Όπως επισημαίνεται στην εισαγωγή, το βιβλίο απευθυνόταν σε μηχανικούς που έχουν ως στόχο τη σχεδίαση συνθηκών θερμικής άνεσης σε εσωτερικούς χώρους και δεν διαθέτουν εκπαίδευση σε θέματα φυσιολογίας, ψυχολογίας ή εργονομίας. Το βιβλίο έχει αναγνωριστεί διεθνώς ως κλασικό έργο για τους ερευνητές στον τομέα της θερμικής άνεσης και καταγράφει τα αποτελέσματα όλων των μελετών που έχουν διεξαχθεί στα εργαστήρια του DTU και του Kansas State University. Συγκεκριμένα, περιλαμβάνονται αναλύσεις για την επίδραση του φύλου και της ηλικίας, καθώς και οι υπολογισμοί των συντελεστών γωνίας και της μέσης θερμοκρασίας ακτινοβολίας. (d'Ambrosio Alfano et al., 2017)

Ο δείκτης Μέσης Προβλεπόμενης Ψήφου , PMV (Predicted Mean Vote) βαθμονομείται σε μια κλίμακα εννέα σημείων και αντιπροσωπεύει τη μέση εκτίμηση της θερμικής άνεσης από μια ομάδα ατόμων που βρίσκονται σε συγκεκριμένο χώρο, υπό σταθερές συνθήκες για αρκετό χρονικό διάστημα ώστε να σταθεροποιηθεί η ανταλλαγή θερμότητας μεταξύ του σώματος και του περιβάλλοντος.

Μπορεί να επιτύχει ακρίβεια έως και 80% ,εφόσον οι παράμετροι μετρηθούν με ακρίβεια. Οι μελέτες δείχνουν ότι προσωπικές παράμετροι, όπως ο μεταβολισμός, έχουν μεγαλύτερη επίδραση στη θερμική άνεση σε σχέση με τους περιβαλλοντικούς παράγοντες, όπως η υγρασία, η οποία επηρεάζει την άνεση μόνο σε ακραία επίπεδα (κάτω από 30% ή πάνω από 60%).

Η εξίσωση υπολογισμού του δείκτη PMV (μαζί με τις βοηθητικές εξισώσεις υπολογισμού παραμέτρων που εμφανίζονται στη βασική σχέση) είναι:

$$PMV = (0.028 + 0.3033e^{-0.036M}) \times L \quad (1)$$

$$\begin{aligned} L = & (M - W) - 3.05 \times 10^{-3}(5733 - 6.99(M - W) - Pa) \\ & - 0.42(M - W - 58.15) - 1.7 \times 10^{-5}(5867 - Pa) \\ & - 0.0014M(34 - t_a) - f_{cl}h_c(t_{cl} - t_a) - 3.96 \\ & \times 10^{-8}f_{cl}[(t_{cl} + 273)^4 - (\bar{t}_r + 273)^4] \end{aligned} \quad (2)$$

$$h_c = \begin{cases} 2.38(t_{cl} - t_a)^{0.25}, & \text{if } 2.38(t_{cl} - t_a)^{0.25} > 12.1\sqrt{V} \\ 12.1\sqrt{V}, & \text{if } 2.38(t_{cl} - t_a)^{0.25} \leq 12.1\sqrt{V} \end{cases} \quad (3)$$

$$t_{cl} = 35.7 - 0.028(M - W) - 0.155I_{cl} \left\{ 3.96 \times 10^{-8} \right. \\ \left. \times f_{cl} \left[ (t_{cl} + 273)^4 + (\bar{t}_r + 273)^4 \right] + f_{cl} \times h_c(t_{cl} - t_a) \right\} \quad (4)$$

όπου το  $L$  ορίζει τη συνολική μεταφορά θερμότητας γύρω από ένα άτομο ( $W/m^2$ ), το  $M$  είναι ο μεταβολικός ρυθμός ( $W/m^2$ ), το  $W$  είναι το έργο που εκπέμπεται από το άτομο ( $W/m^2$ ), το  $P_a$  είναι η πίεση των υδρατμών,  $t_r$  είναι η μέση θερμοκρασία ακτινοβολίας σε  $^{\circ}C$ ,  $t_a$  είναι η θερμοκρασία του αέρα σε  $^{\circ}C$ ,  $f_{cl}$  είναι ο συντελεστής μόνωσης του ρουχισμού που ορίζεται ως το ποσοστό της συνολικής επιφάνειας του σώματος που καλύπτεται από τον ρουχισμό,  $I_{cl}$  είναι η μόνωση του ρουχισμού σε  $CL_0$  και  $h_c$  είναι ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας με ρυθμό συναγωγής σε  $W/(m^2K)$ .  $V$  είναι η ταχύτητα του αέρα σε  $ms^{-1}$  και  $t_{cl}$  είναι η θερμοκρασία του ρουχισμού σε  $^{\circ}C$ . (Hasan et al., 2016)

### Δείκτης PPD

Ο δείκτης Προβλεπόμενου Ποσοστού δυσανεξίας των ανθρώπων PPD (Predicted Percentage of Dissatisfied People) προβλέπει το ποσοστό των θερμικά δυσαρεστημένων ατόμων. Προκύπτει για συγκεκριμένη τιμή του PMV και εκφράζει το προβλεπόμενο ποσοστό, επί τοις εκατό των ατόμων που είναι θερμικά δυσαρεστημένοι στο περιβάλλον που βρίσκονται, σε σχέση με το σύνολο των ατόμων που βρίσκονται στο περιβάλλον αυτό. Όσο ο PMV απομακρύνεται από την τιμή του μηδενός, ο PPD αυξάνεται. Στην εικόνα 6 αποτυπώνεται γραφικά η σχέση των δύο δεικτών. (Jang et al., 2007)

Relationship between PMV and thermal sensation

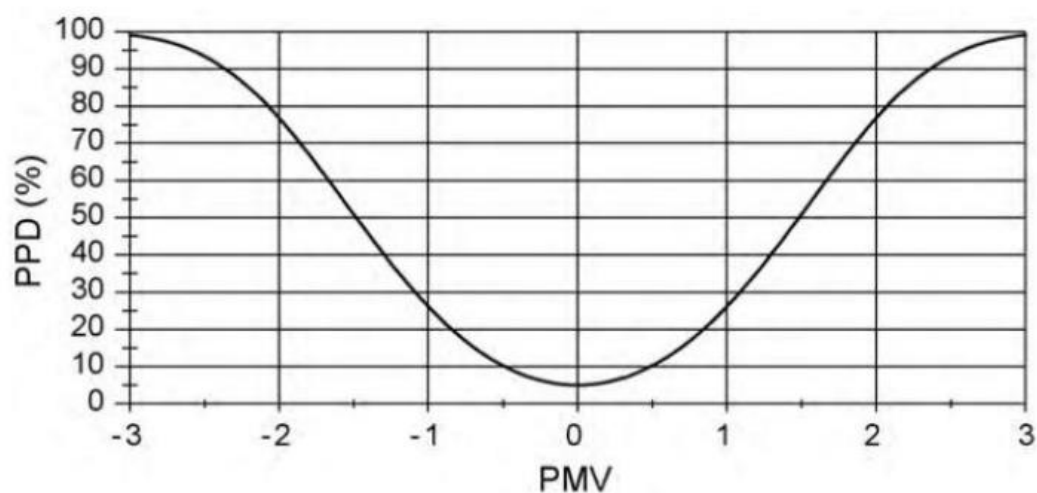
(a) Proposed by Fanger[5]

PMV	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
Thermal sensation	Hot	Warm	Slightly warm	Neutral	Slightly cool	Cool	Cold

(b) Modified after Jendritzky et al. (1990)[6]

PMV	Thermal sensation	Physiological stress level
-3.5	Very cold	Extreme cold stress
-2.5	Cold	Strong cold stress
-1.5	Cool	Moderate cold stress
-0.5	Slightly cool	Slight cold stress
0.5	Comfortable	No thermal stress
1.5	Slightly warm	Slight heat stress
2.5	Warm	Moderate heat stress
3.5	Hot	Strong heat stress
4.5	Very hot	Extreme heat stress

Εικόνα 6 Σχέση μεταξύ του δείκτη PMV και της Θερμικής Άνεσης (Jang κ.α. 2007)



Εικόνα 7 Γραφική Παράσταση του δείκτη PMV σε σχέση με το δείκτη PPD (Πηγή: εργαστηριακή άσκηση)

Έχει αποδειχθεί ότι το μοντέλο PMV-PPD υπερεκτιμά τις αισθήσεις του ψύχους και της ζέστης, οδηγώντας σε υπερεκτιμήσεις της δυσαρέσκειας των ατόμων. Ωστόσο, όταν η θερμική αίσθηση κυμαίνεται μεταξύ ελαφρώς δροσερού και ελαφρώς ζεστού, η προβλεπτική ακρίβεια είναι καλύτερη. (Cheung et al., 2019)

### Δείκτης PET

Ο PET (Ισοδύναμη Φυσιολογική Θερμοκρασία, Physiological Equivalent Temperature) είναι ένας ανθρωπίνος βιομετεωρολογικός δείκτης. Η βασική ιδέα της δημιουργίας του δείκτη, είναι η περιγραφή της θερμοκρασίας ενός ισοδύναμου, ιδεατού εσωτερικού περιβάλλοντος, το οποίο αναμένεται να έχει την ίδια επίδραση στη θερμική άνεση με αυτήν του αντίστοιχου εξωτερικού (Matzarakis & Mayer, 1991).

Στον πίνακα 1 φαίνεται ο δείκτης PMV και ο συσχετισμός του με τον δείκτη PET και τις παραμέτρους θερμικής άνεσης / θερμικής αντίληψης.

Πίνακας 1: Εύρος των θερμικών δεικτών μέσης προβλεπόμενης ψήφου (PMV) και φυσιολογικής ισοδύναμης θερμοκρασίας (PET) για διαφορετικούς βαθμούς θερμικής αντίληψης και φυσιολογικής έντασης αντίστοιχα, με σταθερό μεταβολισμό 80 W, και αντίσταση ένδυσης 0,9 clo. (Matzarakis et al., 1999)

PMV	PET (°C )	Thermal Perception	Grade of physiological stress
-3.5	4	Very cold	Extreme cold stress
		cold	Strong cold stress
-2.5	8	cool	Moderate cold stress
-1.5	13	Slightly cool	Slight cold stress
-0.5	18	comfortable	no thermal stress
0.5	23	Slightly warm	slight heat stress
1.5	29	warm	moderate heat stress
2.5	35	hot	strong heat stress
3.5	41	Very hot	extreme heat stress

### Δείκτης UTCI

Ο Δείκτης **UTCI (Universal Thermal Climate Index)** σχεδιάστηκε για να αποτυπώνει τη θερμική άνεση του ανθρώπου, λαμβάνοντας υπόψη την φυσιολογική ανταπόκριση του σώματος σε πολύπλοκες περιβαλλοντικές συνθήκες. Ορίζεται ως η θερμοκρασία αέρα υπό συγκεκριμένες συνθήκες αναφοράς που προκαλεί το ίδιο επίπεδο θερμικής καταπόνησης



με το πραγματικό περιβάλλον. Στόχος της χρήσης του δείκτη UTCI είναι να απλοποιήσει αυτές τις πολυδιάστατες φυσιολογικές αντιδράσεις σε έναν ενιαίο αριθμητικό δείκτη, διευκολύνοντας την ερμηνεία και την εφαρμογή του σε διάφορους τομείς. Η τιμή του δείκτη υπολογίζεται μέσω ενός δυναμικού θερμοφυσιολογικού μοντέλου που ενσωματώνει πολλαπλές μεταβλητές. Ο UTCI αποτελεί ένα πολύτιμο εργαλείο για την κατανόηση και τη διαχείριση της θερμικής άνεσης σε διάφορα περιβάλλοντα, καθιστώντας τον θεμελιώδη για την περιβαλλοντική και τη δημόσια υγειονομική έρευνα και ιδιαίτερα στον αστικό σχεδιασμό.(Błażejczyk et al., 2010)

### Δείκτης SET

Η Αμερικανική Επιστημονική Εταιρία Θέρμανσης Ψύξης και Κλιματισμού (ASHRAE) προτείνει τη χρήση της τυπικής πραγματικής θερμοκρασίας (SET) για την αξιολόγηση της θερμικής άνεσης (πρότυπο ANSI/ASHRAE 55-2017 ([ASHRAE,2017b])). Η SET ορίζεται ως εξής: «η θερμοκρασία ενός φανταστικού περιβάλλοντος σε 50% σχετική υγρασία, μέση ταχύτητα 0,1 m/s και η θερμοκρασία του αέρα είναι ίση με τη μέση θερμοκρασία ακτινοβολίας, στην οποία η συνολική απώλεια από το δέρμα ενός φανταστικού χρήστη με επίπεδο δραστηριότητας 1,0 met και επίπεδο ένδυσης 0,6 clo είναι η ίδια με εκείνη ενός ατόμου στο πραγματικό περιβάλλον, με πραγματικό ένδυμα και επίπεδο δραστηριότητας». Η αξιολόγηση SET λαμβάνει υπόψη την επίδραση του ρουχισμού και του μεταβολικού ρυθμού. Άλλοι παράγοντες που λαμβάνονται υπόψη είναι: η θερμοκρασία του αέρα, η ταχύτητα του αέρα, η ατμοσφαιρική πίεση, η σχετική υγρασία και η μέση θερμοκρασία ακτινοβολίας.(Mahgoub et al., 2020).

Ο δείκτης SET είναι συνάρτηση των ακόλουθων παραμέτρων:

$$SET = f(T_a, RH\%, V_{air}, \text{Clothing factor}, \text{Metabolic rate}).$$

Όπου  $T_a$  η θερμοκρασία του αέρα ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $RH\%$  η σχετική υγρασία(%), και  $V_{air}$  η ταχύτητα του ανέμου (m/s)

**Πίνακας 2** Κύρια χαρακτηριστικά των πιο συχνά χρησιμοποιούμενων δεικτών σε μελέτες θερμικής αντίληψης εξωτερικών χώρων.(Potchter et al., 2018)

Δείκτης	Αναφορά	Χρήση	Κατηγορίες Θερμικής Άνεσης	Κατάλληλο Κλίμα	Ορισμός Θερμικής Κλίμακας
PET ( $^{\circ}\text{C}$ )	Mayer and Höppe, 1987	Για εξωτερικούς χώρους	Κλίμακα 7-9 σημείων: Από πολύ κρύο έως πολύ ζεστό	Όλα τα κλίματα	Προτείνεται τροποποίηση για διαφορετικά κλίματα (Matzarakis et al., 1999)
PMV	Fanger, 1970	Κυρίως για εσωτερικούς χώρους (Fanger, 1970), εφαρμόζεται και σε εξωτερικούς	Κλίμακα 7 σημείων: Από κρύο έως ζεστό	Όλα τα κλίματα	Σχεδιασμένο για ευρύ φάσμα καιρού και κλιμάτων

UTCI (°C)	Jendritzky et al., 2009, 2012	Για εξωτερικούς χώρους	Κλίμακα 10 σημείων: Από ακραίο κρύο έως ακραία ζέστη	Όλα τα κλίματα	Σχεδιασμένο για ευρύ φάσμα καιρού και κλιμάτων (Błażejczyk et al., 2010)
SET (°C)	Gonzalez et al., 1974	Κυρίως για εσωτερικούς χώρους εφαρμόζεται και σε εξωτερικούς	Κλίμακα 4 σημείων: Από κρύο έως ακραία ζέστη	Από μέτρια έως θερμά κλίματα	Σχεδιασμένο κυρίως για ζεστά κλίματα

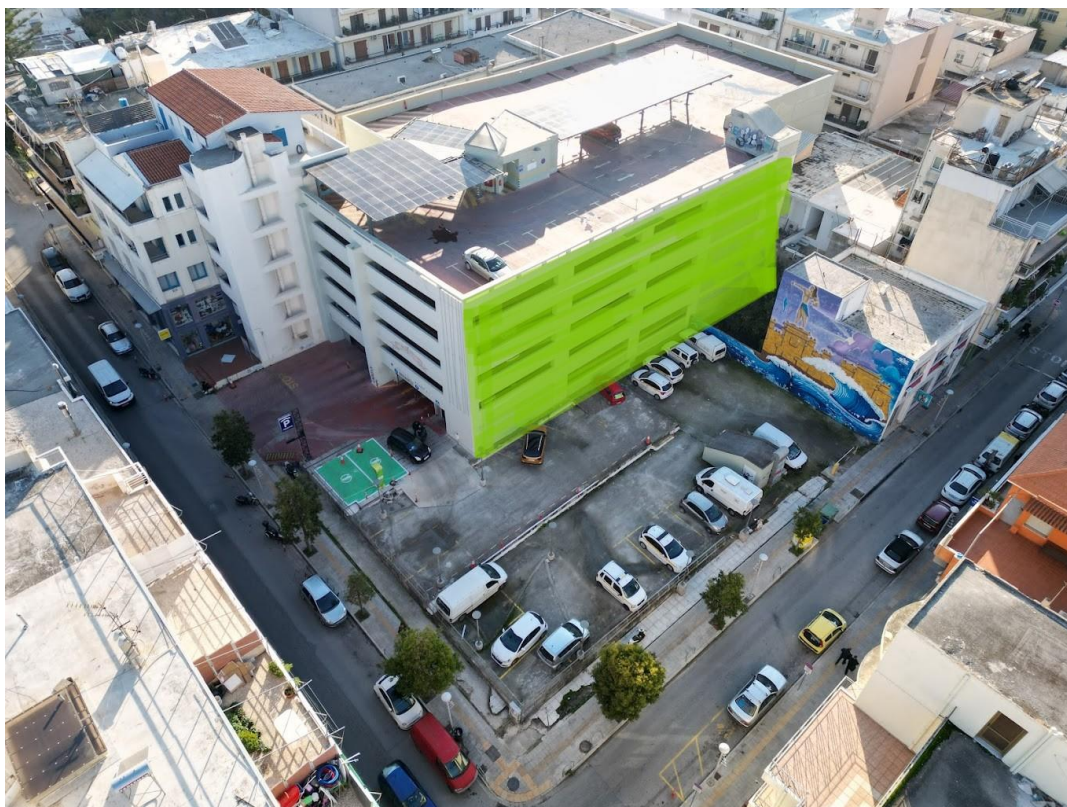
Μελέτες που χρησιμοποιούν τους παραπάνω δείκτες δείχνουν ότι οι άνθρωποι προσαρμόζονται στο κλίμα στο οποίο ζουν. Για παράδειγμα, υπάρχει σύνδεση μεταξύ των θερμοκρασιών που οι άνθρωποι θεωρούν άνετες και των τυπικών υψηλών και χαμηλών θερμοκρασιών στην περιοχή τους. Επιπρόσθετα, οι μελέτες αυτές δείχνουν ότι οι άνθρωποι γενικά διαχειρίζονται καλύτερα τον κρύο καιρό απ' ό,τι τον πολύ ζεστό. Συγκεκριμένα για τους δείκτες PET και UTCI, ενώ υπολογίζουν την άνεση με διαφορετικούς τρόπους και τα δύο εργαλεία δίνουν παρόμοια αποτελέσματα όταν προσδιορίζουν τι θεωρούν οι άνθρωποι άνετο. Ο PET εστιάζει στον τρόπο με τον οποίο το σώμα εξισορροπεί τη θερμότητα, ενώ ο UTCI χρησιμοποιεί ένα πιο σύνθετο μοντέλο των συστημάτων του σώματος. (Potchter et al., 2018). Οι δείκτες θερμικής άνεσης ενώ είναι χρήσιμα εργαλεία, έχουν αρκετούς περιορισμούς που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη. Μελέτες δείχνουν ότι πολύ συχνά υπάρχουν μεγάλες αποκλίσεις με την πραγματικότητα. Συχνά τα απλοποιημένα μαθηματικά μοντέλα δε λαμβάνουν υπόψη τους δυναμικούς παράγοντες του περιβάλλοντος, τα τοπικά μικροκλίματα αλλά και ατομικούς παράγοντες, όπως η ένδυση, το φύλλο, η ηλικία και ο μεταβολισμός του κάθε ανθρώπου (Jang et al., 2007).

## 2 Μεθοδολογία

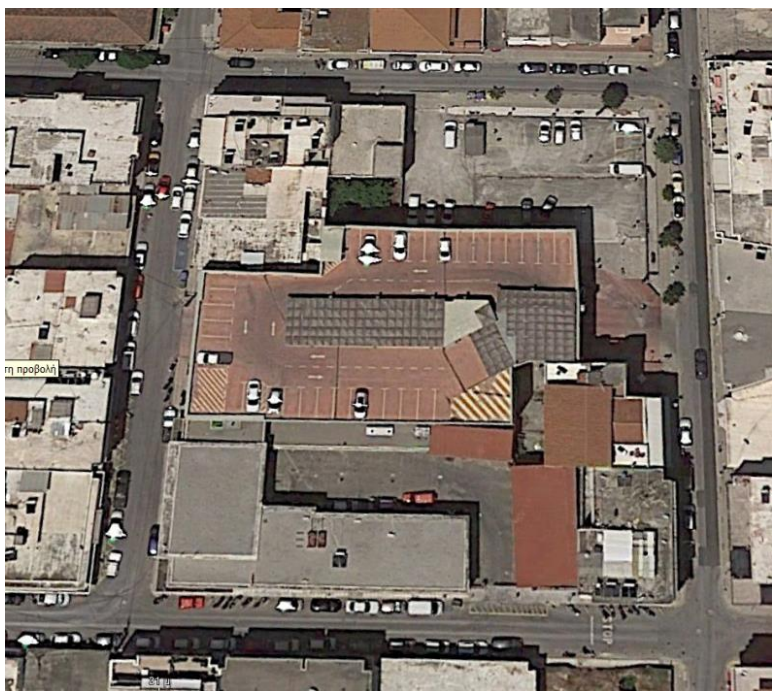
Για την αξιολόγηση των οφελών των πράσινων τοίχων στην πόλη, η εργασία βασίζεται σε μελέτη περίπτωσης. Αφορά ένα κτίριο στο κέντρο των Χανίων, στο οποίο θα εφαρμοστεί πράσινος τοίχος. Χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό προσομοίωσης ENVI-met για τη μοντελοποίηση τριών διαφορετικών παραλλαγών για την επιλεγμένη γειτονιά. Αρχικά η πρώτη προσομοίωση που έτρεξε αποτυπώνει την γειτονιά στην τρέχουσα κατάστασή της, χρησιμεύοντας ως βάση για τις θερμικές συνθήκες. Στη συνέχεια, δημιουργήθηκαν 2 παραλλαγές της αρχικής γειτονιάς, οι οποίες περιλαμβάνουν την εγκατάσταση ενός πράσινου τοίχου με διαφορετικές τεχνικές. Διάφοροι δείκτες, συμπεριλαμβανομένης της επιφανειακής θερμοκρασίας, της θερμοκρασίας του αέρα και της ακτινοβολίας, συγκρίθηκαν πριν και μετά την εγκατάσταση των πράσινων τοίχων για να ποσοτικοποιηθεί ο αντίκτυπός τους στο μικρόκλιμα της γειτονιάς. Επιπλέον, αναλύθηκαν δείκτες θερμικής άνεσης, οι οποίοι λαμβάνουν υπόψη τόσο τις περιβαλλοντικές συνθήκες όσο και την ανθρώπινη αντίληψη της θερμοκρασίας, για να προσδιοριστούν οι βελτιώσεις στη θερμική άνεση. Τα παραπάνω θα επεξηγηθούν αναλυτικά στις υποενότητες που ακολουθούν.

## 2.1 Περιοχή μελέτης και Κλίμα

Το υπό μελέτη κτίριο βρίσκεται στην Κρήτη, στο κέντρο των Χανίων και περιβάλλεται από τις οδούς Υψηλαντών , Περίδου, Γρ Ε και Καραϊσκάκη. Το κτίριο αποτελείται από 5 ορόφους και χρησιμοποιείται ως Parking με την είσοδο του να βρίσκεται επί της Περίδου όπως φαίνεται στην εικόνα 8. Πρόσφατα έχει υπαχθεί στο έργο 'JUSTNature' το οποίο έχει λάβει χρηματοδότηση από το πρόγραμμα έρευνας και καινοτομίας «Horizon 2020» της Ευρωπαϊκής Ένωσης, για τη δημιουργία πράσινου τοίχου επί των οδών Υψηλαντών και Περίδου. Βρίσκεται σε ένα από τα πιο κεντρικά σημεία της πόλης με έντονο το φαινόμενο της κίνησης ιδιαίτερα τους καλοκαιρινούς μήνες, λόγω του έντονου τουρισμού στην περιοχή. Το πράσινο που το περιβάλλει περιορίζεται σε ελάχιστα δέντρα μέτριου ύψους. Στην εικόνα 9 παρουσιάζεται η κάτοψη του κτιρίου από το Google Earth.



