



**ΓΕΩΠΟΝΙΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ**

**ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ**

**ΘΕΤΙΚΕΣ ΕΠΙΣΤΗΜΕΣ ΣΤΗΝ ΓΕΩΠΟΝΙΑ**

**ΚΛΑΔΟΣ: ΓΕΩΛΟΓΙΚΟ ΚΑΙ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΓΙΑ ΤΟΝ  
ΣΧΕΔΙΑΣΜΟ ΕΡΓΩΝ ΥΠΟΔΟΜΗΣ**

**ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΜΙΚΡΟΚΛΙΜΑΤΙΚΗ ΚΑΙ ΒΙΟΚΛΙΜΑΤΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ  
ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΜΙΚΡΩΝ ΥΠΑΙΘΡΙΩΝ ΧΩΡΩΝ ΤΟΥ ΑΣΤΙΚΟΥ  
ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ. ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ**

**ΒΑΣΙΛΙΚΗ Γ. ΧΡΙΣΤΟΠΟΥΛΟΥ  
ΓΕΩΠΟΝΟΣ Γ.Π.Α.**

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΤΣΙΡΟΣ Ε. ΙΩΑΝΝΗΣ, ΑΝΑΠΛΗΡΩΤΗΣ  
ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Γ.Π.Α.**

**ΑΘΗΝΑ 2014**

**ΓΕΩΠΟΝΙΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ**  
**ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ**  
**ΘΕΤΙΚΕΣ ΕΠΙΣΤΗΜΕΣ ΣΤΗΝ ΓΕΩΠΟΝΙΑ**  
**ΚΛΑΔΟΣ: ΓΕΩΛΟΓΙΚΟ ΚΑΙ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΓΙΑ ΤΟΝ**  
**ΣΧΕΔΙΑΣΜΟ ΕΡΓΩΝ ΥΠΟΔΟΜΗΣ**

**ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΜΙΚΡΟΚΛΙΜΑΤΙΚΗ ΚΑΙ ΒΙΟΚΛΙΜΑΤΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ**  
**ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΜΙΚΡΩΝ ΥΠΑΙΘΡΙΩΝ ΧΩΡΩΝ ΤΟΥ ΑΣΤΙΚΟΥ**  
**ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ. ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ**

**ΒΑΣΙΛΙΚΗ Γ. ΧΡΙΣΤΟΠΟΥΛΟΥ**  
**ΓΕΩΠΟΝΟΣ**

**ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:**

**ΕΙΣΗΓΗΤΗΣ:** ΙΩΑΝΝΗΣ Ξ. ΤΣΙΡΟΣ, ΑΝΑΠΛΗΡΩΤΗΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ  
ΓΕΩΠΟΝΙΚΟΥ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟΥ ΑΘΗΝΩΝ  
**ΜΕΛΗ:** ΝΙΚΟΛΑΟΣ ΑΛΒΕΡΤΟΣ, ΕΠΙΚΟΥΡΟΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ  
ΓΕΩΠΟΝΙΚΟΥ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟΥ ΑΘΗΝΩΝ  
ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ ΨΥΛΟΓΛΟΥ, ΚΥΡΙΟΣ ΕΡΕΥΝΗΤΗΣ ΕΘΝΙΚΟΥ  
ΑΣΤΕΡΟΣΚΟΠΕΙΟΥ ΑΘΗΝΩΝ

ΑΘΗΝΑ 2014

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της παρούσας εργασίας, είναι η μικροκλιματική ανάλυση ιδιαίτερων αρχιτεκτονικά χώρων του αστικού περιβάλλοντος, με εσωτερικές αυλές ή αίθρια, που στοχεύουν την βελτιστοποίηση των βιοκλιματικών συνθηκών που διαμορφώνονται. Στα πλαίσια της εργασίας έγινε λοιπόν εκτεταμένη καταγραφή των δεδομένων θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας του αέρα, της ταχύτητας του ανέμου και της μικρού μήκους κύματος ακτινοβολίας, προσπίπτουσας και ανακλώμενης, σε μια εσωτερική αυλή και έναν γειτονικό ακάλυπτο χώρο πολύ μικρής έκτασης στην περιοχή των Πατησίων, καθώς και σε εσωτερική αυλή στην Νέα Σμύρνη. Παράλληλα διεξήχθησαν ημερήσιες μετρήσεις σε υπαίθριους και αίθριους χώρους του Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών. Συνολικά οι μετρήσεις διήρκησαν 2,5 μήνες και πραγματοποιήθηκαν από της 25 Ιουνίου του 2013 μέχρι της 9 Σεπτεμβρίου του ίδιου έτους. Τα δεδομένα χρησιμοποιήθηκαν για την εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με την μικροκλιματική κατάσταση των χώρων αυτών, ενώ έπειτα χρησιμοποιήθηκαν μικροκλιματικά δεδομένα του έτους 2007 (όπως παρουσιάζονται στην εργασία των Tsiros and Hoffman, 2013) για διεξαχθεί ο έλεγχος αξιοπιστίας του μοντέλου Envi-met στην περιοχή των Πατησίων. Το μοντέλο αυτό, στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκε για την εξαγωγή σεναρίων σχετικά με τη βελτίωση των βιοκλιματικών συνθηκών της περιοχής αυτής.

Τα αποτελέσματα από τις επί τόπου μετρήσεις έδειξαν ότι οι μικροκλιματικές συνθήκες εξαρτώνται κατά κύριο λόγο από την διαμόρφωση του χώρου και την γεωμετρία του, καθώς ο μικρός ακάλυπτος επηρεάζονταν ελάχιστα από τις μετεωρολογικές συνθήκες, ενώ στους δύο άλλους μεγάλους χώρους διαμορφώνονταν ένα μωσαϊκό θερμομετρικών συνθηκών που επηρεαζόταν από την ύπαρξη της βλάστησης, των κτιρίων καθώς και της κάλυψης του εδάφους. Ο έλεγχος αξιοπιστίας του μοντέλου έδειξε υψηλή συσχέτιση των μετρούμενων και προσομοιούμενων τιμών, με τα σενάρια που διεξήχθησαν να καταδεικνύουν την σημαντικότητα της υψηλής βλάστησης στην θερμική άνεση όπως εκφράζεται μέσω της μέσου ακτινοβόλου θερμοκρασίας (mean radiant temperature), ενώ σύμφωνα με το σενάριο με την χαμηλή βλάστηση, φαίνεται ότι η βλάστηση δεν επηρεάζει την θερμοκρασία του αέρος που διαμορφώνεται σε ένα ύψος πάνω από την επιφάνεια του εδάφους. Παράλληλα, οι δομικές τροποποιήσεις όπως αλλαγή προσανατολισμού της αυλής και μείωση του ύψους κτιρίων, σύμφωνα με τα εξεταζόμενα σενάρια, έδειξαν βελτίωση των μικροκλιματικών και βιοκλιματικών συνθηκών καταδεικνύοντας έτσι ότι τα οφέλη από μία κατάφυτη εσωτερική αυλή αυξάνονται όταν υπάρχει κατάλληλη δόμηση και προσανατολισμός της ευρύτερης περιοχής.

Λέξεις κλειδιά: βιοκλιματικές συνθήκες, εσωτερικές αυλές, αίθρια, μοντελοποίηση, προσομοίωση, μοντέλο envi-met

## ABSTRACT

The purpose of this work is the micro-climatic analysis of specific architectural spaces of the urban environment, such as courtyards or atriums, aiming the optimization of bioclimatic conditions. An extensive data recording of temperature and relative humidity, wind speed and shortwave radiation, incident and reflected, were carried out in an inner courtyard and an adjacent small open space in Patissia/Athens and in a backyard in a suburb of Athens (Nea Smyrni). Furthermore, daily measurements were carried out in eight open spaces and atriums of the Agricultural University of Athens. Overall the measurements lasted for 2.5 months from June 25th till September 9th of 2013. These data were used to draw conclusions about the micro-climatic condition of these sites, while microclimatic data of the year 2007 (as presented in the work of Tsiros and Hoffman, 2013) were used to calibrate the Envi-met model. This model is then used for extraction scenarios on improving the bioclimatic conditions of this region.

The results from the in-situ measurements showed that the microclimatic conditions are affected primarily of the shape of space and geometry, as well as the small unbuilt space minimally affected by meteorological conditions, while in the two other major areas were formed a mosaic which affected by the existence of vegetation, buildings and soil cover. The calibration of the model showed high correlation between measured and simulated values. The scenarios demonstrate the importance of high vegetation on thermal comfort as expressed through the mean radiant temperature, while according to the scenario with low vegetation, it appears that vegetation does not affect the temperature of air is formed at a height above the ground surface. Meanwhile, structural modifications such as changing orientation of the courtyard and reduce building heights, according to the scenarios showed an improvement of microclimatic and bioclimatic conditions; thus demonstrating that the benefits of a full vegetated inner courtyard increased when there is appropriate geometry and orientation of the region.

Keywords: bioclimatic conditions, courtyard, atrium, simulation, envi-met model

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<u>ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ</u> .....	vi
<u>ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΓΡΑΦΗΜΑΤΩΝ</u> .....	vi
1. <u>ΣΚΟΠΟΣ ΚΑΙ ΔΙΑΡΘΡΩΣΗ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ - ΕΙΣΑΓΩΓΗ</u> .....	1
2. <u>ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ</u> .....	2
2.1 <u>ΑΣΤΙΚΟ ΜΙΚΡΟΚΛΙΜΑ</u> .....	2
2.2 <u>ΘΕΡΜΙΚΗ ΑΝΕΣΗ ΚΑΙ ΒΙΟΚΛΙΜΑΤΟΛΟΓΙΑ</u> .....	3
2.3 <u>ΑΣΤΙΚΗ ΡΟΗ ΑΕΡΑ ΚΑΙ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟ ΙΣΟΖΥΓΙΟ</u> .....	5
3. <u>ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑΣ</u> .....	8
3.1 <u>ΘΕΡΜΙΚΗ ΑΝΕΣΗ ΕΞΩΤΕΡΙΚΩΝ ΧΩΡΩΝ</u> .....	8
3.2 <u>ΜΙΚΡΟΚΛΙΜΑΤΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΣΕ ΕΣΩΤΕΡΙΚΕΣ ΑΥΛΕΣ</u> .....	11
3.3 <u>ΜΟΝΤΕΛΑ – ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ ΑΣΤΙΚΟΥ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ</u> .....	13
4. <u>ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΚΑΙ ΥΛΙΚΑ</u> .....	15
4.1 <u>ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΛΙΜΑΤΙΚΩΝ ΣΥΝΘΗΚΩΝ ΑΤΤΙΚΗΣ</u> .....	15
4.2 <u>ΠΕΡΙΟΧΗ ΕΡΕΥΝΑΣ ΚΑΙ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΠΕΔΙΟΥ</u> .....	16
4.3 <u>ΟΡΓΑΝΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΚΑΙ ΔΕΔΟΜΕΝΑ</u> .....	24
4.4 <u>ΜΟΝΤΕΛΟ ENVI-MET</u> .....	27
4.4.1 <u>ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ</u> .....	27
4.4.2 <u>ΔΙΑΤΑΞΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ</u> .....	28
4.4.3 <u>ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ</u> .....	30
4.4.4 <u>ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ENVI-MET</u> .....	34
5. <u>ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ</u> .....	37
5.1 <u>ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΜΙΚΡΟΚΛΙΜΑΤΙΚΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ</u> .....	37
5.1.1. <u>ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΩΝ ΠΑΤΗΣΙΩΝ</u> .....	37
5.1.2. <u>ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΣΤΗΝ ΝΕΑ ΣΜΥΡΝΗ</u> .....	48
5.1.3. <u>ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΣΤΟ ΓΕΩΠΟΝΙΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ</u> .....	55
5.2 <u>ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ</u> .....	63
5.2.1 <u>ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΠΟΙΗΣΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ</u> .....	63
5.2.2 <u>ΕΛΕΓΧΟΣ ΑΞΙΟΠΙΣΤΙΑΣ ΜΟΝΤΕΛΟΥ</u> .....	65
5.2.3 <u>ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ</u> .....	68
5.2.4 <u>ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΜΟΝΤΕΛΟΥ - ΣΕΝΑΡΙΑ</u> .....	71
<u>ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ</u> .....	86
<u>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ</u> .....	xi
<u>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ</u> .....	i

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1	Ατμοσφαιρικό περιβάλλον και άνθρωπος (WMO, 1999).....	3
Εικόνα 2	Περιοχή μελέτης στα Πατήσια (Πηγή: maps-google, 2013) .....	17
Εικόνα 3	Εσωτερική αυλή στα Πατήσια (Πηγή: Tsiros and Hoffman, 2013) .....	18
Εικόνα 4	Περιοχή μελέτης Νέα Σμύρνη (Πηγή: gis-ktimanet.gr, 2013).....	19
Εικόνα 5	Εσωτερική αυλή στην Νέα Σμύρνη (α, β) και άποψη αίθριου από ψηλά (γ). .....	20
Εικόνα 6	Θέσεις μετρήσεων στην βορειοανατολική πλευρά του Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών, (α) κίосκι, (β) αίθριο στο κτίριο Χασιώτη, (γ) αίθριο στο κτίριο Ρουσσόπουλου, (δ) γήπεδα και (ε) βιβλιοθήκη. ....	22
Εικόνα 7	Θέσεις μετρήσεων στην νοτιοδυτική πλευρά του Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών, (α) κεντρικό κτίριο, (β) ανθοκομία και (γ) ιατρείο.....	23
Εικόνα 8	Φορητός μετεωρολογικός σταθμός και όργανα μετρήσεων .....	25
Εικόνα 9	Βασική διάταξη μοντέλου (Πηγή: www.envi-met.info).....	29
Εικόνα 10	Ροή δεδομένων μοντέλου (Πηγή: www.envi-met.info).....	30
Εικόνα 11	Απεικόνιση περιβάλλοντος Envi-met, όπου (α) editor, (β) configuration file, (γ) configuration default, (δ) Leonardo-map.....	36
Εικόνα 12	Τυπική μορφολογία περιοχής μελέτης όπως προέκυψε από το Envi-met Editor 3.1. ....	63
Εικόνα 13	Τρισδιάσταση αποτύπωση περιοχής μελέτης (οι διαφορετικές αποχρώσεις του πράσινου έγκειται στην διαφορετική πυκνότητα φυλλώματος). ....	64

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1	Στατιστικά για την θερμοκρασία του αέρα σε ° C.....	24
Πίνακας 2	Καιρικές συνθήκες των επιλεγμένων ημερών για την βαθμονόμηση του μοντέλου, όπως καταγράφηκαν από τον μετεωρολογικό σταθμό του NOA (Tsiros and Hoffman, 2013) .....	64

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΓΡΑΦΗΜΑΤΩΝ

Γράφημα 1	Πορεία μετρούμενων τιμών μικροκλιματικών παραμέτρων σε ύψος 1.5m από το έδαφος στον ακάλυπτο χώρο στην περιοχή των Πατησίων για την περίοδο 01/08 – 02/08.....	38
Γράφημα 2	Πορεία μετρούμενων τιμών μικροκλιματικών παραμέτρων σε ύψος 1.5m από το έδαφος στην θέση πλησίον του διώροφου κτιρίου στην περιοχή των Πατησίων για την περίοδο 22/07 – 25/07. ....	40
Γράφημα 3	Πορεία μετρούμενων τιμών μικροκλιματικών παραμέτρων σε ύψος 1.5m από το έδαφος στο μέσον της εσωτερικής αυλής στην περιοχή των Πατησίων για την περίοδο 25/07 – 27/07. ....	41
Γράφημα 4	Πορεία μετρούμενων τιμών μικροκλιματικών παραμέτρων σε ύψος 1.5m από το έδαφος στην τρίτη θέση κάτω από πυκνή φυτοκάλυψη για την περίοδο 27/07 – 01/08. ....	43
Γράφημα 5	Θηκόγραμμα ωριαίων τιμών διαφορών θερμοκρασίας μεταξύ της πρώτης θέσης και του σταθμού αναφοράς.....	44
Γράφημα 6	Θηκόγραμμα ωριαίων τιμών διαφορών θερμοκρασίας μεταξύ της δεύτερης θέσης και του σταθμού αναφοράς. ....	45
Γράφημα 7	Θηκόγραμμα ωριαίων τιμών διαφορών θερμοκρασίας μεταξύ της τρίτης θέσης και του σταθμού αναφοράς.....	46
Γράφημα 8	Θηκόγραμμα ωριαίων τιμών διαφορών θερμοκρασίας μεταξύ του ακάλυπτου χώρου και του σταθμού αναφοράς. ....	47

Γράφημα 9	Πορεία μετρούμενων τιμών θερμοκρασίας αέρος (σε °C), σχετικής υγρασίας αέρος (σε %) και ταχύτητας ανέμου (σε m/sec) για τις τρεις θέσεις μετρήσεων. ....	49
Γράφημα 10	Πορεία μετρούμενων τιμών της μικρού μήκους κύματος ακτινοβολίας προσπίπτουσας και ανακλώμενης (σε W/m <sup>2</sup> ) στην Νέα Σμύρνη. ....	51
Γράφημα 11	Θηκόγραμμα ωριαίων τιμών διαφορών θερμοκρασίας μεταξύ της πρώτης θέσης και του σταθμού αναφοράς. ....	52
Γράφημα 12	Θηκόγραμμα ωριαίων τιμών διαφορών θερμοκρασίας μεταξύ της δεύτερης θέσης και του σταθμού αναφοράς. ....	53
Γράφημα 13	Θηκόγραμμα ωριαίων τιμών διαφορών θερμοκρασίας μεταξύ της τρίτης θέσης και σταθμού αναφοράς. ....	54
Γράφημα 14	Ταχύτητα ανέμου σε m/sec στους αίθριους χώρους του Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών. ....	56
Γράφημα 15	Ταχύτητα ανέμου σε m/sec στους υπαίθριους χώρους του Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών. ....	58
Γράφημα 16	Μέση ακτινοβόλος θερμοκρασία σε σχέση με τις αντίστοιχες τιμές της θερμοκρασίας του αέρος σε °C στους αίθριους χώρους (επάνω) και στους υπαίθριους χώρους (κάτω) του Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών. ....	59
Γράφημα 17	Ανακλώμενη μικρού μήκους κύματος ακτινοβολία προς στην προσπίπτουσα σε W/m <sup>2</sup> στους αίθριους χώρους (επάνω) και στους υπαίθριους χώρους (κάτω) του Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών. ....	60
Γράφημα 18	Διαφορές θερμοκρασίας μεταξύ του σταθμού αναφοράς (Γ.Π.Α.) και του πρώτου σημείου μετρήσεων – κιάσκι σε °C. ....	61
Γράφημα 19	Διαφορές θερμοκρασίας μεταξύ του σταθμού αναφοράς (Γ.Π.Α.) και των αίθριων χώρων της βόρειας πλευράς του πανεπιστημίου σε °C. ....	62
Γράφημα 20	Πορεία προσομοιωμένων και μετρούμενων τιμών θερμοκρασίας αέρος (σε °C), για 3 διαφορετικές ημέρες στην εσωτερική αυλή (α) και σε παράπλευρο πεζόδρομο (β). ....	66
Γράφημα 21	Σύγκριση προσομοιωμένων και μετρούμενων τιμών θερμοκρασίας αέρος (σε °C), για 3 διαφορετικές ημέρες στην εσωτερική αυλή (α) και σε παράπλευρο πεζόδρομο (β). ....	67
Γράφημα 22	Ωριαία μεταβολή της ταχύτητας του ανέμου για τις τρεις ημέρες αναφοράς. ....	68
Γράφημα 23	Ωριαία μεταβολή της σχετικής υγρασίας του αέρα για τις τρεις ημέρες αναφοράς. ....	69
Γράφημα 24	Ωριαία μεταβολή της θερμοκρασίας αέρος και της μέσης θερμοκρασίας ακτινοβολίας για τις τρεις ημέρες αναφοράς. ....	69
Γράφημα 25	Ωριαία πορεία της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας (επάνω) και της ανακλώμενης (κάτω) για τις τρεις ημέρες αναφοράς. ....	70
Γράφημα 26	Απεικόνιση διαφορών θερμοκρασιών στις 12:00 LST με δεδομένα σταθμού αναφοράς για την δεδομένη χρονική στιγμή σε °C. Κλίμακα θερμοκρασιών από -7.8° C (σκούρο μπλε) έως -4.8° C (ροζ) και οριζόντια ροή αέρα από 0.20m/sec ως 2.00m/sec. ....	71
Γράφημα 27	Χωρική κατανομή της διαφοράς θερμοκρασίας του αέρος σε σχέση με δεδομένα σταθμού αναφοράς σε ύψος 2m στις 12:00 LST στα δύο σενάρια αλλαγής προσανατολισμού. Κλίμακα θερμοκρασιών από -7.8° C (σκούρο μπλε) έως -4.8° C (ροζ) και οριζόντια ροή αέρα από 0.20m/sec ως 2.00m/sec. ....	74
Γράφημα 28	Χωρική κατανομή των διαφορών των θερμοκρασιών του αέρα σε σχέση με σταθμό αναφοράς σε °C στις 12:00 LST. Κλίμακα θερμοκρασιών από -7.1° C (σκούρο μπλε) έως -4.0° C (ροζ) και οριζόντια ροή αέρα από 0.10m/sec ως 0.50m/sec. ....	75
Γράφημα 29	Κατακόρυφη κατανομή θερμοκρασιών αέρα σε °C στις 12:00 LST στην παρούσα κατάσταση (επάνω), στο πρώτο και στο δεύτερο σενάριο αλλαγής προσανατολισμού (μέση και κάτω). Κλίμακα θερμοκρασιών 27.5° C (σκούρο μπλε) ως 32° C (ροζ) και ροή αέρα από 1 - 5m/sec. ....	77
Γράφημα 30	Οριζόντια χωρική κατανομή της T <sub>mr</sub> t σε °C στις 12:00 LST στο πρώτο (1α), δεύτερο (1β) και στο τρίτο σενάριο (1γ) αλλαγής βλάστησης και επιφανειών κάλυψης. Κλίμακα τιμών 39.0° C (σκούρο μπλε) ως 75° C (ροζ). ....	79
Γράφημα 31	Οριζόντια χωρική κατανομή της T <sub>mr</sub> t στις 12:00 LST στα σενάρια αλλαγής προσανατολισμού και αλλαγής γεωμετρίας (3α και 3β). Κλίμακα τιμών 39.0° C (σκούρο μπλε) ως 75° C (ροζ). ....	80
Γράφημα 32	Χωρική κατανομή της θερμοκρασίας των επιφανειών σε °C στις 12:00 LST στην παρούσα κατάσταση, στο πρώτο (1α), στο δεύτερο (1β) και στο τρίτο σενάριο (1γ) αλλαγής βλάστησης και επιφανειών κάλυψης. Η κλίμακα κυμαίνεται από τους 21.5° C (σκούρο μπλε) ως τους 53° C (ροζ). ....	83
Γράφημα 33	Οριζόντια απεικόνιση θερμοκρασιών επιφάνειας σε °C στις 12:00 LST στο πρώτο (2α) και στο δεύτερο (2β) σενάριο προσανατολισμού και στο πρώτο (3α) και δεύτερο (3β) αλλαγής γεωμετρίας. Κλίμακα τιμών 21.5° C (σκούρο μπλε) ως 53° C (ροζ). ....	85

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα εργασία ανατέθηκε από τον αναπληρωτή καθηγητή του εργαστηρίου γενικής και γεωργικής μετεωρολογίας Ιωάννη Ξ. Τσίρο, στα πλαίσια του μεταπτυχιακού προγράμματος σπουδών του Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών. Το θέμα μελέτης είναι:

### ‘ΜΙΚΡΟΚΛΙΜΑΤΙΚΗ ΚΑΙ ΒΙΟΚΛΙΜΑΤΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΜΙΚΡΩΝ ΥΠΑΙΘΡΙΩΝ ΧΩΡΩΝ ΤΟΥ ΑΣΤΙΚΟΥ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ. ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ’

Ευχαριστώ θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή Τσίρο Ι. για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε κατά την ανάθεση αυτού του θέματος, αλλά και την καθοδήγηση του κατά την διάρκεια της εκπόνησης τόσο του πειραματικού όσο θεωρητικού μέρους της μελέτης.

Παράλληλα θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επίκουρο καθηγητή του εργαστηρίου Γενικής Υδραυλικής Αλεξανδρή Σταύρο, για την πολύτιμη βοήθεια του στα θέματα σχετικά με τον προγραμματισμό του data logger και την εγκατάσταση των μικρομετεωρολογικών οργάνων, αλλά και για την παραχώρηση σχετικού εξοπλισμού (οργάνων, ηλιακού πάνελ κ.λ.π.) για την εκπόνηση των μετρήσεων. Ευχαριστώ επίσης τον Χαραλαμπίδου Ιωάννη του εργαστηρίου Γενικής και Γεωργικής Μετεωρολογίας για τις γνώσεις που προσέφερε σχετικά με την προγενέστερη εμπειρία του στο μοντέλο Envi-met αλλά και την έγκαιρη αποστολή των μετεωρολογικών δεδομένων του αυτόματου μετεωρολογικού σταθμού του Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών, καθώς και την υποψήφια διδάκτορα Τσέλιου Αρετή για την βοήθεια της στη διαδικασία της επιλογής και εγκατάστασης των σχετικών οργάνων και στην διεξαγωγή των μετρήσεων.

Τις ευχαριστίες μου στον επίκουρο καθηγητή του εργαστηρίου Φυσικής Αλβέρτο Νικόλαο και στον ερευνητή του Αστεροσκοπείου Αθηνών Ψυλόγλου Βασίλειο, για την συμμετοχή τους στην εξεταστική επιτροπή και τις διαλέξεις τους κατά την διάρκεια του μεταπτυχιακού προγράμματος.

Τέλος ευχαριστώ τις συμφοιτήτριες μου κάθε μία ξεχωριστά για την υποστήριξη και την συνεργασία που είχαμε καθ’ όλη την διάρκεια του μεταπτυχιακού προγράμματος.



## 1. ΣΚΟΠΟΣ ΚΑΙ ΔΙΑΡΘΡΩΣΗ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ - ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο μικροκλιματικός σχεδιασμός των πόλεων βασίζεται κυρίως στις στρατηγικές ελέγχου της ηλιακής ακτινοβολίας και του ανέμου στις αστικές δομές, για τη δημιουργία συνθηκών άνεσης κατά την διάρκεια του θέρους. Ο βαθμός έκθεσης στην ηλιακή ακτινοβολία ενός χώρου είναι ο κύριος τρόπος περιορισμού και ελέγχου της επίδρασης της στις μικροκλιματικές και βιοκλιματικές συνθήκες. Η ανθρώπινη άνεση είναι μια σύνθετη αντίδραση μεταξύ πολλών περιβαλλοντικών παραμέτρων, με την αστικοποίηση να δημιουργεί αρνητικές επιπτώσεις στην θερμική αίσθηση των ανθρώπων και την αστική βλάστηση να παίζει σημαντικό ρόλο στη διαμόρφωση του αστικού μικροκλίματος.

Σκοπός της παρούσας διατριβής είναι η διερεύνηση και η ανάλυση των μικροκλιματικών συνθηκών που επικρατούν σε ιδιαίτερες διαμορφώσεις της αστικής δόμησης όπως είναι τα αίθρια και οι εσωτερικές αυλές, με απώτερο στόχο την βελτιστοποίηση της βιοκλιματικής κατάστασης που διαμορφώνεται στους χώρους αυτούς. Οι περιοχές που επιλέχθηκαν ήταν τα Πατήσια, η Νέα Σμύρνη και το Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών, όπου στην μεν πρώτη ελήφθησαν μετρήσεις από μία φυτοκαλυμμένη εσωτερική αυλή έκτασης περίπου 300m<sup>2</sup> και έναν γειτονικό ακάλυπτο χώρο μόλις 10m<sup>2</sup> στον οποίο απουσίαζε η βλάστηση, ενώ στη δεύτερη περιοχή οι μετρήσεις αφορούσαν μια εσωτερική αυλή. Στο γεωπονικό πανεπιστήμιο επιλέχθηκαν οκτώ θέσεις μετρήσεων με διαφορετική φυτοκάλυψη και γεωμετρία. Ουσιαστικά μελετάται το φαινόμενο της αστικής θερμικής νησίδας και η επίδραση της βλάστησης, όπως επίσης η αρχιτεκτονική, η γεωμετρία και ο προσανατολισμός των χώρων, σε σχέση με τις μικροκλιματικές συνθήκες. Η διάρθρωση της εργασίας είναι η ακόλουθη.

Στο 2<sup>ο</sup> κεφάλαιο, αναφερόμαστε σε εισαγωγικά θέματα σχετικά με το φαινόμενο της αστικής θερμικής νησίδας και τις μικροκλιματικές συνθήκες των αστικών περιοχών.

Στο 3<sup>ο</sup> κεφάλαιο, γίνεται μια βιβλιογραφική ανασκόπηση σχετικά με την επίδραση της αρχιτεκτονικής ενός χώρου, την γεωμετρία του, το προσανατολισμό του, την ύπαρξη ή όχι βλάστησης κ.ά., στις μικροκλιματικές συνθήκες της περιοχής.

Στο 4<sup>ο</sup> κεφάλαιο, αναλύεται η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε ως προς τις επί τόπου μετρήσεις, στα όργανα και τα δεδομένα, καθώς και στο μοντέλο Envi-met, το οποίο προσομοιώνει το μικροκλίμα μιας αστικής περιοχής.

Στο 5<sup>ο</sup> κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της μικροκλιματικής ανάλυσης για τις περιοχές μελέτης, τα οποία συγκρίνονται με τα δεδομένα σταθερού σταθμού αναφοράς. Παράλληλα διενεργούνται κάποια σενάρια και προσομοιώσεις σχετικά με σχέδια βελτίωσης των βιοκλιματικών συνθηκών.

Στο τελευταίο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα συμπεράσματα σχετικά με τις μικροκλιματικές συνθήκες των περιοχών, όπως και τα σχέδια βελτιστοποίησης των συνθηκών μέσω των προσομοιώσεων.

## 2. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

### 2.1 ΑΣΤΙΚΟ ΜΙΚΡΟΚΛΙΜΑ

Η διαδικασία της αστικοποίησης παράγει ριζικές αλλαγές στην φύση των επιφανειών και των ατμοσφαιρικών συνθηκών μιας περιοχής. Αυτές περιλαμβάνουν τον μετασχηματισμό των θερμικών, υγρασιακών, αεροδυναμικών χαρακτηριστικών, καθώς και του καθεστώτος της ακτινοβολίας, επηρεάζοντας έτσι το ηλιακό και υδρολογικό ισοζύγιο (Oke, 1987).