Εικόνα 8 Τοίχος του Πάρκινγκ όπου θα τοποθετηθεί η Πράσινη Πρόσοψη στην προσομοίωση  
(Πηγή:<https://kydonparking.gr/>)



**Εικόνα 9 Κάτοψη της γειτονιάς που μοντελοποιήθηκε, το μεγάλο κτίριο στη μέση πρόκειται για το υπό μελέτη κτίριο (Πηγή: Google earth)**

Τα Χανιά είναι μία παραλιακή πόλη της Κρήτης, η δεύτερη μεγαλύτερη σε πληθυσμό. Βρίσκονται σε μία πεδιάδα, στη βάση μίας μεγάλης χερσονήσου, του Ακρωτηρίου. Στα βόρεια η πόλη βρέχεται από το Αιγαίο πέλαγος, ενώ το νότιο τμήμα της πεδιάδας οριοθετείται από την οροσειρά των Λευκών Όρων. Ο δήμος Χανίων, σύμφωνα με τα δημογραφικά στοιχεία του 2021 από την Ελληνική Στατιστική Αρχή, έχει πληθυσμό 111.375 κατοίκων. Η πόλη των Χανίων συγκεκριμένα κατοικείται από 54.559 κατοίκους σε μία έκταση περίπου 12,6 χιλιομέτρων .

Η πόλη φέρει το σημάδι ποικίλων επιδράσεων, καθοριστικές στην αρχιτεκτονική της , η οποία μεταξύ άλλων περιλαμβάνει στυλ Βυζαντινό, Ενετικό, Οθωμανικό και Νεοκλασικό. Από τα τέλη του 19ου αιώνα και μετά η πόλη έχει βιώσει γρήγορη ανάπτυξη ,στην οποία συνέβαλε η ανάδειξη της περιοχής ως κορυφαίος τουριστικός προορισμός κατά τους καλοκαιρινούς μήνες (Deligiorgi κ.ά., 2007).

Η πόλη των Χανίων έχει το τυπικό μεσογειακό κλίμα, το οποίο χαρακτηρίζεται από ζεστά και ξηρά καλοκαίρια και ήπιους χειμώνες. Τα τελευταία χρόνια παρατηρείται αυξημένη βροχόπτωση κατά τους φθινοπωρινούς και χειμερινούς μήνες. Παρότι τα Χανιά είναι μια μεσαίου μεγέθους παράκτια πόλη, η ένταση του φαινομένου της Αστικής Θερμικής Νησίδας το καλοκαίρι είναι εμφανής και επίμονη. Οι συνθήκες άνεσης στον εξωτερικό χώρο χειροτερεύουν καθώς μετακινείται κανείς προς το κέντρο της πόλης, όπου βρίσκεται και το υπό μελέτη κτίριο. Αυτό συμβαίνει διότι οι ψηλές κτιριακές κατασκευές σε συνδυασμό με τον περιορισμένο χώρο πράσινου και την ανθρωπογενή θερμότητα οδηγούν σε μεγαλύτερο θερμικό στρες σε σύγκριση με τις περιαστικές και αγροτικές περιοχές.(Kolokotsa et al., 2009)

Στον πίνακα 3 αποτυπώνονται οι μέσες θερμοκρασίες για τον μήνα Ιούνιο του 2023, καθώς είναι ο μήνας που χρησιμοποιήθηκε κατά την προσομοίωση. Στον πίνακα 2 βλέπουμε τις



μέσες μηνιαίες θερμοκρασίες για την περιοχή της Σούδας Χανίων για τα έτη 1958-2023. Αυτός ο πίνακας μας βοηθά να κατανοήσουμε τις κλιματικές τάσεις και τη θερμοκρασιακή συμπεριφορά της περιοχής σε μακροχρόνια βάση. Μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι τον Ιούνιο του 2023 οι θερμοκρασίες στα Χανιά ήταν ελαφρώς υψηλότερες από τις μέσες θερμοκρασίες της ευρύτερης περιοχής. Επίσης, οι βροχοπτώσεις τον Ιούνιο του 2023 ήταν σημαντικές, με τις τιμές να κυμαίνονται από 23.4mm έως 34mm.

**Πίνακας 3 Μετεωρολογικά δεδομένα Ιουνίου 2023, από τους 3 μετεωρολογικούς σταθμούς στα Χανιά [Πηγή [www.meteo.gr](http://www.meteo.gr)]**

α/α	Μέση μέγιστη θερμοκρασία (°C)	Μέση ελάχιστη θερμοκρασία (°C)	Απόλυτη μέγιστη θερμοκρασία (°C)	Ημέρα	Απόλυτη Ελάχιστη θερμοκρασία (°C)	Ημέρα	Βροχή (mm)
Χανιά-Κέντρο Πόλης	27.5	18.5	31.6	29	14.6	6	23.4
Χανιά-Νότια	28.6	20.4	32.6	25	16.9	3	31
Χανιά-Πολυτεχνείο	28.1	18.5	32.2	25	15.9	2	34

**Πίνακας 4 Μέσα Κλιματικά Δεδομένα περιόδου 1958-2010 για Σούδα Χανίων [Πηγή ΕΜΥ]**

	ΙΑΝ	ΦΕΒ	ΜΑΡ	ΑΠΡ	ΜΑΙ	ΙΟΥΝ	ΙΟΥΛ	ΑΥΓ	ΣΕΠ	ΟΚΤ	ΝΟΕ	ΔΕΚ
Ελάχιστη Μηνιαία Θερμοκρασία (°C)	7.9	7.8	9.0	11.4	15.0	19.0	21.2	21.2	18.7	15.7	12.4	9.7
Μέση Μηνιαία Θερμοκρασία (°C)	11.0	11.0	12.7	15.9	20.2	24.7	26.7	26.3	23.2	19.4	15.8	12.7
Μέγιστη Μηνιαία Θερμοκρασία (°C)	14.4	14.7	16.6	20.0	24.5	28.9	30.7	30.4	27.4	23.5	19.6	16.2
Ελάχιστη Μηνιαία Θερμοκρασία (°C)	7.9	7.8	9.0	11.4	15.0	19.0	21.2	21.2	18.7	15.7	12.4	9.7

## 2.2 Παρουσίαση του λογισμικού ENVI-met

Το ENVI-met είναι ένα λογισμικό ολιστικής, τρισδιάστατης και μη-υδροστατικής μοντελοποίησης υψηλής ανάλυσης. Προσομοιώνει με ακρίβεια πολύπλοκες μικροκλιματικές διεργασίες, αναλύοντας τις επιδράσεις των κτιρίων, της βλάστησης και άλλων αντικειμένων στους τομείς του αστικού σχεδιασμού και προγραμματισμού. (<https://www.envi-met.com/>)

Παρέχει λεπτομερείς γνώσεις σχετικά με τον αντίκτυπο των περιβαλλοντικών παραγόντων στον αστικό σχεδιασμό, υποστηρίζοντας την τεκμηριωμένη λήψη αποφάσεων στον αστικό σχεδιασμό, την ανάπτυξη πράσινων υποδομών και τις στρατηγικές για την κλιματική αλλαγή.

### 2.2.1 Γενικά στοιχεία για το ENVI-met Headquarter 5.5.1

Το μοντέλο ENVI-met είναι ένα προγνωστικό εργαλείο που βασίζεται στους θεμελιώδεις νόμους της δυναμικής των ρευστών και της θερμοδυναμικής. Μέσω αυτού είναι δυνατή η προσομοίωση του αστικού μικροκλίματος, που αποτελείται από δεκάδες διαφορετικά υποσυστήματα. Είναι ικανό για προσομοίωση της ροής αέρα γύρω και μεταξύ των κτιρίων, τις διεργασίες ανταλλαγής στην επιφάνεια του εδάφους και στους τοίχους των κτιρίων, της φυσικής του κτιρίου και της διασποράς των ρύπων. Επίσης, μέσω της προσομοίωσης έχουμε πλήρη εικόνα της γενικότερης βιοκλιματολογίας της περιοχής μοντελοποίησης, καθώς και την επίδραση της βλάστησης στο τοπικό μικρόκlima. Όλα τα συστήματα, από την υδρολογία του εδάφους έως την ενεργειακή προσομοίωση των κτιρίων, υπολογίζονται σε ένα μεγάλο μοντέλο, π.χ. μια αστική συνοικία, επιτρέποντας την αλληλεπίδραση και την υιοθέτησή τους όπως συμβαίνει σε ένα πραγματικό περιβαλλοντικό σύστημα. Το σύστημα ENVI-met παρέχει δεδομένα υψηλής ανάλυσης για οποιοδήποτε από αυτά τα στοιχεία, είτε πρόκειται για ένα κτίριο από όλη την περιοχή μελέτης είτε για ένα δέντρο μέσα από περιοχή με χιλιάδες δέντρα (<https://envi-met.info/doku.php?id=root:start>).

Η κατευθυντήρια αρχή του ENVI-met είναι η ενσωμάτωση όλων αυτών των διαφορετικών προσεγγίσεων σε ένα ενιαίο μοντέλο, έτσι ώστε όλα τα στοιχεία να μπορούν να αλληλοεπιδρούν μεταξύ τους και να αναπαράγουν τις παρατηρούμενες συνέργειες.

Αυτό καθιστά το ENVI-met διαφορετικό από άλλες πλατφόρμες μοντελοποίησης για περιβαλλοντική προσομοίωση, καθώς ενώ υπάρχουν πολλές που υπολογίζουν τη ροή του αέρα μεταξύ των κτιρίων ή την ηλιακή ακτινοβολία στις προσόψεις, λίγες θεωρούν το πολύπλοκο αστικό περιβάλλον ως ενιαίο σύστημα και λαμβάνουν υπόψη το πλήθος των διεργασιών που λαμβάνουν χώρα μεταξύ των στοιχείων. **Αυτός είναι και ο λόγος που επιλέχθηκε το συγκεκριμένο μοντέλο προσομοίωσης για αυτήν τη διπλωματική εργασία.**

Το ENVI-met χρησιμοποιεί προηγμένους αριθμητικούς αλγόριθμους για την ακριβή προσομοίωση πολύπλοκων αλληλεπιδράσεων. Επιτρέπει τη λεπτομερή ανάλυση των μικροκλιματικών συνθηκών εντός των αστικών περιοχών, ειδικά όσον αφορά τη θέρμανση και την ψύξη των κτιρίων και τη θερμική άνεση του ανθρώπου. Ως απάντηση στις

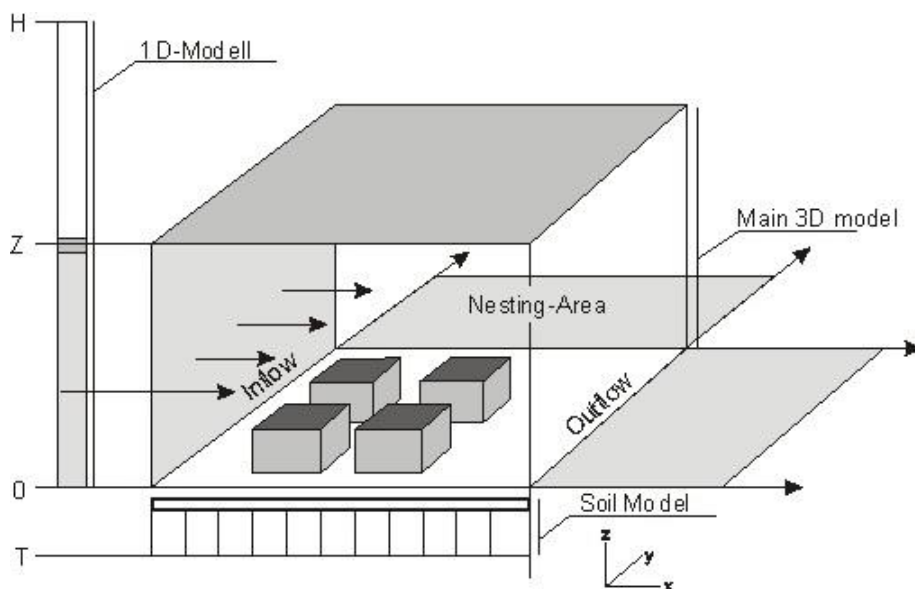
σημαντικές επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής, η ανάπτυξη πιο υγιεινών και ανθεκτικών πόλεων καθίσταται επιτακτική.

Έχει σχεδιαστεί για μικροκλίμακα με τυπική οριζόντια ανάλυση από 0,5 έως 10 m και τυπικό χρονικό πλαίσιο 24 έως 48 ώρες με χρονικό βήμα 1 έως 5 δευτερόλεπτα. Αυτό επιτρέπει την ανάλυση αλληλεπιδράσεων μικρής κλίμακας μεταξύ μεμονωμένων κτιρίων, επιφανειών και φυτών. Ανάλογα με τις δυνατότητες του υπολογιστή και τον χρόνο, μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για την προσομοίωση ολόκληρων μηνών ή ακόμη και ενός ολόκληρου έτους.

Οι υπολογισμοί του μοντέλου περιλαμβάνουν:

- Ροές ακτινοβολίας μικρού και μεγάλου μήκους κύματος σε σχέση με τη σκίαση, την ανάκλαση και την επαναακτινοβολία από τα κτιριακά συστήματα και τη βλάστηση. Παρέχει μοντελοποίηση υψηλής ανάλυσης όλων των ροών ακτινοβολίας, συμπεριλαμβανομένων των πολλαπλών ανακλάσεων σε αστικές περιοχές και της διάχυσης της ακτινοβολίας στα στέγαστρα των δέντρων.
- Διαπνοή, εξάτμιση και ροή αισθητής θερμότητας από τη βλάστηση στον αέρα, συμπεριλαμβανομένης της πλήρους προσομοίωσης όλων των φυσικών παραμέτρων των φυτών (π.χ. ρυθμός φωτοσύνθεσης).
- Δυναμικός υπολογισμός θερμοκρασίας επιφάνειας και θερμοκρασίας τοίχου για κάθε στοιχείο πρόσοψης και οροφής που υποστηρίζει έως και 3 στρώματα υλικών και 7 σημεία υπολογισμού στον τοίχο/την οροφή.
- Υποστήριξη συστημάτων πρασίνου τοίχου/στέγης, συμπεριλαμβανομένου του στρώματος υποστρώματος
- Ανταλλαγή νερού και θερμότητας στο εσωτερικό του εδαφικού συστήματος, συμπεριλαμβανομένης της απορρόφησης νερού από τα φυτά
- Τρισδιάστατη αναπαράσταση της βλάστησης, συμπεριλαμβανομένης της δυναμικής μοντελοποίησης του ισοζυγίου νερού των επιμέρους ειδών
- Διασπορά αερίων και σωματιδίων. Το μοντέλο υποστηρίζει σωματίδια (συμπεριλαμβανομένης της καθίζησης και της απόθεσης στα φύλλα και τις επιφάνειες), αδρανή αέρια και αντιδραστικά αέρια του κύκλου αντίδρασης NO-NO<sub>2</sub>-Ozone.
- Υπολογισμός βιομετεωρολογικών δεικτών όπως η μέση θερμοκρασία ακτινοβολίας, PMV/PPD, PET ή UTCI μέσω του BioMet

### 2.2.2 Δομή του μοντέλου ENVI-met



Εικόνα 10 Βασική διάταξη μοντέλου ENVI-met [Πηγή: [www.envi-met.com](http://www.envi-met.com)]

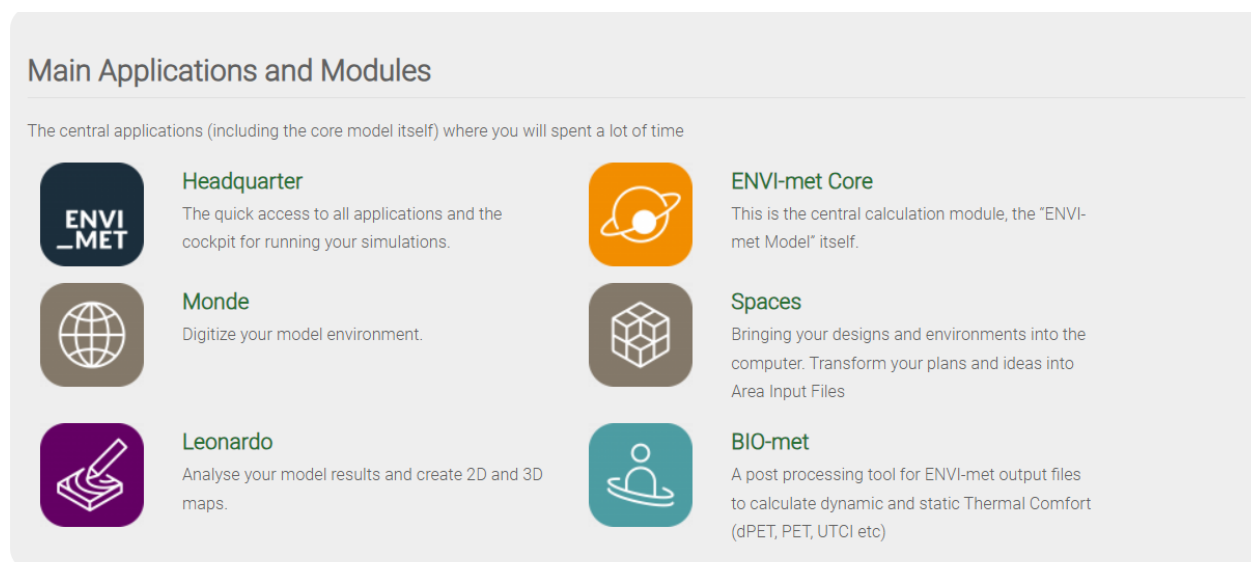
Το παραπάνω σχέδιο αποτυπώνει μία πολύ βασική δομή ενός μοντέλου μικροκλίματος που χρησιμοποιεί το ENVI-met. Ο γενικός σχεδιασμός δεν είναι μόνο ειδικός για το ENVI-met αλλά χρησιμοποιείται από σχεδόν όλα τα 3D αριθμητικά μοντέλα. Το κύριο μοντέλο σχεδιάζεται σε 3D με 2 οριζόντιες διαστάσεις (x και y) και μία κατακόρυφη διάσταση (z). Μέσα σε αυτό το κύριο μοντέλο, τοποθετούνται τα τυπικά στοιχεία που αντιπροσωπεύουν την περιοχή ενδιαφέροντος: κτίρια, βλάστηση, διαφορετικοί τύποι επιφανειών. Για να χρησιμοποιηθεί ένα αριθμητικό μοντέλο, η περιοχή ενδιαφέροντος πρέπει να αναχθεί σε 'κελιά πλέγματος' (grid cells), δηλαδή υπολογιστικά κελιά. Όσο μικρότερο είναι ένα μεμονωμένο κελί πλέγματος, τόσο πιο λεπτομερής είναι η ανάλυση του μοντέλου. Από την άλλη πλευρά, το να γίνουν τα κελιά του πλέγματος μικρά σημαίνει ότι απαιτούνται περισσότερα κελιά για την κάλυψη μιας συγκεκριμένης περιοχής. Για κάθε προσομοίωση, πρέπει να βρεθεί ένας συμβιβασμός μεταξύ της ακρίβειας και της ανάλυσης του μοντέλου και του αριθμού των επεξεργάσιμων κελιών πλέγματος.

Το ENVI-met χρησιμοποιεί διάφορες στρατηγικές για να καλύψει όσο το δυνατόν μεγαλύτερο χώρο με λιγότερα σημεία πλέγματος λόγω του περιορισμένου χώρου και της μνήμης. Μία από αυτές τις στρατηγικές είναι η χρήση ενός πρόσθετου μοντέλου 1D που υπολογίζει τις διεργασίες του οριακού στρώματος, δηλαδή του στρώματος αέρα που βρίσκεται ακριβώς πάνω από τις επιφάνειες (έδαφος, κτίρια, βλάστηση) και επηρεάζεται άμεσα από αυτές. Το οριακό στρώμα είναι μια περιοχή όπου παρατηρούνται έντονες μεταβολές στη θερμοκρασία, την υγρασία και την ταχύτητα του ανέμου, καθώς ο αέρας αλληλοεπιδρά με τις επιφάνειες του περιβάλλοντος. Επιπλέον, το 1D μοντέλο παρέχει τα κατακόρυφα προφίλ όλων των μεταβλητών για το όριο εισροής του 3D μοντέλου. Μια άλλη στρατηγική είναι η χρήση του 'Nesting Area', όπου όσο πιο μακριά είναι τα κελιά από τον πυρήνα του μοντέλου, τόσο μεγαλύτερο είναι το μέγεθός τους. Αυτό επιτρέπει τη μετακίνηση των ορίων του μοντέλου χωρίς να σπαταλούνται πολλά κελιά. Τέλος, το μοντέλο εδάφους (Soil Model) είναι απαραίτητο για τον υπολογισμό της μεταφοράς θερμότητας από τις επιφάνειες στο έδαφος και αντίστροφα, καθώς και για τις υδρολογικές πληροφορίες του



εδάφους. Τα δεδομένα αυτά είναι απαραίτητα για την εκτίμηση της μέγιστης διαπνοής της βλάστησης και του διαθέσιμου νερού στην επιφάνεια του εδάφους.

Στο αρχικό παράθυρο του λογισμικού (Headquarter) ανοίγουν οι υπόλοιπες από τις εφαρμογές που φαίνονται στην εικόνα 11. Συνοπτικά, στην εφαρμογή **Spaces** γίνεται η εισαγωγή των διαστάσεων και η τοποθεσία της περιοχής ενδιαφέροντος και στη συνέχεια ο σχεδιασμός της. Στη συνέχεια για την προσομοίωση της περιοχής ενδιαφέροντος χρησιμοποιείται αρχικά η εφαρμογή **ENVI-guide** όπου εισάγονται τα κατάλληλα κλιματικά και χρονικά δεδομένα, και στη συνέχεια η εφαρμογή **ENVI-core** όπου και 'τρέχει' η προσομοίωση. Το **Bio-met** υπολογίζει διάφορους δείκτες θερμικής άνεσης. Μετά το πέρας της προσομοίωσης, γίνεται η οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων μέσω διάφορων χαρτών, με την εφαρμογή **Leonardo**.



**Εικόνα 11 Εφαρμογές του ENVI-met [Screenshot από [www.envi-met.com](http://www.envi-met.com)]**

Στην εικόνα 12 αποτυπώνονται κάποιες επιπλέον βοηθητικές εφαρμογές όπου μπορεί να γίνει επεξεργασία, ακόμα και να δημιουργηθούν καινούρια υλικά, τοίχοι, φυτά (3D και μη) κλπ.

## System and Helper Applications

These are the "smaller" applications - but never the less very important for your simulation work



### DBManager

With the Database Manager you can edit, add or modify all kind of materials, soils or other physical settings used in ENVI-met.



### Albero

Green your world! With Albero, you can design functional 3D and QSM vegetation ready to run in your ENVI-met model



### ENVIGuide

Create new simulations files (.SIMX) or edit existing ones on an interactive basis.



### Forcing Manager

Import and analyse weather data and generate input files for full forcing



### Manage Workspaces and Projects

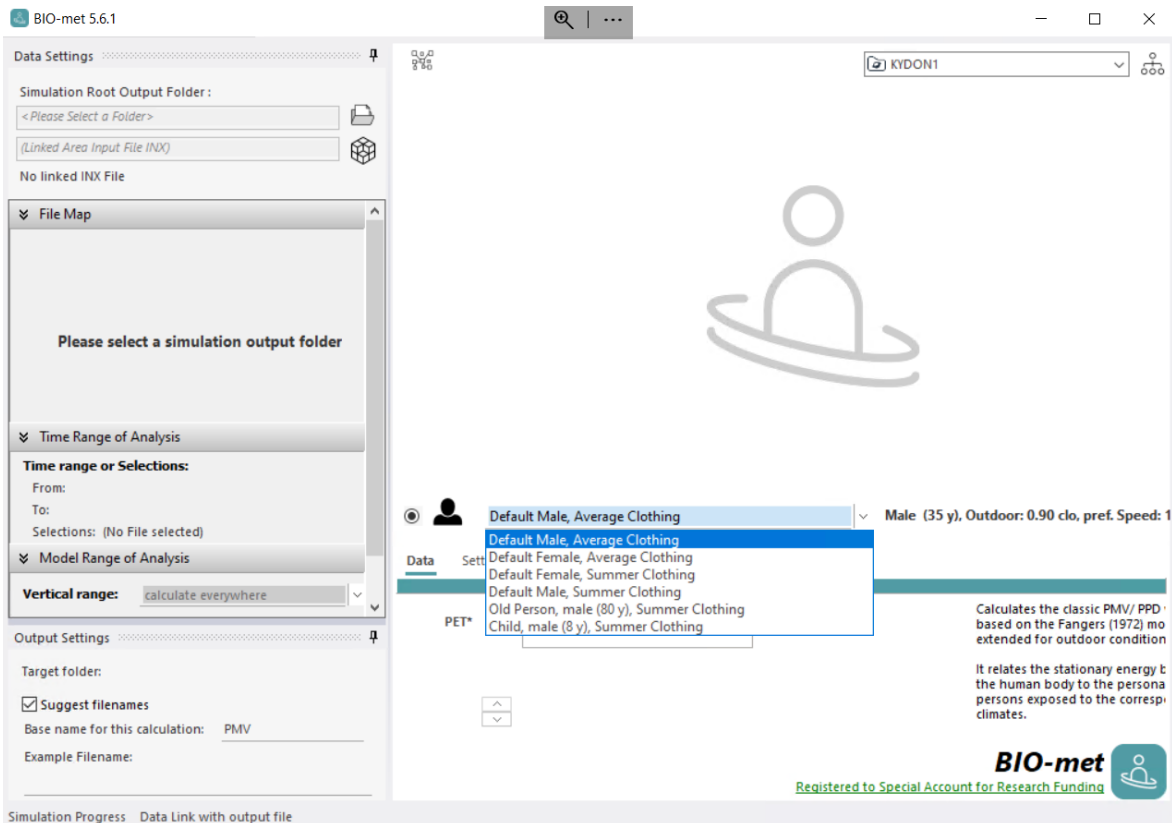
Organize your ENVI-met system into Workspaces and projects and define the individual settings for your simulation projects.

Εικόνα 12 Βοηθητικές εφαρμογές του ENVI-met [Screenshot από [www.envi-met.com](http://www.envi-met.com)]

### 2.2.3 Υπολογισμός βιομετεωρολογικών δεικτών μέσω του Bio-met

Για τους δείκτες θερμικής άνεσης, πριν την οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων σε χάρτες, χρειάζεται ή χρήση της εφαρμογής **Bio-met**. Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι όλοι οι δείκτες που υπολογίζονται, έχουν τροποποιηθεί από το ENVI-met ανάλογα, ώστε να ανταποκρίνονται στο εξωτερικό περιβάλλον.

Εισάγοντας τους output φακέλους μετά το πέρας της προσομοίωσης, επιλέγεται ο δείκτης που επιθυμούμε να υπολογιστεί το χρονικό πλαίσιο καθώς και το ύψος μέσα στην προσομοίωση και στη συνέχεια 'τρέχει' μία επιπλέον προσομοίωση, ώστε να υπολογιστεί ο δείκτης αυτός. Για να είναι πιο ρεαλιστικό το μοντέλο, καθώς κάθε άνθρωπος έχει διαφορετική αντίληψη της θερμικής άνεσης, το Bio-met δίνει τη δυνατότητα επιλογής συγκεκριμένου προφίλ γύρω από το οποίο θα υπολογιστούν οι δείκτες θερμικής άνεσης.(εικόνα 13).



Εικόνα 13 Περιβάλλον Bio-met (Πηγή: προσωπική εργασία)

Μόλις ολοκληρωθεί η άντληση των δεδομένων , δημιουργείται ένας καινούριος φάκελος ‘bio-met’, ο οποίος στη συνέχεια επεξεργάζεται στην εφαρμογή Leonardo.

Συγκεκριμένα, οι τύποι που χρησιμοποιεί το Bio-met για τους δείκτες θερμικής άνεσης φαίνονται στον παρακάτω:

### Δείκτες PMV και PPD

Η βασική εξίσωση PMV για όλες τις περιπτώσεις, εσωτερικές και εξωτερικές, δίνεται από τη σχέση

$$PMV = \left[ 0.028 + 0.30 \times \exp \left( -0.036 \times \frac{M}{A_{Du}} \right) \right] \times \left( \frac{H}{A_{Du}} - E_d - E_{sw} - E_{re} - L - R - C \right) \quad (1)$$

Όπου,  $M$  είναι ο μεταβολικός ρυθμός ( $W/m^2$ ) ,  $A_{Du}$  η επιφάνεια σώματος κατά DuBois ( $m^2$ ),

$H/A_{Du}$  είναι η εσωτερική απομένουσα ενέργεια,  $E_d$  η λανθάνουσα θερμότητα που χάνεται μέσω διάχυσης ατμού από το δέρμα,  $E_{sw}$  η λανθάνουσα θερμότητα λόγω εφίδρωσης,

$E_{re}$  η λανθάνουσα θερμότητα που χάνεται μέσω της αναπνοής,  $L$  η αισθητή θερμότητα από την αναπνοή,

R η ανταλλαγή ακτινοβολούμενης θερμότητας με το περιβάλλον και C η ανταλλαγή θερμότητας μέσω συναγωγής.

$$E_d = 0.30 \times (7.3 - .07 \times \frac{H}{A_{\Delta\theta}} - e) \quad (2)$$

Όπου e η πίεση ατμών του αέρα (hPa)

$$E_{sw} = 0.42 \times (\frac{H}{A_{Du}} - 58) \quad (3)$$

$$E_{re} = 0.0017 \times M/A_{Du} \times (58.7 - e) \quad (4)$$

$$L = 0.0014 \times \frac{M}{A_{Du}} \times (34 - t_a) \quad (5)$$

Όπου  $t_a$  η θερμοκρασία αέρα (°C)

$$R = 3.95 \times 10^{-8} \times f_{cl} \times (T_{cl}^4 - T_{mrt}^4) \quad (5)$$

Όπου  $f_{cl}$  συντελεστής διεύρυνσης της περιοχής του σώματος λόγω στρώματος ρουχισμού,

$$f_{cl} = 1.0 + I_{cl} \times 0.115 \quad (6)$$

όπου  $I_{cl}$  η θερμική αντίσταση των ρούχων (clo),

$T_{cl}$  η επιφανειακή θερμοκρασία του στρώματος ρουχισμού σε [K],

$T_{mrt}$  η μέση θερμοκρασία ακτινοβολίας του περιβάλλοντος σε [K].

$$C = f_{cl} \times h_c \times (t_{cl} - t_l) \quad (6)$$

Όπου  $h_c$  ο συντελεστής τυρβώδους μεταφοράς θερμότητας για τη θερμότητα μεταξύ ενδυμάτων και αέρα, με

$$h_c = \max(2.0 \times (t_{cl} - t_a), 121.1 \times \sqrt{W}) \quad (7)$$

Όπου W είναι η σχετική ταχύτητα του ανέμου στην επιφάνεια του σώματος. Στο Bio-met, υποθέτουν ότι για εξωτερικές συνθήκες

$$W = \max(u(x, y, z), v_p) \quad (8)$$

Όπου  $u(x, y, z)$  είναι η τοπική ταχύτητα ανέμου και  $v_p$  η ταχύτητα βάδισης του ατόμου.

Οι βασικές παράμετροι εισόδου περιλαμβάνουν τη θερμοκρασία αέρα ( $T_a$ ) τη μέση θερμοκρασία ακτινοβολίας ( $T_{\text{mt}}$ ), την ταχύτητα ανέμου ( $u$ ) και την ατμοσφαιρική πίεση υδρατμών ( $e$ ) καθώς και προσωπικά χαρακτηριστικά όπως η θερμική αντίσταση των ρούχων ( $I_{\text{cl}}$ ) και η μεταβολική δραστηριότητα ( $M$ ). Το ENVI-met επιλύει την εξίσωση **PMV** επαναληπτικά για την εξισορρόπηση των ροών ενέργειας. Για εφαρμογές σε εξωτερικούς χώρους, το μοντέλο προσαρμόζεται συμπεριλαμβάνοντας παράγοντες όπως τα αυξημένα φορτία ακτινοβολίας, οι υψηλότερες ταχύτητες ανέμου και ο μειωμένος εξαερισμός σε ανοιχτούς χώρους.

Ο **Δείκτης PPD**, που προκύπτει από το άμεσα από το δείκτη PMV, καθώς προβλέπει το ποσοστό των ατόμων που είναι δυσαρεστημένα με το θερμικό τους περιβάλλον χρησιμοποιώντας μια εμπειρική σχέση:

$$PPD = 100 - 95 \times \exp(-0.0333 \times PMV^4 - 0,2179 \times PMV^2)$$

Ο υπολογισμός του PMV/PPD στο ENVI-met έχει προσαρμοστεί ειδικά για εξωτερικές συνθήκες. Αν και αρχικά σχεδιασμένο για εσωτερικά περιβάλλοντα, το μοντέλο προσαρμόζει τον δείκτη PMV ώστε να λαμβάνει υπόψη τις πολυπλοκότητες του εξωτερικού περιβάλλοντος, όπως οι υψηλότερες ακτινοβολιακές φορτίσεις και οι αυξημένες συναγωγικές απώλειες θερμότητας.

### Δείκτης PET

Στο ENVI-met, η βασική ιδέα πίσω από το δείκτη PET για ένα υπαίθριο περιβάλλον είναι η εξής:

1. Καθορισμός όλων των εισερχόμενων και εξερχόμενων ροών στο ανθρώπινο σώμα
2. Υπολογισμός της θερμοκρασίας του δέρματος και του πυρήνα, που ταιριάζει με όλες τις υπολογισμένες ροές
3. Μεταφορά του ατόμου σε εσωτερικό περιβάλλον
4. Επαναφορά όλων των δεδομένων που δεν είναι διαθέσιμα σε εσωτερικό περιβάλλον (άμεση ηλιακή ακτινοβολία, αναγκαστική κίνηση του ανέμου)
5. Αναζήτηση για μια εσωτερική θερμοκρασία αέρα (ως μοναδική παράμετρο) που οδηγεί στην ίδια θερμοκρασία δέρματος και πυρήνα με την εξωτερική ρύθμιση.

Αυτή η θεωρητικά υπολογισμένη εσωτερική θερμοκρασία ονομάζεται PET.

### Δείκτης UTCI

Όπως εφαρμόζεται στο ENVI-met, υπολογίζεται με τη χρήση πολυωνυμικής παλινδρόμησης 6ου βαθμού (6th-order polynomial regression function), η οποία εκτιμά τον

UTCI με βάση βασικές μετεωρολογικές παραμέτρους, όπως η ταχύτητα ανέμου, η θερμοκρασία αέρα, η μέση θερμοκρασία ακτινοβολίας και η πίεση υδρατμών. Ο υπολογισμός του UTCI απαιτεί την ταχύτητα ανέμου σε ύψος αναφοράς 10 μέτρων. Ωστόσο, το ENVI-met χρησιμοποιεί τα τοπικά δεδομένα ταχύτητας ανέμου στο επίπεδο των πεζών και τα προσαρμόζει στο ύψος των 10 μέτρων μέσω του λογαριθμικού προφίλ ισχύος του ανέμου:

$$Wind_{10m} = \left[ \frac{\ln\left(\frac{10}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{z_{level}}{z_0}\right)} \right] \times Wind_{z_{level}}$$

Όπου  $Wind_{10m}$  η ταχύτητα ανέμου στα 10 μέτρα ύψος,

$z_0$  το μήκος τραχύτητας της επιφάνειας,

$Wind_{z_{level}}$  γ τοπική ταχύτητα ανέμου στο επίπεδο των πεζών .

Η μέθοδος αυτή διασφαλίζει την κλιμάκωση όλων των μετεωρολογικών παραμέτρων (π.χ. θερμοκρασία και ταχύτητα ανέμου) σύμφωνα με τις απαιτήσεις του μοντέλου UTCI. Παρόλο που η **τιμή τραχύτητας  $z_0$**  μπορεί να είναι άγνωστη σε σύνθετες αστικές περιοχές, το ENVI-met παρέχει λεπτομερή υπολογιστικά δεδομένα ροής ανέμου για όλα τα επίπεδα.

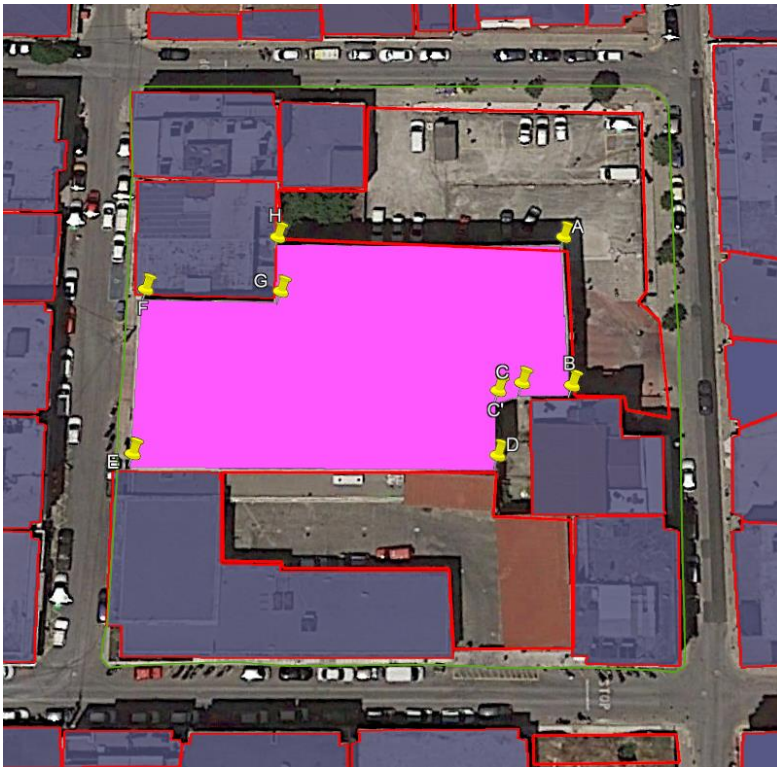
#### Δείκτης SET

Το λογισμικό Envi-met υπολογίζει την πρότυπη πραγματική θερμοκρασία (SET) σύμφωνα με το πρότυπο ASHRAE 55-2013 χωρίς περαιτέρω τροποποιήσεις.

## **2.3 Σχεδιασμός και κατασκευή**

### **2.3.1 Μοντελοποίηση της περιοχής στο λογισμικό ENVI-met.**

Αρχικά, δημιουργήθηκε το αρχείο εισαγωγής δεδομένων (input file) μέσω της εφαρμογής Spaces. Έπρεπε να δημιουργηθεί μία απλουστευμένη εικόνα-φόντο της υπό μελέτη περιοχής (εικόνα 14) , ώστε να τοποθετηθούν με ακρίβεια επάνω στον κάνναβο σχεδιασμού τα κτίρια, οι δρόμοι και τα δέντρα. Για την επίτευξη του διακριτού διαχωρισμού των κτιρίων με τη μεγαλύτερη δυνατή λεπτομέρεια, μέσω του προγράμματος Google Earth δημιουργήθηκε η παρακάτω εικόνα όπου είναι διαχωρισμένα τα κτίρια. Το έντονο ροζ κτίριο αποτελεί το υπό μελέτη κτίριο.



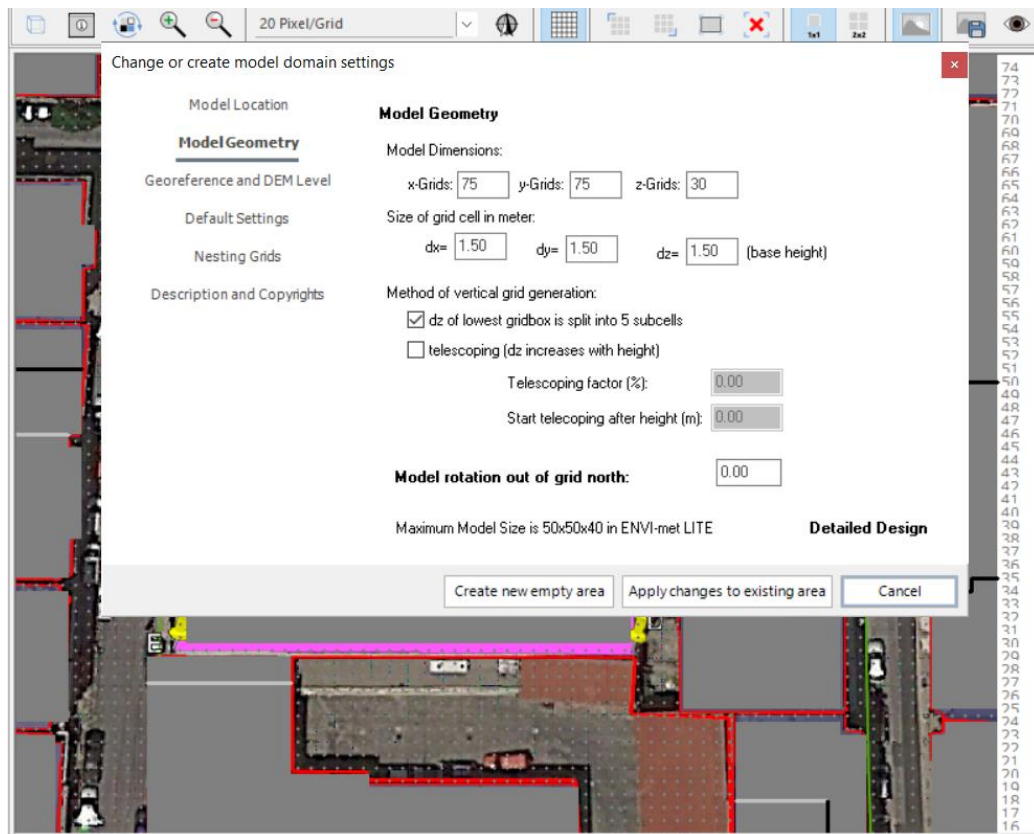
Εικόνα 14 Φόντο για την μοντελοποίηση (Πηγή: Προσωπικό Αρχείο)

Για τα ύψη και τυχόν ιδιαιτερότητες του κάθε κτιρίου, καθώς και για την καταγραφή των φυτών στην περιοχή μελέτης, έγινε δια ζώσης καταγραφή.



Εικόνα 15 Φωτογραφία επί της οδού Περίδου (Πηγή: Προσωπικό Αρχείο)

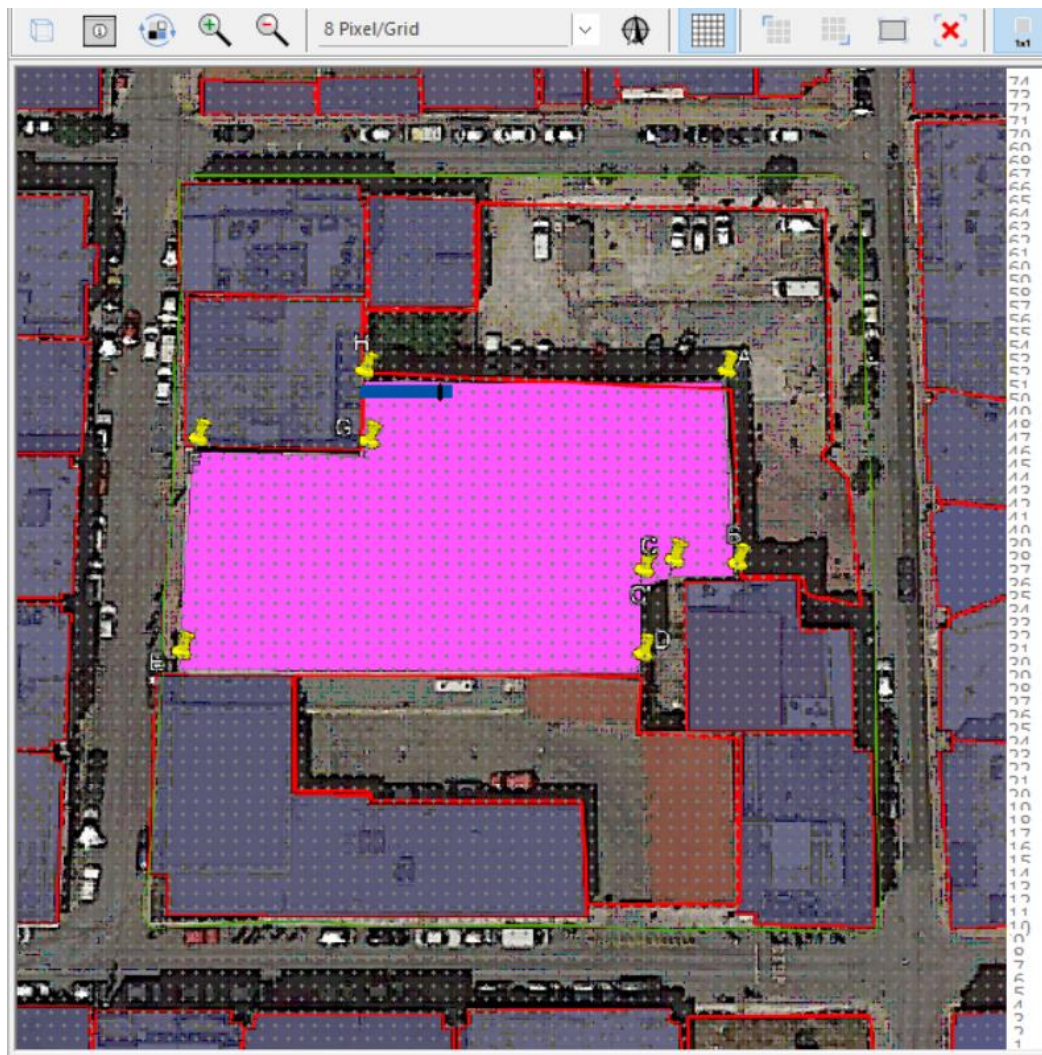
Αρχικά, ξεκινώντας τη διαδικασία της μοντελοποίησης, πρέπει να οριστούν οι διαστάσεις του μοντέλου. Κατά προσέγγιση, υπολογίστηκαν οι διαστάσεις της περιοχής, στα 110\*110 m και ότι το ψηλότερο δεν ξεπερνά τα 15 μέτρα. Ύστερα από πολλαπλές δοκιμές, οι διαστάσεις του κάθε κελιού ορίστηκαν ως  $dx=1.5m$  και  $dy=1.5m$ , για την περισσότερη δυνατή λεπτομέρεια. Το  $dz$  ορίστηκε ομοίως στα 1.5m. Οι διαστάσεις του μοντέλου ορίστηκαν ως 75\*75\*30. Βασικός κανόνας για τη μοντελοποίηση στο ENVI-met είναι το ύψος του μοντέλου να είναι τουλάχιστον διπλάσιο από το ύψος του ψηλότερου κτιρίου. Το αποτέλεσμα αποτυπώνεται στην εικόνα 17.



Εικόνα 16 Διαστάσεις μοντέλου (Πηγή: Προσωπικό Αρχείο)

Στη συνέχεια, ορίστηκε ως περιοχή μελέτης τα Χανιά και αυτόματα από τη βάση δεδομένων του λογισμικού ορίστηκαν τα γεωγραφικά στοιχεία και το υψόμετρο. Επιλέγοντας το 'Select Bitmap' στο εικονίδιο 'Digitize' τοποθετήθηκε η φωτογραφία του υποβάθρου η οποία έπρεπε να είναι αρχείο .bmp. Η φωτογραφία λήφθηκε από το Google Earth και φαίνεται όλο το οικοδομικό τετράγωνο και το εξωτερικό περιβάλλον. Με βάση την εικόνα αλλά και με δια ζώσης παρατήρηση της περιοχής όπως προαναφέρθηκε, άρχισαν να δημιουργούνται τα κτίρια, έπειτα οι δρόμοι, τα 3D φυτά αλλά και τα υλικά επίστρωσης.