Στο μικροκλίμα ενός αστικού περιβάλλοντος οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ εδάφους – βιόσφαιρας και ατμόσφαιρας, παρατηρούνται σε ένα στρώμα που λέγεται ‘urban canopy layer’ (Oke, 1987). Το πιο γνωστό χαρακτηριστικό του αστικού μικροκλίματος είναι ότι οι νυχτερινές θερμοκρασίες είναι υψηλότερες από εκείνες των γύρω μη αστικών περιοχών. Σε πυκνοκατοικημένα κέντρα μεγάλων πόλεων, έχει παρατηρηθεί νυχτερινή αστική θερμική νησίδα της τάξης των 12° Kelvin. Κατά τη διάρκεια της ημέρας, έχουν παρατηρηθεί μικρότερες διαφορές μεταξύ αστικών και περί-αστικών περιοχών, ενώ έχει σημειωθεί χαμηλότερη μέση ένταση ανέμου μέσα στον αστικό κλοιό (Oke, 1987). Η ύπαρξη της αστικής θερμικής νησίδας, στις εύκρατες περιοχές μπορεί να μην είναι τόσο επιζήμια, καθώς παρατηρείται ένα όφελος από την εξοικονόμηση της ενέργειας για θέρμανση, το οποίο είναι οριακά μειωμένο σε σχέση με την αύξηση της ζήτησης σε ψύξη (Kolokotroni et al., 2012; Emmanuel and Krüger, 2012).

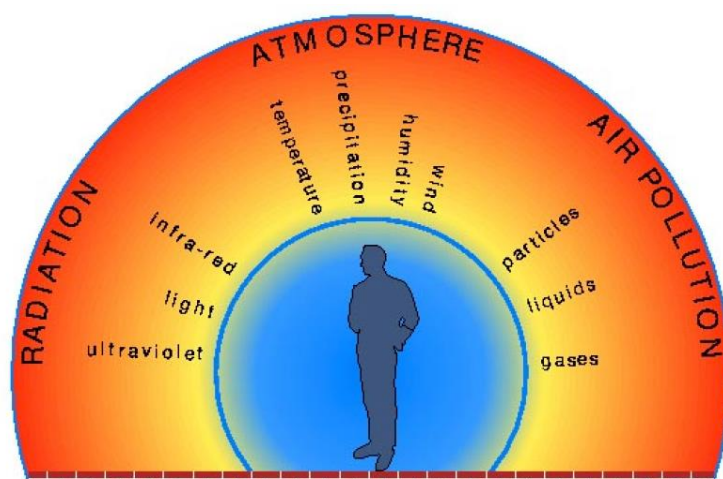
Η αστική γεωμετρία και οι θερμικές ιδιότητες των αστικών επιφανειών έχουν βρεθεί ότι είναι οι δύο κυριότερες παράμετροι που επηρεάζουν το αστικό μικροκλίμα (Oke, 1987). Η αναλογία μεταξύ του ύψους των κτιρίων (H) και η απόσταση μεταξύ τους (W) επηρεάζει την ποσότητα της εισερχόμενης και της εξερχόμενης ακτινοβολίας και επίσης επηρεάζει τις ταχύτητες του ανέμου, αποδεικνύοντας έτσι ότι η νυχτερινή αστική θερμική νησίδα αυξάνει με τον λόγο H/ W, αφού η καθαρή εξερχόμενη μεγάλου μήκους κύματος ακτινοβολία μειώνεται λόγω της μειωμένης θέασης προς τον ουρανό (SVF). Παράλληλα η υψηλή θερμοχωρητικότητα των υλικών συμβάλλει επίσης στην νυχτερινή θερμική νησίδα, καθώς ένα μεγάλο μέρος της εισερχόμενης ακτινοβολίας κατά τη διάρκεια της ημέρας είναι αποθηκευμένο σε αυτά τα υλικά (Oke, 1987).

Η ηλιακή ακτινοβολία είναι ένας καθοριστικός παράγοντας του φαινομένου αστική θερμική νησίδα και η μόνη κινητήρια δύναμη των αερίων μαζών σε αστικά περιβάλλοντα (Bozonnet et al., 2007). Στο αστικό περιβάλλον, κατά την θερινή περίοδο αυξάνονται τα θερμικά φορτία των κτιρίων, επηρεαζόμενα σε μεγάλο βαθμό από την ηλιακή ακτινοβολία, καθώς οι επιφάνειες αυτές έχουν συνήθως χαμηλή ανακλαστικότητα (albedo) (Akbari et al., 2001).

## 2.2 ΘΕΡΜΙΚΗ ΑΝΕΣΗ ΚΑΙ ΒΙΟΚΛΙΜΑΤΟΛΟΓΙΑ

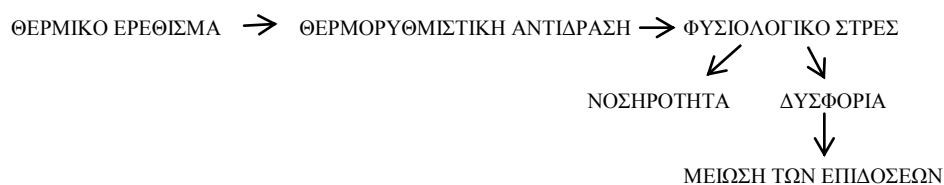
Βιομετεωρολογία είναι ο κλάδος της περιβαλλοντικής μετεωρολογίας που ασχολείται με της επιδράσεις της ατμόσφαιρας στα έμβια όντα, πρόκειται δηλαδή για μια διεπιστημονική επιστήμη που επίσημα αναγνωρίστηκε το 1956 (Ebi et al., 2009). Ουσιαστικά είναι το κομμάτι της φυσιολογίας και της οικολογίας στο οποίο η ατμόσφαιρα, φυσική ή ανθρωπογενής, είναι ένας σημαντικός παράγοντας (Munn, 1970). Κατά τον Mayer (1993b), στον πολεοδομικό σχεδιασμό και την αστική ανάπλαση πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η φυσιολογία, η υγεία και η ευεξία των ανθρώπων, με σκοπό την προσέγγιση των χαρακτηριστικών του “ιδανικού αστικού μικροκλίματος” προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί το κλιματικό στρες.

Η ανθρώπινη άνεση είναι μια σύνθετη αντίδραση μεταξύ πολλών περιβαλλοντικών παραμέτρων, που έχουν ήδη αναγνωριστεί από το 1938 (Εικόνα 1). Ο άνθρωπος έχει την ανάγκη να προσαρμόζει το ισοζύγιο της θερμότητας του σώματος του με το θερμικό περιβάλλον, ώστε να μεγιστοποιηθεί η άνεση (Ebi et al., 2009). Η διατήρηση της θερμικής αυτής ισορροπίας προϋποθέτει την εξισορρόπηση των θερμικών απωλειών με το ποσό της θερμότητας που δέχεται ο οργανισμός από το περιβάλλον και το ποσό που παράγεται από τον μεταβολισμό (Χρονοπούλου-Σέρελη και Χρονόπουλος, 2011). Η εξισορρόπηση του ισοζυγίου θερμότητας, ελέγχεται από αυτόνομο σύστημα ρύθμισης θερμοκρασίας το οποίο οδηγείται από συνειδητή αίσθηση θερμικής δυσφορίας (Ebi et al., 2009).



Εικόνα 1 Ατμοσφαιρικό περιβάλλον και άνθρωπος (WMO, 1999)

Το μοντέλο των περισσότερων μελετών ακολουθεί την εξής γραμμική αλληλουχία:



Η ανθρώπινη αντίδραση μπορεί να εκτιμηθεί από την εξίσωση του θερμικού ενεργειακού ισοζυγίου, λαμβάνοντας δηλαδή υπόψη το στρες, τον μεταβολισμό, την ακτινοβολία, την μεταγωγή και την εξάτμιση. Το ελάχιστο στρες μπορεί να επέλθει όταν ο μεταβολισμός ισορροπείται με την απώλεια σε θερμότητα σε μια θερμοκρασία κοντά στους 37°C. Αυτή η θερμοκρασία επιτυγχάνεται όταν η θερμοκρασία περιβάλλοντος είναι κοντά στους 25°C. Κατά τον Fanger (1967), ένας νέος άνδρας με μεταβολισμό 100W/m<sup>2</sup> σε θερμοκρασία 25.5°C έχει τιμή του δείκτη PMV ίσο με το μηδέν δηλαδή είναι θερμικά άνετα.

Η θερμοκρασία του ατμοσφαιρικού αέρα, που περιβάλλει τον άνθρωπο και καθορίζει μερικώς τη ροή θερμότητας από και προς αυτόν, παίζει σημαντικό ρόλο στην θερμική του αίσθηση. Παράλληλα όμως η θερμική αίσθηση επηρεάζεται και από άλλες μικρομετεωρολογικές παραμέτρους όπως είναι η υγρασία του αέρα, η θερμοκρασία ακτινοβολίας και η ταχύτητα του ανέμου (Χρονοπούλου-Σέρελη και Χρονόπουλος, 2011). Κατά τους Matzarakis and Mayer (2000), η πιο σημαντική μετεωρολογική παράμετρος που επηρεάζει την ενεργειακή ισορροπία των ανθρώπων κατά την διάρκεια ηλιόλουστων συνθηκών είναι η μέση θερμοκρασία ακτινοβολίας (mean radiant temperature – T<sub>mrt</sub>). Η παράμετρος αυτή ορίζεται για έναν άνθρωπο με καθορισμένη θέση και ενδυμασία ως η αντίστοιχη μέση θερμοκρασία εκπομπής μέλανος σώματος, στο οποίο θα είχαμε τις ίδιες απώλειες και οφέλη ακτινοβολίας κάτω από όμοιες πραγματικές συνθήκες (Matzarakis and Mayer, 2000).

Σύμφωνα με τον Ματζαράκη (1995), στον ελλαδικό χώρο τον Ιούνιο η βαθμίδα της μεγάλης θερμικής επιβάρυνσης επικρατεί μέχρι περίπου τα 400m ή τα 600m ανάλογα με την περιοχή, ενώ τον Ιούλιο και τον Αύγουστο παρατηρείται μια σταθερότητα των βιοκλιματικών συνθηκών που κατά τις μεσημεριανές ώρες κυριαρχούνται από τη βαθμίδα της υψηλής θερμικής επιβάρυνσης.

Η αστικοποίηση δημιούργησε αρνητικές επιπτώσεις στην θερμική άνεση των ανθρώπων (Emmanuel R., 2005) με την αστική βλάστηση να παίζει σημαντικό ρόλο στη διαμόρφωση του αστικού μικροκλίματος (Barrabas 1991; De ridder et al. 2004), καθώς τα πάρκα και οι υπαίθριοι χώροι αστικού πρασίνου, καθίστανται πιο ψυχροί και δροσεροί χώροι, σε σχέση με το δομημένο χώρο, λόγω της διαπνοής των φυτικών διαπλάσεων, δημιουργώντας έτσι ένα μωσαϊκό του μικροκλίματος. Τα αποτελέσματα αυτά υπογραμμίζουν τη σημασία των φυτεμένων ανοιχτών χώρων ως ένα αποτελεσματικό εργαλείο για την εξασθένιση της θερμότητας και την δημιουργία βέλτιστων συνθηκών θερμικής άνεσης.

### 2.3 ΑΣΤΙΚΗ ΡΟΗ ΑΕΡΑ ΚΑΙ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟ ΙΣΟΖΥΓΙΟ

Οι παράμετροι που συνήθως επηρεάζουν τις θερμικές βιοκλιματικές συνθήκες σε αστικές περιοχές και οι οποίες μπορούν να διαμορφωθούν ή να αλλάξουν με τον αστικό πολεοδομικό σχεδιασμό είναι οι ροές ακτινοβολίας και η ταχύτητα του ανέμου (Herrmann ad Matzarakis, 2010). Ουσιαστικά δηλαδή, ο μικροκλιματικός σχεδιασμός πόλεων βασίζεται στις στρατηγικές ελέγχου της ηλιακής ακτινοβολίας και του ανέμου στις αστικές δομές, με τον βαθμό έκθεσης στην ηλιακή ακτινοβολία να είναι ο κύριος τρόπος περιορισμού και ελέγχου της επίδρασης της στις μικροκλιματικές συνθήκες. (Erell et al., 2010) Πολλές μελέτες έχουν γίνει σχετικά με την επίδραση της ηλιακής ακτινοβολίας συγκριτικά σε δρόμους, ημι-υπαίθριους χώρους και πλατείες.

Η διαφορά μικροκλίματος ενός δομημένου και ενός αδόμητου περιβαλλοντικού περιβάλλοντος έγκειται στις διάφορες επιφανειακού ενεργειακού ισοζυγίου (surface energy balance – SEB). Η έννοια του ενεργειακού ισοζυγίου βασίζεται στον 1<sup>ο</sup> θερμοδυναμικό νόμο όπου κάθε ενέργεια δεν δημιουργείται ούτε καταστρέφεται αλλά μόνο μετατρέπεται από μια μορφή σε μια άλλη και ακολουθεί το εξής:

$$\{ \text{Εισερχόμενη ακτινοβολία} = \text{εξερχόμενη} + \text{αποθηκευμένη} \}$$

με την εισερχόμενη και εξερχόμενη ακτινοβολία να μην είναι απαραίτητα της ίδιας μορφής. Το ανώτατο όριο του urban boundary layer είναι κατά κάποιο τρόπο αυθαίρετο, ενώ το κατώτατο όριο του συστήματος μπορεί να είναι κάποια εκατοστά βάθους εδάφους ή κάποια μέτρα ανάλογα με τις ιδιότητες του. Τυπικά το επιφανειακό ενεργειακό ισοζύγιο θεωρείται ως ένα τυπικό μέσο-κλιματικό φαινόμενο με την αστική δομή να αναπαρίσταται ως μια επιφάνεια με μέσες ιδιότητες. (Erell et al., 2010)

Το υψόμετρο, ο προσανατολισμός και η κλίση των επιφανειών παίζουν σημαντικό ρόλο στο ποσό της ακτινοβολίας που φτάνει στο έδαφος τους, με αποτέλεσμα να παρατηρούνται σημαντικές μεταβολές στα προσλαμβανόμενα ποσά ενέργειας σε θέσεις που έχουν σχετικά μικρή απόσταση μεταξύ τους. Έτσι ανάλογα με το γεωγραφικό πλάτος την εποχή και την ώρα της ημέρας η ένταση και η διάρκεια της ακτινοβολίας παρουσιάζει έντονη μεταβλητότητα στο χώρο και στο χρόνο. Που αποδίδεται κυρίως στην μεταβλητότητα των γωνιών πρόσπτωσης των ηλιακών ακτινών. Παράλληλα στις θέσεις που η ηλιακή ακτινοβολία προσπίπτει κάθετα δέχονται σημαντικά μεγαλύτερα ποσά. Με τη γωνία πρόσπτωσης να διαφοροποιείται κατά τη διάρκεια της ημέρας. (Χρονοπούλου-Σέρελη και Χρονόπουλος, 2011)

Κατά τις πρωινές ώρες της ημέρας οι ανατολικές νοτιοανατολικές και τις απογευματινές οι δυτικές και νοτιοδυτικές εκθέσεις του βορείου ημισφαιρίου δέχονται θεωρητικά το ίδιο ποσοστό της άμεσης ακτινοβολίας αλλά παρουσιάζουν διαφορετικό θερμοκρασιακό

καθεστώς, διότι στις ανατολικές εκθέσεις ένα ποσοστό της ακτινοβολίας καταναλώνεται στην εξάτμιση της πρωινής δρόσου. (Χρονοπούλου-Σέρελη και Χρονόπουλος, 2011)

Η ηλιακή ακτινοβολία είναι απαραίτητη για την παθητική θέρμανση των κτιρίων. Οι επιφάνειες των κτιρίων που λαμβάνουν τις θετικές επιδράσεις είναι συνήθως οι κάθετες και οι προσανατολιζόμενες στον βορρά για το νότιο ημισφαίριο και στο νότο για το βόρειο ημισφαίριο. Ο έλεγχος της έκθεσης στον ήλιο περιλαμβάνει και όρια ως προς το ύψος ή των όγκο των κτιρίων που εξαρτάται από την έκθεση του ήλιου και την γεωγραφική θέση (γεωγραφικό πλάτος και μήκος). Η θερμική άνεση σε εξωτερικούς χώρους εξαρτάται κατά το πλείστον από τα φορτία ακτινοβολίας στα οποία ο χώρος έχει εκτεθεί όπως η θερμοκρασία του αέρα. Ο έλεγχος της θερμοκρασίας αέρος είναι περιορισμένος στους εξωτερικούς χώρους, έτσι δημιουργείται η ανάγκη μετριασμού της έκθεσης των επιφανειών και του χώρου στον ήλιο μέσω της σκίασης είτε από δένδρα κατά μήκος των πεζοδρομίων είτε από τις βεράντες. (Erell et al., 2010)

Ο άνεμος επηρεάζει τη χρήση των πεζοδρομίων των ανοιχτών χώρων σε δύο επίπεδα. Πρώτον, η κίνηση του αέρα έχει ως αποτέλεσμα την τυρβώδη μίξη της ενέργειας και της υγρασίας και δεύτερον, προωθεί την ανταλλαγή της ενέργειας στο ανθρώπινο σώμα μέσω της εξάτμισης του ιδρώτα σε ζεστές συνθήκες περιβάλλοντος και δημιουργώντας ρίγος σε ψυχρές συνθήκες. Ο σχεδιασμός ανεμοφρακτών σε ανοιχτούς χώρους απαιτεί συνδυασμό με συγκεκριμένες συνθήκες σε κάθε περιοχή όπως είναι η περιοδική και εποχιακή ανάλυση της ταχύτητας και της διεύθυνσης του ανέμου. (Erell et al., 2010)

Τα υλικά που αποτελούν τις αστικές επιφάνειες έχουν μεγάλη επίδραση στο θερμικό ισοζύγιο. Η απορροφητικότητα και η θερμική απόδοση των επιφανειών επηρεάζει την θερμοκρασία τους σε διάφορες συνθήκες. Παρόλα αυτά, η θερμοκρασία των επιφανειών καθορίζει την ανταλλαγή ακτινοβολίας μεταξύ του πεζόδρομου. Ο ρόλος των υλικών στην διαμόρφωση της αστικής θερμικής νησίδας δεν έχει μελετηθεί ακόμα σε βάθος. Πειράματα δείχνουν ότι η νυχτερινή αστική θερμική νησίδα εξηγείται όχι μόνο από την επίδραση της γεωμετρίας του αστικού φαραγγιού στην μεγάλου μήκους κύματος ακτινοβολία αλλά και στην διαφορά των θερμικών συνθηκών αστικών και περί-αστικών δομών. Στην πραγματικότητα οι διαφορές αυτές των υλικών είναι μικρές και επηρεάζονται σε μεγάλο βαθμό από την περιβαλλοντική εδαφική υγρασία. Η άσφαλτος για παράδειγμα, έχει μικρότερη αγωγιμότητα από το τσιμέντο, άρα ζεσταίνεται και ψύχεται γρηγορότερα. Τα κτίρια στην Μεσόγειο είναι ανοιχτόχρωμα για να μειώνεται η απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας κατά την διάρκεια της ημέρας και να διαμορφώνονται έτσι οι επιφανειακές θερμοκρασίες. Η ίδια στρατηγική ακολουθείται και για την μείωση της ανταλλαγής θερμότητας από τα πεζοδρόμια και τα κτίρια στον αέρα. Μελέτες δείχνουν πως κατά τη διάρκεια της ημέρας τα υλικά είχαν μέση θερμοκρασία μεγαλύτερη από την θερμοκρασία του αέρος με αντίστροφα αποτελέσματα το βράδυ που η διαφορά έφτανε τους 6°C. Τα οφέλη στα ζεστά κλίματα από

την μείωση της απορροφητικότητας της ηλιακής ακτινοβολίας των υλικών είναι στην θερμοκρασία των επιφανειών και στην μείωση της ανακλαστικότητας. Η λευκαύγεια των υλικών της ταράτσας (albedo), επιδρά ελάχιστα στην θερμοκρασία του αέρα στον αστικό κλοιό, καθώς επηρεάζει την αλλαγή των θερμοκρασιών πάνω από το επίπεδο της οροφής. (Errel et al., 2010)

### 3. ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑΣ

#### 3.1 ΘΕΡΜΙΚΗ ΑΝΕΣΗ ΕΞΩΤΕΡΙΚΩΝ ΧΩΡΩΝ

Η ανθρώπινη άνεση είναι μια σύνθετη αντίδραση μεταξύ πολλών περιβαλλοντικών παραμέτρων, με την αστικοποίηση να δημιουργεί αρνητικές επιπτώσεις στην θερμική αίσθηση των ανθρώπων (Emmanuel R., 2005) και την αστική βλάστηση να παίζει σημαντικό ρόλο στη διαμόρφωση του αστικού μικροκλίματος (Barrabas 1991; De ridder et al. 2004). Στα ξηρά περιβάλλοντα, ο σχεδιασμός του τοπίου, ο συνδυασμός της βλάστησης και του στοιχείου του νερού, καθώς και τα υλικά φύτευσης, έχουν σημαντικές επιπτώσεις στην διαμόρφωση ενός θερμικά άνετου περιβάλλοντος (Attia S., 2006).

Σύμφωνα με έρευνες, πολλοί μικροκλιματικοί παράγοντες είναι αυτοί που επηρεάζουν την θερμική άνεση των υπαίθριων χώρων (Aljawabra and Nikolopoulou, 2009; Tsiros et al, 2012; Shashua-Bar et al, 2010; Attia and Duchhart, 2011; Li and Pitts, 2006), ενώ άλλες μελέτες επικεντρώνονται στην αστική γεωμετρία (Bourbia et al., 2005; Bougatioti F., 2006; Johansson E., 2006; Tsianaka E., 2006; Sauza and Yamaguti, 2007; Bourbia and Boucherida, 2010; Gao et al., 2012; Martins et al., 2012), τον προσανατολισμό, τα υλικά (Chatzidimitriou et al., 2006), την βλάστηση (De ridder et al., 2004; Olivieri et al., 2012; Park et al., 2012; Shashua-Bar et al., 2012) και την ύπαρξη στοιχείων νερού (Kalamatianou and Yannas, 2005). Κατά τον βιοκλιματικό σχεδιασμό των πόλεων σε ζεστά κλίματα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη ο έλεγχος της ηλιακής ακτινοβολίας, του ανέμου και της εξάτμισης (Attia and Duchhart, 2011).

Η γεωμετρία μιας αστικής πόλης παίζει καθοριστικό ρόλο στην θερμική άνεση (Ali-Toudert and Mayer, 2006,2007; Johansson, 2006) και επηρεάζει το ποσό της ηλιακής ακτινοβολίας που θα φτάσει στο έδαφος, ενώ έχει αντίκτυπο στην θερμοκρασία των επιφανειών (Bougatioti F., 2006) και του αέρος (Tsianaka., 2006). Η ηλιακή ακτινοβολία επηρεάζει τον αριθμό των ατόμων και των εξωτερικών δραστηριοτήτων που λαμβάνουν χώρα κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού (Aljawabra and Nikolopoulou, 2009), ενώ είναι και η μόνη κινητήρια δύναμη των αερίων μαζών σε αστικές χαράδρες ή δρόμους (Bozonnet et al., 2007). Παράλληλα η αστική διαμόρφωση επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό τις θερμικές βιοκλιματικές συνθήκες και την μέση ακτινοβολία θερμοκρασία (Herrmann and Matzarakis, 2010), δηλαδή τη ροή των ακτινοβολιών.

Σε ξηρά κλίματα μια αστική συμπαγής δομή, το καλοκαίρι δημιουργεί μια δροσιστική αστική νησίδα (cool island) λόγω της εσωτερικής σκίασης, ενώ το χειμώνα παρέχει ζεστές συνθήκες εξαιτίας της προστασίας από δυνατούς ανέμους κατά τη διάρκεια της νύχτας (Pearmutter et al., 1999). Κατά την διάρκεια της ημέρας, το καλοκαίρι, μια βαθιά αστική χαράδρα παρουσιάζεται αρκετά πιο δροσερή σε σχέση με ρηχή, με τις καλοκαιρινές



θερμοκρασιακές διαφορές να φτάνουν τους 6° Kelvin, ενώ κατά τη διάρκεια του χειμώνα, η ρηχή χαράδρα είναι θερμικά πιο άνετη λόγω της πρόσβασης της ηλιακής ακτινοβολίας σε όλο το βάθος (Johannson E., 2006).

Η δομική μορφή των κτιρίων, όπως προείπαμε επιδρά στον άνεμο μέσα στον αστικό κλοιό, με την κατεύθυνση του ανέμου να είναι διαφορετική σε ένα αστικό φαράγγι από αυτή που μετράτε σε ένα σταθερό σταθμό, ενώ η ταχύτητα του ανέμου παρουσιάζει συσχετίσεις στην περίπτωση χαμηλής δόμησης (Gao et al., 2012). Σε ημι-υπαίθριους χώρους η ταχύτητα του ανέμου εξαρτάται από τους μετεωρολογικούς παράγοντες, παρά από την αρχιτεκτονική του χώρου σε αντίθεση με μια αστική χαράδρα (Gao et al., 2012). Έτσι σε ζεστά και ξηρά κλίματα, προτιμάτε ένας συμπαγές αστικός σχεδιασμός με βαθιές αστικές χαράδρες. (Johannson E., 2006)

Παράλληλα, το άνοιγμα του δρόμου στον ουρανό είναι ανάλογο της θερμικής καταπόνησης. Έρευνες δείχνουν ότι ο παράγοντας θέασης του ουρανού (SVF), ο οποίος αντιπροσωπεύει το ποσοστό του ελεύθερου ουρανού σε συγκεκριμένες περιοχές, επηρεάζει σημαντικά το εξωτερικό θερμικό περιβάλλον. Πιο συγκεκριμένα, μια υψηλή τιμή του δείκτη SVF (μόλις σκιασμένα) προκαλεί δυσφορία το καλοκαίρι (Lin et al., 2010) καθώς συσχετίζεται και με αυξημένες τιμές θερμοκρασίας αέρος (Bourbia and Boucherida, 2010), ενώ μια χαμηλή τιμή SVF προκαλεί δυσφορία το χειμώνα, σε περιοχές με ζεστά καλοκαίρια και ήπιους χειμώνες (Lin et al., 2010). Υψηλός δείκτης SVF επηρεάζει την κατανάλωση ενέργειας ανάλογα με τον προσανατολισμό, με το ύψος των κτιρίων πάνω από τα 24m να μην βελτιστοποιεί την ενεργειακή απόδοση (Saiza and Yamaguti, 2007). Επίσης η μεγάλη αναλογία ύψους σε σχέση με το πλάτος του φαραγγιού επιφέρει μειωμένες θερμοκρασίες αέρος και επιφάνειας εδάφους (Bourbia and Boucherida, 2010).

Στις χαράδρες με μικρότερο άνοιγμα στον ουρανό, ο προσανατολισμός τους παίζει καθοριστικό ρόλο, με αυτές που έχουν ανατολικό-δυτικό προσανατολισμό να παρουσιάζουν δυσμενέστερες συνθήκες ως προς την θερμική αίσθηση (Ali-Toudert and Mayer, 2007).

Σε ζεστά και υγρά κλίματα η σκίαση, στην περίπτωση που δεν υπάρχουν δένδρα, επέρχεται με την υψηλή δόμηση των κτιρίων και η οποία εξαρτάται από τον προσανατολισμό, με την μέγιστη δυνατή σκίαση να παρουσιάζεται στις βορειοδυτικές-νοτιοανατολικές και νοτιοδυτικές-βορειοανατολικές διευθύνσεις (Johansson et al., 2013). Ουσιαστικά οι στοές και όλες οι αρχιτεκτονικές διαμορφώσεις που προσφέρουν σκίαση, καθώς και η βλάστηση, επιτρέπουν μια μικρή μείωση της περιόδου της θερμικής δυσφορίας, εξαρτώμενα από τον προσανατολισμό και τις κατακόρυφες διαστάσεις του φαραγγιού (Ali-Toudert and Mayer, 2007).

Παράλληλα με την γεωμετρία του χώρου, τα υλικά σχεδιασμού παίζουν σημαντικό ρόλο στην διαμόρφωση του αστικού μικροκλίματος, με την θερμοκρασία αέρος να είναι ανάλογη της τραχύτητας των υλικών και αντιστρόφως ανάλογη της ανακλαστικότητας αυτών (albedo)

(Chatzidimitriou et al., 2006). Έτσι, μπορεί ο σχεδιασμός των κτιρίων και αστικών δρόμων ή χαραδρών να έχει μικρή επίδραση στην θερμοκρασία του αέρα, παίζει όμως καθοριστικό ρόλο στον θερμότητα που αποκτάει ένα ανθρώπινο σώμα άρα και στην θερμική του αίσθηση (Ali-Toudert and Mayer, 2007).

Σε ζεστά και ξερά περιβάλλοντα, λαμβάνεται σοβαρά υπόψη κατά τον αστικό σχεδιασμό η σκίαση από τα δένδρα, καθώς επιφέρει μείωση των θερμικών φορτίων των επιφανειών, άρα εξασφαλίζεται ενεργειακή οικονομία (Gomez-Munoz et al., 2010). Ειδικότερα ως προς την βλάστηση σε δρόμους, έρευνες καταδεικνύουν την δροσιστική επίδραση που ασκούν τα δένδρα στην θερμική αίσθηση μειώνοντας μέχρι και 3°K την μέση ημερήσια θερμοκρασία (Shashua-Bar et al., 2010). Παράλληλα παρουσιάζεται μείωση της ταχύτητας του ανέμου με την ύπαρξη δένδρων στα πεζοδρόμια παρά στην μεσαία νησίδα, ενώ με την σκίαση που δημιουργείται έχουμε και μειωμένη εισροή της ηλιακής ακτινοβολίας (Park et al., 2012). Το μέγιστο ποσοστό σκίασης από τα μεγάλα δένδρα, που φτάνει το 70%, παρουσιάζεται την άνοιξη και το φθινόπωρο (Gomez-Munoz et al., 2010). Σύμφωνα με τους Shinzato and Duarte (2012), ο δείκτης φυλλικής επιφάνειας έχει μικροκλιματική επίδραση στην θερμική άνεση, καθώς πυκνό φύλλωμα δένδρων, δηλαδή μεγάλος δείκτης LAI (leaf area index), επιφέρει αυξημένη διαφορά θερμοκρασίας επιφάνειας εδάφους και αέρος, μεταξύ των φυτοκαλυμμένων επιφανειών και του δρόμου.

Η βλάστηση μειώνει την θερμοκρασία του αέρα, λόγω της άμεσης σκίασης των επιφανειών και περιορισμού της αποθήκευσης ηλιακής θερμότητας, μέσω της εξατμισοδιαπνοής των φυτών και την μετατροπή της ηλιακή ακτινοβολίας σε λανθάνουσα θερμότητα, ενώ αυξάνεται και η λανθάνουσα ψύξη προσθέτοντας υγρασία στον αέρα (Dimoudi and Nikolopoulou, 2013). Έτσι, τα πάρκα και οι υπαίθριοι χώροι αστικού πρασίνου, καθίστανται πιο ψυχροί και δροσεροί χώροι, σε σχέση με ένα δομημένο χώρο, λόγω της διαπνοής των φυτικών διαπλάσεων, δημιουργώντας έτσι ένα μωσαϊκό του μικροκλίματος. Σύμφωνα με μελέτες, σχετικά με τη θερμική άνεση σε υπαίθριους χώρους, τα πάρκα παρουσιάζουν καλύτερες συνθήκες σε σχέση με τις πλατείες και τους δρόμους (Spangenberg et al., 2007). Η επίδραση της ψύξης κατά τη διάρκεια της ημέρας έφτανε τους 2°K, με τα πάρκα να παρουσιάζουν σε μια τυπική καλοκαιρινή μέρα μέτρια καταπόνηση ως προς την θερμική αίσθηση σε σχέση με τους πεζόδρομους ή τις πλατείες, ενώ στις ζεστές μέρες ήταν μειωμένες οι ώρες της θερμικής καταπόνησης (Tsiros et al., 2012). Στην πόλη του Μεξικού βρέθηκαν σημαντικές διαφορές θερμοκρασίας, σχετικής υγρασίας και της τάσης υδρατμών μεταξύ των αστικών πάρκων και του περιβάλλοντος δομημένου χώρου, καθιστώντας τα πάρκα της πόλης θερμικά πιο άνετα (Barrabas V.L., 1991), ενώ η παρουσία δένδρων σε δρόμους, μείωσε την θερμοκρασία του αέρα κατά 1.1°K και την θερμοκρασία των επιφανειών κατά 12°K (Spangenberg et al., 2007).

Οι Olivieri et al. (2012), υπογραμμίζουν την αναγκαιότητα χρήσης φυτοκαλυμένων προσόψεων σε αστικούς δρόμους καθώς πειράματα έδειξαν την αισθητή μείωση που παρατηρήθηκε στην θερμοκρασία και την ταχύτητα του ανέμου και την αύξηση της σχετικής υγρασίας του αέρα, διαμορφώνοντας έτσι ευνοϊκότερες συνθήκες θερμικές άνεσης.

Συμπερασματικά, τα αποτελέσματα των παραπάνω ερευνών, υπογραμμίζουν τη σημασία της φυτοκαλυμένων ανοιχτών χώρων, ως ένα αποτελεσματικό εργαλείο για την εξασθένιση θερμότητας, με το όφελος από την δροσιστική επίδραση (cooling effect) των φυτοκαλυμένων αστικών χώρων να είναι ισχυρότερο από το συγκριτικό μειονέκτημα που δημιουργούν το χειμώνα.

### 3.2 ΜΙΚΡΟΚΛΙΜΑΤΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΣΕ ΕΣΩΤΕΡΙΚΕΣ ΑΥΛΕΣ

Οι αυλές είναι μία από τις αρχαιότερες δομικές μορφές που χρησιμοποιήθηκαν από τον άνθρωπο. Χρησιμοποιήθηκαν δε ευρέως από τους Αρχαίους Έλληνες, τους Ρωμαίους και τους Αιγύπτιους. Πιστεύεται ότι οι αυλές είναι το πιο αποτελεσματικό είδος κατασκευής για την επίτευξη των επιθυμητών θερμικών περιβαλλοντικών συνθηκών.

Πολλές έρευνες έχουν γίνει σχετικά με το θερμικό περιβάλλον των εσωτερικών αυλών των αστικών δομών σε σχέση με αυτό των αστικών φαραγγιών – δρόμων (Shashua-Bar and Hoffman, 2004; Fahmy and Sharples, 2009; Gao et al., 2012), αλλά και γενικά για τις θερμικές συνθήκες που επικρατούν στις αυλές και τα αίθρια (Meir et al., 1995; Rajapaksha et al., 2003; Attia, 2006; Tsianaka, 2006; Shashua-Bar et al., 2010; Al-Mesri and Abu-Hijleh, 2012; Berkovic et al., 2012; Yang et al., 2012). Σε ζεστά και ξηρά περιβάλλοντα, έρευνες έχουν δείξει ότι παρατηρείται μειωμένη κατανάλωση ενέργειας και αύξηση του φυσικού φωτισμού σε κτίριο με εσωτερική αυλή σε σχέση με τη συμβατική μορφή ενός κτιρίου (Al-Mashri and Abu-Hijleh, 2012), προβάλλοντας έτσι τις θετικές επιδράσεις των αυλών στην διαμόρφωση του θερμικού περιβάλλοντος.

Η ύπαρξη μιας αυλής φαίνεται ότι επηρεάζει άμεσα τους κατώτερους ορόφους ενός κτιρίου που συνορεύουν ή προσανατολίζονται σε αυτήν, παρουσιάζοντας καλύτερες τιμές θερμοκρασίας αέρος από αυτούς που έχουν προσανατολισμό προς τον δρόμο, έστω και αν ο σχεδιασμός του κτιρίου δεν είναι κατάλληλος για να ευνοεί την μεταφορά του αέρα από την αυλή στο εσωτερικό του κτιρίου (Tsianaka E., 2006).

Η ηλιακή ακτινοβολία και οι αστικές δομές φαίνεται ότι είναι δύο από τους σημαντικότερους παράγοντες που καθορίζουν το θερμικό περιβάλλον της αυλής, τόσο το καλοκαίρι, όσο και το χειμώνα (Yang et al., 2012). Σύμφωνα με τους Meir et al. (1995), η θερμική άνεση μέσα στις αυλές, εξαρτάται από τον προσανατολισμό, την μεταχείριση των εκτιθέμενων επιφανειών και τις σχετικές διαστάσεις του ανοιχτού χώρου και του κτιρίου, με τον σωστό προσανατολισμό των αυλών να μπορεί να βελτιώσει τη θερμική συμπεριφορά του

χώρου και την θερμική δυσφορία να επέρχεται, όταν ο προσανατολισμός είναι ανεξάρτητος της ηλιακής θέσης και της διεύθυνσης του ανέμου, λόγω του ανεπαρκή αερισμού και της συσσώρευσης ακτινοβολίας. Στα αίθρια και στις αυλές τα επίπεδα θερμικής άνεσης παρουσιάζουν δυσκολίες στην εύρεση τους, λόγω της ηλιακής ακτινοβολίας και της έντονης διαστρωμάτωσης της θερμοκρασίας του αέρα (Li and Pitts, 2006).

Σε ξηρά περιβάλλοντα οι εσωτερικές αυλές χρησιμοποιούνται κατά κόρον ως αποθήκες ψυχρού αέρα (cool air reservoir), για να βελτιστοποιήσουν το μικροκλίμα (Attia S., 2006), ενώ η χρήση πολλαπλών αυλών σε κτίρια ιστορικής σημασίας, δείχνει ότι προωθεί την μεταφορά της ψύξης και μειώνει τα πρόσθετα θερμικά φορτία (Ernest and Ford, 2012). Σε ζεστά και υγρά κλίματα, η ένταξη μιας εσωτερικής αυλής στον σχεδιασμό ενός κτιρίου, φαίνεται ότι βελτιστοποιεί τις συνθήκες φυσικού αερισμού μέσα στο κτίριο, μειώνοντας έτσι την πιθανότητα υπερθέρμανσης του εσωτερικού του κτιρίου (Rajapaksha et al., 2003). Ωστόσο η αποτελεσματικότητα της τεχνικής αυτής εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τον σχεδιασμό του κτιρίου και το αν θα επιτρέψει την ανταλλαγή θερμότητας μεταξύ της αυλής και του εσωτερικού χώρου (Rajapaksha et al., 2003), με την ταχύτητα του ανέμου να επηρεάζεται ελαφρώς περισσότερο από την αρχιτεκτονική μορφή ενός κτιρίου παρά οι μετεωρολογικές συνθήκες που επικρατούν εκείνη η στιγμή (Gao et al. 2012).

Ως προς την γεωμετρία των εσωτερικών αυλών σε αστικά περιβάλλοντα, μελέτες δείχνουν ότι οι ανοιχτές αυλές έχουν φτωχό εξαερισμό σε σχέση με τα αίθρια με πολλά ανοίγματα που είναι πιο αποτελεσματικά, καθώς λειτουργούν σε καθεστώς αρνητικής πίεσης, δηλαδή αναρρόφησης (Sharples and Bensalem, 2001), ενώ στις ανοιχτές αυλές εισέρχεται ζεστός αέρας αλλά και ηλιακή ακτινοβολία με αποτέλεσμα την αύξηση της θερμοκρασίας (Berkovic et al., 2012). Παράλληλα με αύξηση των θερμικών μαζών, του albedo και της θερμικής αγωγιμότητας των υλικών στις αυλές, έχουμε μείωση της μέγιστης τιμής της ημερήσιας θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια της ημέρας, με το λόγο H/W της αυλής να παίζει σημαντικό ρόλο στη διαμόρφωση του θερμικού περιβάλλοντος και με το albedo των επιφανειών να έχει τη μικτότερη αξία (Yang et al., 2012).

Στην περίπτωση των πολλαπλών αυλών (multiple courtyards), οι διαφορές μεταξύ του κεντρικού αίθριου και του κήπου δείχνουν ότι ο συνδυασμός της σκίασης και της ψύξης μέσω εξάτμισης στον κήπο και η έκθεση στην ηλιακή ακτινοβολία στην κεντρική αυλή, προωθούν την μεταφορά της ψύξης στους ενδιάμεσους χώρους (Ernest and Ford, 2012), με τις στοές να διαχέουν τον ψυχρό αέρα στους εσωτερικούς χώρους και να βελτιώνουν τις θερμικές συνθήκες (Berkovic et al., 2012).

Η αρχιτεκτονική του τοπίου παίζει σημαντικό ρόλο στην διαμόρφωση της θερμικής άνεσης της αυλής, καθώς μελέτες δείχνουν ότι οι συνθήκες σε πλακόστρωτη ασκίαστη αυλή είναι δυσάρεστες κατά τη διάρκεια της ημέρας, με τις μισές από αυτές να παρουσιάζεται σοβαρή δυσφορία. Η σκίαση μέρους της αυλής με οποιοδήποτε μέσο (δένδρα ή πλέγμα),

έδειξε γενική μείωση στις ώρες δυσφορίας, ενώ μειώθηκε στο μέγιστο όταν η σκίαση ήταν πάνω στην πλακόστρωτη επιφάνεια. Στην περίπτωση ύπαρξης γρασιδιού τα αποτελέσματα ήταν σαφώς καλύτερα, με τα δένδρα όμως να θεωρούνται ως καλύτερος μηχανισμός σκίασης. Σε ασκίαστο δε γρασίδι οι συνθήκες δυσφορίας περιορίστηκαν σε σύντομο χρονικό διάστημα στα μέσα του απογεύματος. (Shashua-Bar et al. 2010) Η παρουσία δε επιφάνειας ή σώματος νερού, μειώνει της τιμές της Tmrt (Kalamatianou and Yannas, 2005), υποδεικνύοντας έτσι την επίδραση της εξάτμισης του νερού στο μικροκλίμα μιας αυλής και στην θερμική άνεση.

### 3.3 ΜΟΝΤΕΛΑ – ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ ΑΣΤΙΚΟΥ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

Τα τελευταία χρόνια έχουν γίνει πολλές έρευνες σχετικά με την προσομοίωση των βιοκλιματικών (Katuya et al., 2007) ή μικροκλιματικών συνθηκών (Erell et al., 2007; Naka Ohkubo et al., 2007) που επιδρούν στην σχεδίαση ενός αστικού δομημένου περιβάλλοντος. Οι περισσότερες από αυτές εστιάζουν στους παράγοντες σχεδιασμού των κτιρίων (γεωμετρία και υλικά) για την προώθηση των βέλτιστων συνθηκών εντός του κτιρίου (Bourbia et al., 2005; Chatzidimitriou et al., 2006) και άλλες που στοχεύουν στην εύρεση της επίδρασης της βλάστησης στην θερμική άνεση υπαίθριων χώρων (Kardinal Jusuf et al., 2006; Spangenberg et al. 2007; Fahmy and Sharplew, 2009; Tsitoura et al., 2011; Olivieri et al., 2012; Shinzato and Duarte, 2012).

Υπάρχουν πολλά μοντέλα που προσομοιώνουν τις συνθήκες περιβάλλοντος και τις συνθήκες θερμικής άνεσης αλλά χρησιμοποιούν διαφορετικό φυσικό υπόβαθρο. Μερικά από τα πιο διαδεδομένα είναι τα envi-met, ecotect, rayman, CAT (canyon air temperature) (Erell and Williamson, 2006) και άλλα. Το μοντέλο Envi-met που χρησιμοποιήθηκε και στην παρούσα εργασία, προσομοιώνει μικρής κλίμακας αλληλεπιδράσεις μεταξύ ατμόσφαιρας, φυτοκάλυψης και αστικών δομών-επιφανειών. Πρόκειται για ένα τρισδιάστατο αριθμητικό, μη υδροστατικό μοντέλο που μεταβάλλεται με το χρόνο (Bruse and Fleer, 1998), καθώς αναπαράγει τις φυσικές διαδικασίες της ατμόσφαιρας που επηρεάζουν το μικροκλίμα (υγροδυναμική και θερμοδυναμική), ενώ βασίζεται σε όλους τους κανόνες της φυσικής. Έχει δυνατότητες πρόβλεψης της κίνησης των ανέμων και της μεταβλητότητας της ακτινοβολίας, της θερμοκρασίας και της υγρασίας. Επίσης είναι δυνατή η προσομοίωση των δομών σε μεγάλη λεπτομέρεια, ενώ παράλληλα οι φυτικές μάζες αντιμετωπίζονται ολοκληρωτικά συμπεριλαμβάνοντας τα φαινόμενα της φωτοσύνθεσης και της διαπνοής (Bruse and Fleer, 1998).

Οι Ali-Toudert and Mayer, το 2006 και το 2007, χρησιμοποίησαν το μοντέλο Envi-met, για την εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με την θερμική άνεση σε αστικούς χώρους και πιο συγκεκριμένα σε αστικούς δρόμους. Στην μεν πρώτη εργασία, ασχολήθηκαν με συμμετρικές αστικές χαράδρες με ποικίλες αναλογίες ύψους πλάτους, καθώς και διαφόρων

προσανατολισμών, σε σχέση φυσικά με ένα δείκτη θερμικής άνεσης για κάθε περίπτωση. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι ο χρόνος και η διάρκεια της ημέρας που παρουσιάζεται η ακραία θερμική καταπόνηση εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από την αναλογία διαστάσεων και τον προσανατολισμό του δρόμου. Το 2007 τα αποτελέσματα της εργασίας έδειξαν ότι ο σχεδιασμός των κτιρίων παίζει μικρό ρόλο στην θερμοκρασία του αέρα, αλλά έχει καθοριστική επίδραση στην θερμότητα που αποκτά ένα ανθρώπινο σώμα. Σε διεθνές συνέδριο οι Spangenberg et al. (2007), παρουσίασαν μια εργασία βασισμένη στο μοντέλο Envi-met, που καταδεικνυε την δροσιστική επίδραση των πάρκων σε σχέση με τις πλατείες και τους δρόμους, ενώ με διάφορα σενάρια κατέληξαν στην θετική επίδραση της ύπαρξης δένδρων σε δρόμους, στην θερμοκρασία αέρος και εδάφους. Οι Johansson et al. (2013) μελέτησαν την επίδραση των διαφόρων προσανατολισμών των ψηλών κτιρίων στην σκίαση, σε ζεστά και υγρά κλίματα, με τα αποτελέσματα να ευνοούν τις βορειοδυτικές-νοτιοανατολικές και νοτιοδυτικές-βορειοανατολικές διευθύνσεις.

Ο Hakansson μελέτησε μέσω του ιδίου μοντέλου τις μικροκλιματικές συνθήκες ενός Seljuk του 13<sup>ου</sup> αιώνα, ενώ οι Kalamatianou and Yannas (2005), την επίδραση της εξάτμισης του νερού στο μικροκλίμα των εσωτερικών αυλών. Οι Samaali et al. (2007), μελέτησαν την εισροή της ηλιακής ακτινοβολίας σε καλλιέργεια σόγιας.

Οι Ng et al. (2012), επέδειξαν την αναγκαιότητα επέκτασης των φυτοκαλυμμένων εκτάσεων σε πυκνοκατοικημένες αστικές δομές, όπως είναι το Hong-Kong όπου διεξήχθησαν οι μετρήσεις, αλλά και την επίδραση του πρασίνου ως μέσο ψύξης. Με το μοντέλο envi-met προσομοιώθηκαν 33 περιπτώσεις με διαφορετικούς παράγοντες. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η χρήση πράσινων ταρατσών είναι αναποτελεσματική μέθοδος βελτίωσης των βιοκλιματικών συνθηκών της πόλης λόγω της μεγάλης αναλογίας H/W (ύψους κτιρίων / πλάτος δρόμου). Η πιο αποτελεσματική μέθοδος για τον δροσισμό των πεζόδρομων αναδείχθηκε η φύτευση δένδρων σε ποσοστό 33% επί της συνολικής επιφάνειας.

Η Saranti K. (2011), μελέτησε τις παραμέτρους θερμικής και οπτικής άνεσης αστικών πλατειών και τις συνέπειες τους στην αστική διαμόρφωση σε πλατεία στην Πάτρα. Τα αποτελέσματα των επί τόπου μετρήσεων έδειξαν ότι ο ήλιος είναι ο κυριότερος περιοριστικός παράγοντας, με τον άνεμο και την θερμοκρασία επιφάνειας να ακολουθούν, ενώ μέσω των μοντέλων envi-met και ecotect διεξήχθησαν σενάρια βελτίωσης των συνθηκών, καθώς και προτάσεις σχετικά με τα υλικά που θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν.

Οι Frohlich and Matzarakis (2013) από την άλλη μεριά κατά την εργασία τους για την ανάπτυξη σεναρίου με σκοπό την βελτίωση της θερμικής βιοκλιματικής κατάστασης στο Freiburg, χρησιμοποίησαν τρία μοντέλα τα οποία και σύγκριναν. Στα αποτελέσματα επεσήμαναν την μεγάλη πολυπλοκότητα του Envi-met η οποία οδηγεί σε λειτουργικά λάθη, ενώ λάθη στον σχεδιασμό του χώρου λόγω της ανάλυσης οδηγεί σε ανακρίβειες στον υπολογισμό της ροής του αέρα και της ακτινοβολίας.

## 4. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΚΑΙ ΥΛΙΚΑ

### 4.1 ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΛΙΜΑΤΙΚΩΝ ΣΥΝΘΗΚΩΝ ΑΤΤΙΚΗΣ

Το κλίμα της Αθηνών γενικά χαρακτηρίζεται από ήπιους χειμώνες αρχόμενους από τα μέσα του Δεκέμβρη. Ο ετήσιος αριθμός αίθριων ημερών, υπερβαίνει τις 120, ενώ η ετήσια νέφωση είναι 3.5 ως 4 βαθμίδες. Παράλληλα ο μικρός αριθμός βροχοπτώσεων, ο μέγιστος αριθμός αίθριων ημερών και η χαμηλή σχετική υγρασία του αέρος, καθιστούν το κλίμα της Αθήνας ιδανικό για τον άνθρωπο (Σέττας Ν., 1975). Στην Αττική παρατηρείται θερινή ανομβρία που διαρκεί τέσσερις μήνες (Σέττας Ν., 1975), με την σχετική υγρασία του αέρα την περίοδο αυτή, να φτάνει το 5% και την εξάτμιση να παίρνει τη μέγιστη τιμή της (Μαριολόπουλος Η., 1936).

Η ανάλυση των κλιματικών παραμέτρων, που ακολουθεί, βασίστηκε στα δεδομένα, που προήλθαν από τον μετεωρολογικό σταθμό της Νέας Φιλαδέλφειας. Ο σταθμός αυτός εντοπίζεται στο κέντρο του νομού Αττικής. Από την ετήσια κατανομή της μέσης μηνιαίας θερμοκρασίας αέρος προκύπτει ότι η τιμή της μέσης ετήσιας θερμοκρασίας αέρος διαμορφώθηκε στους 17,6 °C. Ο ψυχρότερος μήνας είναι ο Ιανουάριος με μέση θερμοκρασία 8,7°C ενώ οι θερμότεροι μήνες ο Ιούλιος με μέση θερμοκρασία 28°C. Όσον αφορά την προοδευτική μεταβολή της μέσης μηνιαίας θερμοκρασίας αέρος από μήνα σε μήνα διαπιστώνεται ότι οι μεγαλύτερες μεταβολές παρατηρούνται κατά τη μετάβαση από Απρίλιο σε Μάιο (+5,4°C) και από Σεπτέμβριο σε Οκτώβριο (-5,2°C) ενώ οι μικρότερες από Ιανουάριο σε Φεβρουάριο (+0,6°C) καθώς και από Ιούλιο σε Αύγουστο (-0,6 °C). Επίσης από την εποχική κατανομή της θερμοκρασίας αέρος διαπιστώνεται ότι θερμότερη εποχή είναι το Θέρος με θερμοκρασία 27°C και ψυχρότερη ο Χειμώνας με θερμοκρασία 9,4°C. Επισημαίνεται ότι η θερμοκρασία αέρος κατά το Φθινόπωρο (18,3°C) είναι μεγαλύτερη από εκείνη κατά την περίοδο της Ανοιξέως (15,7 °C). Η τιμή του ετήσιου θερμομετρικού εύρους διαμορφώνεται στους 19,3°C.

Οι μέσες μηνιαίες και οι απόλυτες τιμές των άκρων θερμοκρασιών στην περιοχή της Νέας Φιλαδέλφειας παρουσιάζουν ανάλογη πορεία κατά τη διάρκεια του έτους. Συγκεκριμένα, η τιμή της μέσης μέγιστης θερμοκρασίας διαμορφώθηκε στους 22,5°C ενώ της μέσης ελάχιστης στους 12,3°C. Η μεγαλύτερη τιμή της μέσης μέγιστης θερμοκρασίας παρατηρήθηκε τον Ιούλιο (33,5°C) ενώ η μικρότερη τιμή τον Ιανουάριο (12,5°C). Από τα δεδομένα των άκρων τιμών θερμοκρασίας προκύπτει ότι η τιμή της απόλυτης μέγιστης θερμοκρασίας σημειώθηκε στις 07-07-1988 φτάνοντας τους 45,0 °C ενώ η απόλυτη ελάχιστη έφτασε τους -5,8°C στις 19-01-1964. Όσον αφορά την προοδευτική μεταβολή της μέσης μέγιστης και της μέσης ελάχιστης θερμοκρασίας από μήνα σε μήνα διαπιστώθηκε γενικά παρόμοια συμπεριφορά με την αντίστοιχη περίπτωση των τιμών της μέσης θερμοκρασίας

αέρος. Έτσι οι μεγαλύτερες θετικές μεταβολές παρατηρήθηκαν κατά τη μετάβαση από Απρίλιο σε Μάιο (+5,8°C) για τη μέγιστη και από Απρίλιο σε Μάιο και Μάιο σε Ιούνιο (+4,3 °C) για την ελάχιστη θερμοκρασία, ενώ οι μεγαλύτερες αρνητικές από Σεπτέμβρη σε Οκτώβριο για τη μέγιστη (-5,9°C) και την ελάχιστη θερμοκρασία (-3,9°C). Οι μικρότερες θετικές μεταβολές σημειώθηκαν κατά τη μετάβαση από Ιανουάριο σε Φεβρουάριο (+1,0°C για τη μέγιστη και +0,2 °C για την ελάχιστη) και οι αρνητικές μεταβολές από Ιούλιο σε Αύγουστο (-0,3°C για τη μέγιστη και -0,1°C για την ελάχιστη).

Στην ετήσια πορεία της σχετικής υγρασίας, διαπιστώνεται αντίστροφη συμπεριφορά σε σχέση με τη θερμοκρασία με ένα ελάχιστο τον Ιούλιο (43,1%) και ένα μέγιστο το Δεκέμβριο (76,1%). Η σχετική υγρασία μεταβάλλεται με πολύ πιο γρήγορο ρυθμό κατά τους θερινούς και φθινοπωρινούς μήνες σε σχέση με τους υπόλοιπους μήνες του έτους.

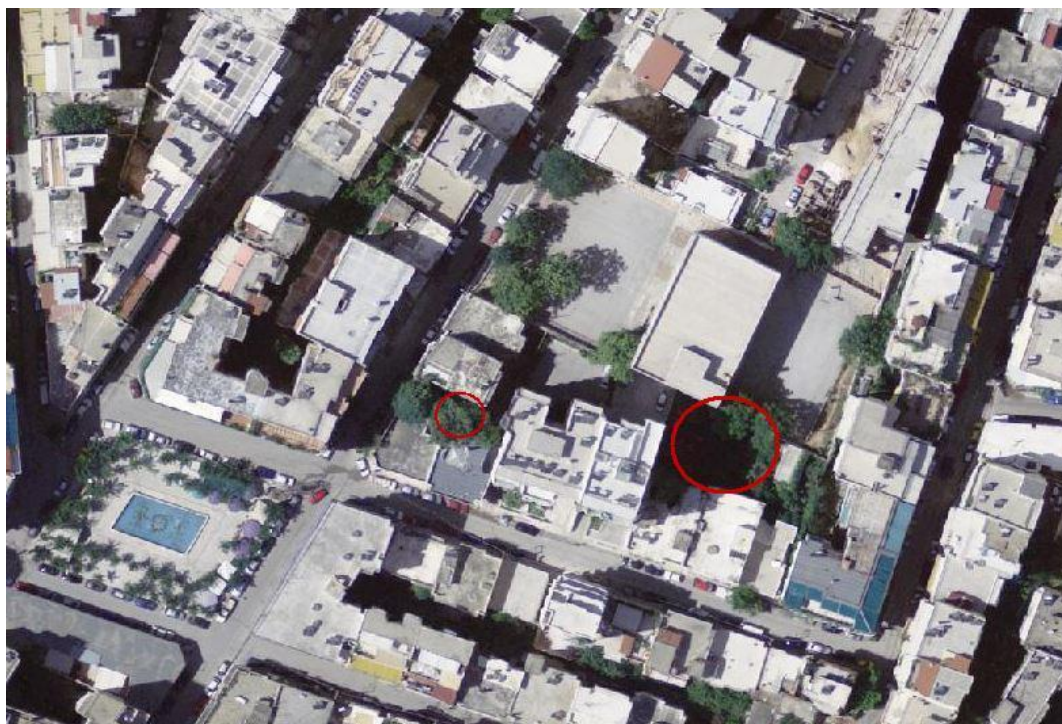
Η μελέτη των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων δείχνει ότι η Αθήνα χαρακτηρίζεται από σχετικά μεγάλο αριθμό ημερών βροχής ετησίως (87,1) με τον νετό να παρατηρείται με μεγαλύτερη συχνότητα κατά τους χειμερινούς μήνες ενώ κατά το Θέρος ο αριθμός ημερών νετού είναι πολύ μικρός. Το ύψος νετού παρουσιάζει τη μέγιστη τιμή το Δεκέμβριο (69,1 mm) και την ελάχιστη τιμή τον Ιούλιο (5,8 mm).

Οι επικρατέστεροι άνεμοι είναι γενικά βορειοανατολικής κατεύθυνσης, με την ένταση του ανέμου να παρουσιάζει τις μικρότερες τιμές της το Νοέμβριο (4,6 Kt) και τις μεγαλύτερες τον Ιούλιο (6,7 Kt).

#### 4.2 ΠΕΡΙΟΧΗ ΕΡΕΥΝΑΣ ΚΑΙ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΠΕΔΙΟΥ

Η πρώτη περιοχή μελέτης αφορά σε μία εσωτερική αυλή έκτασης περίπου 300m<sup>2</sup> ενός διώροφου κτίσματος, με βόρειο – βορειοανατολικό προσανατολισμό, στην περιοχή των Πατησίων. Ο χώρος οριοθετείται βόρεια από ένα σχολικό κτίριο τριών ορόφων, το προαύλιο του σχολείου και ένα γήπεδο, ενώ δυτικά και ανατολικά βρίσκονται κτίρια οχτώ και τεσσάρων ορόφων αντίστοιχα. Πρόκειται δηλαδή για μια κλειστή αυλή ως προς την νότια, νοτιοδυτική και νοτιοανατολική έκθεση. Ο χώρος της εσωτερικής αυλής χαρακτηρίζεται ως κήπος φυτοκαλυμένος, σε επίπεδο 85%, με αρδευόμενη κατά βάση βλάστηση. Η δεύτερη περιοχή έρευνας βρίσκεται επί της ίδιας οδού, στο ίδιο οικοδομικό τετράγωνο και πρόκειται για έναν ακάλυπτο χώρο μόλις 10 m<sup>2</sup>, στον οποίο απουσιάζει χαρακτηριστικά η βλάστηση λόγω της έλλειψης φωτός. Η έκθεση του χώρου αυτού περιορίζεται από τα ανατολικά από κτίρια ύψους οχτώ ορόφων και βορειοανατολικά από κτίριο έξι ορόφων. Βορειοδυτικά δε, υπάρχει στενό άνοιγμα που νοητά συνδέει τον χώρο με παρακείμενο δρόμο.





**Εικόνα 2** Περιοχή μελέτης στα Πατήσια (Πηγή: maps-google, 2013)

Η περιοχή των Πατησίων που μελετάμε, είναι ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα της Αθηναϊκής οικοδόμησης, που ξεκίνησε έντονα την δεκαετία του '50 για την κάλυψη της στέγασης ατόμων λόγω της έντονης αστικοποίησης. Χαρακτηριστικά της κύριας αρχιτεκτονικής που επικράτησε εκείνη την περίοδο ήταν οι στενοί δρόμοι και τα χαμηλής δόμησης οικήματα, όπως μονοκατοικίες ή διπλοκατοικίες που στην πίσω πλευρά βρίσκονταν αίθριοι χώροι ή εσωτερικές αυλές με σκοπό τον αερισμό και τον φωτισμό των πίσω δωματίων. Έτσι στο σύνολο του οικοδομικού τετραγώνου σχηματίζονταν στο κέντρο ένας συνολικά μεγάλος χώρος που δεν καλύπτονταν από βλάστηση. Η τάση που επικράτησε ύστερα, άρχισε την δεκαετία του '70 και συνεχίστηκε στην περίοδο της μεταπολίτευσης, ήταν κτίρια με υψηλό δείκτη δόμησης, με αποτέλεσμα οι χαμηλές κατοικίες να αντικατασταθούν από πολυκατοικίες ύψους έως οκτώ ορόφων.