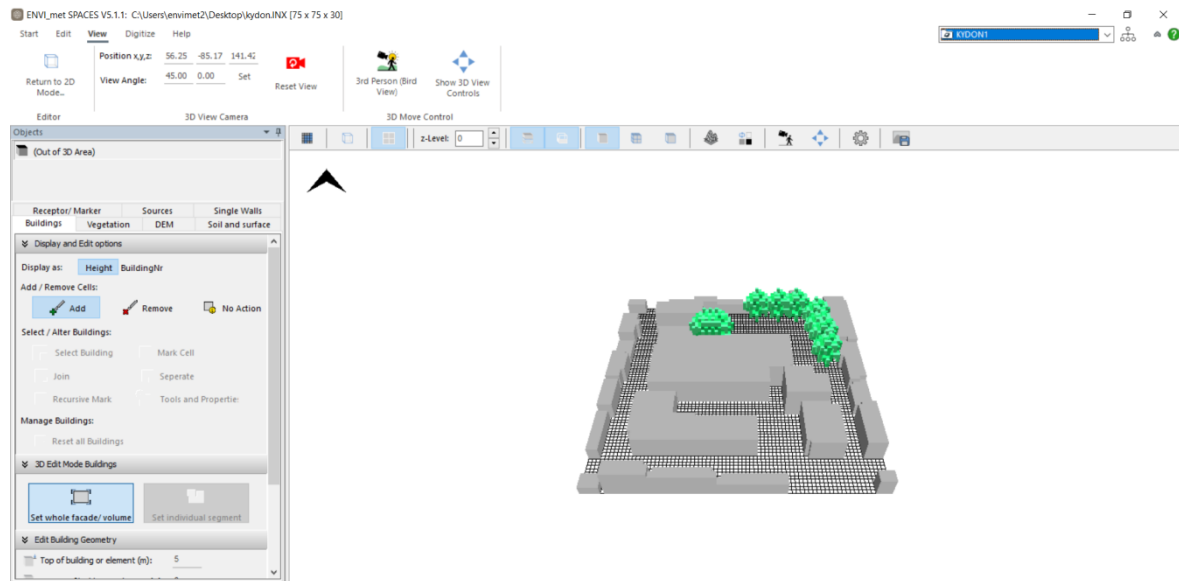
Εικόνα 17 (Πηγή: προσωπικό αρχείο)

Συγκεκριμένα, τα υλικά /οι τοίχοι που χρησιμοποιήθηκαν για το μοντέλο:

- για τη δημιουργία των κτιρίων ο τοίχος Default Wall-moderate insulation
- Στο χώρο που τοποθετήθηκαν κτίρια το υλικό Default unsealed Soil
- Για πεζοδρόμια το υλικό PG Concrete Pavement Gray
- Κατά μήκος των δρόμων το υλικό ST Asphalt Road
- Το υλικό [0000]Loamy soil σε 2 σημεία όπου υπήρχε χώμα
- Για να αποτυπωθούν τα ανοίγματα που έχει ο τοίχος που θα τοποθετηθεί η πράσινη πρόσοψη δημιουργήθηκε 'υλικό' που ονομάστηκε parking air και αποτελείται από αέρα.

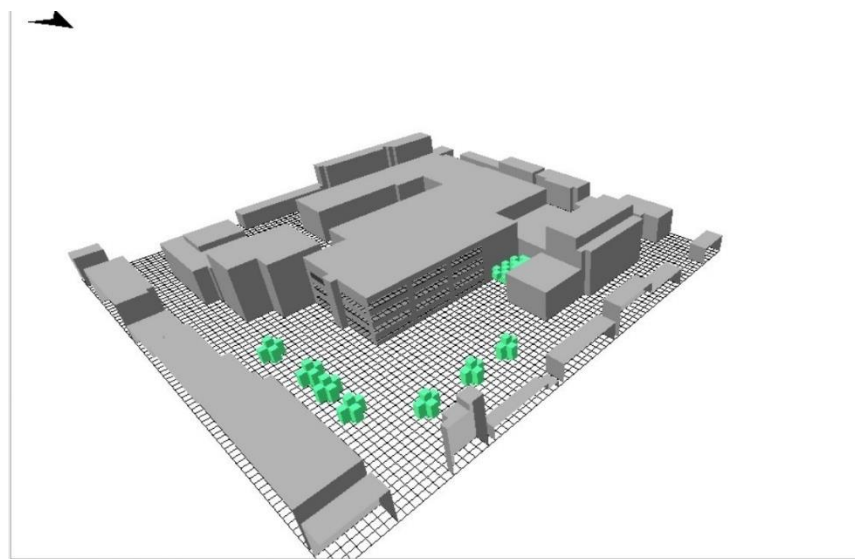
Όσον αφορά τη βλάστηση, το Envi-met προσφέρει μεγάλη βάση δεδομένων με πολλά είδη φυτών . Τα λίγα και χαμηλά δέντρα που απαντώνται στην περιοχή μελέτης, ύστερα από έρευνα αποτυπώθηκαν στην προσομοίωση χρησιμοποιώντας το 3D φυτό 3D PLANT [01SSSSS] Spherical, small tunk, sparse, small (5m) που ανήκει στην οικογένεια των φυτών Senegalia Greggii. Τα 3D φυτά, σε αντίθεση με τα 2D, ενώ τοποθετούνται σε ένα κελί του

καννάβου, ο χώρος που καταλαμβάνουν στην τρισδιάστατη εικόνα του μοντέλου ανταποκρίνεται στην πραγματικότητα, όπως φαίνεται και στην εικόνα 18. Γενικότερα δεν υπήρχε περαιτέρω φύτευση στην περιοχή, εκτός από ελάχιστο διάσπαρτο γρασίδι ανάμεσα σε πεζοδρόμια, το οποίο θεωρήθηκε αμελητέο και δεν τοποθετήθηκε στο μοντέλο.



Εικόνα 18 Τρισδιάστατη μορφή του ολοκληρωμένου μοντέλου (Πηγή προσωπική εργασία)

Στο τέλος ανοίχθηκε η τρισδιάστατη θέαση και με κλικ στην επιλογή '*convert to detailed design*' τοποθετήθηκαν τα προαναφερόμενα ανοίγματα που έχει ο τοίχος του υπό μελέτη κτιρίου. Το μοντέλο της αρχικής κατάστασης της υπό μελέτη περιοχής είναι έτοιμο. Η περιοχή του μοντέλου αποθηκεύεται σε αρχείο '.inx'.



Εικόνα 19 Προσθήκη ανοιγμάτων (Πηγή: προσωπική εργασία)

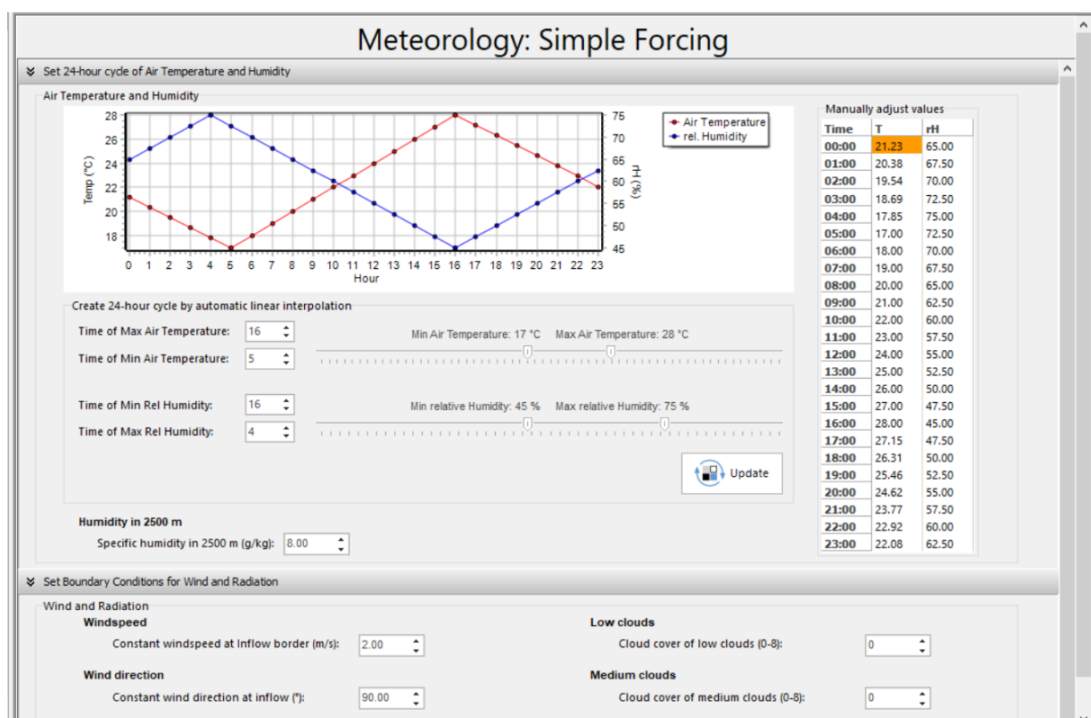
## 2.4 Έναρξη της προσομοίωσης και ανάπτυξη παραλλαγών

Σε αυτό το σημείο η αρχική κατάσταση της υπό μελέτη περιοχής ήταν έτοιμη για την προσομοίωση.

Αρχικά, ανοίγοντας το πρόγραμμα ENVI-guide και επιλέγοντας το project , εισάγεται το input file που κατασκευάστηκε και στη συνέχεια οι γενικές ρυθμίσεις και τα μετεωρολογικά δεδομένα.

Συγκεκριμένα τα δεδομένα που εισάχθηκαν ήταν τα εξής:

- Ημερομηνία προσομοίωσης : 15/06/2023
- Ώρα έναρξης της προσομοίωσης 05.00.00
- Συνολικός χρόνος της προσομοίωσης : 24 ώρες
- Ώρα μέγιστης θερμοκρασίας αέρα: 16.00
- Ώρα ελάχιστης θερμοκρασίας αέρα: 5.00
- Μέγιστη θερμοκρασία αέρα: 28 °C
- Ελάχιστη θερμοκρασία αέρα: 17 °C
- Ώρα μέγιστης σχετικής υγρασίας: 4.00
- Ώρα ελάχιστης σχετικής υγρασίας: 16.00
- Μέγιστη σχετική υγρασία: 75%
- Ελάχιστη σχετική υγρασία: 45%



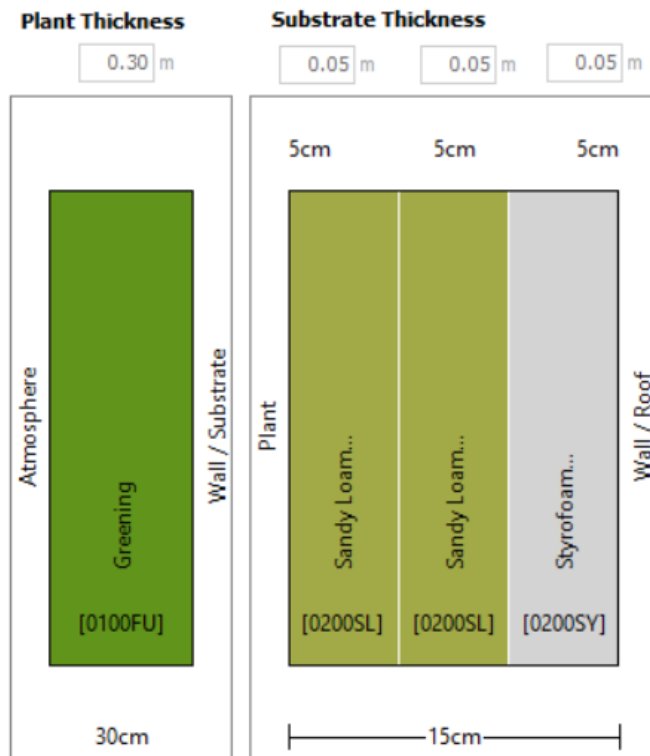
Εικόνα 20 Μετεωρολογικά δεδομένα στο ENVI-guide (Πηγή: προσωπική εργασία)

Ανοίγοντας το πρόγραμμα EVNI-core έγινε ένας έλεγχος ώστε να εντοπιστούν πιθανά σφάλματα. Μόλις το μοντέλο ήταν έτοιμο και ο έλεγχος δεν έβγαζε τυχόν λάθη, άρχισε η προσομοίωση επιλέγοντας *'run simulation'*. Αξίζει να επισημανθεί ότι χρειάστηκε πάνω από μία εβδομάδα για να ολοκληρωθεί ο κύκλος των 24 ωρών. Στο τέλος εμφανίζεται μήνυμα ότι ολοκληρώθηκε η προσομοίωση.

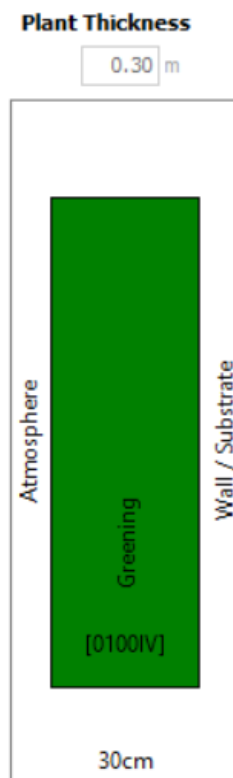
#### 2.4.1 Παραλλαγές

Για της παραλλαγές με την πράσινη πρόσοψη, στο υπάρχον αρχείο της αρχικής κατάστασης της υπό μελέτης περιοχής, ανοίχθηκε η τρισδιάστατη θέαση και με την επιλογή *'convert to detailed design'* τοποθετήθηκαν οι πράσινες προσόψεις. Μόλις ολοκληρώθηκε ο σχεδιασμός των παραλλαγών, αποθηκεύτηκαν αυτά τα δύο νέα input files. Με τις ίδιες ακριβώς ρυθμίσεις που περιεγράφηκαν παραπάνω έτρεξαν οι δύο νέες προσομοιώσεις και ολοκληρώθηκε το πειραματικό στάδιο της εργασίας.

- Στην πρώτη παραλλαγή επιλέχθηκε **πράσινη πρόσοψη με υπόστρωμα**. Συγκεκριμένα στις επιλογές των πράσινων προσόψεων επιλέχθηκε *Default Greenings with air gap* και έπειτα *green and sandy loam substrate* του οποίου η σύνθεση φαίνεται στην εικόνα 21. Το φυτό που χρησιμοποιεί το ENVI-met στη συγκεκριμένη επιλογή, είναι το *Funkia Hosta* (Χόστα). Είναι ποώδη πολυετή φυτά. Έχουν πλατιά λογχοειδή ή ωοειδή φύλλα που ποικίλλουν ευρέως σε μέγεθος ανάλογα με το είδος από 2,5-45,7 cm μήκος και 2-30 cm πλάτος. Οι μικρότερες ποικιλίες ονομάζονται μινιατούρες.
- Στη δεύτερη παραλλαγή επιλέχθηκε **πράσινη πρόσοψη χωρίς υπόστρωμα**. Συγκεκριμένα στις επιλογές των πράσινων προσόψεων επιλέχθηκε *Default Greenings without air gap* και έπειτα *only green* του οποίου η σύνθεση φαίνεται στην εικόνα 22. Το φυτό που χρησιμοποιείται από το λογισμικό στη συγκεκριμένη επιλογή είναι το *Hedera Helix* (Κισσός). Ανήκει στη οικογένεια Αραλίδες (*Araliaceae*) και αποτελεί το μόνο αυτοφυές είδος της οικογένειας στην Ελλάδα. Αναρριχάται πάνω σε δένδρα και βράχους με τη βοήθεια εναέριων προσαρτηρίων ριζών ή έρπει σε δασικά εδάφη σχηματίζοντας χαλαρούς τάπητες. Ο κισσός παρουσιάζει το φαινόμενο της ετεροφυλλίας, έτσι έχουμε από τη μία φύλλα νεαρών κλάδων που έρπουν στο έδαφος και στο κάτω μέρος των κορμών των δένδρων που εμφανίζονται τρίλοβα έως πεντάλοβα και από την άλλη φύλλα ανθοφόρων κλάδων στα ψηλότερα μέρη του κορμού, εκεί που τα βλέπει ο ήλιος, ωοειδή έως ρομβικά. Τα άνθη είναι πενταμερή, κιτρινοπράσινα και εμφανίζονται το φθινόπωρο.



Εικόνα 21 Πράσινη πρόσοψη με υπόστρωμα (Πηγή: προσωπική εργασία)



Εικόνα 22 Πράσινη πρόσοψη χωρίς υπόστρωμα (Πηγή: προσωπική εργασία)

Η επιλογή στα είδη των φυτών και στο είδος του υποστρώματος έγινε από το λογισμικό ,καθώς το ENVI-met δεν επιτρέπει περαιτέρω επεξεργασία των δεδομένων των πράσινων προσόψεων. Για τα πάχη των φυτών και του υποστρώματος, επιλέχθηκε πάλι η προεπιλογή του λογισμικού καθώς αποτελεί μία μέση επιλογή πάχους για τις πράσινες προσόψεις. Στον παρακάτω πίνακα αποτυπώνονται κάποια βασικά χαρακτηριστικά των δύο φυτών.

**Πίνακας 5 Βασικά Χαρακτηριστικά των φυτών Funkia Hosta και Hedera Helix**

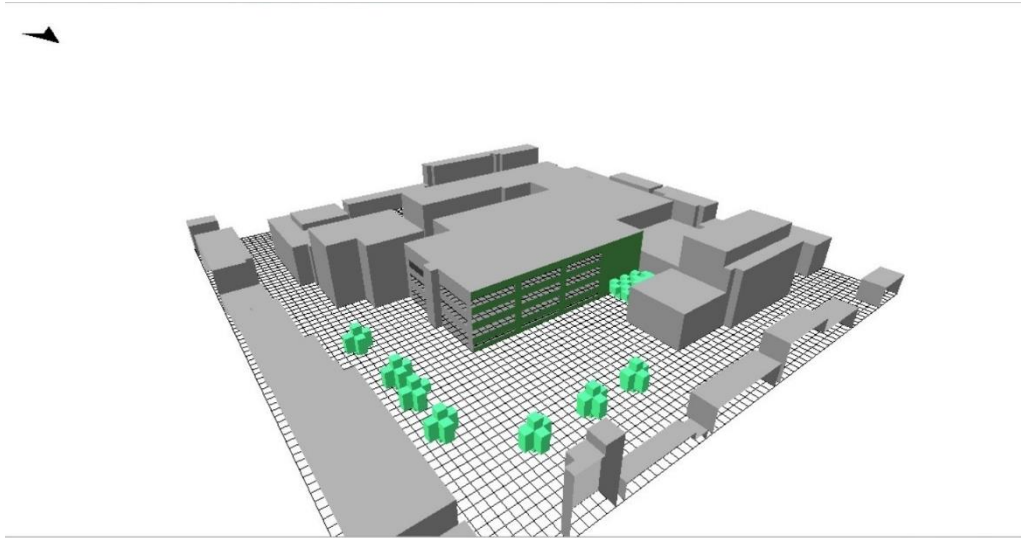
Φυτό	Funkia (Hosta)	Κισσός (Hedera helix)
Τύπος Φύλλων	Φυλλοβόλα	Αειθαλή
Δείκτης φυλλικής επιφάνειας (LAI)	2.0-3.5	2.5-4.5
Ύψος (m)	0.5-1.0	5-20
Βάθος ριζών (m)	0.2-0.3	0.5-1.0
Ρυθμός Διαπνοής	Μέτρια	Μέτρια
Κατανομή γωνίας Φύλλων	Πλανόφιλη	Πλανόφιλη
Αντίσταση στομάτων (s/m)	200-300	150-250

- Τύπος φύλλου: Δείχνει αν το φυτό είναι φυλλοβόλο ή αειθαλές.
- Δείκτης φυλλικής επιφάνειας (LAI): Αντιπροσωπεύει την επιφάνεια των φύλλων ανά μονάδα επιφάνειας εδάφους.
- Ύψος: Τυπικό ώριμο ύψος του φυτού.
- Βάθος ριζών: Τυπικό βάθος του ριζικού συστήματος.
- Ρυθμός διαπνοής: Περιγράφει πόσο νερό διαπνέει το φυτό. Μέτρια σημαίνει ότι διαπνέει μέτρια ποσότητα νερού.
- Κατανομή γωνίας φύλλων: Περιγράφει τον τυπικό προσανατολισμό των φύλλων. Το πλανόφυλλο υποδηλώνει ότι τα φύλλα είναι κυρίως οριζόντια, ενώ το ορθόφυλλο υποδηλώνει ότι τα φύλλα είναι περισσότερο κάθετα.



- Στοματική αντίσταση: Ένα μέτρο του κατά πόσο τα στόματα αντιστέκονται στην ανταλλαγή αερίων. Χαμηλότερες τιμές υποδηλώνουν υψηλότερους ρυθμούς διαπνοής.(Γιαννίτσaros A. et al , 1999 ; Karimi et al., 2022; Su et al., 2024)

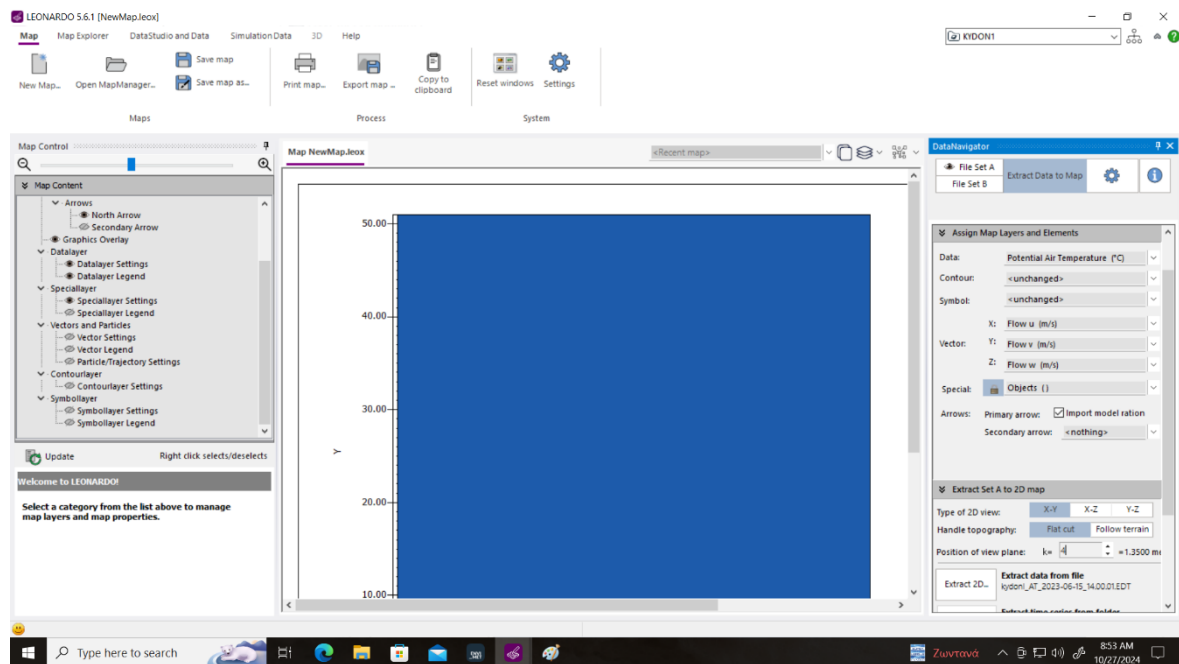
Το τελικό αποτέλεσμα μετά την τοποθέτηση πράσινου τοίχου αποτυπώνεται στην εικόνα 23.