**Εικόνα 3** Εσωτερική αυλή στα Πατήσια (Πηγή: Tsiros and Hoffman, 2013)

Ίδια αρχιτεκτονική επικράτησε και σε άλλες περιοχές εκτός του κέντρου των Αθηνών, όπως στον Δήμο Νέας Σμύρνης, στον νότιο τομέα Αθηνών. Η μελέτη των μικροκλιματικών και βιοκλιματικών συνθηκών στην περιοχή αυτή έγινε σε μία εσωτερική αυλή ενός τετραώροφου κτιρίου. Η εσωτερική αυτή αυλή γειτνιάζει με άλλες αυλές και αίθρια που βρίσκονται στο πίσω μέρος κτιρίων του ίδιου οικοδομικού τετραγώνου, σχηματίζοντας έτσι έναν χώρο συνολικής έκτασης περίπου 480m<sup>2</sup>. Στην ανατολική – νοτιοανατολική πλευρά της αυλής, όπως και στην βορειοανατολική, υπάρχουν κτίρια ύψους πέντε ως επτά ορόφων, ενώ δυτικά επικρατεί η χαμηλή δόμηση των κτιρίων με κτίρια που δεν ξεπερνούν τους τρεις ορόφους. Παράλληλα η ανατολική πλευρά του οικοδομικού τετραγώνου είναι ανυψωμένη, λόγω της τοπογραφίας της περιοχής, με αποτέλεσμα το αίθριο που σχηματίζεται στο κέντρο του οικοδομικού τετραγώνου να εκτίθεται στον ήλιο από τις μεσημβρινές ώρες και μετά, μέχρι και την δύση του ηλίου.

Οι μετρήσεις πεδίου ελήφθησαν σε διαφορετικές θέσεις μέσα στα αίθρια, ώστε να μελετηθεί η επίδραση των κτιρίων και της βλάστησης στις μικρομετεωρολογικές συνθήκες. Έτσι, στην εσωτερική αυλή στα Πατήσια καθορίστηκαν τρία σημεία αναφοράς, εκ των οποίων το πρώτο βρίσκεται πλησίον του διώροφου κτιρίου και σκιάζεται από αυτό κατά τις πρωινές ώρες, ενώ δεν υπάρχει έντονη σκίαση από την βλάστηση κατά την διάρκεια της υπόλοιπης μέρας. Το δεύτερο σημείο αναφοράς βρίσκεται στο κέντρο του υπό εξέταση χώρου κάτω από υψηλή και πυκνή βλάστηση, ενώ το τρίτο στην βορειοδυτική άκρη της αυλής, παράπλευρα του σχολικού κτιρίου. Το έδαφος καλύπτεται από χαλίκι στο δεύτερο και τρίτο σημείο μετρήσεων, ενώ στο πρώτο η επιφάνεια είναι καλυμμένη με τσιμέντο.



**Εικόνα 4** Περιοχή μελέτης Νέα Σμύρνη (αριστερά) και Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών (δεξιά) (Πηγή: gis-ktimanet.gr, 2013)

Στην Νέα Σμύρνη καθορίστηκαν επίσης τρία σημεία, το πρώτο πλησίον πενταόροφου κτιρίου στην νοτιοανατολική πλευρά του οικοδομικού τετραγώνου και το δεύτερο στο κέντρο της εσωτερικής αυλής κάτω από πυκνή βλάστηση και το τρίτο στο κέντρο του αίθριου χώρου, κάτω από αραιή βλάστηση, ενώ οι επιφάνειες εδάφους καλύπτονται από τσιμέντο και αμμοπηλώδες έδαφος αντίστοιχα.

Πριν την έναρξη των μετρήσεων στις θέσεις που προαναφέρθηκαν, ο μικρομετεωρολογικός σταθμός τοποθετήθηκε σε οκτώ θέσεις μέσα στο Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών, οι οποίες διαφοροποιούνται μεταξύ τους ως προς την αρχιτεκτονική τους, την γεωμετρία και τον προσανατολισμό τους, τα υλικά κάλυψης του εδάφους και την φυτοκάλυψη, ενώ η τοπογραφία της περιοχής είναι όμοια. Σε αυτά τα σημεία μετρήσεων περιλαμβάνονται και δύο αίθριοι χώροι κτιρίων με διαφορετική γεωμετρία και εδαφοκάλυψη, με τις άλλες θέσεις να αφορούν σε υπαίθριους χώρους, χαρακτηριστικούς για αστικά περιβάλλοντα.



**Εικόνα 5** Εσωτερική αυλή στην Νέα Σμύρνη (α, β) και άποψη αίθριου από ψηλά (γ).

Η συνολική έκταση του πανεπιστημίου είναι 340 περίπου στρεμμάτων. Στην βορειοανατολική πλευρά οι μετρήσεις έλαβαν χώρα αρχικά σε ένα ξύλινο εξάγωνο κίосκι (θέση 1), δυτικά του κυλικείου (Εικόνα 6α). Η θέση αυτή χαρακτηρίζεται από γρασίδι ύψους 10cm ενώ 2m βόρεια της θέσης βρίσκεται δένδρο ύψους 3m και χαμηλοί θάμνοι. Ουσιαστικά πρόκειται για έναν χώρο πλήρως φυτοκαλυμένο έκτασης περίπου  $45 \times 45m$ , με την σκίαση της θέσης να εξαρτάται μόνο από την στέγη της ξύλινης κατασκευής.

Ως δεύτερο σημείο μετρήσεων (Εικόνα 6β). επιλέχθηκε το αίθριο του κτιρίου Χασιώτη συνολικού εμβαδού  $570m^2$  με το 30% της επιφάνειας του εδάφους να καλύπτεται από τσιμέντο και το υπόλοιπο από αρδευόμενο γρασίδι διαφόρων ειδών που χρησιμοποιείται για

πειραματικούς σκοπούς. Στον χώρο βρίσκονται επίσης δύο δένδρα ύψους περίπου 3m, τα οποία όμως δεν επηρεάζουν τις μετρήσεις καθώς βρίσκονται στην βόρεια και τη νότια πλευρά του αίθριου, ενώ ο σταθμός τοποθετείται στην ανατολική και δυτική πλευρά. Ο χώρος αυτός βρίσκεται ουσιαστικά στο κέντρο παραλληλόγραμμου κτιρίου με το συνολικό ύψος του να φτάνει τα 13m. Η θέαση μέσα από το κτίριο του αίθριου γίνεται από γυάλινη επιφάνεια. Η αρχιτεκτονική αυτή, που εφαρμόζονταν κατά κόρον σε δημόσια κτίρια την δεκαετία του '70, συμβάλλει στον φυσικό φωτισμό και αερισμό του εσωτερικού του κτιρίου. Φυσικά με μελέτες που διεξήχθησαν αργότερα επιβεβαιώθηκε αυτή η λειτουργία, αλλά ο βαθμός έκθεσης στον ήλιο και ο αερισμός φαίνεται ότι εξαρτώνται άμεσα από την γεωμετρία του χώρου, τον προσανατολισμό και το είδος της εδαφοκάλυψη. Το άλλο αίθριο που μελετήθηκε βρίσκεται βορειότερα του προαναφερθέντος και αφορά σε ένα χώρο μικρότερης έκτασης που δεν ξεπερνά τα 100m<sup>2</sup> (Εικόνα 6γ), με το μεγαλύτερο μέρος να καλύπτεται από τσιμέντο και το υπόλοιπο από φυσικό έδαφος με δύο δένδρα μικρής ανάπτυξης και περιορισμένης φυλλικής πυκνότητας που βρίσκονται πλησίον του βορειοανατολικού τοιχώματος.

Στην προκείμενη πλευρά του πανεπιστημίου ελήφθησαν επίσης μετρήσεις από δύο γειτονικούς υπαίθριους χώρους, έμπροσθεν της βιβλιοθήκης (Εικόνα 6ε) και πίσω από τα γήπεδα (Εικόνα 6δ), με διαφορετική διαμόρφωση και θέαση στον ουρανό. Το πρώτο σημείο εκ των δύο αφορά σε χώρο πλακόστρωτο, στον οποίο περιμετρικά βρίσκονται ψηλά δένδρα ύψους άνω των 5m και υψηλοί θάμνοι, ενώ γειτνιάζει βόρεια με γήπεδο τένις και νότια με κτίριο ενός ορόφου αλλά μεγάλου ύψους. Ουσιαστικά ο χώρος που διαμορφώνεται είναι διαστάσεων περίπου 20 × 30m. Το δεύτερο σημείο είναι ανυψωμένο σε σχέση με το προηγούμενο, και αφορά σε τσιμεντοστρωμένη έκταση 7 × 20m που περιβάλλεται από γρασίδι και μικρό δασύλλιο στα βόρεια, ενώ νότια γειτνιάζει με γήπεδο μπάσκετ.

Στην νοτιοδυτική πλευρά του πανεπιστημίου επιλέχθηκαν τρεις θέσεις μετρήσεων. Η πρώτη αφορά σε πλακόστρωτο χώρο έκτασης περίπου 30 × 25m, ο οποίος περιβάλλεται από κτίρια δύο ορόφων στις τρεις πλευρές και τον κήπο της ανθοκομίας από την άλλη, ενώ στο κέντρο του χώρο υπάρχει μοναδικό δένδρο μεγάλου ύψους (Εικόνα 7β). Παράλληλα περιμετρικά του κτιρίου που βρίσκεται βόρεια υπάρχουν θάμνοι μεγάλου ύψους και μεγάλης φυλλικής επιφάνειας. Ο δεύτερος χώρος έκτασης 13 × 25m, (Εικόνα 7γ) ο οποίος διαμορφώνεται μεταξύ κτιρίων χαμηλού ύψους, αφορά σε πλήρως φυτοκαλυμένο χώρο με μικρούς πλακόστρωτους διαδρόμους. Το τρίτο σημείο βρίσκεται έμπροσθεν του κεντρικού κτιρίου του πανεπιστημίου(Εικόνα 7α). Πρόκειται για έναν χώρο πλακόστρωτο έκτασης περίπου 600m<sup>2</sup>, όπου στο κέντρο οριοθετείται χώρος κυκλικός με γρασίδι και έναν φοίνικα, ενώ γειτνιάζει κίονα ανατολικά και δυτικά με χώρους πλήρως φυτοκαλυμένους με ψηλά δένδρα, θάμνους και γρασίδι, ενώ νότια βρίσκεται το κεντρικό κτίριο. Στις εικόνες που ακολουθούν φαίνονται οι θέσεις μετρήσεων και οι διαμορφώσεις των χώρων.



Εικόνα 6 Θέσεις μετρήσεων στην βορειοανατολική πλευρά του Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών, (α) κίосκι, (β) αίθριο στο κτίριο Χασιώτη, (γ) αίθριο στο κτίριο Ρουσσόπουλου, (δ) γήπεδα και (ε) βιβλιοθήκη.



**Εικόνα 7** Θέσεις μετρήσεων στην νοτιοδυτική πλευρά του Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών, (α) κεντρικό κτίριο, (β) ανθοκομία και (γ) ιατρείο-οικονομία.

#### 4.3 ΟΡΓΑΝΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΚΑΙ ΔΕΔΟΜΕΝΑ

Οι μετρήσεις διεξήχθησαν την περίοδο από 29/06 ως τις 9/09. Σύμφωνα με τα μηνιαία κλιματικά δελτία της Εθνικής Μετεωρολογικής Εταιρίας (Ε.Μ.Υ.), στο τελευταίο δεκαήμερο του Ιουνίου επικράτησαν ήπιες συνθήκες καιρού, με την μέγιστη θερμοκρασία να μην ξεπερνά τους 37° C. Τον Ιούλιο παρατηρήθηκαν αυξημένες τιμές θερμοκρασίας σε σχέση με τα κανονικά για την εποχή επίπεδα. Γενικά ήταν ξηρός μήνας με μικρές θερμοκρασιακές διαφορές κατά την διάρκεια της ημέρας, ενώ υπήρχαν άνεμοι μέτριας έντασης. Ο Αύγουστος είναι ένας ζεστός μήνας, με τις υψηλότερες μέγιστες θερμοκρασίες να παρατηρούνται τις τελευταίες μέρες του μήνα, που άγγιξαν τους 39.8° C. Τον Σεπτέμβρη επικράτησαν ήπιες συνθήκες με την μέγιστη θερμοκρασία να είναι στους 30.1° C και την μέση στους 25.7° C, ενώ δεν σημειώθηκε βροχόπτωση, ούτε άνεμοι δυνατής έντασης.

**Πίνακας 1** Στατιστικά για την θερμοκρασία του αέρα σε ° C.  
ΚΑΛΟΚΑΙΡΙ 1955-1997<sup>1</sup> ΚΑΛΟΚΑΙΡΙ 2013<sup>2</sup> ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ 29/06 - 09/09

	ΚΑΛΟΚΑΙΡΙ 1955-1997 <sup>1</sup>				ΚΑΛΟΚΑΙΡΙ 2013 <sup>2</sup>				ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ 29/06 - 09/09			
	ΙΟΥΝΙΟΣ	ΙΟΥΛΙΟΣ	ΑΥΓΟΥΣΤΟΣ	ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ	ΙΟΥΝΙΟΣ	ΙΟΥΛΙΟΣ	ΑΥΓΟΥΣΤΟΣ	ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ	ΙΟΥΝΙΟΣ	ΙΟΥΛΙΟΣ	ΑΥΓΟΥΣΤΟΣ	ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ
ΜΕΣΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ	25.6	28	27.4	23.3	26.6	29.5	29.9	25.7	26.3	33.5	29.3	25.9
ΜΕΣΗ ΜΕΓΙΣΤΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ	31.1	33.5	33.2	29.2	31	33.2	34	30.1	31.3	33.9	37.9	35.3
ΜΕΣΗ ΕΛΑΧΙΣΤΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ	18.2	20.8	20.7	17.3	20.6	22.9	24.7	19.5	22.6	22.2	24.5	22.3

Για την μελέτη των μικροκλιματικών συνθηκών που επικρατούν στους παραπάνω χώρους κρίθηκε αναγκαία η μέτρηση της θερμοκρασίας και της υγρασίας του ατμοσφαιρικού αέρα, καθώς και η ταχύτητα του ανέμου αλλά και της μικρού μήκους κύματος ακτινοβολίας (προσπίπτουσας και ανακλώμενης). Επιπλέον για την εκτίμηση της θερμικής άνεσης χρησιμοποιήθηκε αισθητήρας μέτρησης της ακτινοβόλου θερμοκρασίας.

Τα όργανα που χρησιμοποιήθηκαν για να ληφθούν τα δεδομένα των μικρομετεωρολογικών παραμέτρων, τοποθετήθηκαν σε ιστό σε ύψος 1.5m από το έδαφος. Για την μέτρηση της θερμοκρασίας και της σχετικής υγρασίας του αέρα, χρησιμοποιήθηκε ένα θερμό-υγρόμετρο Rotronic Hygromer MP100A. Οι αισθητήρες του οργάνου προστατεύονται από πλαστικό κάλυμμα υψηλής ανθεκτικότητας στην υπεριώδη ακτινοβολία,

<sup>1</sup> Σταθμός Εθνικής Μετεωρολογικής Υπηρεσίας, Νέα Φιλαδέλφεια με ΓΠ 38° 03' και ΓΜ 23° 40', 136.1m υψόμετρο, λεκάνη βαρόμετρου 138m και ύψος ανεμόμετρου 12m

<sup>2</sup> Κλιματικά δελτία Εθνικής Μετεωρολογικής Υπηρεσίας μηνών Ιουνίου, Ιουλίου, Αυγούστου και Σεπτεμβρίου 2013 για τον σταθμό της Ελευσίνας



παρέχοντας παράλληλα προστασία από τον άνεμο, την βροχή και την προσπίπτουσα ακτινοβολία. Ο αισθητήρας θερμοκρασίας έχει ακρίβεια  $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$  και εύρος που κυμαίνεται από  $-40^{\circ}\text{C}$  έως  $60^{\circ}\text{C}$ . Αντίστοιχα ο αισθητήρας της υγρασίας έχει εύρος από 0 ως 100% με ακρίβεια 2% και 5 ως 95% για ακρίβεια 1%. Ο χρόνος απόκρισης των δύο αισθητήρων σε θερμοκρασία  $23^{\circ}\text{C}$  και κινήσεις του αέρα με ταχύτητα 1m/sec είναι μικρότερο από 10sec για την υγρασία και μικρότερο από 15sec για την θερμοκρασία.



**Εικόνα 8** Φορητός μετεωρολογικός σταθμός και όργανα μετρήσεων

Η οριζόντια ταχύτητα του ανέμου μετρήθηκε με ένα ανεμόμετρο κυπέλλου (cup anemometer), που αποτελείται από 3 κύπελλα σε διάταξη  $120^{\circ}$  τοποθετημένα σε ένα κεντρικό άξονα περιστροφής. Η ακρίβεια μέτρησης είναι 0.1-0.3m/sec και το εύρος μετρήσεων από 0-75m/sec. Ως προς την ακτινοβολία χρησιμοποιήθηκε ο αισθητήρας προσπίπτουσας και ανακλώμενης ακτινοβολίας μικρού μήκους κύματος, δηλαδή ένα αλμπεντόμετρο (albedometer) CM7b της Kipp & Zonnen. Το όργανο αυτό αποτελεί συνδυασμό δύο αστεροειδών πυρανομέτρων με ανεξάρτητες αναλογικές τάσεις στις εξόδους μετρήσεις σήματος μια στην κάθε πλευρά μετρώντας την προσπίπτουσα και ανακλώμενη ακτινοβολία μικρού μήκους κύματος. Το κάθε αισθητήριο αποτελείται από 12 μαύρα και λευκά τεμάχια με 6 θερμοστοιχεία το καθένα με φασματική απόκριση από 310 έως 2800nm και αντίστοιχο χρόνο απόκρισης μικρότερο των 15sec. Το εύρος μέτρησης είναι 0-1400  $\text{W}/\text{m}^2$ . Για την μέτρηση της μέσης ακτινοβόλου θερμοκρασίας (mean radiant temperature –  $T_{mrt}$ ),

χρησιμοποιήθηκε επίσης αισθητήρας θερμοκρασίας pt100, ο οποίος τοποθετήθηκε σε ακρυλική σφαίρα διαμέτρου 38mm, βαμμένη σε γκρι ματ απόχρωση (RAL 7001/ flat grey), ώστε η ανακλαστικότητα του να είναι 0.3 (Nikolopoulou et al., 1999, Thorsson et al., 2007).

Όλες οι μετρήσεις των παραπάνω μετεωρολογικών παραμέτρων καταγράφονταν κάθε 10s και αποθηκεύονταν κάθε 1min, στο σύστημα καταγραφής και αποθήκευσης (datalogger) Campbell CR800. Για την λειτουργία του, χρησιμοποιήθηκε μπαταρία 12V και 7.2 AH, κλειστού τύπου (Sealed Lead Acid) με διαστάσεις 151mm x 65mm x 94mm, ενώ για την φόρτιση της μπαταρίας χρησιμοποιήθηκε ηλιακό πάνελ ώστε η τάση της μπαταρίας να μην πέφτει κάτω από τα επιτρεπτά όρια λειτουργίας της. Τα δεδομένα συλλέχθηκαν από τον data logger με την βοήθεια του προγράμματος Logger Net, αφού είχε προηγηθεί ο προγραμματισμός του καταγραφέα και των οργάνων.

## 4.4 ΜΟΝΤΕΛΟ ENVI-MET

### 4.4.1 ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Στην εργασία κρίθηκε αναγκαία, εκτός των μικρομετεωρολογικών και βιοκλιματικών συνθηκών που επικρατούν στους μικρούς και υπαίθριους χώρους, η μελέτη των συνθηκών που θα επικρατούσαν στους χώρους αυτούς μετά από αλλαγές διαφόρων μεταβλητών, όπως είναι η βλάστηση, η έκθεση και ο προσανατολισμός των χώρων, αλλά και των μετεωρολογικών συνθηκών. Έτσι για την διενέργεια των σεναρίων που θα μας οδηγούσαν στα συμπεράσματα σχετικά με την θερμική άνεση και τους παράγοντες που επιδρούν σε αυτή, χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο ENVI-MET 3.0 των Bruse and Flear (1998).

Το μοντέλο ENVI-MET (environmental meteorology), προσομοιώνει μικρής κλίμακας αλληλεπιδράσεις μεταξύ ατμόσφαιρας, φυτοκάλυψης και αστικών δομών-επιφανειών. Πρόκειται για ένα τρισδιάστατο αριθμητικό, μη υδροστατικό μοντέλο που μεταβάλλεται με το χρόνο (Bruse and Flear, 1998), καθώς αναπαράγει τις φυσικές διαδικασίες της ατμόσφαιρας που επηρεάζουν το μικροκλίμα (υγροδυναμική και θερμοδυναμική), ενώ βασίζεται σε όλους τους κανόνες της φυσικής. Έχει δυνατότητες πρόβλεψης της κίνησης των ανέμων και της μεταβλητότητας της ακτινοβολίας, της θερμοκρασίας και της υγρασίας. Επίσης είναι δυνατή η προσομοίωση των δομών σε μεγάλη λεπτομέρεια, ενώ παράλληλα οι φυτικές μάζες αντιμετωπίζονται ολοκληρωτικά συμπεριλαμβάνοντας τα φαινόμενα της φωτοσύνθεσης και της διαπνοής. Η τυπική ανάλυση του μοντέλου στο χώρο είναι από 0 έως 50m και 10sec στο χρόνο, που καθιστά το μοντέλο σε θέση να προσομοιώσει ακόμα και πολύπλοκες γεωμετρικές μορφές, όπως ταράτσες, μπαλκόνια ή πολύπλοκες διαμορφώσεις (Bruse, 2009). Παράλληλα η μικρή οριζόντια χωρική ανάλυση σε συνδυασμό με το μεγάλο χρονικό διάστημα προσομοίωσης (24 ως 48 ώρες), επιτρέπει την ανάλυση μικρής κλίμακας αλληλεπιδράσεις μεταξύ των επιμέρους κτιρίων, επιφανειών και φυτών.

Το μοντέλο αυτό έχει χρησιμοποιηθεί κατά κόρον σε μελέτες για την πρόβλεψη της θερμικής άνεσης κάτω από διαφορετικές προοπτικές σχεδιασμού των χώρων, καθώς λαμβάνεται υπόψη όλα τα αρχιτεκτονικά και δομικά στοιχεία μιας περιοχής, όπως κτίρια, φυσικά εμπόδια, ποσοστό φυτοκάλυψης, τύπος υλικών δόμησης και εδάφους, καθώς και οι μετεωρολογικές παράμετροι. Τα συνήθη πεδία εφαρμογής του είναι η αστική κλιματολογία, η αρχιτεκτονική των κτιρίων και ο περιβαλλοντικός αστικός-πολεοδομικός σχεδιασμός.

Το μοντέλο αυτό βασίζεται στους θεμελιώδεις νόμους της μηχανικής των ρευστών και της θερμοδυναμικής ενώ περιλαμβάνει την προσομοίωση των παρακάτω:

- της ροής γύρω και μεταξύ των κτιρίων,
- τις διαδικασίες ανταλλαγής θερμότητας και εξάτμισης στην επιφάνεια του εδάφους και στους τείχους,

- τον στροβιλισμό
- τις διαδικασίες ανταλλαγής ενέργειας μεταξύ βλάστησης και ατμόσφαιρας,
- την βιοκλιματολογία και
- την διασπορά ρύπων.

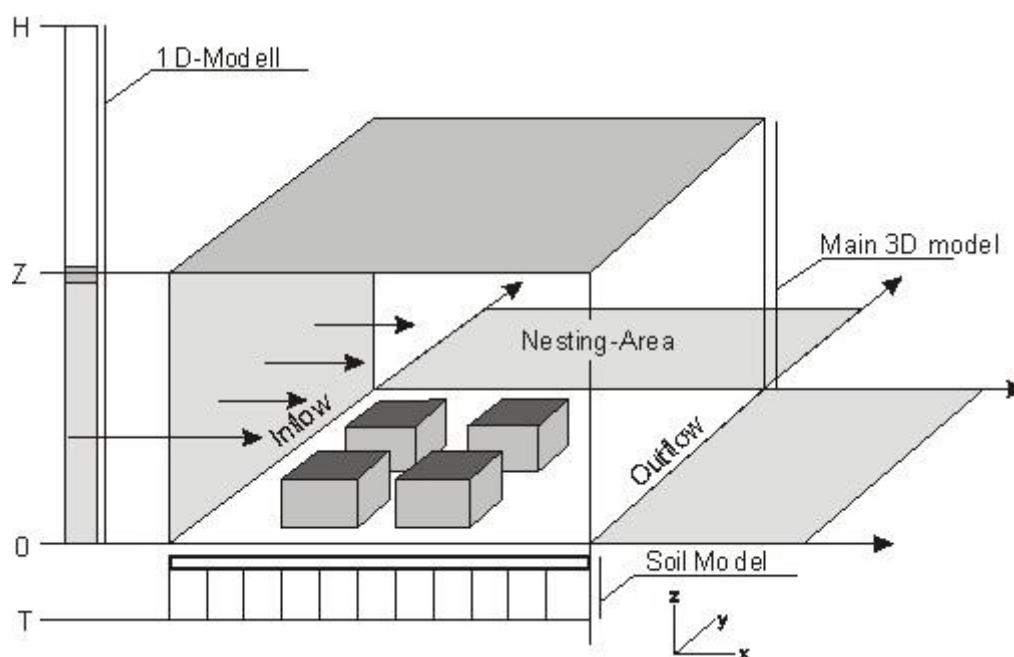
Σύμφωνα με την Ali-Toudert (2005), το envi-met είναι ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο για την πρόβλεψη των μικροκλιματικών συνθηκών σε αστικές δομές καθώς παρουσιάζει πολλά βασικά πλεονεκτήματα, με το σημαντικότερο την προσομοίωση της μικροκλιματικής δυναμικής σε ημερήσιο κύκλο, ενώ δίνεται η δυνατότητα παρουσιάσεις μιας πολύπλοκης αστικής δομής με την βλάστηση να αντιμετωπίζεται όχι μόνο ως ένα πορώδες εμπόδιο στην αιολική και ηλιακή ακτινοβολία, αλλά συμπεριλαμβάνονται και φυσιολογικές διεργασίες όπως είναι η εξατμισοδιαπνοή και η φωτοσύνθεση. Παράλληλα το έδαφος θεωρείται επίσης ως ένας όγκος που αποτελείται από πολλές στρώσεις. Η υψηλή χωρική και χρονική ανάλυση του μοντέλου επιτρέπουν τις - σε μικρή κλίμακα - μικροκλιματικές αλλαγές κυρίως αυτές που είναι ευαίσθητες στην αστική γεωμετρία και σημαντικές στα θέματα άνεσης. Τέλος το μοντέλο απαιτεί έναν ελάχιστο αριθμό δεδομένων εισόδου, ενώ στα αποτελέσματα συμπεριλαμβάνεται πληθώρα παραμέτρων.

#### 4.4.2 ΔΙΑΤΑΞΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

Ο γενικός σχεδιασμός του μοντέλου ακολουθεί το πρότυπο που χρησιμοποιούν όλα τα αριθμητικά τρισδιάστατα μοντέλα. Το κύριο μοντέλο είναι σχεδιασμένο σε τρισδιάστατη μορφή με 2 οριζόντιες διαστάσεις (x και y) και μία κατακόρυφη διάσταση (z). Μέσα σε αυτό το κύριο μοντέλο, τα χαρακτηριστικά στοιχεία που αντιπροσωπεύουν την περιοχή ενδιαφέροντος τοποθετούνται, όπως είναι τα κτίρια, η βλάστηση και οι διαφορετικοί τύποι επιφανειών. Για το αριθμητικό μοντέλο, η περιοχή ενδιαφέροντος θα πρέπει να μειωθεί σε ένα πλέγμα. Όσο μικρότερο είναι ένα μεμονωμένο κελί του πλέγματος, τόσο υψηλότερη είναι η ανάλυση του μοντέλου. Από την άλλη πλευρά, μειώνοντας τις διαστάσεις μιας κυψελίδας, αυξάνεται η ποσότητα των κελιών που θα χρειαστούν για να καλύψουν μια συγκεκριμένη περιοχή. Για παράδειγμα, μια περιοχή 100 x 100m μπορεί να οργανωθεί σε 100 x 100 κυψελίδες με διαστάσεις 1 x 1 m έκαστη ή μπορεί να οργανωθεί σε 20 x 20 κυψελίδες των 5 x 5 m. Για κάθε προσομοίωση, πρέπει να δίνεται μια σωστή αναλογία μεταξύ της ακρίβειας του μοντέλου, του αριθμού και του μεγέθους των κυψελίδων, καθώς και της δυνατότητας του εκάστοτε υπολογιστή. Ως γενικός κανόνας, φτάνοντας τις 250 x 250 x 30 κυψελίδες (ή οποιοδήποτε άλλο συνδυασμό, όπως 120 x 80 x 30) μπορεί να θεωρηθεί ως ένα μεγάλο μοντέλο και χρειάζεται ένα μεγάλο κομμάτι της CPU.

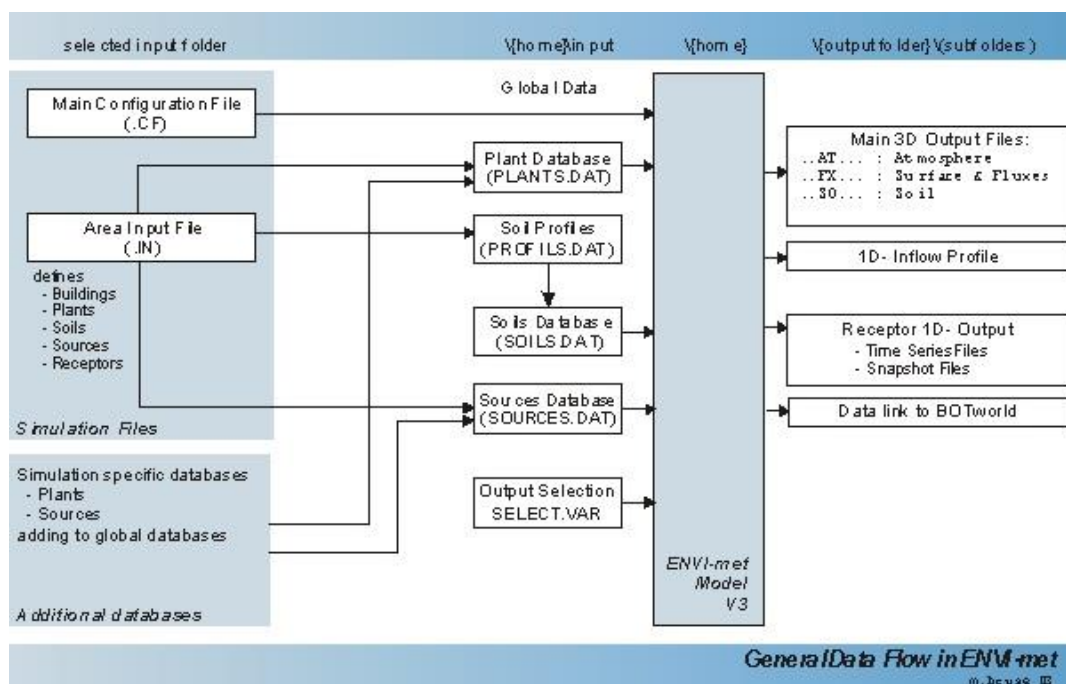
Καθώς η διαθέσιμη αριθμητική ισχύ και η μνήμη αποθήκευσης του υπολογιστή είναι ο καθοριστικός περιοριστικός παράγοντας, διάφορες στρατηγικές χρησιμοποιούνται από το ENVI-met για να καλύψει όσο το δυνατόν περισσότερο χώρο, χρησιμοποιώντας όσο το δυνατόν λιγότερα σημεία του πλέγματος. Μία από αυτές τις στρατηγικές είναι η χρήση ενός επιπλέον μονοδιάστατου μοντέλου (1D), ώστε να καθίσταται δυνατή μια ακριβής προσομοίωση των διαδικασιών του οριακού στρώματος, τουλάχιστον μέχρι το ύψος των 2500m, μέσω της επέκτασης του μοντέλου. Επιπλέον, το μοντέλο 1D παρέχει τα κάθετα προφίλ όλων των μεταβλητών-παραμέτρων του μοντέλου για την εισροή στο όριο του 3D μοντέλου.