Εικόνα 23 Μοντελοποίηση Πράσινου Τοίχου (Πηγή: προσωπική εργασία)

## 2.5 Επεξεργασία αποτελεσμάτων

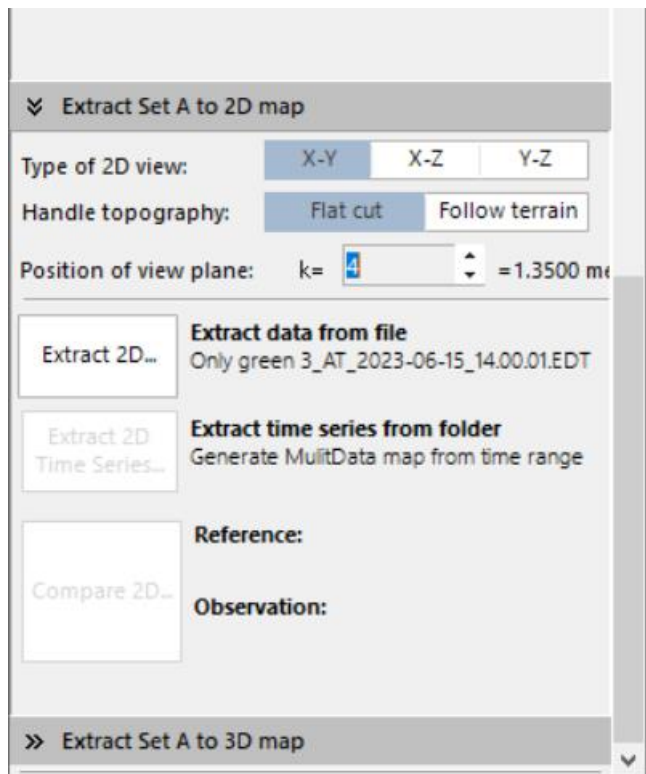
Μόλις ολοκληρώθηκε η κάθε προσομοίωση, χρειάστηκε να επεξεργαστεί ώστε να υπάρξουν τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στο κεφάλαιο 3. Πιο συγκεκριμένα , όπως έχει ήδη αναφερθεί στο κεφάλαιο 2, η οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων μέσω διάφορων χαρτών αλλά και δεδομένων στη μορφή φύλλων Excel , έγινε στην εφαρμογή **Leonardo**.



Εικόνα 24 Περιβάλλον Leonardo (Πηγή: προσωπική εργασία)

Επιλέχθηκε σαν θέση του επιπέδου προβολής , το  $k=4= 1.300 \text{ m}$ . Είναι η τιμή που προτείνεται από το Envi-met για την ανάλυση εξωτερικής θερμικής άνεσης, καθώς το θερμικό περιβάλλον σε αυτό το ύψος επηρεάζει περισσότερο τη θερμική άνεση του ανθρώπου.





**Εικόνα 25** Επιλογή θέσης επιπέδου προβολής (Πηγή: Προσωπική εργασία)

Τα δεδομένα σε μορφή Excel που χρησιμοποιήθηκαν για τα διαγράμματα και τη σύγκριση στο κεφάλαιο 4, αντλούνται επιλέγοντας ένα συγκεκριμένο σημείο στο χάρτη. Με αυτόν τον τρόπο μπορούν να αντληθούν όλα τα δεδομένα για όλες τις χρονικές στιγμές στο συγκεκριμένο σημείο του χάρτη.

Στη συνέχεια, από την εφαρμογή Bio-met υπολογίστηκαν οι δείκτες PMV, PPD, PET, UTCI και SET. Υπολογίστηκαν με καλοκαιρινά ρούχα, καθώς η προσομοίωση έγινε για τις 15 Ιουνίου. Το Bio-met έχει 4 έτοιμα προφίλ ανθρώπου, τα οποία και επιλέχθηκαν. Πιο συγκεκριμένα, τα αποτελέσματα αφορούν ενήλικα άνδρα 35 ετών, ενήλικη γυναίκα 35 ετών, παιδί 8 ετών, και ηλικιωμένο άνθρωπο 80 ετών, ώστε να δημιουργηθεί μία πιο ολοκληρωμένη εικόνα, σχετικά με το πως επηρεάζει η παρουσία πράσινης πρόσοψης την θερμική άνεση όλων των ηλικιακών ομάδων.

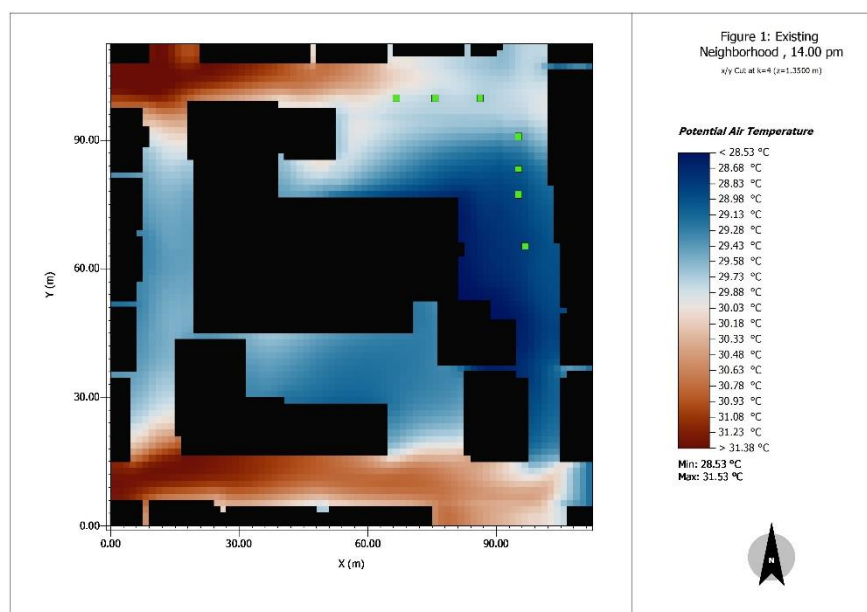
### 3 Αποτελέσματα

Παρακάτω θα παρατεθούν όλα τα διαγράμματα και οι χάρτες που δημιουργήθηκαν από την απεικόνιση των προσομοιώσεων. Τα δεδομένα αντλήθηκαν από ένα συγκεκριμένο σημείο στην προσομοίωση. Συγκεκριμένα, επιλέχθηκε το πεδίο  $(x,y)=(39,51)$  για  $K=4$  ( $z=1,35m$ ). Το συγκεκριμένο σημείο, επιλέχθηκε καθώς είναι στη μέση του πράσινου τοίχου και ακριβώς μπροστά από αυτόν.

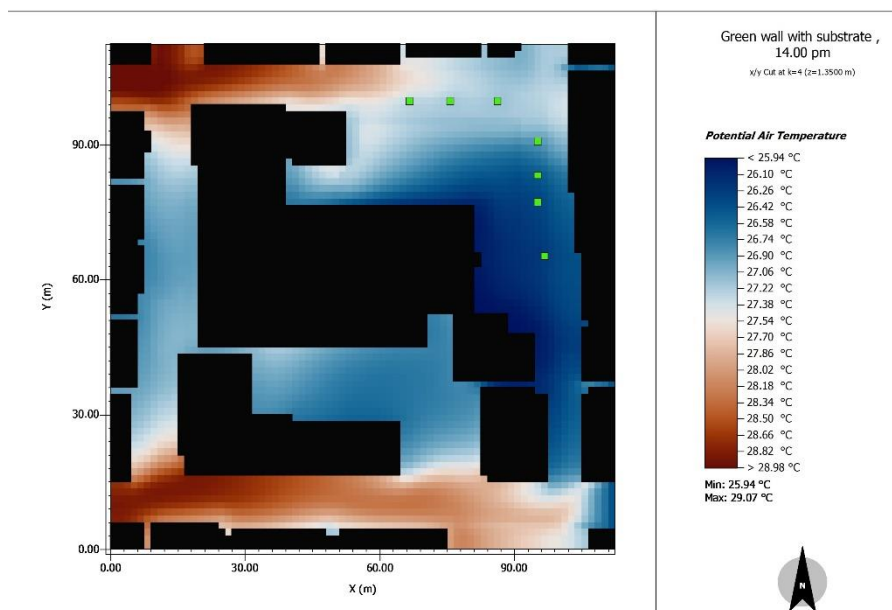
### 3.1 Θερμοκρασία

Παρακάτω φαίνεται η δυνητική θερμοκρασία του αέρα αλλά και των κτιρίων για την ώρα 14.00 μ.μ. της προσομοίωσης, στις 3 διαφορετικές προσομοιώσεις υπό τη μορφή δισδιάστατων και τρισδιάστατων χαρτών.

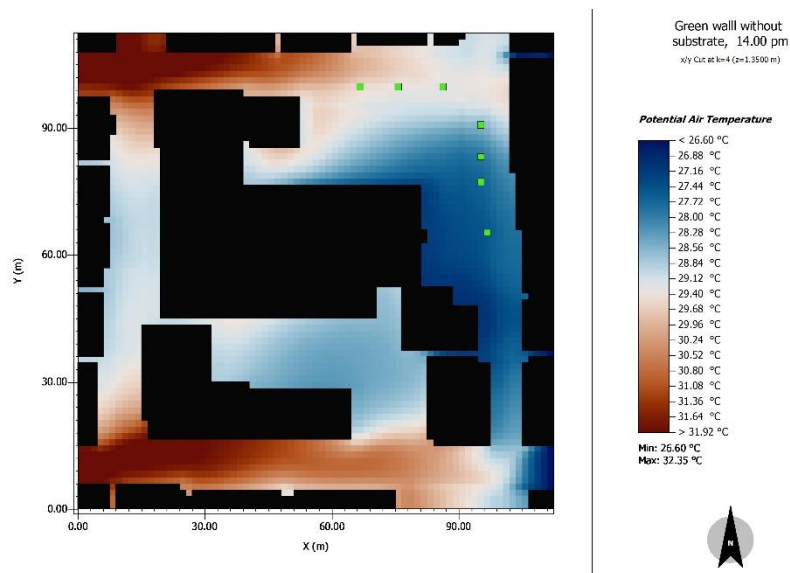
#### 3.1.1 Θερμοκρασία Αέρα



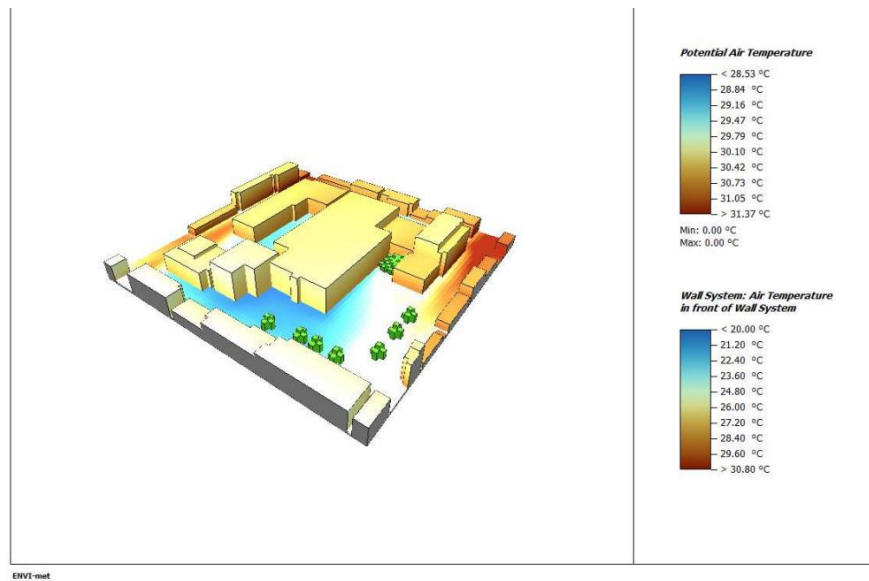
Εικόνα 26 Δυνητική Θερμοκρασία αέρα στις 2.00 μ.μ. στην αρχική γειτονιά



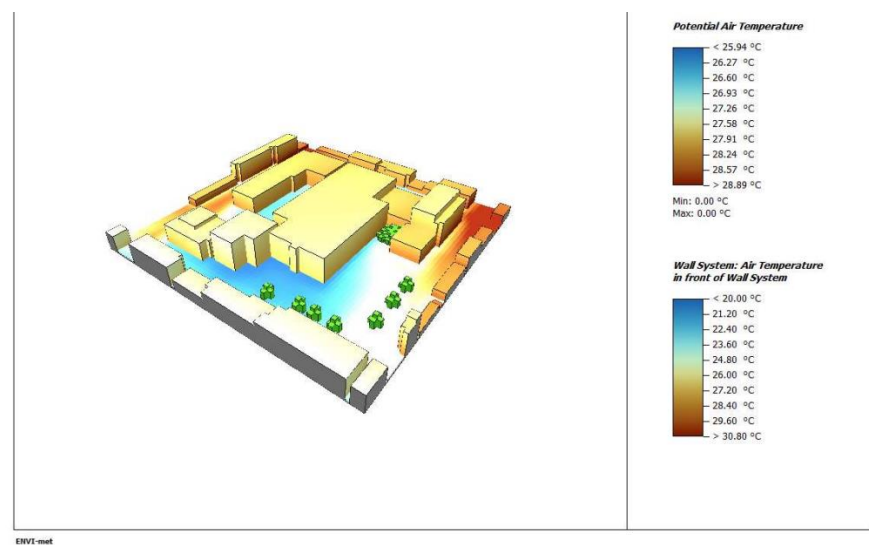
Εικόνα 27 Δυνητική Θερμοκρασία αέρα στις 2.00 μ.μ. στην Παραλλαγή 1



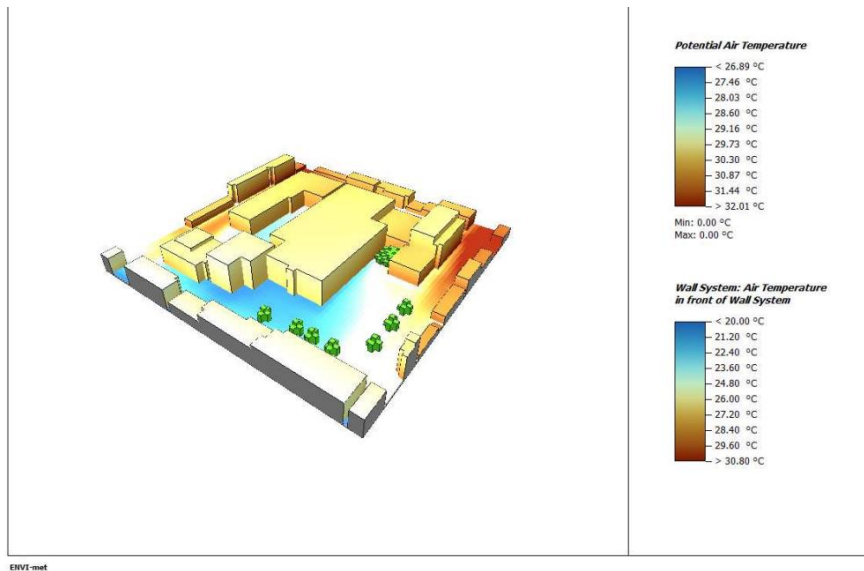
Εικόνα 28 Δυνητική Θερμοκρασία αέρα στις 2.00 μ.μ. στην Παραλλαγή 2



Εικόνα 29 Δυνητική Θερμοκρασία αέρα και θερμοκρασία αέρα μπροστά στα κτίρια στην αρχική γειτονιά στις 2.00 μ.μ.



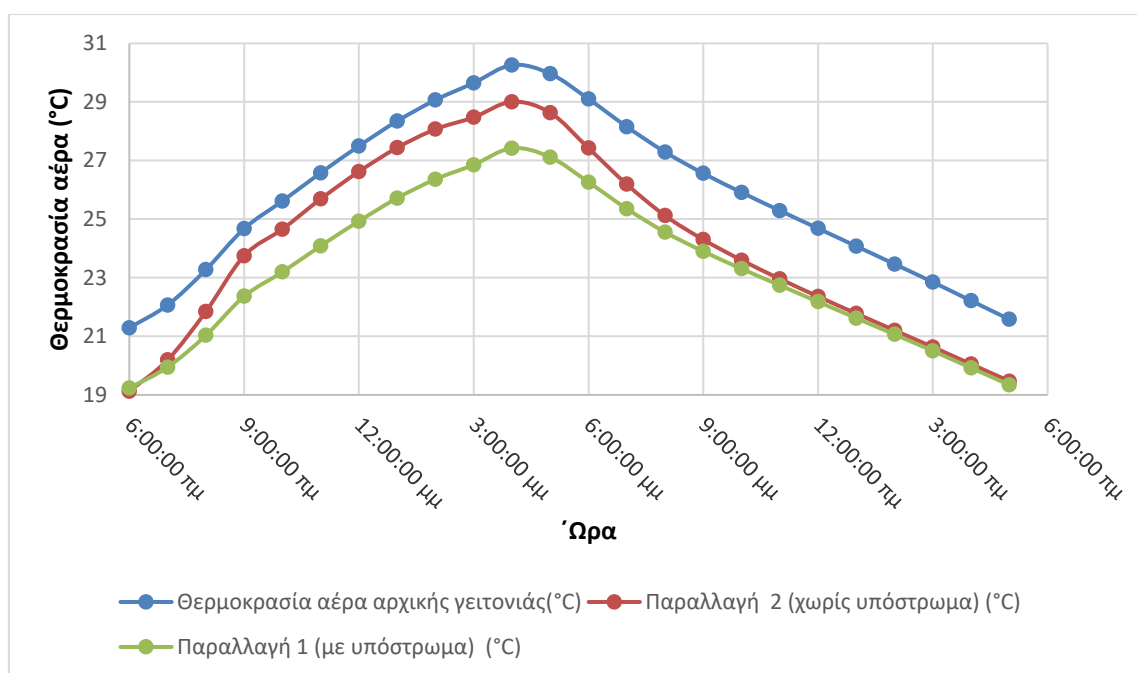
Εικόνα 30 Δυνητική Θερμοκρασία αέρα και θερμοκρασία αέρα μπροστά στα κτίρια στην Παραλλαγή 1 στις 2.00 μ.μ.



Εικόνα 31 Δυνητική Θερμοκρασία αέρα και θερμοκρασία αέρα μπροστά στα κτίρια στην Παραλλαγή 2 στις 2.00 μ.μ.

Παρακάτω απεικονίζεται η θερμοκρασία του αέρα κατά τη διάρκεια των 24 ωρών της προσομοίωσης.

**Διάγραμμα 1: Σύγκριση της θερμοκρασίας αέρα μεταξύ των παραλλαγών κατά τη διάρκεια 24ωρης προσομοίωσης**



Παρατηρείται ότι οι θερμοκρασίες και στις δύο παραλλαγές του πράσινου τοίχου , είναι σταθερά χαμηλότερες από ό,τι στην αρχική γειτονιά. Ιδιαίτερα στις ώρες της ημέρας με την περισσότερη ηλιοφάνεια (από τις 9.00 μέχρι τις 18.00) στον πράσινο τοίχο με υπόστρωμα παρατηρούνται οι χαμηλότερες θερμοκρασίες. Πιο συγκεκριμένα, η εισαγωγή ενός πράσινου τοίχου με υπόστρωμα (Παραλλαγή 1) μείωσε τη θερμοκρασία στο συγκεκριμένο σημείο στην προσομοίωση κατά μέσο όρο κατά 2,52°C κατά τη διάρκεια της 24ωρης προσομοίωσης. Ο πράσινος τοίχος χωρίς υπόστρωμα πέτυχε μέση μείωση της θερμοκρασίας σε σχέση με την αρχική γειτονιά , όλο το 24ωρο, κατά 1,7°C.

Παρατηρείται επίσης ,ότι μετά την δύση του Ηλίου , η οποία στις 15 Ιουνίου πραγματοποιείται περίπου στις 20.50 σύμφωνα με τα δεδομένα της Εθνικής Μετεωρολογικής Υπηρεσίας, οι τιμές στις 2 παραλλαγές είναι σχεδόν ίδιες, σταθερά χαμηλότερες από τις τιμές της αρχικής γειτονιάς. Αυτό συμβαίνει καθώς οι πράσινοι τοίχοι διατηρούν σταθερότερες θερμοκρασίες κατά τη διάρκεια της νύχτας. Οι αστικές επιφάνειες συσσωρεύουν περισσότερη θερμότητα κατά τη διάρκεια της μέρας και συνεχίζουν να αποβάλλουν θερμότερα και μετά τη Δύση του Ηλίου (Su et al., 2024).

**Πίνακας 6 Σύγκριση της θερμοκρασίας αέρα μεταξύ των παραλλαγών**

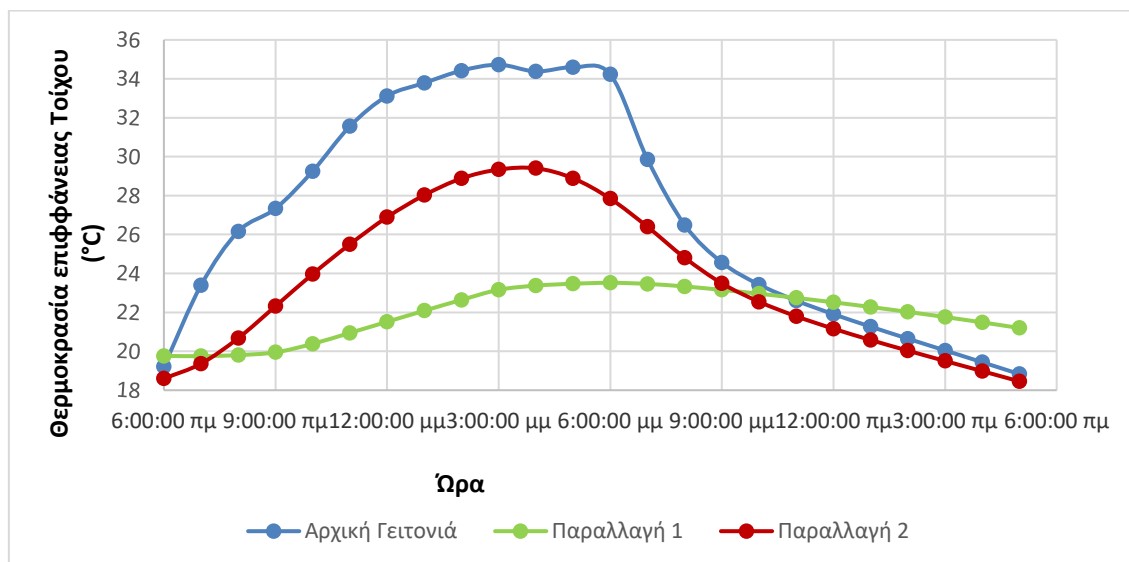
Ώρα	Αρχική Γειτονιά (°C)	Παραλλαγή 1 (με υπόστρωμα) (°C)	Παραλλαγή 2 (χωρίς υπόστρωμα) (°C)
7.00 π.μ.	22,07	19,95	20,19
11.00 π.μ.	23,27	21,03	21,85
3.00 μ.μ.	24,68	22,37	23,75
7.00 μ.μ.	25,68	23,20	24,66
11.00 μ.μ.	26,58	24,09	25,69

Από τα παραπάνω ευρήματα είναι φανερό η επίδραση της πράσινης πρόσοψης στη διατήρηση της θερμοκρασίας σε χαμηλότερα επίπεδα. Μέσα στη μέρα είναι σημαντική η μείωση της θερμοκρασίας με τη χρήση υποστρώματος, ωστόσο τις βραδινές ώρες, όπου και παρατηρείται στις πόλεις το φαινόμενο αστικής θερμικής νησίδας, οι δύο παραλλαγές της πράσινης πρόσοψης παρουσιάζουν παρόμοια αποτελέσματα, με θερμοκρασίες αρκετά χαμηλότερες από την αρχική κατάσταση.

### 3.1.2 Θερμοκρασία Επιφάνειας Τοίχου

Παρακάτω παρουσιάζεται το διάγραμμα που δημιουργήθηκε από μετρήσεις σε σημείο επάνω στον τοίχο. Επιλέχθηκε το πεδίο (x,y)=(40,51) για K=4 (z=1,35m). Το συγκεκριμένο σημείο, επιλέχθηκε καθώς είναι το αντίστοιχο σημείο με το σημείο που επιλέχθηκε για τα υπόλοιπα διαγράμματα, απλά είναι πάνω στο κτίριο και όχι ακριβώς μπροστά από αυτό.