Μια άλλη στρατηγική ώστε να καλύπτεται περισσότερος οριζόντιος χώρος χωρίς την χρήση κυψελίδων είναι η Nesting area, η οποία είναι μία ζώνη από κυψελίδες που περιβάλλουν τον πυρήνα του τρισδιάστατου μοντέλου. Με την απομάκρυνση των κελιών από το κέντρο του μοντέλου, αυξάνεται το μέγεθος τους. Το αποτέλεσμα είναι ότι δίνεται η επιλογή μετακίνησης των ορίων του μοντέλου μακριά από τον πυρήνα χωρίς να χάνονται κυψέλες υπολογισμού.



Εικόνα 9 Βασική διάταξη μοντέλου (Πηγή: [www.envi-met.info](http://www.envi-met.info))

Τέλος, το μοντέλο εδάφους είναι αναγκαίο για τον υπολογισμό της μεταφοράς θερμότητας από τις διάφορες επιφάνειες στο έδαφος και αντίστροφα. Επίσης, το υδρολογικό μέρος του εδαφικού μοντέλου παρέχει σημαντικές πληροφορίες σχετικά με το διαθέσιμο νερό μέσα στο έδαφος. Αυτά τα δεδομένα είναι αναγκαία για να εκτιμηθεί η μέγιστη διαπνοή της βλάστησης και του διαθέσιμου νερού στην επιφάνεια του εδάφους.



Εικόνα 10 Ροή δεδομένων μοντέλου (Πηγή: [www.envi-met.info](http://www.envi-met.info))

#### 4.4.3 ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

Οι ενότητες που περιλαμβάνει το μοντέλο αφορούν στην ατμόσφαιρα, στο σύστημα εδάφους, στην βλάστηση, στις επιφάνειες και στην βιομετεωρολογία. Πιο συγκεκριμένα οι υπολογισμοί του μοντέλου περιλαμβάνουν:

- τον υπολογισμό των ροών μικρού και μεγάλου μήκους κύματος ακτινοβολίας σε σχέση με τη σκίαση, την ανάκλαση και την αντανάκλαση της ακτινοβολίας από τα συστήματα δόμησης και βλάστησης,
- την διαπνοή, εξάτμιση και αισθητή ροή θερμότητας από τη βλάστηση στον αέρα συμπεριλαμβανομένης της πλήρους προσομοίωσης όλων των φυσικών παραμέτρων των φυτών (π.χ. ρυθμός φωτοσύνθεσης),
- την θερμοκρασία επιφανειών και τοιχωμάτων για κάθε σημείο του πλέγματος,
- την ανταλλαγή θερμότητας και υγρασίας στο εσωτερικό του συστήματος εδάφους,
- τον υπολογισμό βιομετεωρολογικών παραμέτρων, όπως Mean Radiant Temperature ή Predicted Mean Vote (PMV) και
- την διασπορά αδρανών αερίων και σωματιδίων, συμπεριλαμβανομένων την καθίζηση των σωματιδίων σε φύλλα και επιφάνειες.

Τα κτίρια, η βλάστηση, το έδαφος, οι επιφάνειες και οι πηγές ρύπων μπορούν να τοποθετηθούν μέσα στην περιοχή του μοντέλου κατά το πρώτο στάδιο της σχεδίασης. Εκτός

από φυσικές και τεχνητές επιφάνειες, το μοντέλο είναι επίσης σε θέση να διαχειριστεί και υδατικά συστήματα.

### **ΤΟΜΕΑΣ ΤΗΣ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑΣ**

Το πεδίο αυτό περιλαμβάνει τον υπολογισμό του ανέμου, της θερμοκρασίας, της υγρασίας και τους στροβιλισμούς. Για τον άνεμο χρησιμοποιούνται οι τρισδιάστατες εξισώσεις των Navier-Stokes στην μη υδροστατική προσέγγιση του Boussinesq. Η διατάραξη της πίεσης έχει αφαιρεθεί από τις εξισώσεις και υπολογίζεται ένα βοηθητικό πεδίο ταχύτητας. Οι ανταλλαγές μαζών ικανοποιούνται με τη διόρθωση του βοηθητικού πεδίου από μια επαναληπτική λύση της εξίσωσης Poisson και τη διόρθωση στα όρια εκροής. Η ροή ανανεώνεται σε δεδομένα χρονικά διαστήματα. Το ENVI-met υποστηρίζει επίσης έναν υπολογισμό της ροής σε πραγματικό χρόνο, που σημαίνει ότι το πεδίο ροής αντιμετωπίζεται ως μια κανονική προγνωστική μεταβλητή και υπολογίζεται σε κάθε βήμα. Όμως λόγω των πολύ μικρών βημάτων χρόνου που απαιτούνται στο στάδιο αυτό, χρειάζονται πολύ ισχυροί υπολογιστές.

Η οριζόντια μεταφορά και διάχυση της θερμοκρασίας ( $\theta$ ) και της υγρασίας ( $q$ ) υπολογίζεται χρησιμοποιώντας το προηγούμενο υπολογιζόμενο πεδίο του ανέμου και δίνονται από τις εξισώσεις: (Bruse and Fleer, 1998)

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + u_i \frac{\partial \theta}{\partial x_i} = K_h \left( \frac{\partial^2 \theta}{\partial x_i^2} \right) + Q_h$$
$$\frac{\partial q}{\partial t} + u_i \frac{\partial q}{\partial x_i} = K_q \left( \frac{\partial^2 q}{\partial x_i^2} \right) + Q_q$$

Η επιφάνεια του εδάφους και της βλάστησης ενσωματώνονται χρησιμοποιώντας μια πηγή / καταβόθρα και στις δύο εξισώσεις, ενώ οι τοίχοι των κτιρίων ενεργούν μόνο ως πηγή / καταβόθρα για τη θερμοκρασία.

Ο στροβιλισμός υπολογίζεται χρησιμοποιώντας το μοντέλο "E-epsilon" ή "k-epsilon". Δύο προγνωστικές εξισώσεις για την τυρβώδη παραγωγή ενέργειας (E) και της κατανάλωσης χρησιμοποιούνται για την προσομοίωση της κατανομής της τυρβώδους ενέργειας. Οι συντελεστές ανταλλαγής στον αέρα υπολογίζεται με βάση τη σχέση των Prandtl-Kolmogorov. Για τις καταστάσεις χαμηλής ταχύτητας ανέμου, το μοντέλο μήκους ανάμιξης 1ης τάξης μπορεί να χρησιμοποιηθεί αντί του μοντέλου E-έψιλον, η οποία συχνά αποτυγχάνει σε αυτή την κατάσταση.

Η πρώτη εξίσωση που χρησιμοποιείται στο μοντέλο για τον στροβιλισμό της κινητικής ενέργειας, περιγράφει τη διανομή της κινητικής ενέργειας (E) στον αέρα ανάλογα με την παραγωγή, την μεταφορά, η διάχυση και την καταστροφή:

$$\begin{aligned} \frac{\partial E}{\partial t} + u \frac{\partial E}{\partial x} + v \frac{\partial E}{\partial y} + w \frac{\partial E}{\partial z} = & \\ & \frac{\partial}{\partial x} \left( K_E \frac{\partial E}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_E \frac{\partial E}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_E \frac{\partial E}{\partial z} \right) \\ & + K_m \left\{ 2 \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 + 2 \left( \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \right. \\ & \left. + \left( \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 + 2 \left( \frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \right\} - \frac{g}{\theta} K_h \frac{\partial \theta}{\partial z} + Q_E(x, y, z) - \epsilon \end{aligned}$$

με την δεύτερη εξίσωση του μοντέλου να είναι παρόμοια και να περιγράφει τον ρυθμό διάχυσης του στροβιλισμού:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \epsilon}{\partial t} + u \frac{\partial \epsilon}{\partial x} + v \frac{\partial \epsilon}{\partial y} + w \frac{\partial \epsilon}{\partial z} = & \frac{\partial}{\partial x} \left( K_\epsilon \frac{\partial \epsilon}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_\epsilon \frac{\partial \epsilon}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_\epsilon \frac{\partial \epsilon}{\partial z} \right) \\ & + c_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{E} K_m \left\{ 2 \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 + 2 \left( \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \right. \\ & \left. + 2 \left( \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 + 2 \left( \frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \right\} \\ & - c_{3\epsilon} \frac{\epsilon}{E} \cdot \frac{g}{\theta} K_h \frac{\partial \theta}{\partial z} - c_{2\epsilon} \frac{\epsilon^2}{E} + Q_\epsilon(x, y, z) \end{aligned}$$

Τέλος ο συντελεστής της τυρβώδης ανταλλαγής είναι αποτέλεσμα και των δύο

$$K_m = c_\mu \frac{E^2}{\epsilon}$$

και είναι:

### ΣΥΣΤΗΜΑ ΕΛΑΦΟΥΣ

Στον τομέα αυτό γίνεται υπολογισμός της θερμοκρασίας και της ροής νερού μέσα στο εδαφικό σύστημα καθώς και τα υδάτινα σώματα. Η κατακόρυφη κατανομή της θερμοκρασίας και του νερού, υπολογίζονται για τα φυσικά εδάφη, καθώς και για τα τεχνητά υλικά καλύψεως. Για κάθε κατακόρυφο πλαίσιο πλέγματος, ένα διαφορετικό εδαφικό υλικό μπορεί να επιλέγεται έτσι ώστε να προσομοιώσει διάφορα αστικά εδάφη. Η ροή του νερού μέσα στο φυσικό έδαφος υπολογίζεται με τη χρήση των τύπων από τους Clapp και Hornberger. Οι υδραυλικές εξισώσεις περιλαμβάνουν έναν όρο καταβόθρας για την πρόσληψη νερού από τις ρίζες των φυτών. Οι θερμοδυναμικές ιδιότητες του εδάφους υπολογίζονται με τη βοήθεια της πραγματικής περιεκτικότητας σε νερό.

Τα υδάτινα σώματα παρουσιάζονται ως έναν ειδικό τύπο του εδάφους. Οι διεργασίες που υπολογίζονται μέσα στο νερό περιλαμβάνουν τη μετάδοση και την απορρόφηση της ακτινοβολίας μικρού μήκους κύματος μέσα στο νερό. Δεν χρησιμοποιείται δεύτερο ενεργειακό ισοζύγιο για την επιφάνεια του εδάφους του υδάτινου σώματος, έτσι ώστε η θέρμανση των ρηχών συστημάτων να είναι χαμηλότερη από ότι στις πραγματικές συνθήκες, όπου η κύρια πηγή ενέργειας να είναι η συναγωγή από την υδάτινη επιφάνεια του εδάφους,



παρά η απορρόφηση της ακτινοβολίας. Επιπλέον, το μοντέλο δεν περιλαμβάνει την τυρβώδη ανάμιξη, έτσι ώστε η χρήση να περιορίζεται σε στάσιμα ύδατα (π.χ. λίμνες).

### **ΒΛΑΣΤΗΣΗ**

Η βλάστηση αντιμετωπίζεται ως μία μονοδιάστατη στήλη με ύψος ( $Z_p$ ) και δεδομένη πυκνότητα φυλλώματος (Leaf area density). Μέσα στο εδαφικό σύστημα, η κατανομή των ριζών, αναπαρίσταται από την πυκνότητα των ριζών (root area density) και το συνολικό βάθος. (Bruse and Fleer, 1998)

Στο πεδίο αυτό γίνεται υπολογισμός της θερμοκρασίας του φυλλώματος, της ροής θερμότητας και νερού καθώς και της ανταλλαγής ατμών μεταξύ της κομοστέγης και του ατμοσφαιρικού αέρα. Η μέση θερμοκρασία των φύλλων σε ένα πλέγμα υπολογίζεται από την επίλυση του ενεργειακού ισοζυγίου της επιφάνειας των φύλλων σε σχέση με τις πραγματικές μετεωρολογικές συνθήκες και τις φυσιολογικές συνθήκες των φυτών. Οι τυρβώδεις ροές θερμότητας και ατμών υπολογίζονται μέσω του πεδίου του ανέμου και της γεωμετρίας του φυτού. Ο υπολογισμός των ροών ακτινοβολίας περιλαμβάνει τη σκίαση, την απορρόφηση και τη θωράκιση της ακτινοβολίας, καθώς και την ανάκλαση της ακτινοβολίας από άλλα φυτικά στρώματα.

Η ανταλλαγή των αερίων και της θερμότητας μεταξύ της βλάστησης και της ατμόσφαιρας ελέγχεται από τοπικό ενεργειακό ισοζύγιο μέσω της θερμοκρασίας των φύλλων και της αγωγιμότητας στομάτων, ελέγχοντας την ανταλλαγή αερίων (ατμού και  $CO_2$ ). Η πραγματική αγωγιμότητα των στομάτων ενός φυτού είναι μια σύνθετη λειτουργία, που εξαρτάται από τις εξωτερικές καιρικές συνθήκες (θερμοκρασία αέρα, διαθέσιμη ηλιακή φωτοσυνθετικά ενεργή ακτινοβολία - PAR και πολλά άλλα), καθώς και από τις φυσιολογικές διαδικασίες των φυτών (ρυθμός φωτοσύνθεσης, ζήτηση  $CO_2$  κ.ά.). Το ENVI-met χρησιμοποιεί ένα εξελιγμένο μοντέλο για την προσομοίωση της συμπεριφοράς των στομάτων της βλάστησης. Για να ορίσει το ύψος και το σχήμα ενός φυτού, το μοντέλο χρησιμοποιεί τυποποιημένη κανονική λειτουργία, που μπορεί να εφαρμοστεί για την επιφάνεια γρασιδιού, καθώς και για μεγάλα δέντρα. Το νερό στα φύλλα επηρεάζει ιδιαίτερα την εξατμιστική ικανότητα του φυτού. Η συμπύκνωση του νερού των φύλλων, η απορρόφηση της βροχής και η μεταφορά μεταξύ των διαφόρων στρωμάτων ή την επιφάνεια του εδάφους λόγω της βαρύτητας αντιμετωπίζεται ως ένα ανεξάρτητο σύστημα στο εσωτερικό του μοντέλου.

### **ΕΠΙΦΑΝΕΙΕΣ**

Ο τομέας αυτός περιλαμβάνει τις ροές στην επιφάνεια του εδάφους, στους τοίχους και τις οροφές, καθώς και την μεταφορά θερμότητας μέσα στα τοιχώματα. Το ενεργειακό ισοζύγιο υπολογίζεται στην επιφάνεια του εδάφους, με αποτελέσματα την επιφανειακή θερμοκρασία και υγρασία, καθώς και τις ροές αισθητής και λανθάνουσας θερμότητας. Η

επιφάνεια του εδάφους και οι τοίχοι χρησιμοποιούνται ως οριακές συνθήκες για το ατμοσφαιρικό μοντέλο (επιφάνεια του εδάφους και τοίχων) και για το μοντέλο εδάφους (επιφάνεια του εδάφους).

Η θερμοκρασία των τοιχωμάτων και των οροφών υπολογίζεται για κάθε σημείο του πλέγματος σε σχέση με τον προσανατολισμό των επιφανειών, την ανακλαστικότητα και την ανταλλαγή θερμότητας με τη θερμοκρασία στο εσωτερικό του κτιρίου. Η ανταλλαγή θερμότητας μεταξύ των τοιχωμάτων ή της οροφής και της ατμόσφαιρας δίνονται από το ισοζύγιο και τους τοπικούς στροβιλισμούς.

### **ΒΙΟΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΑ**

Στο πεδίο αυτό γίνεται ο υπολογισμός της Mean Radiant temperature ( $T_{mrt}$ ) και του δείκτη Predicted mean vote (PMV). Ο δείκτης PMV ορίστηκε από τον Fanger το 1972 και συσχετίζει το ενεργειακό ισοζύγιο του ανθρώπινου σώματος με τη θερμική άνεση του ατόμου. Κανονικά, η τιμή PMV δίδεται μεταξύ των τιμών -4 (πολύ κρύο) και +4 (πολύ ζεστό), αλλά, δεδομένου ότι σχετίζεται με το ενεργειακό ισοζύγιο μπορεί να φθάσει σε υψηλότερες ή χαμηλότερες τιμές. Ο υπολογισμός του δείκτη που γίνεται από το μοντέλο είναι μια ειδική προσαρμογή στις εξωτερικές συνθήκες που προτάθηκε από τον Jendritzky.

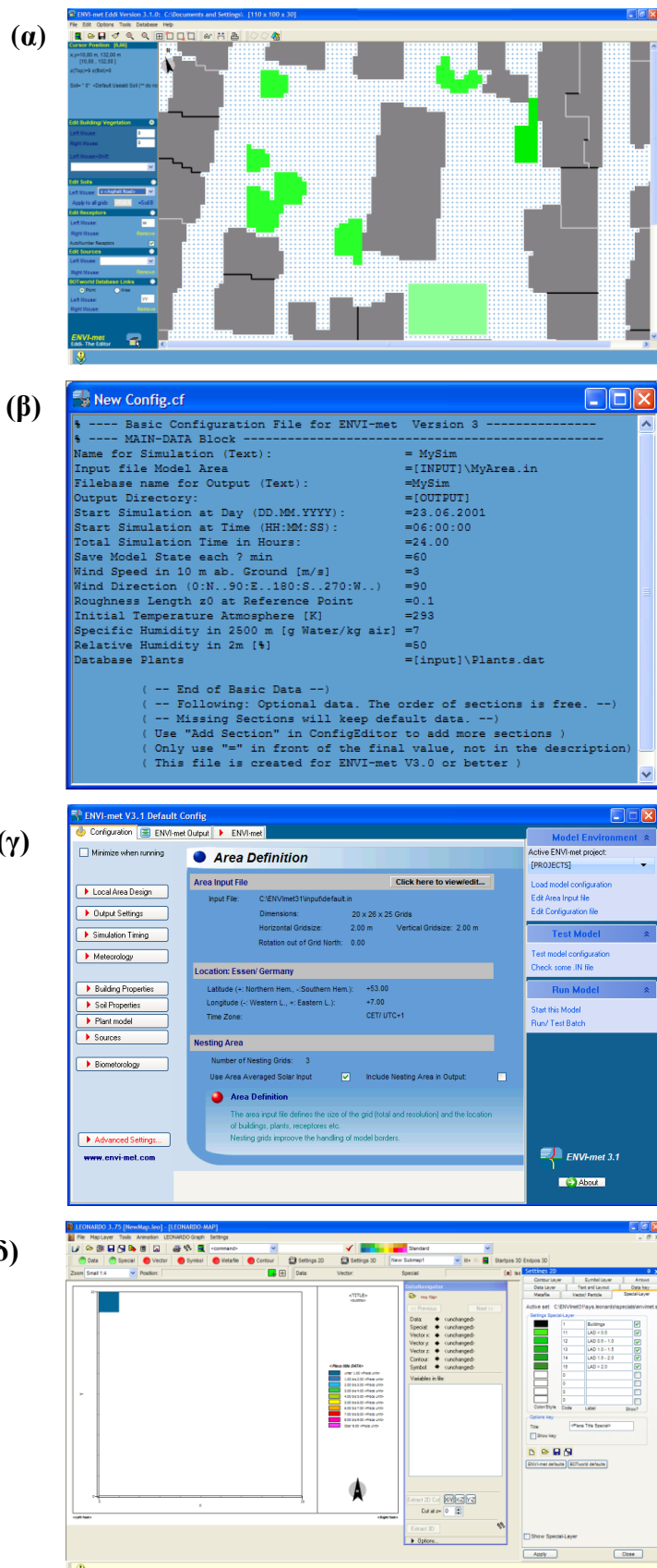
#### **4.4.4 ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ENVI-MET**

Το Envi-met αποτελείται από τέσσερις επιμέρους εφαρμογές, που περιλαμβάνουν την εφαρμογή σχεδίασης του περιβάλλοντος, την εφαρμογή εισαγωγής δεδομένων, το μαθηματικό υπολογιστικό μοντέλο και τέλος την εφαρμογή τμηματική εξαγωγής αποτελεσμάτων. Η πρώτη εφαρμογή, Envi-met Editor 3.1.0 (Εικόνα 11α), αφορά στην σχεδίαση της διαμόρφωσης του αστικού χώρου, δηλαδή όλων των κτιρίων και της βλάστησης, καθορίζοντας κάθε φορά το αντίστοιχο ύψος και την ακριβή θέση. Παράλληλα στην περίπτωση της βλάστησης υπάρχει η δυνατότητα καθορισμού της πυκνότητας του φυλλώματος, του είδους του φυτού, το βάθος των ριζών καθώς και τις ακριβείς διαστάσεις του φυτού. Στις κτιριακές διαμορφώσεις μπορούν να αναπαρασταθούν φυτεμένες ταράτσες, εξώστες, αίθρια και άλλα. Στην εφαρμογή αυτή επίσης δίνεται η δυνατότητα καθορισμού σε κάθε κελί της εδαφικής επιφάνειας και κάλυψης, που μπορεί να ποικίλει από γυμνό έδαφος, καθορίζοντας κάθε φορά την μηχανική του σύσταση, σε τεχνητά είδη κάλυψης όπως είναι το τσιμέντο, η άσφαλτος και άλλα υλικά στα οποία θα πρέπει να καθορίζονται τα επιμέρους χαρακτηριστικά τους. Τέλος υπάρχει η πρόβλεψη εισαγωγής πηγών ρύπων.

Στην δεύτερη εφαρμογή, Envi-met Configuration Editor 3.0 (Εικόνα 11β), εισάγονται κατά κύριο λόγο μετεωρολογικά δεδομένα που αφορούν στις αρχικές ατμοσφαιρικές

συνθήκες, όπως είναι η θερμοκρασία, η υγρασία και η ταχύτητα του ανέμου. Παράλληλα εισάγονται στοιχεία που αφορούν στο χρόνο προσομοίωσης του μοντέλου και διαφόρων άλλων χαρακτηριστικών και παραμέτρων, όπως είναι τα χαρακτηριστικά των κτιρίων, του εδάφους, της βλάστησης, των ρύπων ή σωματιδίων και της βιομετεωρολογίας.

Στο τελευταίο στάδιο, μέσω της εφαρμογής Envi-met 3.1 default configuration (Εικόνα 11γ), εισάγονται τα στοιχεία από τις δύο παραπάνω εφαρμογές και ακολουθεί ο έλεγχος των αρχείων και η έναρξη της προσομοίωσης.



Εικόνα 11 Απεικόνιση περιβάλλοντος Envi-met, όπου (α) editor, (β) configuration file, (γ) configuration default, (δ) Leonardo-map.

## 5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από τις επί τόπου μετρήσεις στις τρεις περιοχές μελέτης, όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενα κεφάλαια, καθώς και οι προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν για μία από τις αυτές περιοχές, ενώ διεξήχθησαν και σενάρια ώστε να διερευνηθεί η επίδραση του αστικού σχεδιασμού στις βιοκλιματικές και μικροκλιματικές συνθήκες. Παράλληλα με την παράθεση των αποτελεσμάτων των μικρομετεωρολογικών παραμέτρων, όπως καταγράφηκαν, παρουσιάζεται και μία στατιστική των δεδομένων, ώστε να συγκριθούν με δεδομένα σταθερού σταθμού αναφοράς.

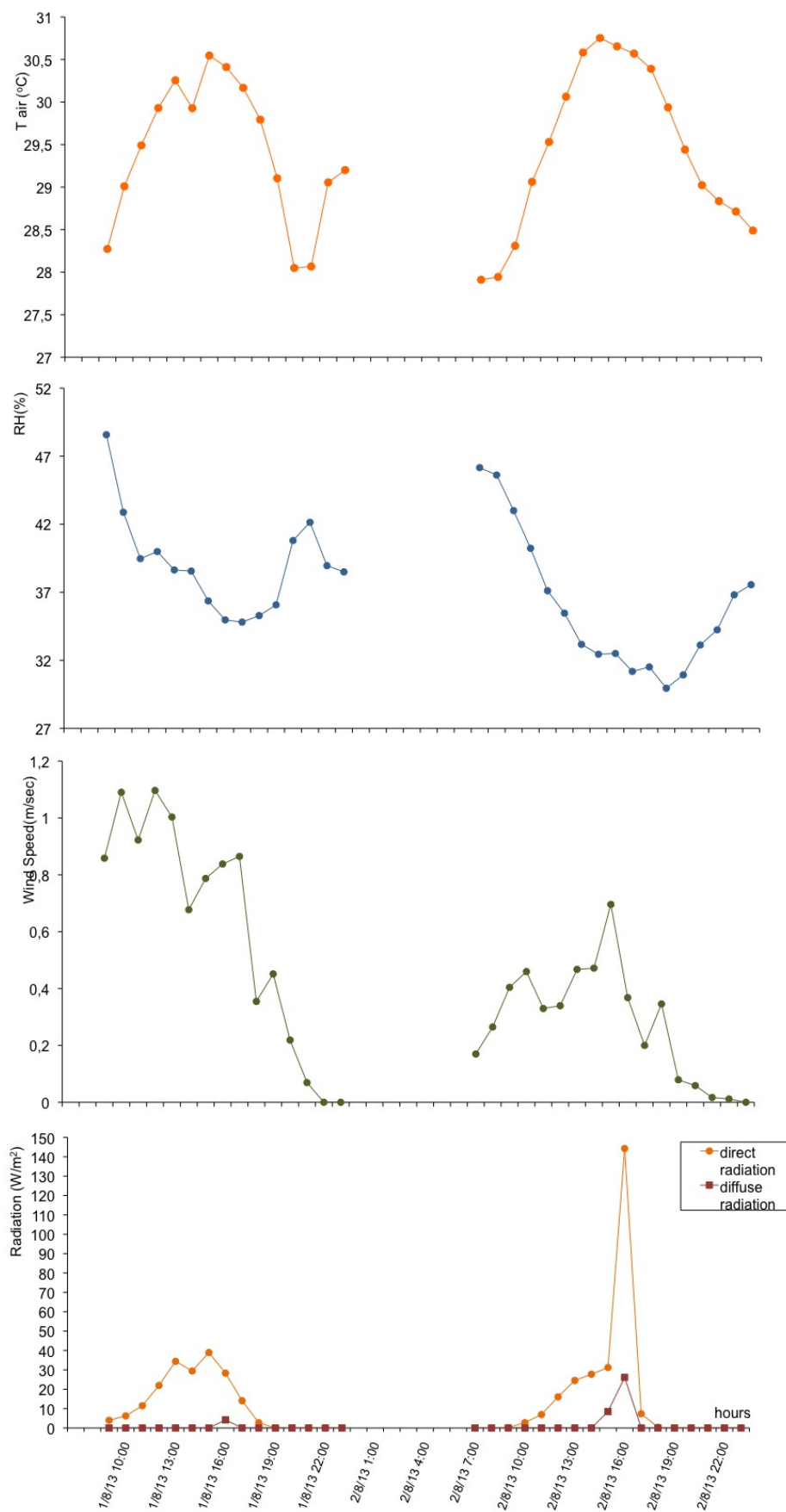
### 5.1 ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΜΙΚΡΟΚΛΙΜΑΤΙΚΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ

#### 5.1.1. ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΩΝ ΠΑΤΗΣΙΩΝ

##### A. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΜΙΚΡΟΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΚΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ

Στην περιοχή αυτή, όπως προαναφέρθηκε, χρησιμοποιήθηκαν δύο διαφορετικοί γειτονικοί χώροι για τη λήψη των μετρήσεων. Η διαφορετικότητα τους έγκειται στην γεωμετρία τους, την βλάστηση, τα είδη κάλυψης και στο μέγεθος τους. Στην πρώτη περιοχή – εσωτερική αυλή – έκτασης περίπου 300m<sup>2</sup>, ελήφθησαν μετρήσεις σε τρία σημεία, ώστε να διερευνηθούν οι μικροκλιματικές συνθήκες που διαμορφώνονται στον χώρο αυτό αλλά και το πως επηρεάζονται από τα κτίρια ή την βλάστηση. Στον δεύτερο χώρο, ο οποίος θα αναφέρεται ως ακάλυπτος, μετρήθηκαν βασικές μικροκλιματικές παράμετροι, ώστε να καταστούν συγκρίσιμες οι τιμές των παραμέτρων με αυτές της γειτονικής εσωτερικής αυλής.

Στον ακάλυπτο χώρο οι μετρήσεις διεξήχθησαν για δύο μέρες από τις πρωινές ως τις βραδινές ώρες. Από τα αποτελέσματα που φαίνονται στα παρακάτω γραφήματα παρατηρούμε ότι η θερμοκρασία έχει μια μικρή διακύμανση κατά την διάρκεια της ημέρας της τάξης των 3°C, ενώ η υγρασία μεταβάλλεται αρκετά, με τις πρωινές τιμές να είναι στο 47% περίπου και το μεσημέρι να παίρνει μια ελάχιστη τιμή που είναι κατά 16% χαμηλότερη. Οι ταχύτητες του ανέμου κυμαίνονται σε χαμηλά επίπεδα, με τις πιο αξιόλογες μεταβολές να παρατηρούνται όπως είναι φυσικό από τις πρωινές ως τις απογευματινές ώρες. Η μικρού μήκους κύματος ακτινοβολίας, προσπίπτουσα και ανακλώμενη, έχουν πολύ χαμηλές τιμές, κάτι που καταδεικνύει την έντονη σκίαση του χώρου από τα κτίρια. Εδώ θα πρέπει να σημειωθεί ότι το δεκαπεντάλεπτο από τις 16:25 ως τις 16:40 οι τιμές της προσπίπτουσας μικρού μήκους κύματος ακτινοβολίας άγγιξαν τα 483W/m<sup>2</sup>, γεγονός που δείχνει ότι η ηλιακή έκθεση του ακάλυπτου χώρου είναι αρκετά περιορισμένη, γι' αυτό και δεν παρατηρούνται αξιόλογες μεταβολές στις μικροκλιματικές συνθήκες.