Διάγραμμα 2 Θερμοκρασία επιφάνειας τοίχου (°C)



Επάνω στον τοίχο αποτυπώνονται και οι μεγαλύτερες διαφορές στη θερμοκρασία. Η αρχική κατάσταση παρουσιάζει τη μεγαλύτερη διακύμανσή κατά τη διάρκεια του 24ώρου, με τη θερμοκρασία να φτάνει τους 34,6 °C στις 5.00 μμ. Την ίδια ώρα στην Παραλλαγή 1 η θερμοκρασία είναι 23,5 °C και στην παραλλαγή 2 είναι 28,9°C. Η παραλλαγή 1 παρουσιάζει τις μικρότερες θερμοκρασίες καθώς και τη μικρότερη διακύμανση κατά τη διάρκεια των 24 ωρών, παρέχοντας σταθερότητα. Η παραλλαγή 2 παρουσιάζει αισθητά μειωμένη θερμοκρασία από την αρχική κατάσταση, όχι ωστόσο όσο η παραλλαγή 1. Βέβαια, τις πολύ πρωινές ώρες (4.00 π.μ-6.00 π.μ.) η αρχική κατάσταση και η παραλλαγή 2 παρουσιάζουν χαμηλότερες θερμοκρασίες από την παραλλαγή 1, λίγο πριν αυξηθούν πολύ παραπάνω. Είναι φανερό η σταθερότητα που προσδίδει η φύτευση στη θερμοκρασία του τοίχου η οποία ενισχύεται αισθητά με τη χρήση υποστρώματος.

Τα παραπάνω αποτελέσματα δείχνουν ότι οι πράσινοι τοίχοι, ιδιαίτερα με υπόστρωμα, είναι αποτελεσματικοί στον μετριασμό της συσσώρευσης θερμότητας στις επιφάνειες των κτιρίων. Η ψυκτική επίδραση των πράσινων τοίχων είναι πιο έντονη κατά τις ώρες αιχμής της ηλιακής ακτινοβολίας, όταν η θερμότητα είναι συνήθως υψηλότερη. Η παρουσία πράσινων τοίχων μειώνει το θερμικό φορτίο στις επιφάνειες των κτιρίων, μειώνοντας ενδεχομένως τη θερμότητα που εκπέμπεται στο αστικό περιβάλλον. Αυτό είναι σημαντικό για τον μετριασμό του φαινομένου Αστικής Θερμικής Νησίδας (UHI). Παράλληλα, οι χαμηλότερες θερμοκρασίες εξωτερικών τοίχων συσχετίζονται άμεσα με τη μειωμένη μεταφορά θερμότητας στα κτίρια, βελτιώνοντας τη θερμική άνεση των εσωτερικών χώρων.

### **3.2 Ακτινοβολία**

Σύμφωνα με το ENVImet, Reflected Shortwave Radiation ή Ανακλώμενη ακτινοβολία βραχέων κυμάτων ( $W/m^2$ ) είναι η διαθέσιμη ανακλώμενη ηλιακή ακτινοβολία από το περιβάλλον σε οριζόντια επιφάνεια αναφοράς. Προέρχεται από την ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει στην επιφάνεια και ανακλάται πίσω στο περιβάλλον. Η μείωσή της βελτιώνει το θερμικό περιβάλλον κοντά στην επιφάνεια.

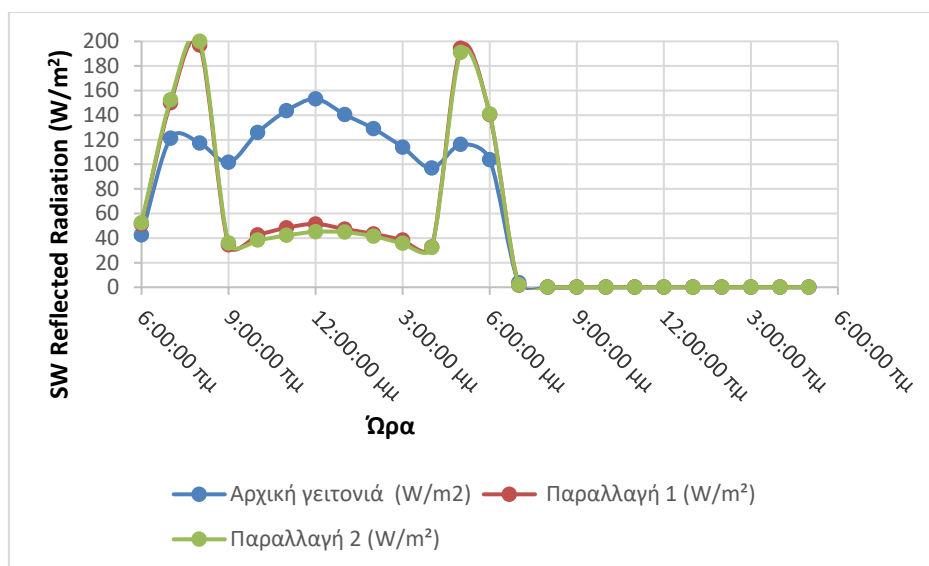
Επιπρόσθετα, Longwave radiation emitted ή Ακτινοβολία μεγάλου μήκους κύματος που εκπέμπεται από την επιφάνεια ( $W/m^2$ ) αναφέρεται στην ποσότητα της μακροκύμαντης θερμικής ακτινοβολίας που εκπέμπεται από την επιφάνεια ενός αντικειμένου (π.χ., τοίχου). Η μείωσή της συμβάλλει στη μείωση του θερμικού φορτίου στο περιβάλλον, κατ' επέκταση μειώνοντας την ένταση της UHI.

#### **3.2.1 Ανακλώμενη ακτινοβολία βραχέων κυμάτων τοίχου**

Παρακάτω θα δούμε τη σύγκριση των αποτελεσμάτων για τις 3 προσομοιώσεις για την Ανακλώμενη ακτινοβολία βραχέων κυμάτων τοίχου, shortwave (SW) Radiation reflected ( $W/m^2$ ).



**Διάγραμμα 3: Σύγκριση της ανακλώμενης ακτινοβολίας βραχέων κυμάτων τοίχου μεταξύ των παραλλαγών κατά τη διάρκεια 24ωρης προσομοίωσης**



Παρατηρείται ότι η αρχική γειτονιά εμφανίζει τις υψηλότερες τιμές , υποδεικνύοντας υψηλή ανακλαστικότητα και χαμηλότερη απορρόφηση.

Η παραλλαγή 1 (πράσινος τοίχος με υπόστρωμα ) έχει τη χαμηλότερη ανακλώμενη ακτινοβολία, καταδεικνύοντας υψηλότερη απορρόφηση ενέργειας, ιδίως κατά τις ώρες αιχμής του ηλιακού φωτός.

Στην παραλλαγή 2 (πράσινος τοίχος χωρίς υπόστρωμα ) οι τιμές είναι παρόμοιες με την παραλλαγή 1 , όμως υψηλότερες, εκτός από το χρονικό πλαίσιο 10.00 – 16.00 , όπου φαίνεται να παρουσιάζει ελαφρώς χαμηλότερες τιμές.

**Πίνακας 7 Σύγκριση της ανακλώμενης ακτινοβολίας βραχέων κυμάτων τοίχου μεταξύ των παραλλαγών**

Ωρα	Αρχική Γειτονιά (W/m²)	Παραλλαγή 1 (με υπόστρωμα) (W/m²)	Παραλλαγή 2 (χωρίς υπόστρωμα) (W/m²)
7.00 π.μ.	121,3	150,15	152,43
11.00 π.μ.	143,6	48,377	42,192
3.00 μ.μ.	113,95	38,421	35,825
7.00 μ.μ.	3,7154	1,7672	1,9488
11.00 μ.μ.	0	0	0

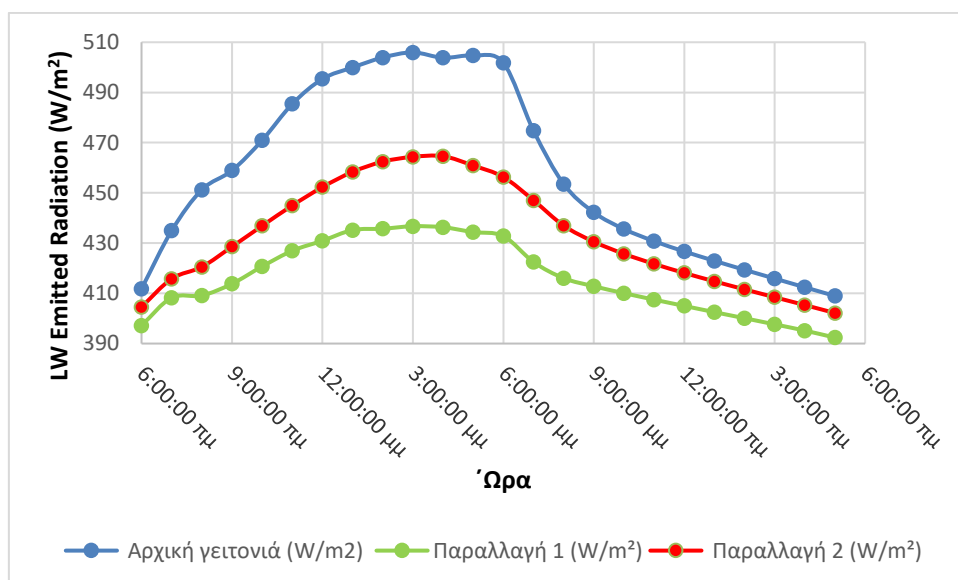
Η παρουσία πράσινου τοίχου αυξάνει την ικανότητα απορρόφησης ενέργειας, οδηγώντας σε χαμηλότερη ανακλαστικότητα και δυνητικά βελτιωμένες θερμικές συνθήκες. Η μειωμένη ανάκλαση του Παραλλαγής 1, υποδηλώνει ότι το υπόστρωμα απορροφά περισσότερη

ηλιακή ακτινοβολία, μετατρέποντάς την πιθανώς σε θερμότητα εντός του υλικού υποστρώματος αντί να την ανακλά προς τα έξω, στα δίπλα κτίρια. Γνωρίζουμε ότι η υψηλότερη απορροφητική ικανότητα, παρέχει καλύτερη θερμική άνεση και οφέλη αστικού δροσισμού με τη μείωση της ανακλόμενης θερμότητας στους αστικούς χώρους, μετρίζοντας το φαινόμενο της αστικής θερμικής νησίδας. (Manso & Castro-Gomes, 2015).

### 3.2.2. Ακτινοβολία μεγάλου μήκους κύματος που εκπέμπεται από την επιφάνεια του τοίχου

Παρακάτω θα δούμε τη σύγκριση των αποτελεσμάτων για τις 3 προσομοιώσεις για την Ακτινοβολία μεγάλου μήκους κύματος που εκπέμπεται από την επιφάνεια του τοίχου

Διάγραμμα 4 Σύγκριση Longwave emitted Radiation (W/m<sup>2</sup>) μεταξύ των παραλλαγών κατά τη διάρκεια του 24ωρης προσομοίωσης



Τα αποτελέσματα κινούνται ίδια με την Reflected Shortwave Radiation. Ο πράσινος τοίχος, καθώς μειώνει σημαντικά τις θερμοκρασίες της επιφάνειας του τοίχου, έχει χαμηλότερη ακτινοβολία LW και μειωμένη συνεισφορά θερμότητας στο περιβάλλον χώρο. Πάλι αποτυπώνεται ότι η ύπαρξη υποστρώματος φέρει καλύτερα αποτελέσματα.

Πίνακας 8 Σύγκριση Longwave emitted Radiation (W/m<sup>2</sup>) μεταξύ των παραλλαγών

Ωρα	Αρχική Γειτονιά (W/m <sup>2</sup> )	Παραλλαγή 1 (με υπόστρωμα) (W/m <sup>2</sup> )	Παραλλαγή 2 (χωρίς υπόστρωμα) (W/m <sup>2</sup> )
7.00 π.μ.	434,97	408,27	415,81
11.00 π.μ.	485,43	426,96	444,99
3.00 μ.μ.	505,95	436,72	464,36
7.00 μ.μ.	474,79	422,48	447,05
11.00 μ.μ.	0	0	0

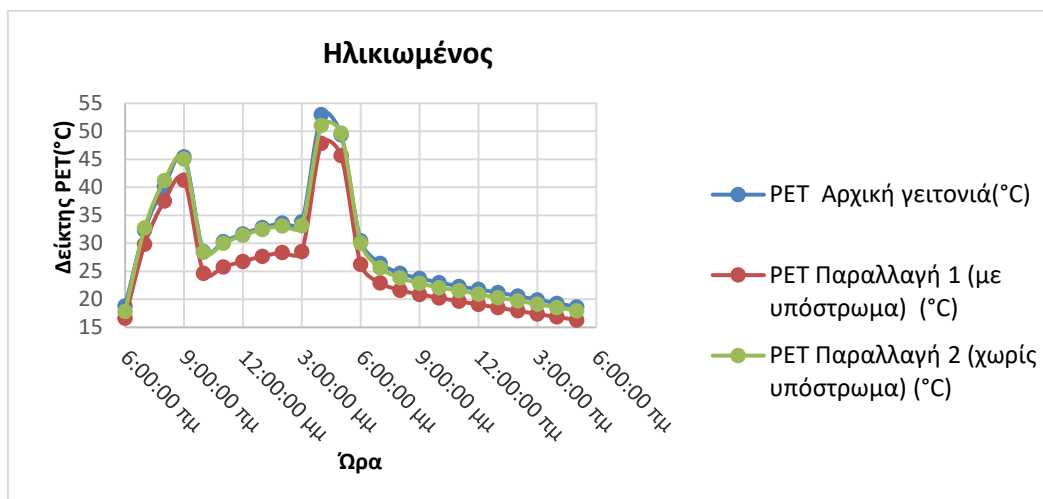
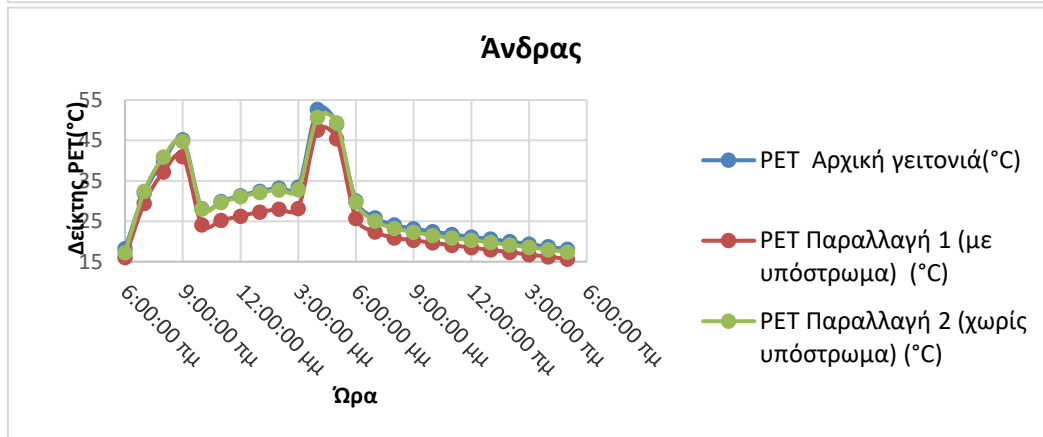
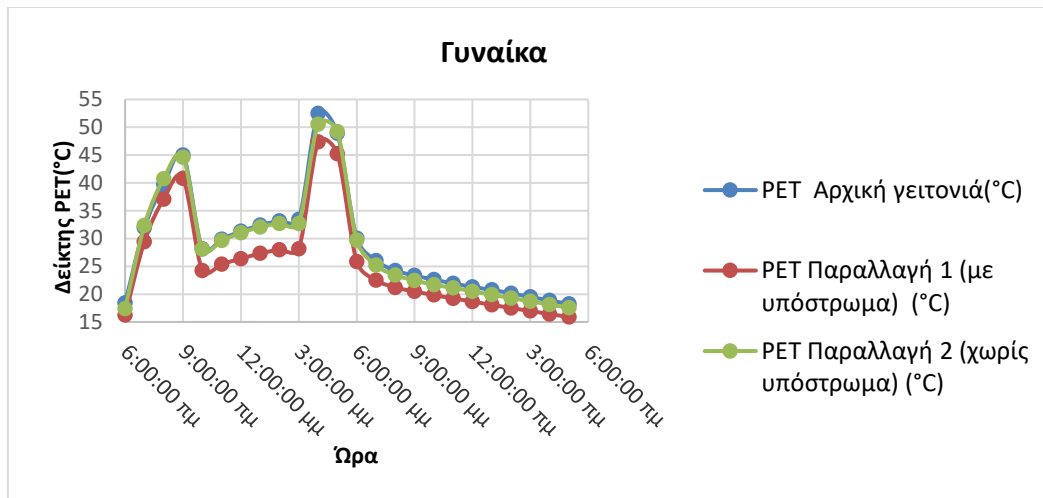
### 3.3 Δείκτες Θερμικής Άνεσης

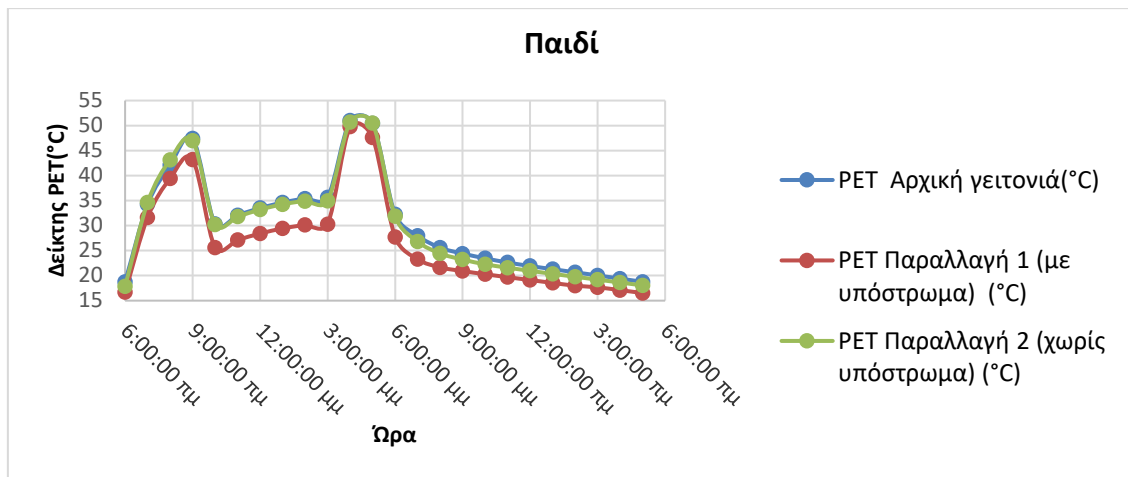
#### 3.3.1 Δείκτης PET

Στα παρακάτω διάγραμμα καταγράφεται ο Δείκτης PET για κάθε μία από τις προσομοιώσεις, στο πέρασμα των 24 ωρών για διαφορετικές δημογραφικές ομάδες (Άνδρας , Γυναίκα , Ηλικιωμένος , Παιδί).

Με μπλε Γραμμή φαίνονται οι τιμές στην Αρχική Κατάσταση , με κόκκινο στην παραλλαγή 1 (υπόστρωμα) και με πράσινο στην παραλλαγή 2 (χωρίς υπόστρωμα).

Διαγράμματα 5, 6,7,8: Σύγκριση του δείκτη PET μεταξύ των παραλλαγών κατά τη διάρκεια 24ωρης προσομοίωσης για 4 διαφορετικές δημογραφικές ομάδες





Σε όλες τις δημογραφικές ομάδες παρατηρείται ότι η προσομοίωση της αρχικής γειτονιάς έχει τις μεγαλύτερες τιμές PET. Παρόμοιες, όμως χαμηλότερες τιμές παρουσιάζει η Παραλλαγή 2 (πράσινος τοίχος χωρίς υπόστρωμα) δείχνοντας βελτίωση. Η παραλλαγή 1 (πράσινος τοίχος με υπόστρωμα) παρουσιάζει εμφανώς χαμηλότερες τιμές του δείκτη PET καθ' όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης.

Ενώ και οι δύο διαμορφώσεις πράσινου τοίχου συμβάλλουν στη μείωση του δείκτη θερμικής άνεσης PET, (πίνακας 1), βλέπουμε ότι ο πράσινος τοίχος με υπόστρωμα παρουσιάζει σταθερά χαμηλότερες τιμές PET κατά τη διάρκεια της ημέρας. Επιπρόσθετα, εστιάζοντας στο πρόβλημα της αστικής θερμικής νησίδας, μετά τη δύση του ηλίου η παραλλαγή 1 συνεχίζει να έχει τις χαμηλότερες τιμές, παρόλο που η δυνητική θερμοκρασία αέρα στις παραλλαγές 1 και 2 είναι σχεδόν η ίδια (Διάγραμμα 1).

#### Διαφορές μεταξύ των ομάδων:

Γυναίκες: Οι τιμές PET είναι ελαφρώς χαμηλότερες σε σύγκριση με τους άνδρες, υποδεικνύοντας ότι μπορεί να βιώνουν ελαφρώς καλύτερη θερμική άνεση στο ίδιο περιβάλλον.

Άνδρες: Οι υψηλότερες τιμές PET σε σύγκριση με τις γυναίκες υποδηλώνουν ελαφρώς μεγαλύτερη θερμική καταπόνηση, ιδίως κατά τις ώρες αιχμής της θερμοκρασίας.

Ηλικιωμένοι: Οι τιμές PET είναι πιο κοντά σε εκείνες των γυναικών, αλλά τα ηλικιωμένα άτομα ενδέχεται να είναι πιο ευαίσθητα σε αυτές τις τιμές λόγω μειωμένης θερμορυθμιστικής ικανότητας.

Παιδιά: Οι τιμές PET είναι σχετικά υψηλότερες σε σύγκριση με άλλες ομάδες κατά τις ώρες αιχμής, γεγονός που υποδηλώνει ότι τα παιδιά είναι πιο ευαίσθητα στη θερμική καταπόνηση υπό αυτές τις συνθήκες.

Σε σύγκριση με τις γυναίκες και τους ηλικιωμένους ενήλικες, τα παιδιά και οι άνδρες είναι πιθανό να αντιμετωπίζουν υψηλότερα επίπεδα θερμικής καταπόνησης λόγω των

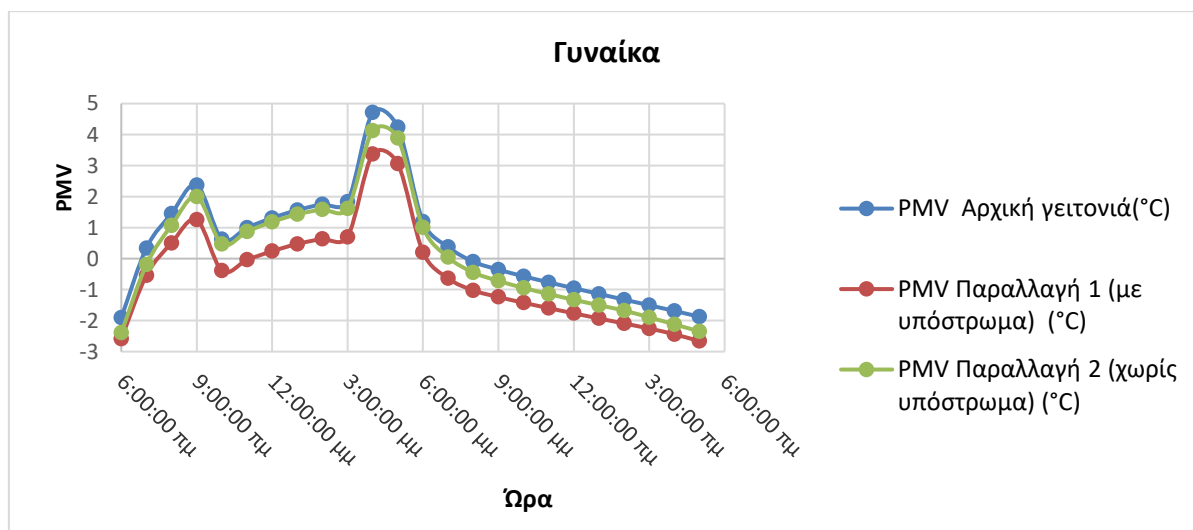
υψηλότερων τιμών PET. Θα πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή στο σχεδιασμό περιβαλλόντων που ελαχιστοποιούν το θερμικό στρες για αυτές τις ομάδες.