**Γράφημα 1** Πορεία μετρούμενων τιμών μικροκλιματικών παραμέτρων σε ύψος 1.5m από το έδαφος στον ακάλυπτο χώρο στην περιοχή των Πατησίων για την περίοδο 01/08 – 02/08.

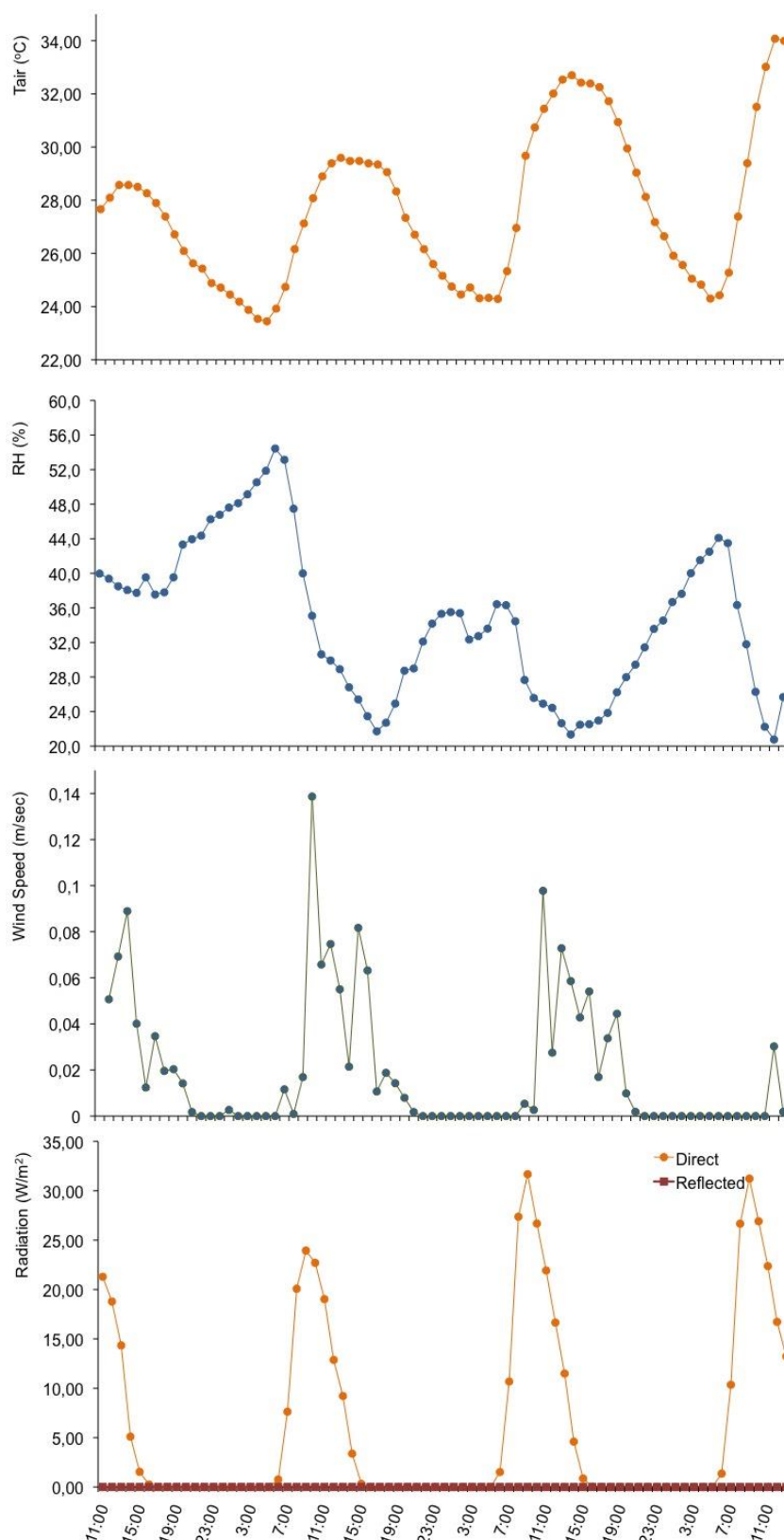
Στην εσωτερική αυλή, οι μετρήσεις ήταν ολοήμερες και διήρκησαν από τις 22.07 ως τις 01.08. Ο λόγος που οι μετρήσεις λαμβάνονταν και κατά την διάρκεια της νύχτας, είναι ώστε να διερευνηθούν οι μικροκλιματικές συνθήκες που διαμορφώνονται σε σχέση με την ημέρα, αλλά και η επίδραση της βλάστησης και των κτιρίων στην αυλή κατά την διάρκεια της νύχτας. Στο πρώτο σημείο μετρήσεων μέσα στην αυλή, ο σταθμός τοποθετήθηκε πλησίον διώροφου κτιρίου και οι τιμές των παραμέτρων ελήφθησαν από τις πρώτες μεσημεριανές ώρες στις 22/07 και διήρκησαν μέχρι τις 25/07.

Από τα αποτελέσματα, όπως φαίνονται και στα παρακάτω γραφήματα, παρατηρείται ότι η θερμοκρασία ακολουθεί μια ανοδική πορεία με το πέρασμα των ημερών, που φτάνει τους 34°C, με την σχετική υγρασία του αέρα να παίρνει την μέγιστη τιμή της τις πρώτες πρωινές ώρες, όπου η θερμοκρασία ελαχιστοποιείται. Η γενική κύμανση της σχετικής υγρασίας είναι 20 με 55%, ενώ τις ημέρες που παρατηρείται αυξημένη η θερμοκρασία του αέρα, η μέση ημερήσια σχετική υγρασία είναι σε χαμηλά επίπεδα. Ως προς την ταχύτητα του αέρα, παρατηρούνται πολύ χαμηλές ταχύτητες ανέμου, που δεν ξεπερνούν τα 0.15m/sec, με τις ελάχιστες ημερήσιες τιμές να καταγράφονται τις μέρες με αυξημένη θερμοκρασία και μειωμένη σχετική υγρασία. Η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία στην θέση αυτή διατηρεί τιμές κάτω των 32W/m<sup>2</sup>, ενώ η ανακλώμενη παρουσιάζει μηδενικές τιμές, λόγω της έντονης σκίασης από το κτίριο καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας. Η ημερήσια μέγιστη τιμή της προσπίπτουσας ακτινοβολίας παρουσιάζεται στις 09:00 LST ενώ από τις 15:00 LST και μετά οι τιμές είναι μηδενικές. Ουσιαστικά υπάρχει έντονος περιορισμός της ηλιακής έκθεσης της θέσης αυτής, όπως παρατηρήθηκε και στην περίπτωση του ακάλυπτου χώρου, ενώ και οι υπόλοιπες μικροκλιματικές παράμετροι ακολουθούν παρόμοια πορεία στις δυο θέσεις.

Στην δεύτερη θέση, στο μέσον δηλαδή της εσωτερικής βλάστησης (Γράφημα 3), οι μετρήσεις ελήφθησαν για δύο ημέρες από τις 25/07 ως τις 27/07. Η θερμοκρασία αέρα στην θέση αυτή κυμάνθηκε από τους 24 ως τους 36°C, με την σχετική υγρασία του αέρα να λαμβάνει τιμές από 22 μέχρι 47%. Η ταχύτητα του ανέμου παρουσίασε χαμηλές ταχύτητες ανέμου που δεν ξεπερνούσαν τα 0.7m/sec, αλλά ήταν εμφανώς αυξημένη σε σχέση με αυτές που καταγράφηκαν στην θέση πλησίον του κτιρίου. Η προσπίπτουσα μικρού μήκους κύματος ακτινοβολία, τις μεσημεριανές ώρες έφτασε τα 890W/m<sup>2</sup>, με την τιμή να διατηρείται σε αυξημένα επίπεδα από της 9:00 μέχρι της 16:00. Ενώ από τις 18:00 μέχρι της 6:00 της επομένης μέρας οι τιμές είναι μηδενικές. Η πορεία της ανακλώμενης ηλιακής ακτινοβολίας ακολουθεί ανάλογη πορεία με της προσπίπτουσας με υποδεκαπλάσιες τιμές.

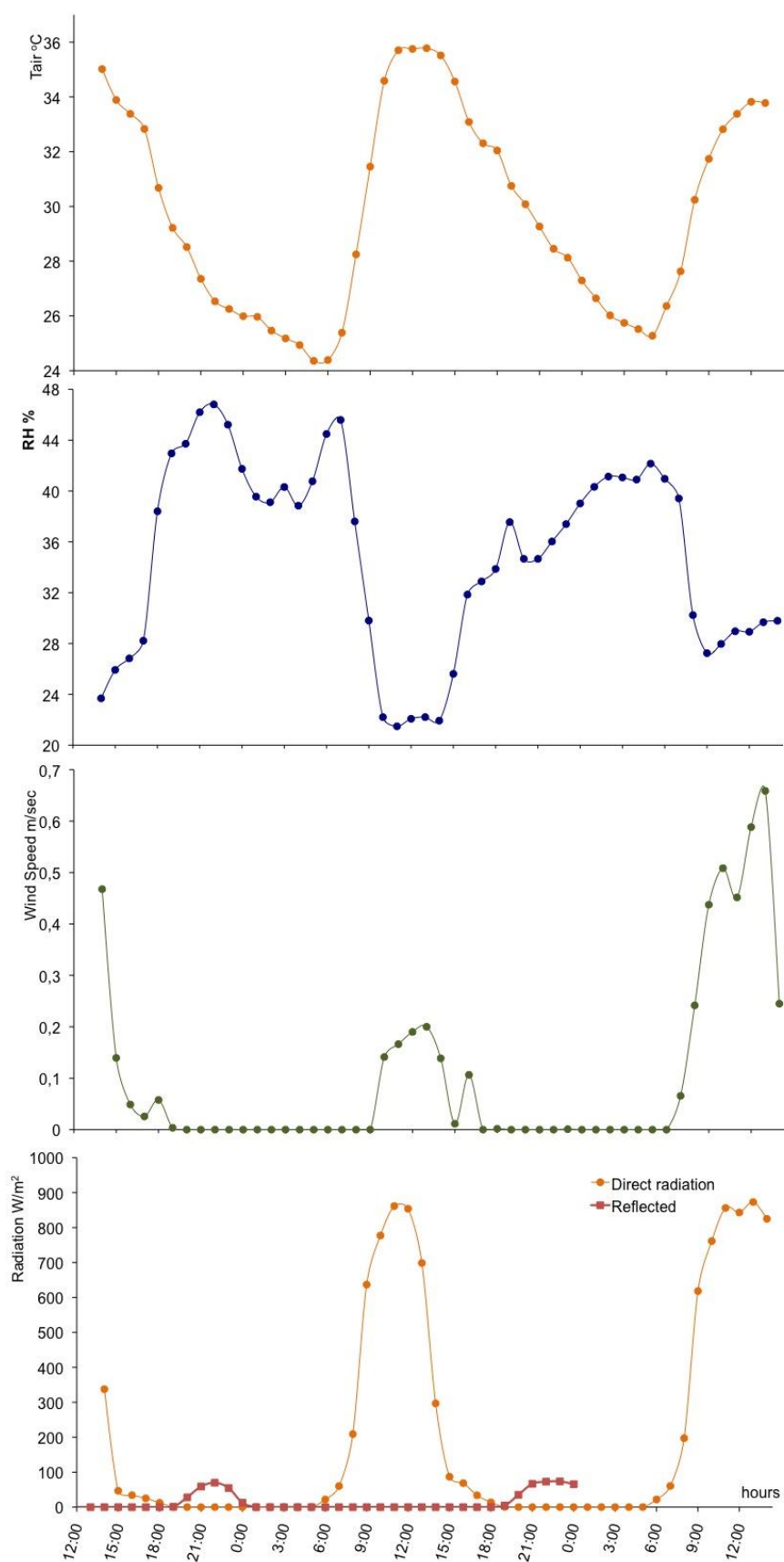
Σε σχέση με την πρώτη θέση, δεν καταγράφηκαν ιδιαίτερες μεταβολές στις μικροκλιματικές παραμέτρους, εκτός από την ηλιακή ακτινοβολία, που είναι το αποτέλεσμα της έκθεσης του σημείου αυτού στον ήλιο για μεγάλο χρονικό διάστημα κατά την διάρκεια

της ημέρας, λόγω της μειωμένης σκίασης που προκύπτει από την υπερκείμενη αραιή βλάστηση.



**Γράφημα 2** Πορεία μετρούμενων τιμών μικροκλιματικών παραμέτρων σε ύψος 1.5m από το έδαφος στην θέση πλησίον του διώροφου κτιρίου στην περιοχή των Πατησίων για την περίοδο 22/07 – 25/07.

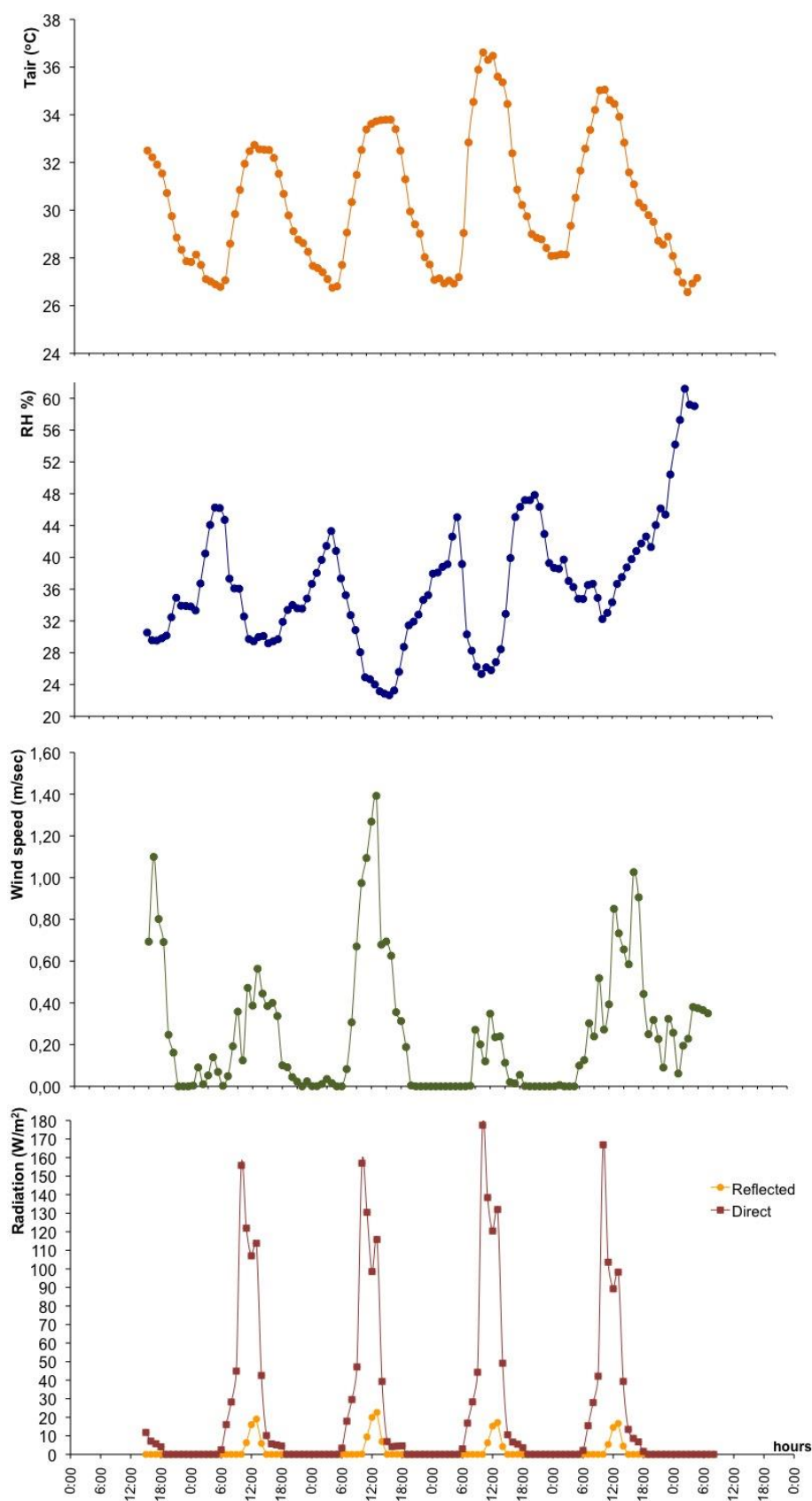




**Γράφημα 3** Πορεία μετρούμενων τιμών μικροκλιματικών παραμέτρων σε ύψος 1.5m από το έδαφος στο μέσον της εσωτερικής αυλής στην περιοχή των Πατησίων για την περίοδο 25/07 – 27/07.

Στην τρίτη θέση μέσα στην εσωτερική αυλή κάτω από πυκνή βλάστηση (Γράφημα 4), οι μετρήσεις ελήφθησαν για έξι ημέρες από τις 27/07 ως τις 01/08. Η θερμοκρασία αέρος στην θέση αυτή κυμάνθηκε από τους 26 ως τους 37° C, με την σχετική υγρασία του αέρα να μεταβάλλεται από 22 ως 62%. Η ταχύτητα του ανέμου παρουσίασε αυξημένες τιμές σε σχέση με τις άλλες δύο θέσεις, που δεν ξεπερνούσαν τα 1.5m/sec. Η προσπίπτουσα μικρού μήκους κύματος ακτινοβολία, τις μεσημεριανές ώρες έφτασε τα 180W/m<sup>2</sup>, ενώ η ανακλώμενη τις ώρες αυτές καταγράφηκε στα 22W/m<sup>2</sup>. Στις ώρες μεταξύ στις 7 το απόγευμα και τις 6 το πρωί της επόμενης οι τιμές της μικρού μήκους κύματος ακτινοβολίας ήταν μηδενικές και στην προσπίπτουσα και στην ανακλώμενη.

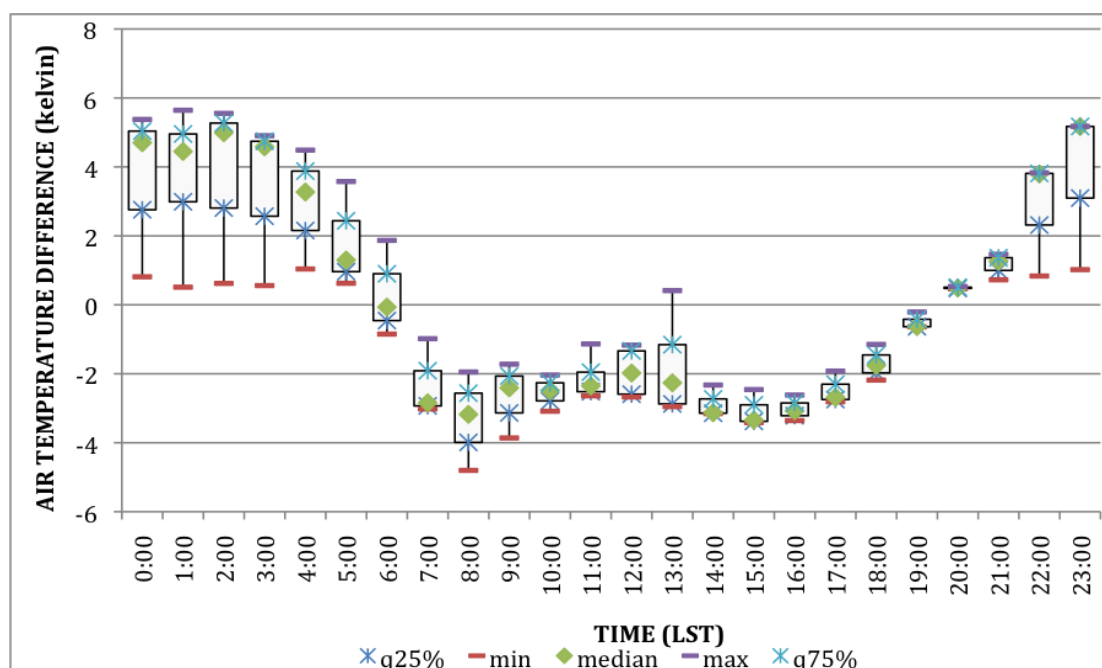
Συμπερασματικά θα μπορούσαμε να πούμε ότι η ηλιακή ακτινοβολία παίζει καθοριστικό ρόλο στην διαμόρφωση των μικροκλιματικών συνθηκών, με την γεωμετρία του χώρου και την βλάστηση να την επηρεάζει. Παράλληλα οι θερμομετρικές συνθήκες των δύο χώρων δεν παρουσίασαν έντονες διαφορές, ενώ η ταχύτητα του ανέμου ήταν αρκετά περιορισμένη σε όλες τις θέσεις, ενώ βαίνει ελαφρώς μειωμένη από την τρίτη θέση, στην δεύτερη και στην πρώτη.



**Γράφημα 4** Πορεία μετρούμενων τιμών μικροκλιματικών παραμέτρων σε ύψος 1.5m από το έδαφος στην τρίτη θέση κάτω από πυκνή φυτοκάλυψη για την περίοδο 27/07 – 01/08.

## B. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΙΜΩΝ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΑΕΡΟΣ ΜΕΤΑΞΥ ΘΕΣΕΩΝ ΣΤΑ ΠΑΤΗΣΙΑ ΚΑΙ ΣΤΑΘΜΟΥ ΑΝΑΦΟΡΑΣ

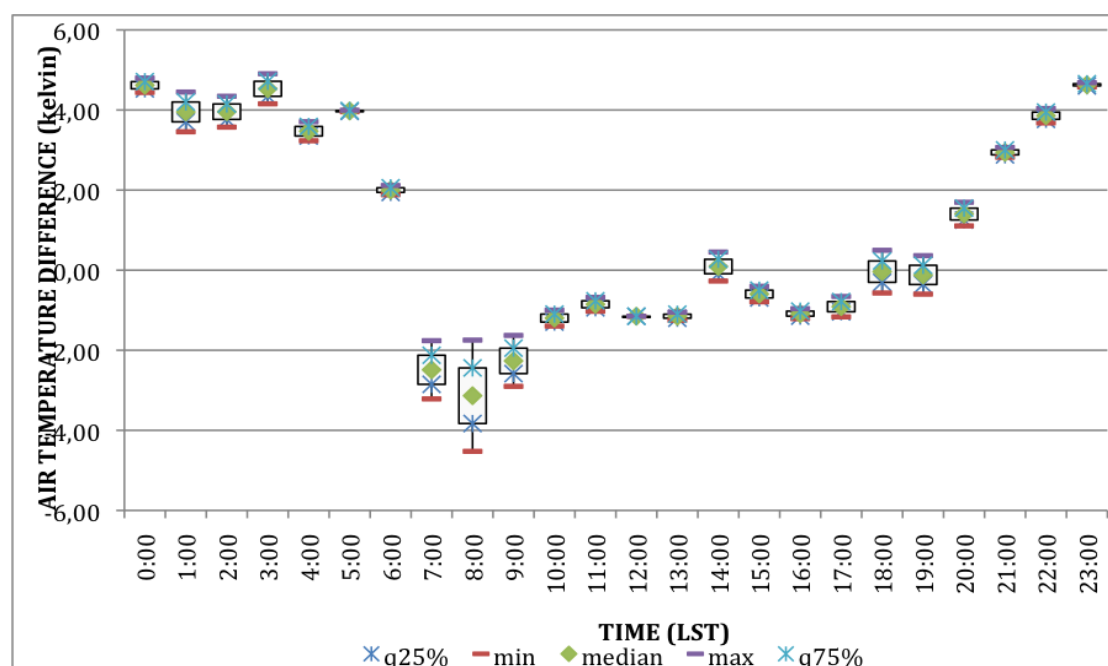
Για την διαμόρφωση μιας πληρέστερης εικόνας σχετικά με τις διαφοροποιήσεις των μικροκλιματικών παραμέτρων που παρουσιάστηκαν προηγουμένως στις τρεις θέσεις μετρήσεων, κρίθηκε απαραίτητη η σύγκριση τους με δεδομένα σταθερού σταθμού αναφοράς, ο οποίος πληροί τις προϋποθέσεις μόνιμου μετεωρολογικού σταθμού. Έτσι έπειτα από επεξεργασία των δεδομένων, προέκυψαν τα παρακάτω γραφήματα σε μορφή θηκογραμμάτων (box plots), τα οποία παρουσιάζουν πέντε βασικές στατιστικές (ελάχιστο, μέγιστο, πρώτο δευτέρο/ διάμεσος και τρίτο τεταρτημόριο). Ως σταθμός αναφοράς χρησιμοποιήθηκε ο αυτόματος μετεωρολογικός σταθμός του Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών.



**Γράφημα 5** Θηκογράμμα ωριαίων τιμών διαφορών θερμοκρασίας μεταξύ της πρώτης θέσης και του σταθμού αναφοράς.

Οι θετικές διαφορές των θερμοκρασιών καταδεικνύουν την ύπαρξη της αστικής θερμικής νησίδας (urban heat island), δηλαδή της υψηλής θερμοκρασίας της θέσης που βρίσκεται μέσα στην αστική δομή σε σχέση με σταθμό που βρίσκεται σε υπαίθριο χώρο. Αντίστοιχα οι αρνητικές διαφορές δείχνουν την ύπαρξη μιας ψυχρής αστικής νησίδας (cool island). Στην θέση κοντά στο κτίριο, μετά την δύση του ηλίου και μέχρι την ανατολή δηλαδή στο διάστημα από τις 20:00 έως τις 6:00 γίνεται εμφανής η αστική θερμική νησίδα καθώς οι θερμοκρασίες στην θέση αυτή είναι υψηλότερες από αυτές που καταγράφηκαν στον σταθμό αναφοράς. Κατά την διάρκεια της ημέρας η θερμοκρασία στην εσωτερική αυλή παρουσιάζεται ως και 2.5K χαμηλότερη κάτι που καταδεικνύει την ευνοϊκή επίδραση της αυλής στις θερμομετρικές συνθήκες.

Αντίστοιχη είναι και η κατάσταση στις άλλες δύο θέσεις μέσα στην εσωτερική αυλή. Στην θέση στο κέντρο της αυλής, η αστική θερμική νησίδα παρουσιάζεται τις βραδινές ώρες, ενώ κατά την διάρκεια της ημέρας η ψυχρή νησίδα είναι ισχυρή για μικρή χρονική περίοδο από της 6:00 έως τις 8:00, ενώ μετά εμφανίζεται ασθενής με τις θερμοκρασιακές διαφορές να κυμαίνονται από -0,5 έως 0 K.

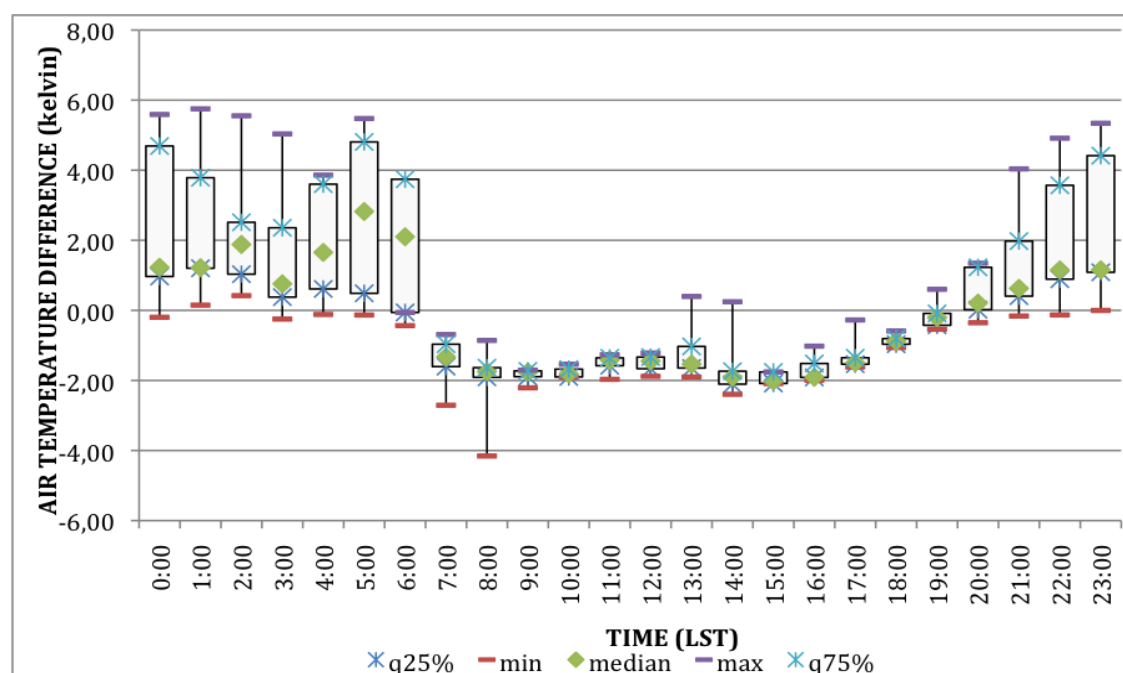


**Γράφημα 6** Θηκόγραμμα ωριαίων τιμών διαφορών θερμοκρασίας μεταξύ της δεύτερης θέσης και του σταθμού αναφοράς.

Η θέση αυτή γενικά χαρακτηρίζεται από περιορισμένη φυτοκάλυψη, εντείνοντας έτσι την επίδραση του ήλιου στις θερμομετρικές συνθήκες. Αξιοσημείωτη η κατάσταση αυτή, που δείχνει ότι ακόμα και η τοπική έλλειψη της βλάστησης ή η επίδραση των κτιρίων, δημιουργεί συνθήκες παρόμοιες με αυτές που παρατηρούνται σε θέσεις σταθερού σταθμού. Παράλληλα παρατηρείται ότι τα θηκογράμματα που ακολουθούν είναι 'συμπιεσμένα', δηλαδή οι διαφοροποιήσεις μεταξύ των στατιστικών παραμέτρων είναι μικρές, κάτι που καταδεικνύει τις μικρές διαφορές μεταξύ των ημερών στις ωριαίες θερμοκρασίες.

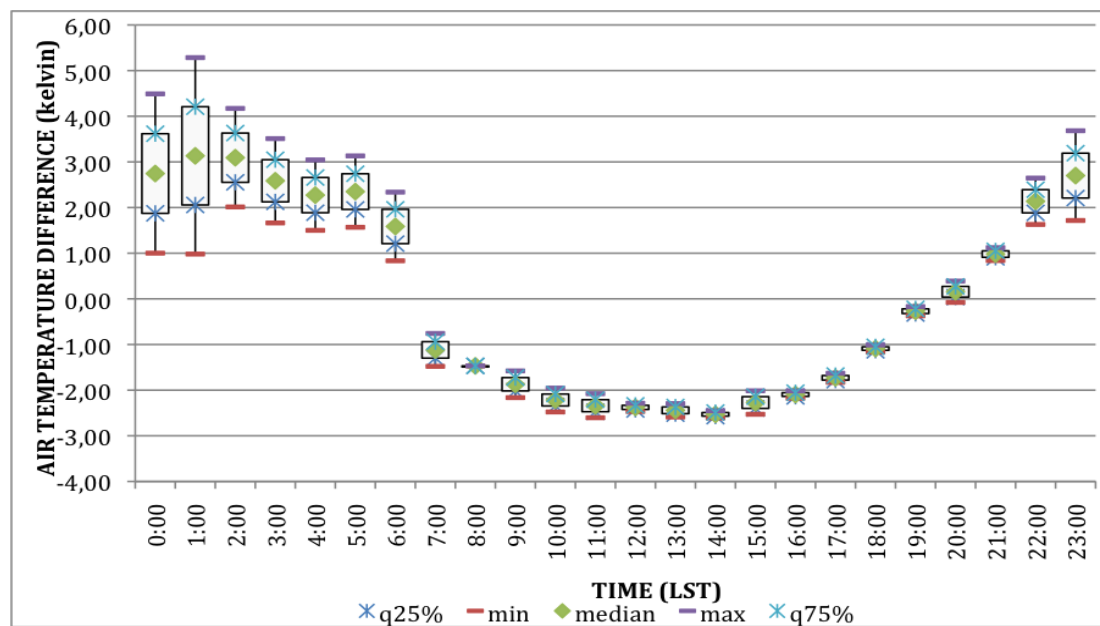
Στην τρίτη θέση μετρήσεων, όπου είναι έντονη η επίδραση από το σχολικού κτιρίου και την βλάστηση της αυλής, παρατηρείται μία έντονη θερμική νησίδα από τις 20:00 έως τις 6:00 με τις μέγιστες τιμές των ωριαίων διαφορών να αγγίζουν τους 5.8 K και τις μέσες τιμές να είναι μικρότερες από 1K μέχρι τις 1:00 ενώ μέχρι τις 6:00 οι μέσες διαφορές φτάνουν τους 3K. Από την ανατολή του ήλιου μέχρι και την δύση φαίνεται η ευνοϊκή επίδραση της αυλής στις θερμομετρικές συνθήκες, καθώς παρατηρείται μία ασθενής ψυχρή αστική νησίδα της τάξεως των 2K, ενώ κατά τις ώρες αυτές δεν υπάρχουν ιδιαίτερες διαφοροποιήσεις μεταξύ των ωριαίων στατιστικών παραμέτρων.

Στον γειτονικό ακάλυπτο χώρο, μικρής έκτασης όπου στερείται φυτικής βλάστησης, παρατηρείται έντονη αστική θερμική νησίδα από τις 20:00 μέχρι τις 6:00, με τις μέσες τιμές των διαφορών των ωριαίων τιμών να κυμαίνονται μεταξύ 2-3K, ενώ οι μέγιστες τιμές των διαφορών των ωριαίων τιμών φτάνουν και τους 5.5K. Κατά την διάρκεια της ημέρας η ψυχρή νησίδα εμφανίζεται ασθενής, ενώ κατά τις μεσημεριανές ώρες γίνεται έντονη φτάνοντας και τους 2.5K και έπειτα βαίνει μειούμενη μέχρι τις 20:00. Χαρακτηριστικές είναι οι μικρές διαφορές που παρατηρούνται μεταξύ των στατιστικών παραμέτρων κατά τις μεσημεριανές ώρες.



**Γράφημα 7** Θηκόγραμμα ωριαίων τιμών διαφορών θερμοκρασίας μεταξύ της τρίτης θέσης και του σταθμού αναφοράς.

Συμπερασματικά για τον χώρο της εσωτερικής αυλής θα μπορούσαμε να πούμε ότι η ψυχρή αστική νησίδα παρατηρείται σε όλες τις διαμορφώσεις της αυλής κατά τις μεσημεριανές ώρες όπου συνήθως επικρατούν συνθήκες δυσφορίας κατά τους καλοκαιρινούς μήνες, καταδεικνύοντας έτσι την ευνοϊκή επίδραση της αυλής. Η ένταση όμως της ψυχρής νησίδας εξαρτάται από την συνδυαστικά από την επίδραση των κτιρίων και της βλάστησης. Παρατηρείται επίσης η επίδραση της γεωμετρίας του χώρου στις θερμομετρικές συνθήκες, καθώς μικροί ακάλυπτοι που περιβάλλονται από ψηλά κτίρια, συμπεριφέρονται όπως οι θέσεις πλησίον κτιρίων σε φυτοκαλυμένους χώρους μεγάλης έκτασης που περιβάλλονται από υψηλή δόμηση.



Γράφημα 8 Θηκόγραμμα ωριαίων τιμών διαφορών θερμοκρασίας μεταξύ του ακάλυπτου χώρου και του σταθμού αναφοράς.

### 5.1.2. ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΣΤΗΝ ΝΕΑ ΣΜΥΡΝΗ

#### A. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΜΙΚΡΟΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΚΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ

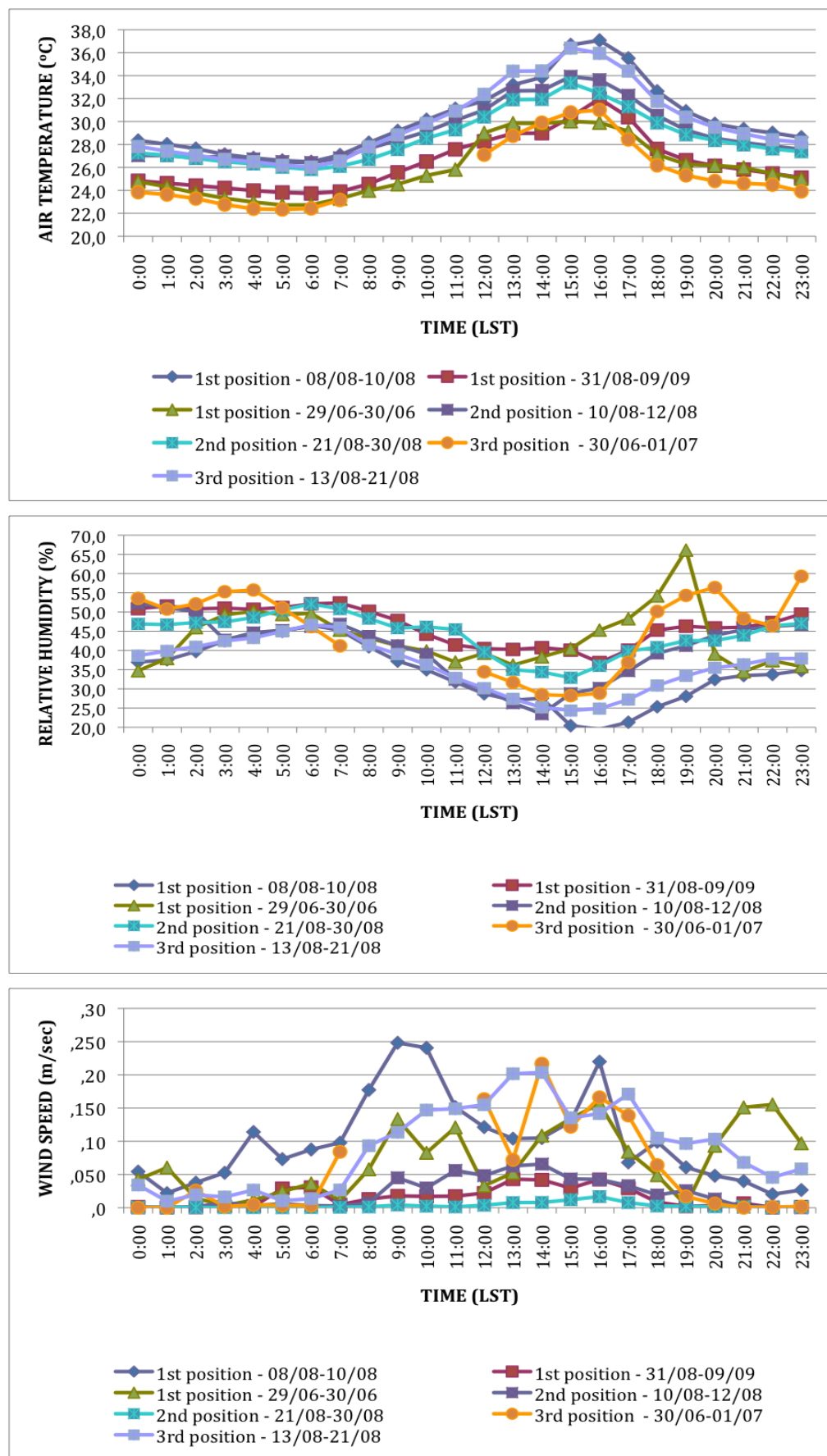
Στην περιοχή αυτή, μετρήθηκαν οι μικροκλιματικές συνθήκες σε τρία σημεία εντός του χώρου, η θέση του πρώτου καθορίστηκε πλησίον πενταόροφης πολυκατοικίας, του δεύτερου κάτω από πυκνή βλάστηση και το τρίτο κάτω από αραιή βλάστηση. Η επιλογή των θέσεων έγινε ώστε να υπολογιστούν οι διαφορετικές πιθανόν τιμές στις μικροκλιματικές παραμέτρους μεταξύ των θέσεων, αλλά και να εξαχθούν συμπεράσματα συγκριτικά με τις άλλες περιοχές μελέτης.

Στην πρώτη θέση, ο σταθμός τοποθετήθηκε κάτω από μπαλκόνι πλάτους 1.5m σε επιφάνεια τσιμέντου, σε απόσταση μόλις 1m από το φυσικό έδαφος και τη βλάστηση, ενώ οι μετρήσεις ελήφθησαν σε τρεις περιόδους. Η πρώτη περίοδος πραγματοποιήθηκε στα τέλη Ιουνίου, η δεύτερη στις αρχές Αυγούστου και η τρίτη στις αρχές Σεπτεμβρίου. Στην δεύτερη θέση, ο σταθμός τοποθετήθηκε εντός του φυτοκαλυμένου κήπου, κάτω από πυκνή βλάστηση, μεγάλου ύψους (άνω των 3m), ενώ η επιφάνεια του εδάφους καλύπτονταν από αμμοπηλάδες χώμα. Οι μετρήσεις στην θέση αυτή πραγματοποιήθηκαν στο πρώτο και στο τελευταίο δεκαήμερο του Αυγούστου. Στην τρίτη θέση, ο σταθμός τοποθετήθηκε σε μικρό πλακόστρωτο διάδρομο στο κέντρο του αίθριου, κάτω από αραιή βλάστηση μετρίου ύψους, ενώ οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε δύο περιόδους, στο τέλος Ιουνίου και στα μέσα Αυγούστου.

Οι μετρήσεις που ελήφθησαν στα τέλη Ιουνίου, πραγματοποιήθηκαν για να διερευνηθούν σε πρώτο στάδιο οι μικροκλιματικές συνθήκες σε δύο θέσεις μέσα στο αίθριο. Έπειτα λόγω του ενδιαφέροντος που παρουσίασαν σε σχέση με την γεωμετρία του χώρου και τις συνθήκες της βλάστησης, οι μετρήσεις συνεχίστηκαν για όλη την περίοδο του Αυγούστου και μέχρι τις αρχές Σεπτεμβρίου.

Στα παρακάτω γραφήματα (Γραφήματα 9, 10, 11), παρουσιάζονται οι τιμές των μικροκλιματικών παραμέτρων που μετρήθηκαν και στις τρεις θέσεις. Ως προς την θερμοκρασία αέρος δεν παρατηρούνται αξιόλογες μεταβολές μεταξύ των δύο θέσεων για την περίοδο Ιουνίου, με την σχετική υγρασία να ακολουθεί αντίστροφη πορεία από τη θερμοκρασία κατά τη διάρκεια της ημέρας και την ταχύτητα του ανέμου να διατηρείται σε μικρές ταχύτητες. Ως προς την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία παρατηρείται μέγιστη τιμή στην διάρκεια του μεσημεριού στην τρίτη θέση, ενώ στην πρώτη θέση η τιμή της είναι σε πολύ μικρά επίπεδα της τάξης των  $100\text{W}/\text{m}^2$ . Η ανακλώμενη ακτινοβολία μικρού μήκους κύματος στην τρίτη θέση είναι δεκαπλάσια από την μέγιστη της πρώτης θέσης.





Γράφημα 9 Πορεία μετρούμενων τιμών θερμοκρασίας αέρος (σε °C), σχετικής υγρασίας αέρος (σε %) και ταχύτητας ανέμου (σε m/sec) για τις τρεις θέσεις μετρήσεων.

Στην πρώτη θέση, την περίοδο του Αυγούστου, η θερμοκρασία παίρνει μέγιστες τιμές τις μεσημεριανές ώρες που φτάνουν τους  $38^{\circ}\text{C}$ , την ίδια ώρα που η σχετική υγρασία βρίσκεται στα χαμηλότερα επίπεδα της (μεταξύ 20 και 25%) και με την μέγιστη σχετική υγρασία να παρατηρείται στις 5 το πρωί. Η ταχύτητα του ανέμου είναι περιορισμένη με τις μέγιστες τιμές να παρατηρούνται από τις 6 ως τις 9 το πρωί. Ως προς την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία η μέγιστη τιμή παρατηρείται στις 15:00, ενώ έχει μηδενικές τιμές πριν από της 12:00 και μετά της 18:00, λόγω της σκίασης από τα κτίρια και την βλάστηση. Αντίστοιχη πορεία ακολουθείται από την ανακλώμενη ηλιακή ακτινοβολία με υποπενταπλάσιες τιμές.

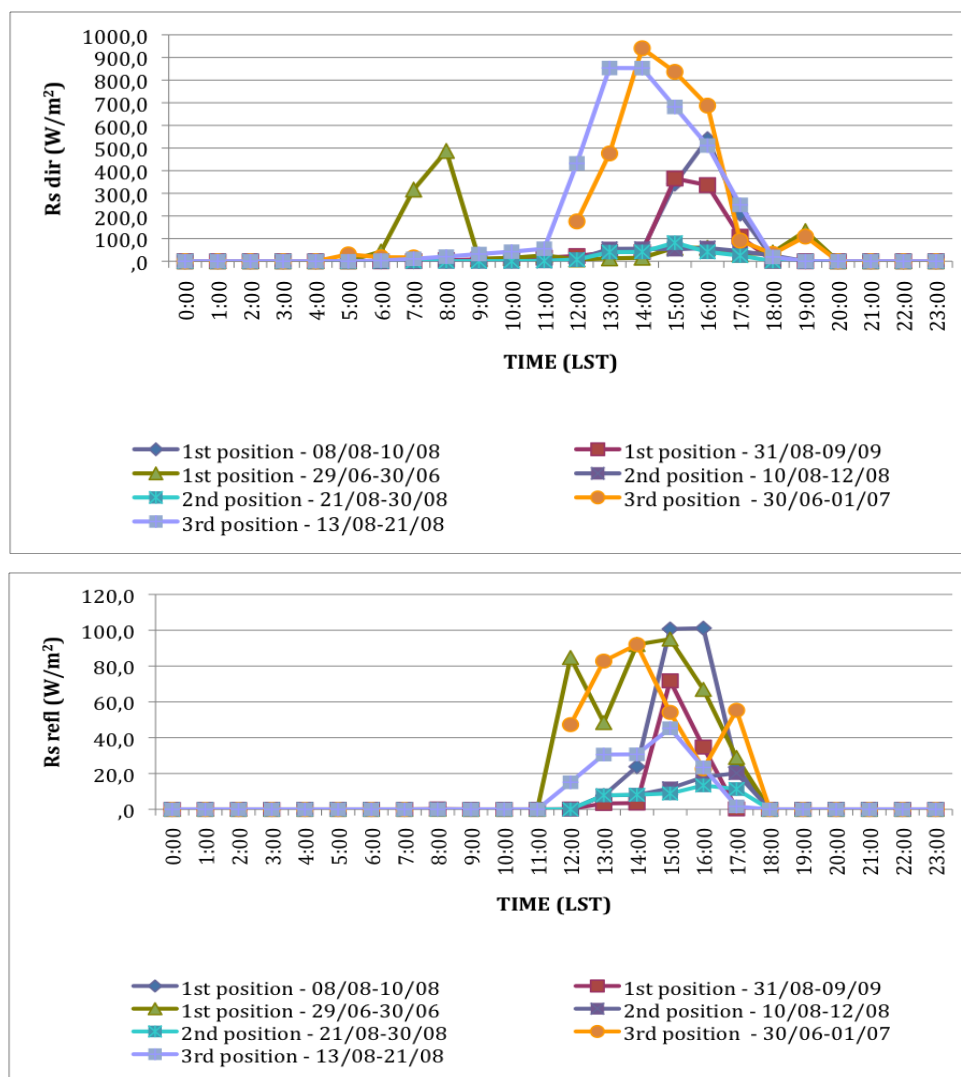
Την δεύτερη περίοδο μετρήσεων, δηλαδή στις αρχές Σεπτεμβρίου, δεν παρατηρούνται ιδιαίτερες διαφοροποιήσεις σε σχέση με την προηγούμενη περίοδο, εκτός από την μείωση των θερμοκρασιών κατά 2.5K περίπου και την αντίστοιχη αύξηση της σχετικής υγρασίας κατά 15%. Πιο αναλυτικά η θερμοκρασία κυμάνθηκε από τους 22 ως τους  $38^{\circ}\text{C}$  και η σχετική υγρασία από 25 μέχρι 70%. Η ταχύτητα του ανέμου διατηρήθηκε για όλη την περίοδο σε πολύ χαμηλές τιμές, εκτός από τις πρωινές ώρες της 4<sup>ης</sup> Σεπτεμβρίου όπου η ταχύτητα δεκαπλασιάστηκε σε σχέση με την μέση ημερήσια τιμή της δεύτερης περιόδου μετρήσεων.

Στην δεύτερη θέση τοποθέτησης του σταθμού, κάτω δηλαδή από πυκνή βλάστηση, όπως προείπαμε, ελήφθησαν μετρήσεις κατά το πρώτο και το τρίτο δεκαήμερο του Αυγούστου. Από τις 10/08 ως τις 12/08, η θερμοκρασία κυμάνθηκε από τους  $26^{\circ}$  ως τους  $34^{\circ}\text{C}$  περίπου, ενώ η σχετική υγρασία από 20 έως 62%. Η ταχύτητα του ανέμου δεν ξεπέρασε στην θέση αυτή τα 0.10m/sec και η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία διατηρήθηκε σε χαμηλές τιμές που έφτασαν τα  $65\text{W/m}^2$ . Ανάλογες ήταν και οι τιμές για την ανακλώμενη ακτινοβολία μικρού μήκους κύματος, όπου σε ωριαία βάση δεν ξεπέρασαν τα  $35\text{W/m}^2$ .

Οι μετρήσεις που ελήφθησαν στο τελευταίο δεκαήμερο του Αυγούστου, από τις 21/08 έως τις 30/08, έδειξαν μια ομοιόμορφη κατανομή της θερμοκρασίας και της υγρασίας του αέρα, με τιμές από  $24.5$  έως  $35^{\circ}\text{C}$  και από 25 έως 67%, αντίστοιχα. Οι ταχύτητες του ανέμου δεν ξεπέρασαν τα 0.05m/sec, ενώ η μικρού μήκους κύματος ακτινοβολία διατηρήθηκε σε επίσης χαμηλά επίπεδα, με την προσπίπτουσα να φτάνει τα  $120\text{W/m}^2$  και την ανακλώμενη τα  $18\text{W/m}^2$ .

Στην τρίτη θέση στην οποία τοποθετήθηκε ο φορητός μικρομετεωρολογικός σταθμός, καταγράφηκαν δύο περίοδοι μετρήσεων, η πρώτη στις 30/06 με 01/07 και η άλλη στο δεύτερο δεκαήμερο του Αυγούστου από της 13/08 μέχρι της 21/08. Η θερμοκρασία και τις δύο περιόδους κυμάνθηκε σε πολύ υψηλά επίπεδα, ενώ σε δύο από τις οκτώ ημέρες της περιόδου του Αυγούστου η μέση ωριαία τιμή άγγιξε τους  $38^{\circ}\text{C}$ . Στις μεσημεριανές ώρες που

στην θερμοκρασία καταγράφονταν μέγιστες τιμές, η σχετική υγρασία ήταν γύρω στο 18% με



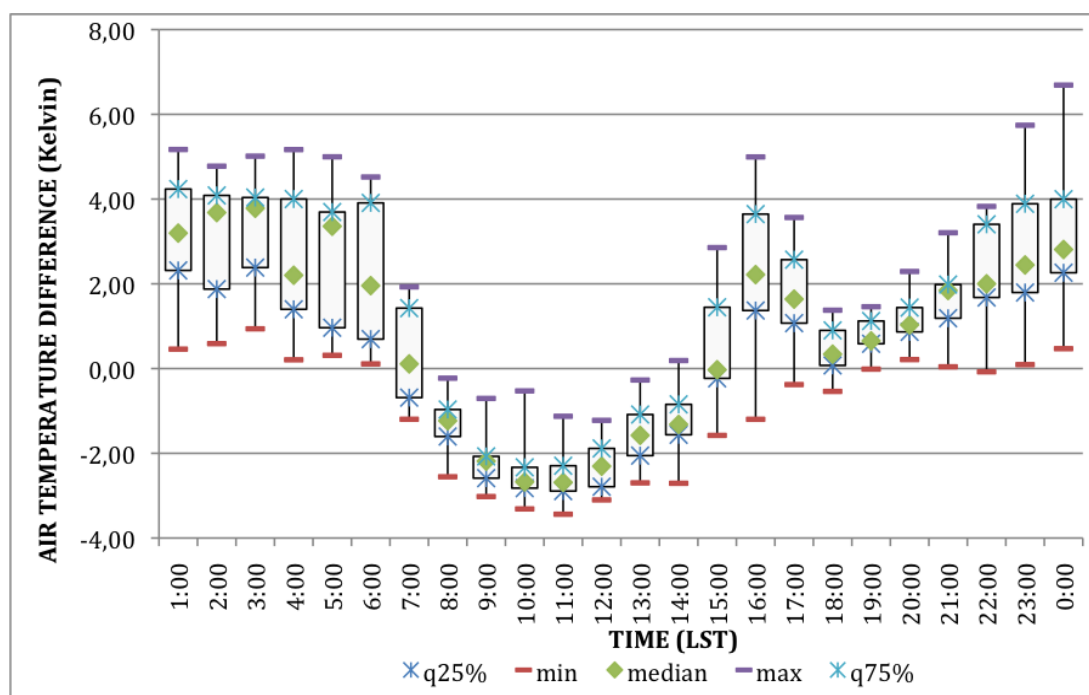
**Γράφημα 10** Πορεία μετρούμενων τιμών της μικρού μήκους κύματος ακτινοβολίας προσπίπτουσας και ανακλώμενης (σε  $W/m^2$ ) στην Νέα Σμύρνη.

αντίστοιχες χαμηλές τιμές να παρατηρούνται και στην ταχύτητα του ανέμου. Σε γενικές γραμμές, η θερμοκρασία κυμάνθηκε από τους 25.5 ως τους 38° C, η σχετική υγρασία από 17 ως 62% και η ταχύτητα του ανέμου δεν ξεπέρασε τα 0.6m/sec. Απ' το γράφημα 10 παρατηρούμε ότι η έκθεση της θέσης αυτής στον ήλιο περιορίζονταν από τις 11 το πρωί ως τις 7 το απόγευμα, όπου η τιμή της μικρού μήκους κύματος ακτινοβολίας έφτασε τα 890  $W/m^2$ , με την ανακλώμενη να ακολουθεί αντίστοιχη πορεία με την μέγιστη τιμή να καταγράφεται το μεσημέρι όπου φτάνει τα 50  $W/m^2$ .

Η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία στην δεύτερη θέση είναι μειωμένη καθώς δεν ξεπερνά τα 100 $W/m^2$  και στις δύο περιόδους μετρήσεων. Στην τρίτη θέση οι τιμές παρουσιάζονται δεκαπλάσιες, ενώ υπάρχει μια χρονική υστέρηση της ηλιακή έκθεσης στην περίοδο Ιουνίου.

B. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΙΜΩΝ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΑΕΡΟΣ ΜΕΤΑΞΥ ΘΕΣΕΩΝ ΣΤΗΝ ΝΕΑ ΣΜΥΡΝΗ ΚΑΙ ΣΤΑΘΜΟΥ ΑΝΑΦΟΡΑΣ

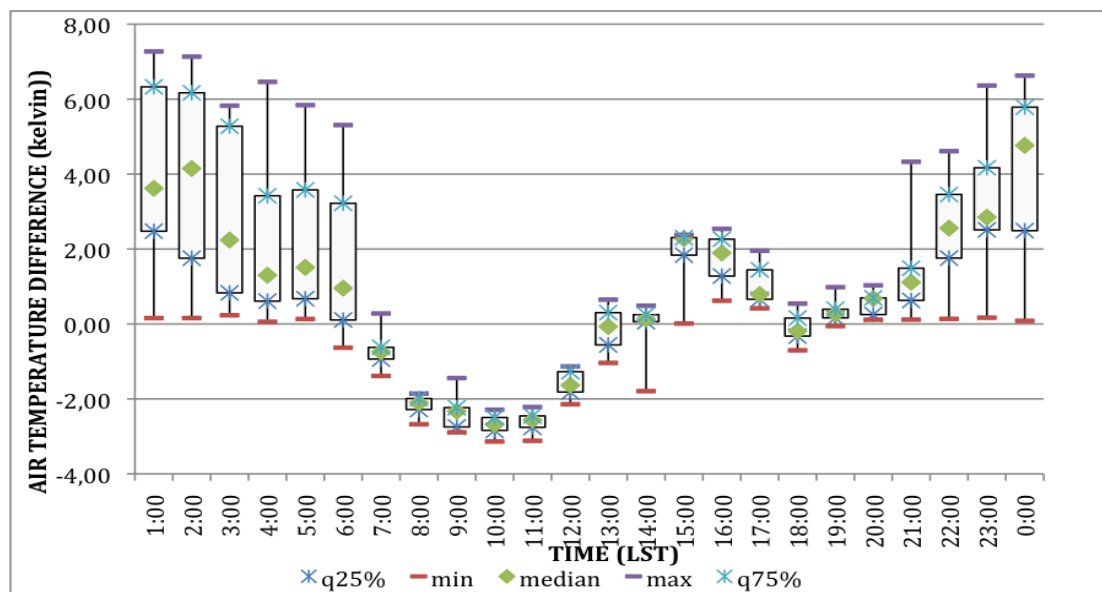
Στον αίθριο χώρο στην περιοχή της Νέας Σμύρνης, στις τρεις θέσεις μετρήσεων παρατηρείται μία μικρή χρονική διάρκεια της ψυχρής νησίδας, που περιορίζεται στις πρώτες πρωινές ώρες. Πιο αναλυτικά, στην θέση κοντά στο κτίριο, η θερμική νησίδα παρατηρείται στο μεγαλύτερο μέρος της ημέρας από τις 15:00 μέχρι τις 7:00, με τις μέσες τιμές των ωριαίων διαφορών να φτάνουν τους 2K τις πρώτες μεσημεριανές ώρες, ενώ ακολουθεί μείωση της τάξης 1K μέχρι την δύση του ήλιου. Στην συνέχεια αυξάνεται η διαφορά στις μέσες τιμές, φτάνοντας και τους 4K στις 3:00. Οι ελάχιστες τιμές των διαφορών των ωριαίων τιμών είναι γύρω στον 0.5K, ενώ οι μέγιστες τιμές φτάνουν τους 7K. Η ψυχρή αστική νησίδα, περιορίζεται από τις 8:00 μέχρι τις 14:00 στην θέση αυτή, με την μέγιστη ένταση της να φτάνει τους 2.5K στις 10:00 με 11:00.



Γράφημα 11 Θηκόγραμμα ωριαίων τιμών διαφορών θερμοκρασίας μεταξύ της πρώτης θέσης και του σταθμού αναφοράς.

Στην θέση κάτω από πυκνή βλάστηση, η θερμική νησίδα περιορίζεται χρονικά από τις 19:00 μέχρι τις 7:00, με τις μέσες τιμές των ωριαίων διαφορών να μην ξεπερνούν τους 2K μέχρι τις 22:00, ενώ έπειτα ακολουθεί αύξηση των μέσων τιμών των διαφορών που φτάνουν τους 5K. Οι ελάχιστες τιμές των διαφορών των ωριαίων τιμών δεν ξεπερνούν τον 0.5° C, ενώ οι μέγιστες τιμές φτάνουν τους 6.5K. Η ψυχρή αστική νησίδα, παρατηρείται από τις 8:00 μέχρι τις 14:00 στην θέση αυτή, με την μέγιστη ένταση της να φτάνει τους 3K στις 9:00 με 11:00. Από τις 12:00 και μετά γίνεται ασθενής, ενώ μετά τις 15:00 και για διάστημα

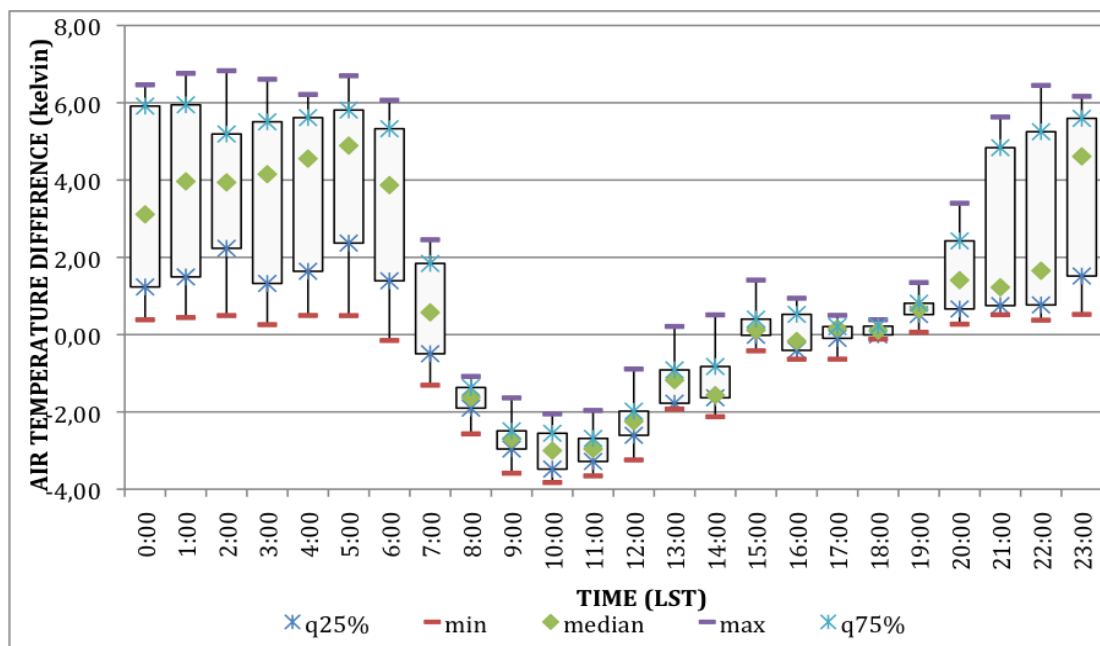
τεσσάρων ωρών οι θερμοκρασίες των δύο συγκρινόμενων θέσεων δεν διαφέρουν. Σε σχέση δηλαδή με την προηγούμενη θέση όπου τις μεσημεριανές αυτές ώρες ήταν αισθητή η θερμική νησίδα, παρατηρείται ότι η πυκνή βλάστηση έπαιξε σημαντικό ρόλο στην διαμόρφωση ευνοϊκότερων συνθηκών.