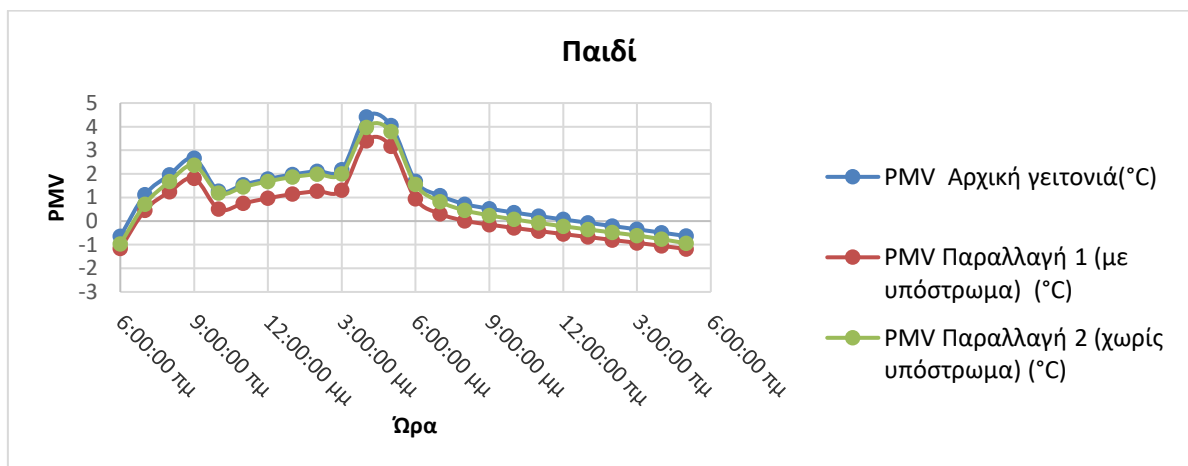
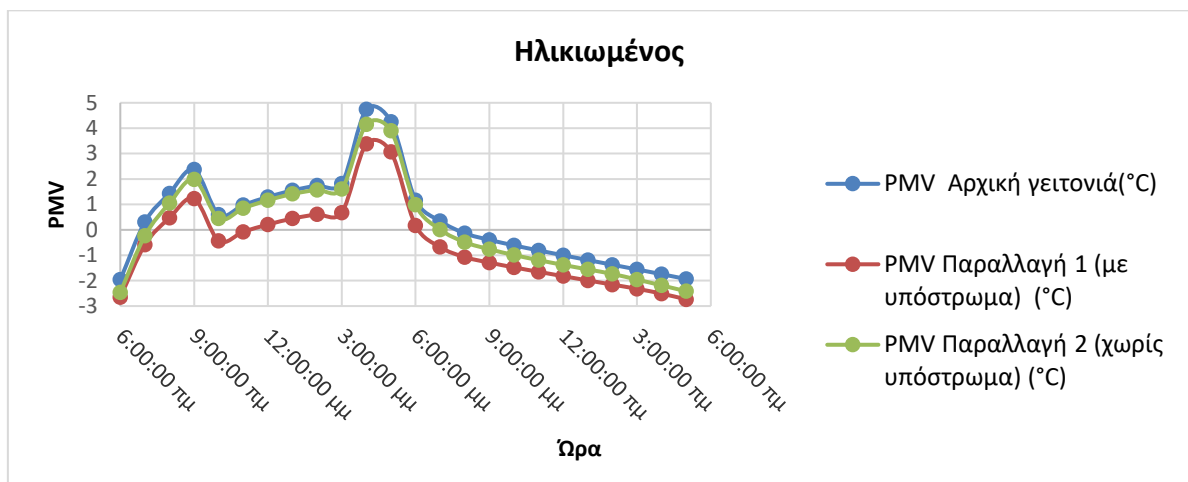
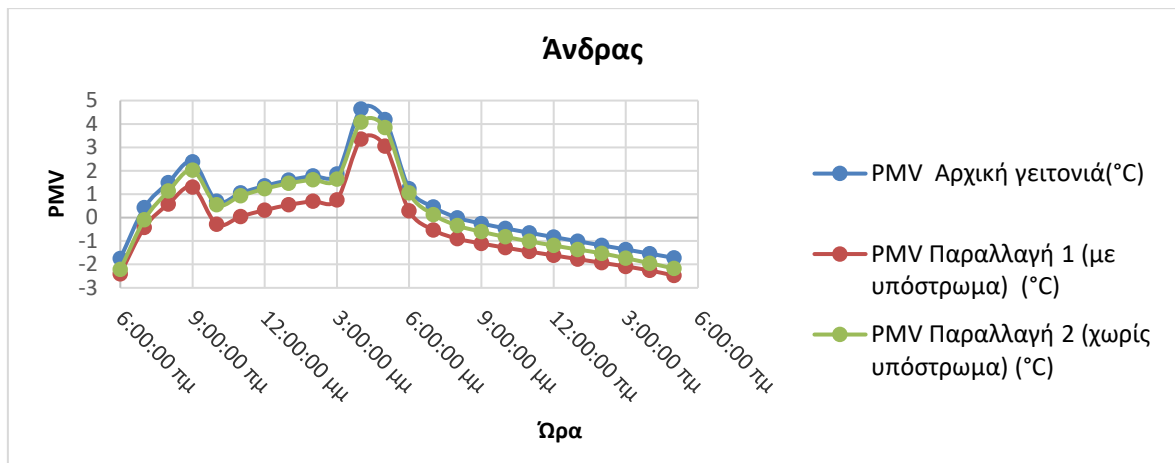
### 3.3.2 Δείκτες PMV/PPD

Στα παρακάτω διάγραμμα καταγράφεται ο Δείκτης PMV για κάθε μία από τις προσομοιώσεις, στο πέρασμα των 24 ωρών για διαφορετικές δημογραφικές ομάδες (Άνδρας , Γυναίκα , Ηλικιωμένος , Παιδί). Ο δείκτης PPD δημιουργεί ποσοστό % βασιζόμενος στον PMV ,γι' αυτό γίνεται ανάλυση μόνο του PMV αφού πρόκειται για την ίδια ερμηνεία αποτελεσμάτων.

Με μπλε Γραμμή φαίνονται οι τιμές στην Αρχική Κατάσταση , με κόκκινο στην παραλλαγή 1 (υπόστρωμα) και με πράσινο στην παραλλαγή 2.

Διαγράμματα 9,10,11,12 Σύγκριση του δείκτη PMV μεταξύ των παραλλαγών κατά τη διάρκεια 24ωρης προσομοίωσης για 4 διαφορετικές δημογραφικές ομάδες





Σε όλες τις δημογραφικές ομάδες στην αρχική γειτονιά οι τιμές PMV είναι οι υψηλότερες κατά τις ώρες αιχμής της θερμοκρασίας (μεταξύ 12:00 μ.μ. και 4:00 μ.μ.), υποδεικνύοντας μεγαλύτερη θερμική καταπόνηση και δυσφορία. Και οι δύο παραλλαγές (με και χωρίς υπόστρωμα) παρουσιάζουν μειωμένες τιμές PMV, γεγονός που υποδηλώνει ότι οι πράσινοι τοίχοι μετριάζουν τη θερμική δυσφορία, ιδίως κατά τις θερμότερες ώρες. Κατά τη διάρκεια της νύχτας (9.00 μμ έως 6.00 π.μ.), οι τιμές PMV μειώνονται σημαντικά σε όλα τα σενάρια. Ωστόσο, οι παραλλαγές πράσινου τοίχου εξακολουθούν να παρουσιάζουν ελαφρώς

καλύτερα αποτελέσματα από το βασικό σενάριο. Η παραλλαγή 1 (με υπόστρωμα) έχει ελαφρώς μεγαλύτερο αντίκτυπο. Τα οφέλη της θερμικής ρύθμισης μέσω των πράσινων τοίχων είναι πιο έντονα κατά τη διάρκεια της ημέρας και συγκεκριμένα κατά τις ώρες αιχμής της θερμοκρασίας.

Ο δείκτης PMV καταδεικνύει ότι η παραλλαγή 1 επιτυγχάνει την πιο βελτιωμένη θερμική άνεση.

#### Διαφορές μεταξύ των ομάδων:

Τόσο οι άνδρες όσο και οι γυναίκες ενήλικες εμφανίζουν παρόμοιες τιμές PMV. Ωστόσο, οι γυναίκες παρουσιάζουν ελαφρώς υψηλότερες τιμές.

Ηλικιωμένοι: Η ομάδα των ηλικιωμένων είναι η πιο θερμικά ευαίσθητη, με σταθερά υψηλότερες τιμές PMV από τις άλλες ομάδες. Οι πράσινοι τοίχοι φαίνεται να παρέχουν σημαντική ανακούφιση, ιδίως η παραλλαγή 1 (με υπόστρωμα).

Παιδιά: Τα παιδιά παρουσιάζουν ελαφρώς υψηλότερες τιμές PMV κατά τις ώρες αιχμής σε σύγκριση με τους ενήλικες, υποδεικνύοντας μεγαλύτερη ευπάθεια στη θερμότητα. Και τα δύο σενάρια πράσινου τοίχου βελτιώνουν τη θερμική άνεση για τα παιδιά, με την παραλλαγή 1 (με υπόστρωμα) να παρουσιάζει την καλύτερη απόδοση.

Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι οι ηλικιωμένοι και τα παιδιά επωφελούνται περισσότερο από την εφαρμογή πράσινων τοίχων λόγω της μεγαλύτερης ευπάθειάς τους στη θερμική καταπόνηση. Η παραλλαγή με υπόστρωμα έχει σταθερά καλύτερες επιδόσεις σε όλες τις δημογραφικές ομάδες, ιδίως κατά τις ώρες αιχμής της ζέστης. Ωστόσο, θα πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι το μοντέλο PMV-PPD υπερεκτιμά τις αισθήσεις του ψύχους και της ζέστης, οδηγώντας σε υπερεκτιμήσεις της δυσaráσκειας των ατόμων.

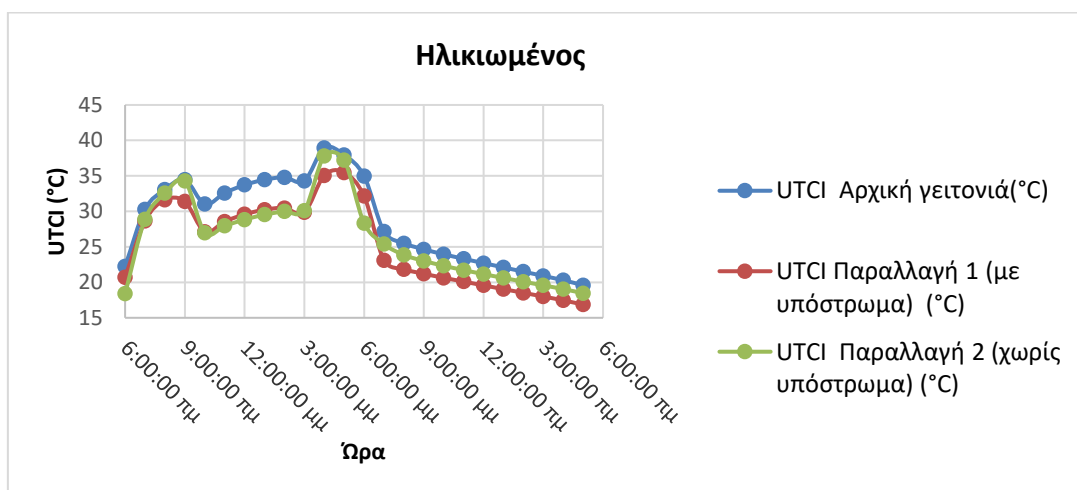
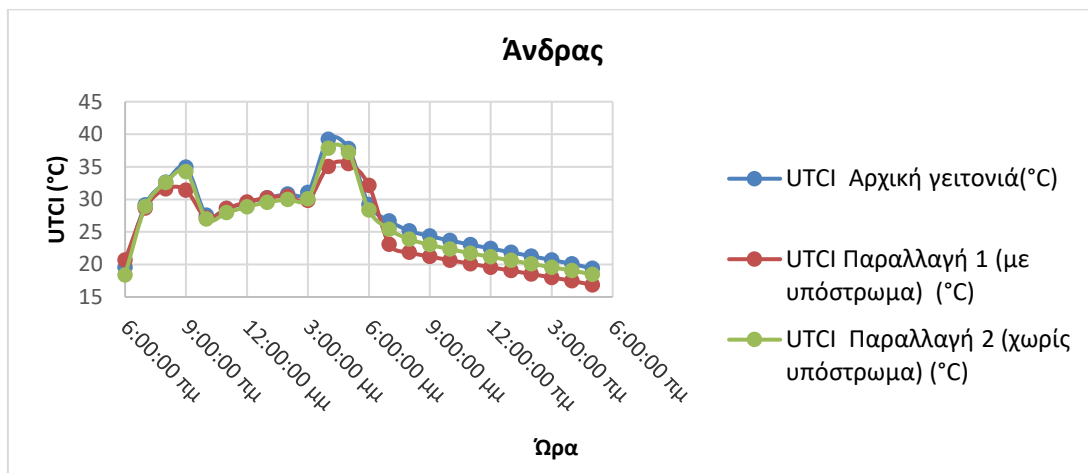
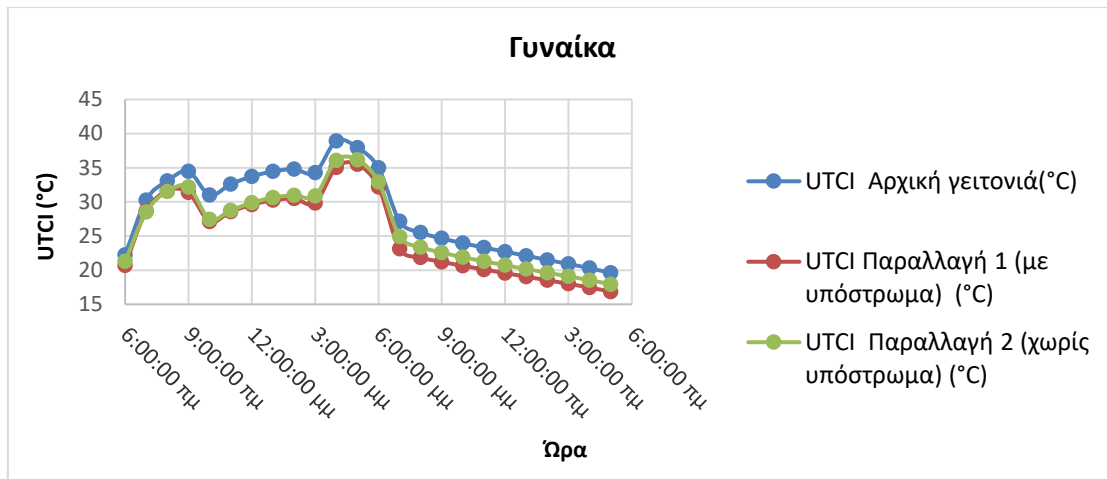
### **3.3.3 Δείκτης UTCI**

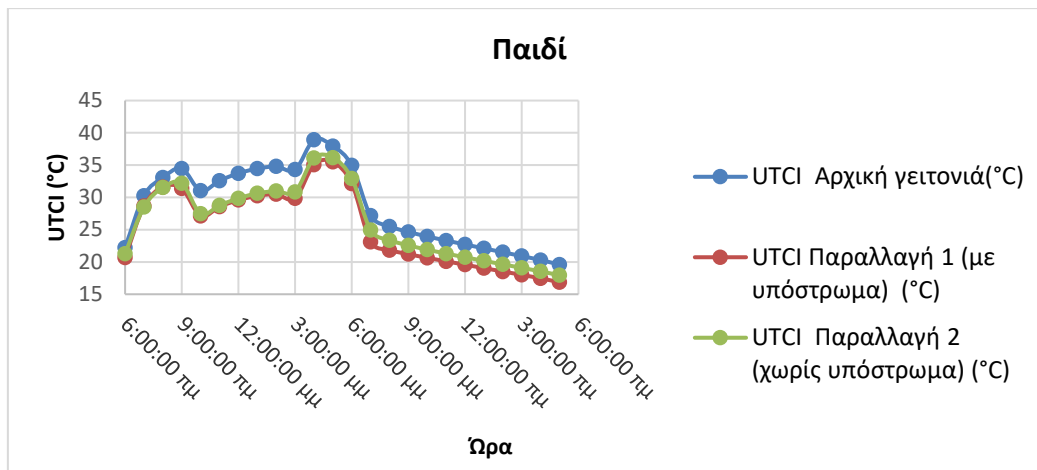
Στα παρακάτω διάγραμμα καταγράφεται ο Δείκτης UTCI για κάθε μία από τις προσομοιώσεις, στο πέρασμα των 24 ωρών για διαφορετικές δημογραφικές ομάδες (Άνδρας , Γυναίκα , Ηλικιωμένος , Παιδί).

Με μπλε Γραμμή φαίνονται οι τιμές στην Αρχική Κατάσταση , με κόκκινο στην παραλλαγή 1 (υπόστρωμα) και με πράσινο στην παραλλαγή 2 (χωρίς υπόστρωμα) .



Διαγράμματα 13,14,15,16 Σύγκριση του δείκτη UTCI μεταξύ των παραλλαγών κατά τη διάρκεια 24ωρης προσομοίωσης για 4 διαφορετικές δημογραφικές ομάδες





Σε όλες τις δημογραφικές ομάδες, η αρχική γειτονιά εμφανίζει τις υψηλότερες τιμές του δείκτη UTCI, υποδεικνύοντας τη μικρότερη θερμική άνεση. Η παραλλαγή 2 (χωρίς υπόστρωμα) παρέχει μέτρια βελτίωση της θερμικής άνεσης. Η μεγαλύτερη βελτίωση υπάρχει στην Παραλλαγή 1 (με υπόστρωμα), όπου προκύπτουν οι χαμηλότερες τιμές UTCI, που αντικατοπτρίζουν την μεγαλύτερη θερμική άνεση. Οι μεγαλύτερες διαφορές στις τιμές φαίνονται στις ώρες 10.00 π.μ. με 3.00 μ.μ., όπου στην Αρχική γειτονιά το θερμικό στρες είναι υψηλό, ενώ και στις 2 παραλλαγές παρουσιάζεται σημαντική βελτίωση. Οι διαφορές στις τιμές μεταξύ των προσομοιώσεων μειώνονται κατά τη διάρκεια της νύχτας αλλά ο πράσινος τοίχος με υπόστρωμα παρουσιάζει σταθερά ελαφρώς καλύτερα επίπεδα άνεσης. Σε όλες τις ομάδες η μέγιστη τιμή του δείκτη μειώνεται τουλάχιστον κατά 3°C στην παραλλαγή 1 και κατά 2 °C στην παραλλαγή 2.

#### Διαφορές μεταξύ των ομάδων:

**Γυναίκες:** Παρουσιάζουν χαμηλότερες τιμές UTCI σε σύγκριση με τους άνδρες, γεγονός που υποδηλώνει καλύτερη θερμική άνεση. Η Παραλλαγή 1 παρέχει την καλύτερη βελτίωση της θερμικής αντίληψης κατά τις ώρες αιχμής της θερμοκρασίας.

**Άνδρες:** Εμφανίζουν υψηλότερες τιμές UTCI από τις γυναίκες, υποδηλώνοντας μεγαλύτερο θερμικό στρες. Οι διαφορές στις τιμές μεταξύ των προσομοιώσεων είναι πιο έντονες για τους άνδρες, με τη παραλλαγή 1 να είναι η πιο αποτελεσματική στη μείωση της θερμικής καταπόνησης. Οι άνδρες έχουν υψηλότερο μεταβολικό ρυθμό, γεγονός που οδηγεί σε αυξημένη παραγωγή θερμότητας και άρα θερμική δυσφορία κατά τη διάρκεια υψηλών θερμοκρασιών.

**Ηλικιωμένοι:** Παρουσιάζουν σχετικά χαμηλές τιμές UTCI. Οι χαμηλότερες τιμές UTCI πιθανώς προέρχονται από τον επιβραδυνόμενο μεταβολισμό και κατ' επέκταση τη μειωμένη θερμοπαραγωγή των ηλικιωμένων ατόμων. Ο πράσινος τοίχος με υπόστρωμα μειώνει σημαντικά τον UTCI, ενισχύοντας τη θερμική άνεση.

**Παιδιά:** Παρουσιάζουν τις υψηλότερες τιμές UTCI, γεγονός που αντανακλά την ευπάθειά τους στη θερμική καταπόνηση. Η παραλλαγή 1 μειώνει αποτελεσματικά τον δείκτη UTCI, προσφέροντας τη μεγαλύτερη θερμική άνεση σε σχέση με τις άλλες ομάδες.

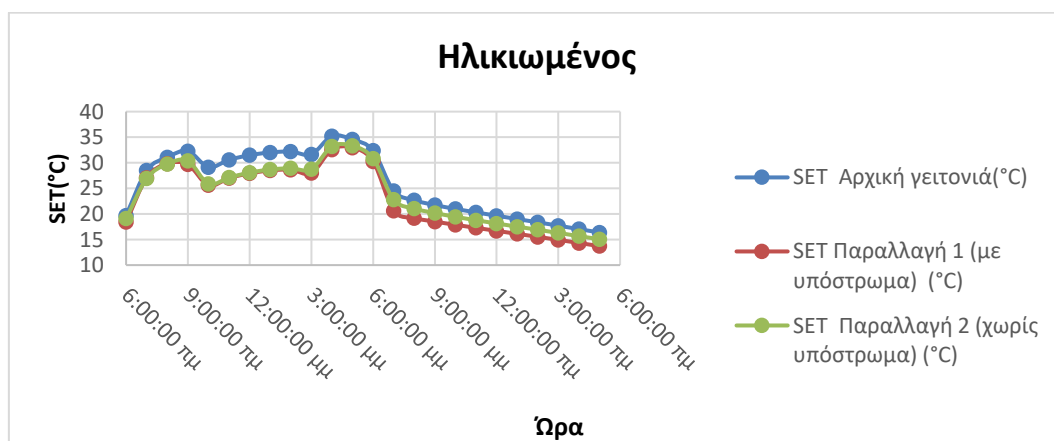
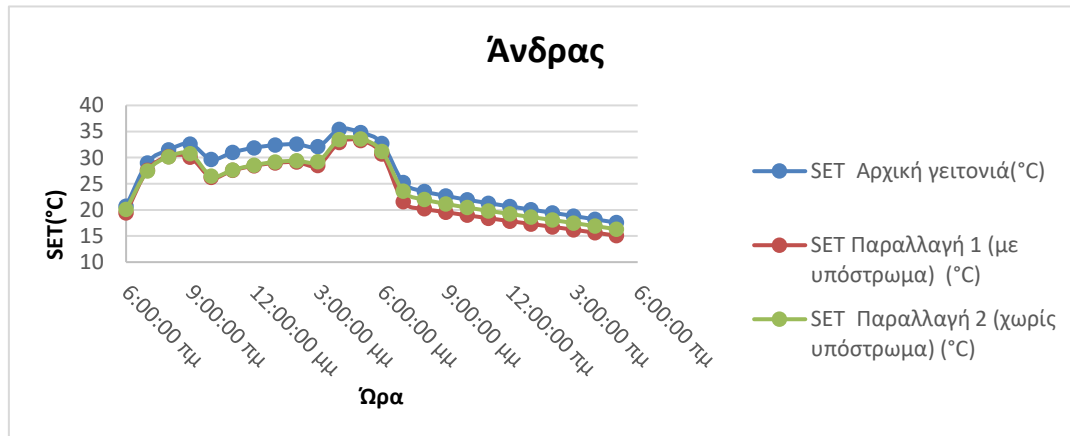
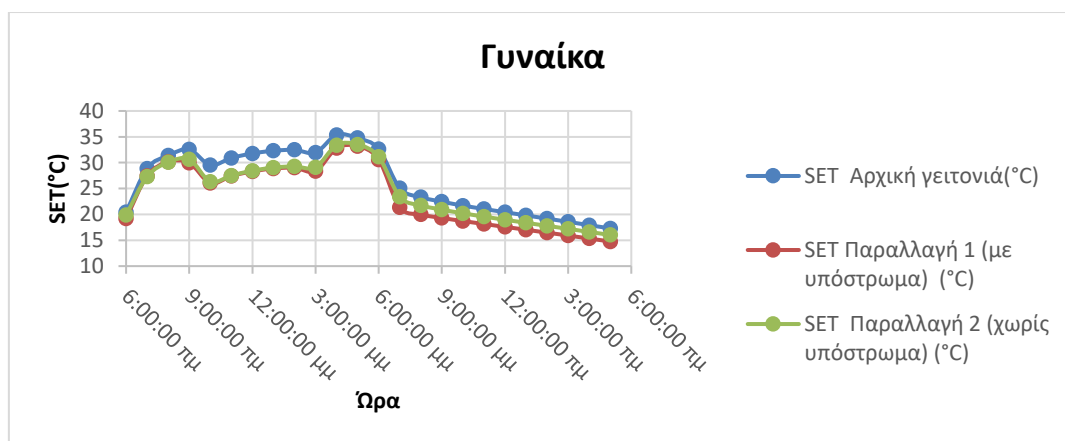
Τα αποτελέσματα υποδηλώνουν ότι η αστική πράσινη υποδομή (Παραλλαγές 1 και 2) είναι απαραίτητη για τη θερμική άνεση σε δημογραφικές ομάδες με υψηλότερες μεταβολικές απαιτήσεις.

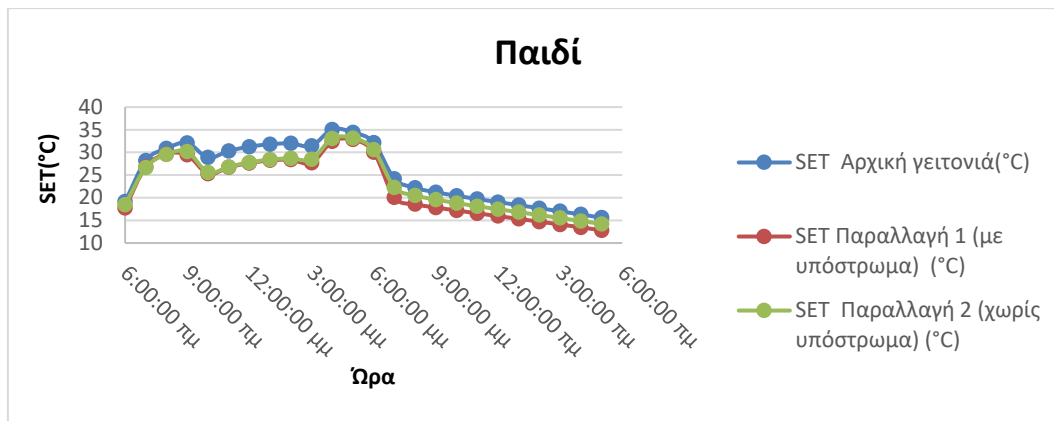
### 3.3.4 Δείκτης SET

Στα παρακάτω διάγραμμα καταγράφεται ο Δείκτης SET για κάθε μία από τις προσομοιώσεις, στο πέρασμα των 24 ωρών για διαφορετικές δημογραφικές ομάδες (Άνδρας , Γυναίκα , Ηλικιωμένος , Παιδί).

Με μπλε Γραμμή φαίνονται οι τιμές στην Αρχική Κατάσταση , με κόκκινο στην παραλλαγή 1 (υπόστρωμα) και με πράσινο στην παραλλαγή 2 (χωρίς υπόστρωμα).

Διαγράμματα 17,18,19,20 Σύγκριση του δείκτη SET μεταξύ των παραλλαγών κατά τη διάρκεια 24ωρης προσομοίωσης για 4 διαφορετικές δημογραφικές ομάδες





Σε όλες τις δημογραφικές ομάδες, η αρχική γειτονιά παρουσιάζει σταθερά υψηλότερες τιμές SET. Η παραλλαγή 1 καταγράφει σταθερά χαμηλότερες τιμές SET από την παραλλαγή 2. Οι τιμές SET κορυφώνονται κατά τις μεσημεριανές ώρες (περίπου 12:00 μ.μ.-3:00 μ.μ.) και μειώνονται νωρίς το πρωί και αργά το βράδυ. Κατά τη διάρκεια των θερμότερων ωρών, στις παραλλαγές 1 μειώθηκαν οι τιμές SET έως και 4°C σε όλες τις δημογραφικές ομάδες, γεγονός που μεταφράζεται σε αισθητή μείωση της αντιλαμβανόμενης θερμότητας.

#### Διαφορές μεταξύ των ομάδων:

Γυναίκες: Το δροσιστικό αποτέλεσμα που παρέχουν οι πράσινοι τοίχοι είναι ιδιαίτερα αισθητό για τις γυναίκες κατά τη διάρκεια του μεσημεριού, όπου οι τιμές SET μειώθηκαν έως και 4°C, όπου η θερμική καταπόνηση είναι υψηλότερη.

Άνδρες: Οι βασικές τιμές SET για τους άνδρες είναι οριακά υψηλότερες σε σύγκριση με τις γυναίκες, αντανakλώντας πιθανές φυσιολογικές διαφορές, όπως υψηλότερους μεταβολικούς ρυθμούς.

Ηλικιωμένοι: Οι ηλικιωμένοι εμφανίζουν σταθερά τις χαμηλότερες τιμές SET σε όλα τα σενάρια. Αυτό θα μπορούσε να αποδοθεί στον βραδύτερο μεταβολισμό και τη μειωμένη παραγωγή θερμότητας στους ηλικιωμένους. Το σχετικό όφελος των πράσινων τοίχων εξακολουθεί να είναι σημαντικό, με μείωση κατά περίπου 3°C κατά τις ώρες αιχμής σε σύγκριση με την αρχική γειτονιά.

Παιδιά: Ο πράσινος τοίχος με υπόστρωμα προσφέρει τα πιο εμφανή οφέλη, μειώνοντας τις τιμές SET στις ώρες αιχμής κατά 4°C.

### 3.4 Ανακεφαλαίωση των αποτελεσμάτων και σύγκριση

Η ανάλυση όλων των παραπάνω δεικτών , δηλαδή της θερμοκρασίας του αέρα, της θερμοκρασίας της επιφάνειας του τοίχου, της μέσης θερμοκρασίας ακτινοβολίας (MRT) και διαφόρων δεικτών θερμικής άνεσης UTCI, PET, PMV/PPD και SET, μαζί με τις ροές ακτινοβολίας (SW ανακλώμενη και LW εκπεμπόμενη), παρέχει μια ισχυρή κατανόηση του αντίκτυπου των πράσινων τοίχων στο αστικό μικρόκλιμα. Τα ευρήματα υπογραμμίζουν την μετασχηματιστική δυνατότητα των πράσινων προσόψεων σε μία πόλη, για τη βελτίωση των θερμικών συνθηκών και ,κατ' επέκταση , τη μετρίαση του φαινομένου της αστικής θερμικής νησίδας.

Τα αποτελέσματα της θερμοκρασίας του αέρα δείχνουν ότι η ύπαρξη ενός πράσινου τοίχου μειώνει τη θερμοκρασία του γύρω περιβάλλοντος , με τον πράσινο τοίχο με υπόστρωμα να παρουσιάζει μείωση της θερμοκρασίας μπροστά από τον τοίχο πάνω από 1,5-2°C κατά τη διάρκεια των ωρών αιχμής του καύσωνα. Ακολούθως , οι επιφανειακές θερμοκρασίες των τοίχων μειώθηκαν κατά έως και 8°C σε σύγκριση με το βασικό σενάριο. Οι δείκτες θερμικής άνεσης παρείχαν επίσης πληροφορίες για την αποτελεσματικότητα των πράσινων τοίχων. Οι τιμές UTCI ανέδειξαν την ακραία θερμική καταπόνηση στο βασικό σενάριο, η οποία μειώθηκε σημαντικά με την ύπαρξη πράσινους τοίχου, με μειώσεις 3-5°C κατά τις ώρες αιχμής. Οι τιμές PET έδειξαν ομοίως βελτιώσεις, με μειώσεις έως και 4°C. Οι δείκτες PMV και PPD επιβεβαίωσαν ότι το βασικό σενάριο οδηγούσε συχνά σε υψηλά επίπεδα δυσφορίας, ενώ οι πράσινοι τοίχοι πέτυχαν ισορροπημένες συνθήκες θερμικής άνεσης, μειώνοντας τα ποσοστά δυσaréσκειας. Οι τιμές SET επιβεβαίωσαν τα παραπάνω ευρήματα, δείχνοντας ξανά την ανώτερη θερμική απόδοση των πράσινων τοίχων. Η μελέτη εξέτασε επίσης τις ροές ακτινοβολίας, όπου οι παραλλαγές με πράσινο τοίχο παρουσίασαν μειωμένη ανάκλαση SW και εκπομπή LW. Τα αποτελέσματα αυτά αναδεικνύουν την ικανότητα του πράσινου τοίχου να απορροφά και να διαχειρίζεται αποτελεσματικά την ηλιακή ενέργεια, μειώνοντας την ποσότητα θερμότητας που εκπέμπεται πίσω στο περιβάλλον. Αυτή η διπλή μείωση της ανακλώμενης και της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας υπογραμμίζει τη σημασία των πράσινων τοίχων ως ενεργειακά αποδοτικής λύσης για τη διαχείριση της θερμότητας στις πόλεις.

## 4 Συμπεράσματα

Τα αποτελέσματα της παρούσας διπλωματικής εργασίας επιβεβαιώνουν τον καθοριστικό ρόλο των πράσινων τοίχων στη μείωση του φαινομένου της Αστικής Θερμικής Νησίδας. Βελτιώνοντας τη θερμική άνεση στους υπαίθριους χώρους, δημιουργούν βιώσιμα αστικά περιβάλλοντα. Μέσα από την ανάλυση των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων στο λογισμικό Envi-met, διαπιστώθηκε ότι οι πράσινοι τοίχοι μειώνουν τις θερμοκρασίες του αέρα και των επιφανειών πάνω και κοντά σε αυτούς.

Παρόλο που και στις 2 παραλλαγές πράσινης κατακόρυφης φύτευσης τα αποτελέσματα ήταν θετικά ως προς τη θερμική άνεση και τη μείωση του φαινομένου της αστικής θερμικής νησίδας, τα αποτελέσματα έδειξαν ότι οι πράσινοι τοίχοι με υπόστρωμα παρουσιάζουν μεγαλύτερη αποδοτικότητα, ιδιαίτερα κατά τις ώρες αιχμής της θερμοκρασίας. Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, αυτό οφείλεται στη θερμική μόνωση, την υγρασία και την ποιότητα της βλάστησης. Το υπόστρωμα λειτουργεί ως θερμικό φράγμα, μειώνοντας τη μεταφορά θερμότητας αλλά και τις θερμοκρασίες της επιφάνειας. Παράλληλα, διευκολύνει τη διαπνοή μέσω της εξάτμισης, δημιουργώντας έτσι ένα πιο δροσερό μικρόκλιμα. (Karimi et al., 2022). Ενισχύει την υγεία των φυτών, παρέχοντας σταθερή ροή υγρασίας και θρεπτικών συστατικών, ενώ παράλληλα βελτιώνει τη σκίαση και την αντανάκλαση της ακτινοβολίας (Zuckerman & Lensky, 2023). Ενώ τα αποτελέσματα δείχνουν ότι οι πράσινοι τοίχοι με υπόστρωμα επιτυγχάνουν καλύτερα αποτελέσματα σε σχέση με την απουσία υποστρώματος, η εφαρμογή τους συνοδεύεται από υψηλότερο κόστος εγκατάστασης και συντήρησης. Το υπόστρωμα απαιτεί εξειδικευμένες τεχνικές κατασκευής, ανθεκτικά υλικά, σύστημα άρδευσης και τακτική συντήρηση, γεγονός που αυξάνει το συνολικό κόστος. Επιπλέον, σε περιπτώσεις όπου ο τοίχος δε μπορεί να υποστηρίξει το βάρος του υποστρώματος ή σε προσωρινές εγκαταστάσεις, τα συστήματα χωρίς υπόστρωμα αποτελούν τη μοναδική επιλογή (Karimi et al., 2022). Όπως επιβεβαιώνεται και στα αποτελέσματα της εργασίας, παρά τις περιορισμένες επιδόσεις, παραμένουν αποτελεσματικά στη βελτίωση της θερμικής άνεσης, καθιστώντας τα ιδανικά για περιορισμένους προϋπολογισμούς ή προσωρινές λύσεις.

Συμπερασματικά, η εργασία αυτή καταδεικνύει ότι οι πράσινοι τοίχοι δεν αποτελούν μόνο μια αισθητική επιλογή αλλά και μία αποδοτική λύση για τη βελτίωση του μικροκλίματος, τη μείωση του φαινομένου UHI, και την ενίσχυση της εξωτερικής θερμικής άνεσης στις αστικές περιοχές. Τα ευρήματα της παρούσας μελέτης παρέχουν πολύτιμες πληροφορίες σχετικά με τις δυνατότητες των πράσινων υποδομών μικρής κλίμακας για την αντιμετώπιση των προκλήσεων που θέτει το φαινόμενο της αστικής θερμικής νησίδας.

Επιβεβαιώνεται ότι οι πράσινοι τοίχοι μπορούν να αποτελέσουν μια εφικτή και αποτελεσματική λύση για περιοχές όπου η έλλειψη γης ή η πυκνότητα δόμησης εμποδίζει την ανάπτυξη πάρκων ή μεγάλων αστικών χώρων πρασίνου. Αυτό τους καθιστά μια εξαιρετική λύση για τις υφιστάμενες αστικές δομές, χωρίς να απαιτούνται σημαντικές χωρικές ή δομικές τροποποιήσεις. Αν και η επίδρασή τους είναι εντονότερη στο άμεσο κοντινό περιβάλλον, με στρατηγική και εντατική τοποθέτηση στα πυκνά αστικά τοπία, οι πόλεις μπορούν να μειώσουν τις θερμικές εστίες στις γειτονιές, προσφέροντας ανάπαυλα σε περιοχές όπου η χώροι πρασίνου δεν είναι εφικτοί και το φαινόμενο της αστικής θερμικής νησίδας είναι σαφώς εντονότερο.

## 5 Μελλοντικές Προοπτικές

Η αξιοποίηση των πράσινων τοίχων παρουσιάζει σημαντικές προοπτικές οι οποίες μπορούν να ενισχυθούν περαιτέρω μέσω της έρευνας. Η μελλοντική έρευνα θα πρέπει να επικεντρωθεί στην ανάπτυξη πιο εξελιγμένων και ολοκληρωμένων μοντέλων που μπορούν ταυτόχρονα να λάβουν υπόψη τις αλλαγές χρήσης γης, τη δυναμική του αστικού κλίματος και τους κοινωνικό-οικονομικούς παράγοντες. Αυτά τα μοντέλα θα πρέπει να στοχεύουν στην καταγραφή των πολύπλοκων, μη γραμμικών αλληλεπιδράσεων μεταξύ διαφορετικών αστικών συστημάτων, αναλύοντας μεγάλα δεδομένα για την εύρεση κρυφών συνδέσμων και μοτίβων σε μεγάλα, πολύπλοκα αστικά περιβάλλοντα. Η ενσωμάτωση προσεγγίσεων του αστικού μεταβολισμού μπορεί να παρέχει βαθύτερες γνώσεις για τις ροές της ενέργειας εντός των πόλεων και τη σχέση τους με το φαινόμενο UHI. Έτσι, θα υπάρξουν ακόμα πιο ακριβείς δείκτες θερμικής άνεσης που θα αποτυπώνουν με μεγαλύτερη ακρίβεια την επίδραση των πράσινων τοίχων, αλλά και των πράσινων υποδομών γενικότερα, στη βελτίωση της ποιότητας ζωής στις σύγχρονες πόλεις.

Γενικότερα για τη μετρίαση του φαινομένου UHI, απαιτείται διεπιστημονική προσέγγιση. Η συνεργασία με ειδικούς από άλλες επιστήμες, όπως ψυχολόγους, κοινωνιολόγους, φιλοσόφους, καθώς και με επαγγελματίες του κτιριακού τομέα (αρχιτέκτονες, μηχανικούς κ.ά.) μπορεί να συνεισφέρει σημαντικά στην ανάπτυξη μιας συστημικής και ολιστικής προσέγγισης, συμπεριλαμβανομένων των φυσιολογικών και ψυχολογικών διαστάσεων του φαινομένου. Εάν η αυξητική τάση των ερευνών συνεχιστεί, ενδέχεται να αναπτυχθούν νέες προσεγγίσεις και λύσεις για την αντιμετώπιση του φαινομένου και, κατ' επέκταση, της κλιματικής αλλαγής. (Rupp et al., 2015). Παράλληλα, η πολιτεία οφείλει να κάνει πράξη τα αποτελέσματα των ερευνών, ενσωματώνοντας επιτακτικά πράσινες υποδομές και άλλες βιώσιμες πρακτικές, στοχεύοντας σε πιο πράσινες πόλεις. Είναι ζωτικής σημασίας ο σχεδιασμός βιώσιμων, ανθεκτικών πόλεων που μπορούν να προσαρμοστούν στις μεταβαλλόμενες κλιματικές συνθήκες, διατηρώντας παράλληλα την υγεία και την ευημερία των κατοίκων τους.

## Βιβλιογραφία

- Assimakopoulos, M.-N., De Masi, R. F., de Rossi, F., Papadaki, D., & Ruggiero, S. (2020). Green Wall Design Approach Towards Energy Performance and Indoor Comfort Improvement: A Case Study in Athens. *Sustainability*, 12(9), 3772. <https://doi.org/10.3390/su12093772>
- Błażejczyk, K., Broede, P., Fiala, D., Havenith, G., Holmér, I., Jendritzky, G., Kampmann, B., & Kunert, A. (2010). Principles of the New Universal Thermal Climate Index (UTCI) and its Application to Bioclimatic Research in European Scale. *Miscellanea Geographica*, 14(1), 91–102. <https://doi.org/10.2478/mgrsd-2010-0009>
- Bowler, D. E., Buyung-Ali, L., Knight, T. M., & Pullin, A. S. (2010). Urban greening to cool towns and cities: A systematic review of the empirical evidence. *Landscape and Urban Planning*, 97(3), 147–155. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2010.05.006>
- Cheung, T., Schiavon, S., Parkinson, T., Li, P., & Brager, G. (2019). Analysis of the accuracy on PMV – PPD model using the ASHRAE Global Thermal Comfort Database II. *Building and Environment*, 153, 205–217. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.01.055>
- Chrenko, F. A. (1967). Paper 8: Thermal Comfort. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Conference Proceedings*, 182(5), 13–19. [https://doi.org/10.1243/PIME\\_CONF\\_1967\\_182\\_147\\_02](https://doi.org/10.1243/PIME_CONF_1967_182_147_02)
- d'Ambrosio Alfano, F. R., Olesen, B. W., & Palella, B. I. (2017). Povl Ole Fanger's impact ten years later. *Energy and Buildings*, 152, 243–249. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.07.052>
- De Oliveira Santos, T. D., Pacheco, F. A. L., & Fernandes, L. F. S. (2024). A systematic analysis on the efficiency and sustainability of green facades and roofs. *Science of The Total Environment*, 932, 173107. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.173107>
- Deligiorgi, D., Kolokotsa, D., Papakostas, T., & Mantou, E. (n.d.). *Analysis of the Wind Field at the Broader Area of Chania, Crete*.



- Gill, S. E., Handley, J. F., Ennos, A. R., & Pauleit, S. (2007). Adapting Cities for Climate Change: The Role of the Green Infrastructure. *Built Environment*, 33(1), 115–133.  
<https://doi.org/10.2148/benv.33.1.115>
- Hasan, M. H., Alsaleem, F., & Rafaie, M. (2016). Sensitivity study for the PMV thermal comfort model and the use of wearable devices biometric data for metabolic rate estimation. *Building and Environment*, 110, 173–183. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.10.007>
- Jang, M. S., Koh, C. D., & Moon, I. S. (2007). Review of thermal comfort design based on PMV/PPD in cabins of Korean maritime patrol vessels. *Building and Environment*, 42(1), 55–61.  
<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.07.025>
- Karimi, K., Farrokhzad, M., Roshan, G., & Aghdasi, M. (2022). Evaluation of effects of a green wall as a sustainable approach on reducing energy use in temperate and humid areas. *Energy and Buildings*, 262, 112014. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112014>
- Khan, A., Papazoglou, E. G., Cartalis, C., Philippopoulos, K., Vasilakopoulou, K., & Santamouris, M. (2022). On the mitigation potential and urban climate impact of increased green infrastructures in a coastal mediterranean city. *Building and Environment*, 221, 109264.  
<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109264>
- Kolokotroni, M., Wines, C., Babiker, R. M. A., & Da Silva, B. H. (2016). Cool and Green Roofs for Storage Buildings in Various Climates. *Procedia Engineering*, 169, 350–358.  
<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.10.043>
- Kolokotsa, D., Psomas, A., & Karapidakis, E. (2009). Urban heat island in southern Europe: The case study of Hania, Crete. *Solar Energy*, 83(10), 1871–1883.  
<https://doi.org/10.1016/j.solener.2009.06.018>
- Mahgoub, A. O., Gowid, S., & Ghani, S. (2020). Global evaluation of WBGT and SET indices for outdoor environments using thermal imaging and artificial neural networks. *Sustainable Cities and Society*, 60, 102182. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102182>

- Manso, M., & Castro-Gomes, J. (2015). Green wall systems: A review of their characteristics. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 41, 863–871.  
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.203>
- Matzarakis, A., & Mayer, H. (1991). The extreme heat wave in Athens in July 1987 from the point of view of human biometeorology. *Atmospheric Environment. Part B. Urban Atmosphere*, 25(2), 203–211. [https://doi.org/10.1016/0957-1272\(91\)90055-J](https://doi.org/10.1016/0957-1272(91)90055-J)
- Matzarakis, A., Mayer, H., & Iziomon, M. G. (1999). Applications of a universal thermal index: Physiological equivalent temperature. *International Journal of Biometeorology*, 43(2), 76–84. <https://doi.org/10.1007/s004840050119>
- Medl, A., Stangl, R., & Florineth, F. (2017). Vertical greening systems – A review on recent technologies and research advancement. *Building and Environment*, 125, 227–239.  
<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.08.054>
- Nikolopoulou, M., & Steemers, K. (2003). Thermal comfort and psychological adaptation as a guide for designing urban spaces. *Energy and Buildings*.
- Potchter, O., Cohen, P., Lin, T.-P., & Matzarakis, A. (2018). Outdoor human thermal perception in various climates: A comprehensive review of approaches, methods and quantification. *Science of The Total Environment*, 631–632, 390–406.  
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.02.276>
- Rupp, R., Giraldo Vásquez, N., & Lamberts, R. (2015). A review of human thermal comfort in the built environment. *Energy and Buildings*, 105, 178–205.  
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.07.047>
- Su, M., Jie, P., Li, P., Yang, F., Huang, Z., & Shi, X. (2024). A review on the mechanisms behind thermal effect of building vertical greenery systems (VGS): Methodology, performance and impact factors. *Energy and Buildings*, 303, 113785.  
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.113785>

van den Berg, A. E., Maas, J., Verheij, R. A., & Groenewegen, P. P. (2010). Green space as a buffer between stressful life events and health. *Social Science & Medicine*, 70(8), 1203–1210.

<https://doi.org/10.1016/j.socscimed.2010.01.002>

Vardoulakis, E., Karamanis, D., Fotiadi, A., & Mihalakakou, G. (2013). The urban heat island effect in a small Mediterranean city of high summer temperatures and cooling energy demands.

*Solar Energy*, 94, 128–144. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2013.04.016>

Zuckerman, N., & Lensky, I. M. (2023). Thermal performance of vertical greenery systems (VGS) in a street canyon: A real-scale long-term experiment. *Building and Environment*, 244,

110750. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110750>

## Βιβλιογραφία Διαδικτύου

American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning (IN GREEK: Αμερικανική Επιστημονική Εταιρία Θέρμανσης Ψύξης και Κλιματισμού), from [www.ashrae.org](http://www.ashrae.org).

ENVI-met, from <https://www.envi-met.com/> and <https://envi-met.info/doku.php?id=root:start>

Greek Statistical Authority (IN GREEK: Ελληνική Στατιστική Αρχή), from <https://www.statistics.gr/>

<https://www.meteo.gr/>

National Meteorological Service (IN GREEK: Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία), from <https://emy.gr/?area=forecast>

[www.kydonparking.gr](http://www.kydonparking.gr)