**Γράφημα 12** Θηκόγραμμα ωριαίων τιμών διαφορών θερμοκρασίας μεταξύ της δεύτερης θέσης και του σταθμού αναφοράς.

Τέλος στην θέση κάτω από αραιή βλάστηση, η αστική θερμική νησίδα είναι αισθητή στο μεγαλύτερο μέρος της ημέρας καλύπτοντας μια χρονική περίοδο από τις 13:00 μέχρι τις 6:00 και παρουσιάζεται αρχικά ασθενής ενώ τις βραδινές ώρες οι μέσες τιμές των ωριαίων διαφορών φτάνουν τους 5K και οι μέγιστες τους 7K. Η θερμική νησίδα παρουσιάζεται ιδιαίτερα ασθενής τις απογευματινές ώρες από τις 18:00 μέχρι τις 20:00, με τις μέγιστες τιμές των διαφορών να μην ξεπερνούν τον 0.5K. Η ψυχρή αστική νησίδα, περιορίζεται χρονικά από τις 7:00 μέχρι τις 12:00, με την μέγιστη ένταση της να φτάνει τους 2.5K. Κατά τις μεσημεριανές ώρες που αυξάνεται στο μέγιστο η εισερχόμενη και η διάχυτη μικρού μήκους κύματος ακτινοβολία, παρατηρείται μία απότομη αύξηση των διαφορών στις θερμοκρασίες μεταξύ θέσης και σταθμού αναφοράς για διάστημα τριών ωρών, ενώ μετά και για διάστημα τριών πάλι ωρών σχεδόν εξαλείφεται η επίδραση της θερμικής νησίδας.

Συμπερασματικά ευνοϊκότερες συνθήκες ως προς τις νυχτερινές και ημερήσιες τιμές της θερμοκρασίας επικρατούν σε θέσεις πυκνής βλάστησης, με τις θέσεις πλησίον κτιρίου να ακολουθούν, ενώ οι θέσεις με αραιή βλάστηση που δεν δέχονται την επίδραση από τα κτίρια παρουσιάζουν τις δυσμενέστερες θερμικές συνθήκες. Η γενικά μικρή διάρκεια της ψυχρής αστικής νησίδας που παρατηρήθηκε στην περιοχή αυτή, οφείλεται στην έκθεση της περιοχής αυτής στην ηλιακή ακτινοβολία κατά το μεγαλύτερο μέρος της ημέρας, καθώς τα κτίρια στα δυτικά και στα νότια, έχουν χαμηλό ύψος και δεν προσφέρουν σκίαση.



**Γράφημα 13** Θηκόγραμμα ωριαίων τιμών διαφορών θερμοκρασίας μεταξύ της τρίτης θέσης και σταθμού αναφοράς.

### 5.1.3. ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΣΤΟ ΓΕΩΠΟΝΙΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ

#### A. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΜΙΚΡΟΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΚΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΣΤΙΣ ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΘΕΣΕΙΣ

Στο Γεωπονικό πανεπιστήμιο Αθηνών, όπως προαναφέρθηκε, επιλέχθηκαν σημεία μετρήσεων στα οποία διαφοροποιούνται κυρίως ο σχεδιασμός του χώρου και η φυτοκάλυψη, η θέαση του ουράνιου θόλου, αλλά και ο προσανατολισμός των χώρων. Επιλέχθηκαν οχτώ θέσεις μετρήσεων, σε μικρές αποστάσεις μεταξύ τους, στα οποία οι μικρομετεωρολογικές συνθήκες να διαμορφώνονται και να επηρεάζονται κυρίως από τους παραπάνω παράγοντες.

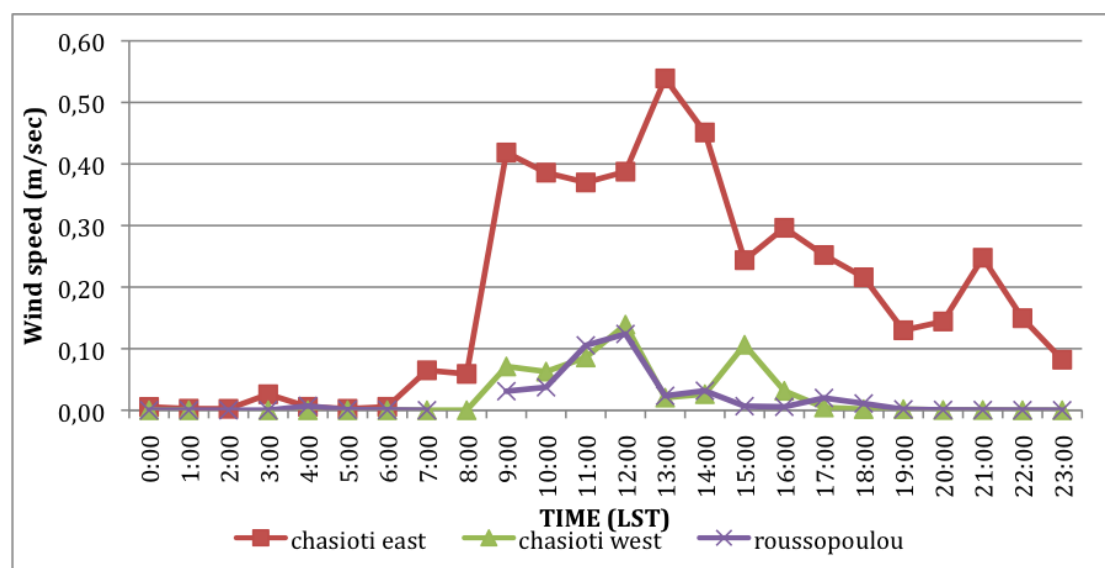
Στο πρώτο σημείο μετρήσεων, στο κιόσκι, οι μετρήσεις διεξήχθησαν για δύο μέρες, στην μία εκ των οποίων (25/6) επικρατούσαν πολύ ζεστές συνθήκες με μηδενικό άνεμο δημιουργώντας την αίσθηση καύσωνα, ενώ στις 2/7 η συνθήκες ήταν πιο ήπιες με την μέση μέγιστη θερμοκρασία να είναι κατά 3°C χαμηλότερη. Όπως φαίνεται στο αντίστοιχο γράφημα, η πορεία της θερμοκρασίας του αέρα είναι σχετικά σταθερή στην θέση αυτή, με μικρή αύξηση να επέρχεται κατά της μεσημεριανές ώρες, διατηρώντας όμως σταθερή διαφορά περίπου 3 με 4° C μεταξύ των δύο ημερών. Η σχετική υγρασία μειώνεται όπως είναι λογικό κατά τις μεσημεριανές ώρες, με εξαίρεση τη 2<sup>η</sup> Ιουλίου όπου μετά της 12:30 αυξάνεται απότομα, κάτι που συνάδει με τα δεδομένα που ελήφθησαν από τον αυτόματο μετεωρολογικό σταθμό του Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών.

Η προσπίπτουσα και ανακλώμενη ηλιακή ακτινοβολία διατηρείται σε χαμηλά επίπεδα, κάτω των 200 και 140 W/m<sup>2</sup> αντίστοιχα, κάτι που καταδεικνύει την έντονη σκίαση που προσφέρει η ξύλινη κατασκευή – κιόσκι κατά το μεγαλύτερο μέρος της ημέρας, ενώ κατά τις μεσημεριανές ώρες η σκίαση αυτή μειώνεται χωρικά αυξάνοντας τις τιμές της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας στα 950 W/m<sup>2</sup>. Οι ανεμομετρικές συνθήκες είναι σταθερές και η ταχύτητα του ανέμου σε χαμηλά επίπεδα. Η μέση ακτινοβόλος θερμοκρασία επηρεαζόμενη από την θερμοκρασία του αέρα και το θερμικό ισοζύγιο του ανθρώπου στις 25/6 άγγιξε τους 38.5° C, ενώ στις 2/7 ήταν κατά 2° C χαμηλότερη.

Το δεύτερο σημείο μετρήσεων στην βορειοανατολική πλευρά του πανεπιστημίου, αφορά στον χώρο έμπροσθεν της βιβλιοθήκης. Οι μετρήσεις ελήφθησαν για δύο ημέρες στις αρχές και στα μέσα Ιουλίου, με γενικά παρόμοιες συνθήκες με εξαίρεση τις ανεμομετρικές, όπου στις 19/7 επικρατούσε δυνατός άνεμος με τη μέση μέγιστη ταχύτητα στο ύψος των 10m να φτάνει τα 6m/sec ενώ στα 3m ήταν μειωμένη στο μισό. Δεν υπάρχουν ιδιαίτερες διαφοροποιήσεις στην πορεία της θερμοκρασίας και της σχετικής υγρασίας αέρος μεταξύ των δύο ημερών, με την θερμοκρασία να παίρνει μέγιστη τιμή τους 31.2° C και την σχετική υγρασία την στιγμή αυτή να είναι στο 30% περίπου. Η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία όπως καταγράφηκε έχει έντονες διακυμάνσεις από της 10 το πρωί και μετά, με τις τιμές να

μεταβάλλονται έντονα ανά δεκάλεπτο. Μηδενικές είναι και οι τιμές τις ανακλώμενης, από την επιφάνεια του εδάφους, μικρού μήκους κύματος ακτινοβολίας έως τις 10:00. Οι έντονες αυτές διακυμάνσεις οφείλονται στην φυτοκάλυψη και δη στην πυκνότητα του φυλλώματος. Στο γράφημα με την ταχύτητα του ανέμου φαίνεται έντονα η διαφοροποίηση μεταξύ των ημερών. Στις 5/7 η τιμή της ταχύτητας του ανέμου δεν ξεπέρασε τα 0.3m/sec, ενώ στις 19/7 καταγράφηκαν έντονες διακυμάνσεις από 0.5 έως 1.5m/sec. Η τιμή της ακτινοβόλου θερμοκρασίας δεν ξεπέρασε τους 35.5° C.

Στην βορειανατολική πλευρά επίσης διεξήχθησαν μετρήσεις σε δύο αίθριους χώρους κτιρίων με το δεύτερο να βρίσκεται βορειότερα και να στερείται φυτοκάλυψης. Στο τρίτο λοιπόν σημείο μετρήσεων στο κτίριο Χασιώτη, οι μετρήσεις ελήφθησαν για δύο συνεχόμενες ημέρες στα τέλη Ιουνίου, αλλά σε διαφορετικές θέσεις εντός του αίθριου. Και οι δύο ημέρες χαρακτηρίζονταν από παρόμοιες συνθήκες καιρού, με αρκετή ζέστη και συννεφιά κατά τις μεσημεριανές κυρίως ώρες. Στα δύο αυτά αίθρια οι μετρήσεις ήταν ολόήμερες για την εύρεση της συμπεριφοράς των χώρων αυτών κατά τις νυχτερινές ώρες. Γενικά, δεν υπάρχουν ιδιαίτερες διαφοροποιήσεις στην πορεία της θερμοκρασίας και της σχετική υγρασίας μεταξύ των τριών θέσεων, με την θερμοκρασία να αποκτά ελάχιστες τιμές τις πρώτες πρωινές ώρες και τις μέγιστες το μεσημέρι, με αντίστροφα αποτελέσματα να παρουσιάζονται στην σχετική υγρασία.



**Γράφημα 14** Ταχύτητα ανέμου σε m/sec στους αίθριους χώρους του Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών.

Η προσπίπτουσα και η ανακλώμενη ηλιακή ακτινοβολία όπως καταγράφηκαν, αποκτούν μηδενικές τιμές από τις 19:00 μέχρι της 5:00, ενώ οι μέγιστες παρουσιάζονται από της 10:00 μέχρι της 15:00. Στο αίθριο του κτιρίου Ρουσσόπουλου η προσπίπτουσα και η ανακλώμενη ακτινοβολία παίρνουν κατά βάση μεγάλες τιμές, που αγγίζουν τα 1000 και 220 W/m<sup>2</sup> αντίστοιχα, ενώ μηδενίζονται σχεδόν ακαριαία κατά τις απογευματινές ώρες. Στις τιμές του

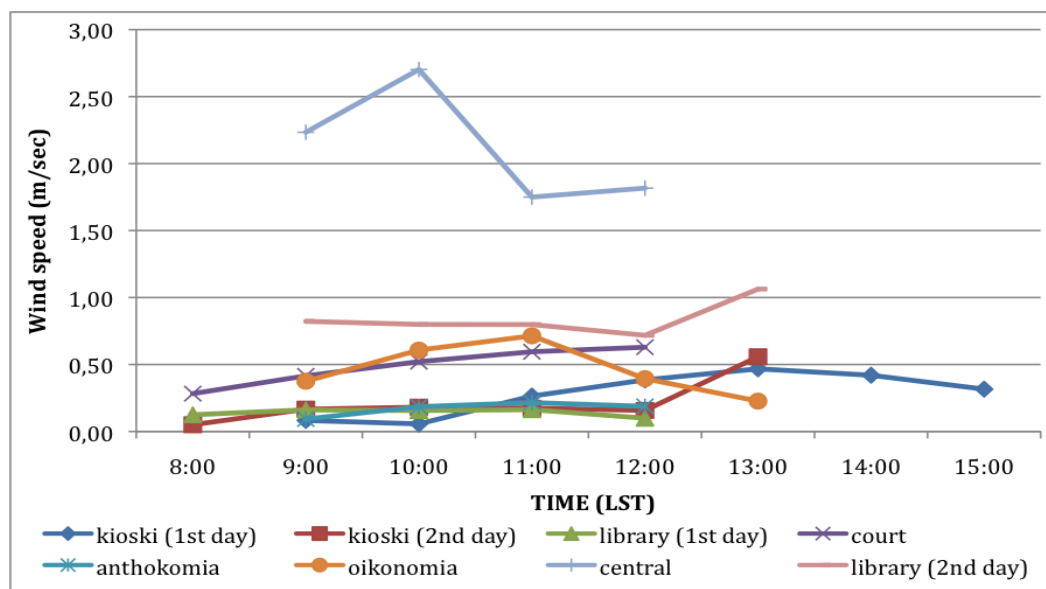


άλλου αίθριου παρουσιάζονται με διαφορά χρόνου οι μέγιστες τιμές της ακτινοβολίας, με αυτές της ανατολικής πλευράς να καθυστερούν χρονικά λόγω της σκίασης από το κτίριο. Στο γράφημα με την ταχύτητα του ανέμου δεν φαίνεται αξιοσημείωτη διαφοροποίηση μεταξύ των θέσεων, με την θέση στην ανατολική πλευρά του κτιρίου Χασιώτη να παρουσιάζει γενικά υψηλότερη ημερήσια ταχύτητα ανέμου, αλλά σε καμία θέση η ταχύτητα δεν ξεπερνά τα 0.6m/sec. Η τιμή της ακτινοβόλου θερμοκρασίας δεν ξεπερνά τους 45° C, με την ημερήσια πορεία να είναι ίδια σε όλες τις θέσεις.

Το τελευταίο σημείο μετρήσεων στην βορειοανατολική πλευρά του πανεπιστημίου, αφορά στον υπαίθριο χώρο βόρεια των γηπέδων. Οι μετρήσεις ελήφθησαν για δύο ημέρες στις αρχές και στα μέσα Ιουλίου, όπου την πρώτη μέρα οι μετρήσεις διεξήχθησαν τις πρωινές ώρες και την δεύτερη κατά τις μεσημεριανές ώρες, με τις καιρικές συνθήκες να είναι γενικά παρόμοιες. Δεν υπάρχουν ιδιαίτερες διαφοροποιήσεις στην πορεία της θερμοκρασίας και της σχετικής υγρασίας αέρος μεταξύ των δύο ημερών, με την τιμή της θερμοκρασίας και της υγρασίας της δεύτερης μέρας να ακολουθεί την πορεία της πρώτης. Η μέγιστη τιμή της θερμοκρασίας παρατηρήθηκε στους 32° C και της σχετικής υγρασίας την στιγμή αυτή να είναι στο 32% περίπου. Η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία αποκτά τιμές μεγαλύτερες των 700W/m<sup>2</sup> από τις 9:15, ενώ αγγίζει τα 1000 W/m<sup>2</sup> από τις 11:30 μέχρι της 12:30, όπου ήταν και η τελευταία μέτρηση. Οι τιμές τις ανακλώμενης, από την επιφάνεια του εδάφους, μικρού μήκους κύματος ακτινοβολίας άγγιξαν τα 230 W/m<sup>2</sup>. Η απότομη αλλαγή στην τιμή της προσπίπτουσας ακτινοβολίας από την πρώτη ώρα των μετρήσεων και μετά οφείλεται στην σκίαση από δένδρο. Η ταχύτητα του ανέμου, που φαίνεται στο αντίστοιχο διάγραμμα, διατηρείται σε υψηλά επίπεδα την δεύτερη μέρα, παρουσιάζοντας και έντονες διακυμάνσεις, με τις τιμές να κυμαίνονται στα ίδια επίπεδα με τις τιμές από σταθερό σταθμό αναφοράς. Την πρώτη μέρα μετρήσεων η ταχύτητα διατηρούταν σε χαμηλά επίπεδα. Η τιμή της μέσης ακτινοβόλου θερμοκρασίας έφτασε τους 40° C, από τις 11:00 μέχρι της 15:00, όπου ήταν και η τελευταία μέτρηση. Η απότομη αύξηση της μέσα σε ένα τέταρτο, από τις 9:15 μέχρι της 9:30 δηλαδή, οφείλεται στην έκθεση του σταθμού στην ηλιακή ακτινοβολία.

Στην νοτιοδυτική πλευρά του πανεπιστημίου, ελήφθησαν μετρήσεις από τρεις θέσεις, η πρώτη εκ των οποίων αφορά στον χώρο της ανθοκομίας, η δεύτερη στον χώρο στην οικονομία και η τρίτη στο κεντρικό κτίριο. Δεν παρατηρήθηκαν ιδιαίτερες διαφοροποιήσεις στην πορεία της θερμοκρασίας και της σχετικής υγρασίας αέρος στις τρεις θέσεις, με την θερμοκρασία να κυμαίνεται από 29 έως 34° C και την σχετική υγρασία από 29 έως 42% στην πρώτη θέση. Στην δεύτερη και στην τρίτη θέση η θερμοκρασία κυμάνθηκε από τους 28 έως 32° C και η σχετική υγρασία από 35 ως 43% και από 32 ως 38% αντίστοιχα. Η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία όπως καταγράφηκε έχει έντονες διακυμάνσεις με την μέγιστη τιμή να φτάνει τα 750W/m<sup>2</sup> στη πρώτη θέση, τα 850W/m<sup>2</sup> στην δεύτερη και τα 900W/m<sup>2</sup> στην τρίτη. Οι τιμές τις ανακλώμενης ακτινοβολίας δεν ξεπέρασαν σε καμία από τις τρεις θέσεις τα

200W/m<sup>2</sup>. Η ταχύτητα του ανέμου στην ανθοκομία ήταν ασθενής και δεν ξεπέρασε τα 0.4m/sec, όπως και στην οικονομία με ταχύτητες μικρότερες από 1.2m/sec. Στην θέση έμπροσθεν του κεντρικού κτιρίου η ταχύτητες που καταγράφηκαν ήταν μέτριες που έφτασαν στο δεκάλεπτο τα 5m/sec.

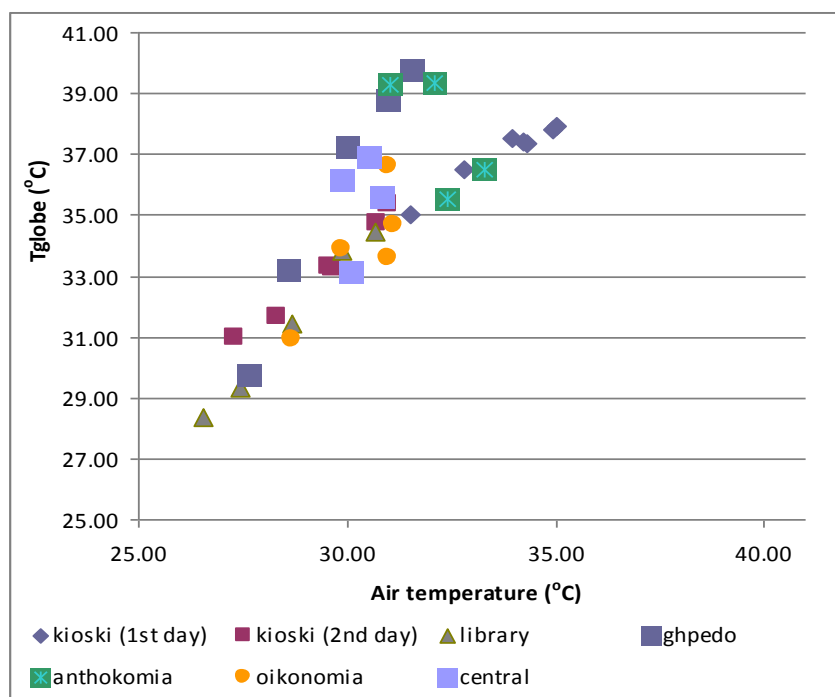
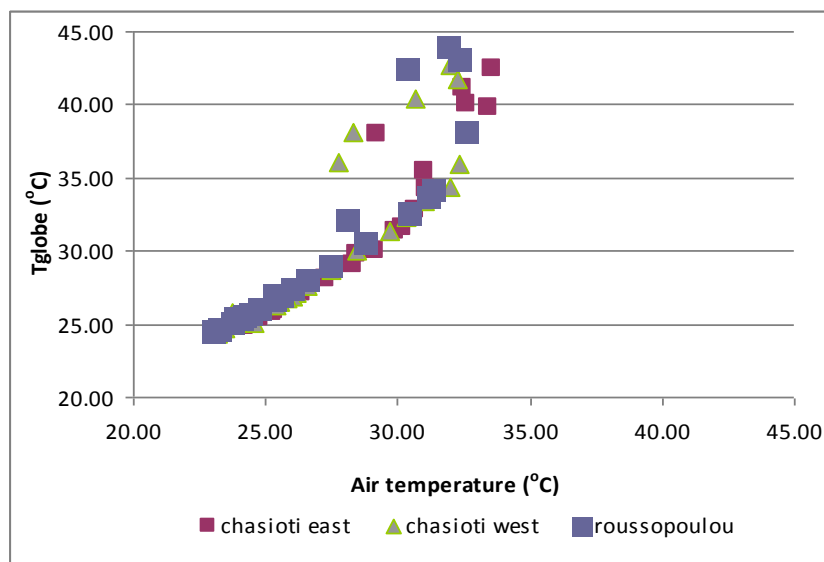


**Γράφημα 15** Ταχύτητα ανέμου σε m/sec στους υπαίθριους χώρους του Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών.

Στο γράφημα 16 παρουσιάζεται η σχέση των τιμών της μέσης ακτινοβόλου θερμοκρασίας με τις αντίστοιχες τιμές της θερμοκρασίας αέρος στους αίθριους και υπαίθριους χώρους μετρήσεων του Πανεπιστημίου. Στους αίθριους χώρους παρατηρείται ταύτιση των δύο τιμών και στους τρεις χώρους όταν οι τιμές είναι μικρότερες των 27° C, δηλαδή με αύξηση της θερμοκρασίας του αέρος παρατηρείται και αντίστοιχη αύξηση στην τιμή της μέσης ακτινοβόλου θερμοκρασίας. Στην ανατολική πλευρά του αίθριο του κτιρίου Χασιώτη, όταν η θερμοκρασία του αέρος ξεπερνά τους 31° C, η τιμή της μέσης ακτινοβόλου θερμοκρασίας αυξάνεται απότομα αγγίζοντας τους 44° C. Αντίστοιχη και η κατάσταση στην δυτική πλευρά του κτιρίου Χασιώτη και στο κτίριο Ρουσσόπουλου με την  $T_{globe}$  να αγγίζει τους 42.5° C και 44° C αντίστοιχα, όταν η θερμοκρασία του αέρος δεν ξεπερνά τους 33° C.

Στο κίосκι μεταξύ των δύο ημερών παρατηρείται ότι η αύξηση της τιμής της θερμοκρασίας του αέρος, συνοδεύεται από αντίστοιχη αύξηση στην τιμή της  $T_{globe}$ , ενώ στο γήπεδο μικρή αύξηση της θερμοκρασίας αέρος επιφέρει μεγάλη αύξηση στην τιμή της  $T_{globe}$ . Στους χώρους 'βιβλιοθήκη' και 'οικονομία', που έχουν παρόμοια γεωμετρία του χώρου παρατηρείται ανάλογη αύξηση της  $T_{air}$  και  $T_{globe}$ , ενώ στο 'γήπεδο' που αφορά σε ανοιχτό υπαίθριο χώρο, μικρή μεταβολή της  $T_{air}$  οδηγεί σε μεγάλη μεταβολή της  $T_{globe}$ . Στο 'κεντρικό κτίριο' και στην 'ανθοκομία' δεν παρατηρούνται ιδιαίτερες διαφοροποιήσεις στις τιμές των δύο παραμέτρων.

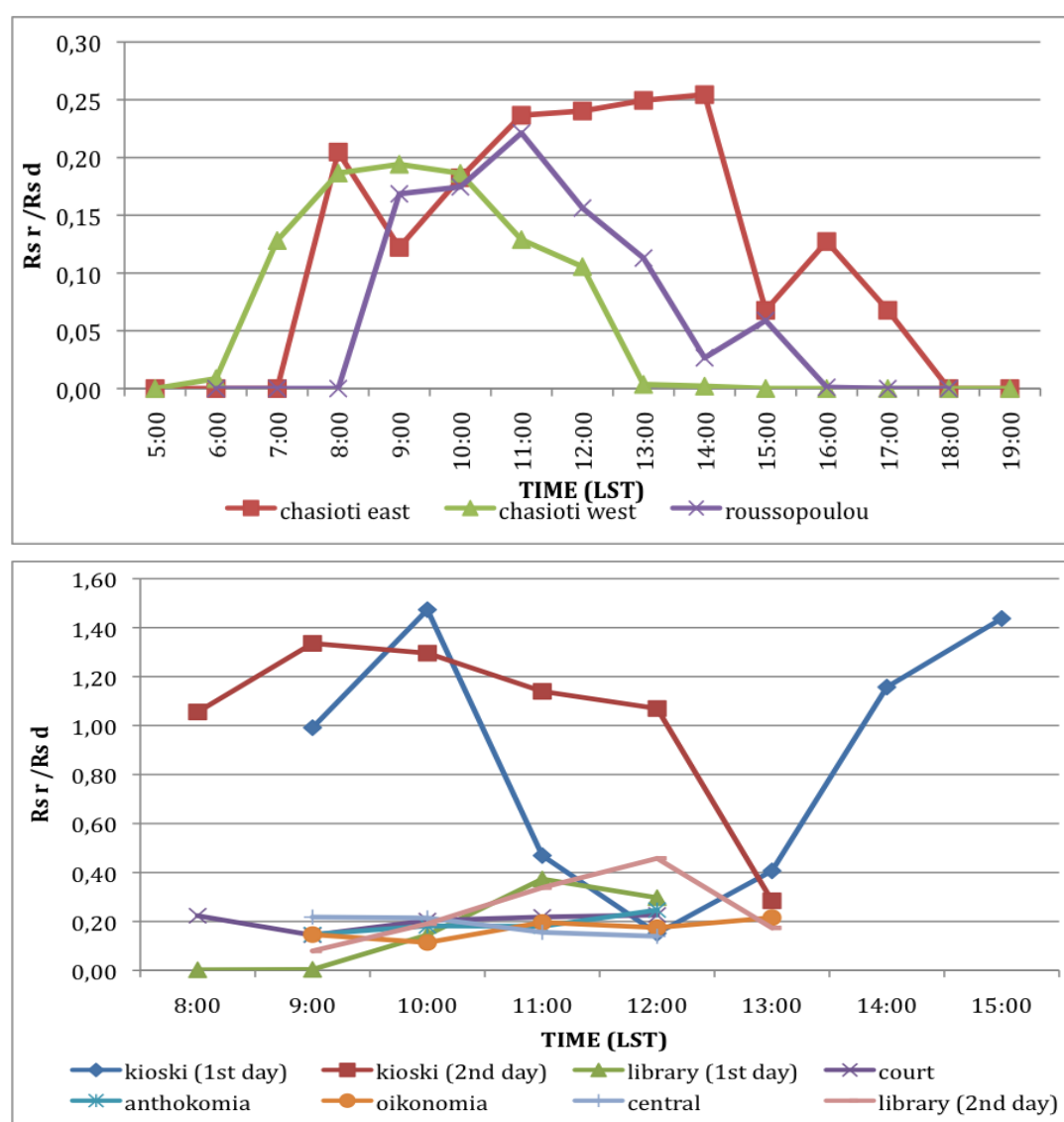
Ουσιαστικά από την μελέτη των μικρομετεωρολογικών παραμέτρων που προηγήθηκε έγινε αντιληπτή η διαφοροποίηση τους σε διαφορετικές συνθήκες προσανατολισμού, βλάστησης και κάλυψης εδάφους. Στο παρακάτω γράφημα παρουσιάζεται η πορεία κατά την



**Γράφημα 16** Θερμοκρασία σφαίρας σε σχέση με τις αντίστοιχες τιμές της θερμοκρασίας του αέρος σε °C στους αίθριους χώρους (επάνω) και στους υπαίθριους χώρους (κάτω) του Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών.

διάρκεια της ημέρας της αναλογίας της ανακλώμενης και της προσπίπτουσας μικρού μήκους κύματος ακτινοβολίας. Στην δυτική πλευρά του κτιρίου Χασιώτη ο λόγος αυτός αποκτά θετικές τιμές από τις 6:00 LST έως τις 13:00 LST, με την μέγιστη τιμή να παρατηρείται στις 09:00 LST, ενώ στην ανατολική πλευρά η περίοδος αυτή διαρκεί από τις 08:00 έως τις 18:00 LST, με την μέγιστη τιμή να αγγίζει το 25%. Στο αίθριο του Ρουσσόπουλου οι θετικές τιμές

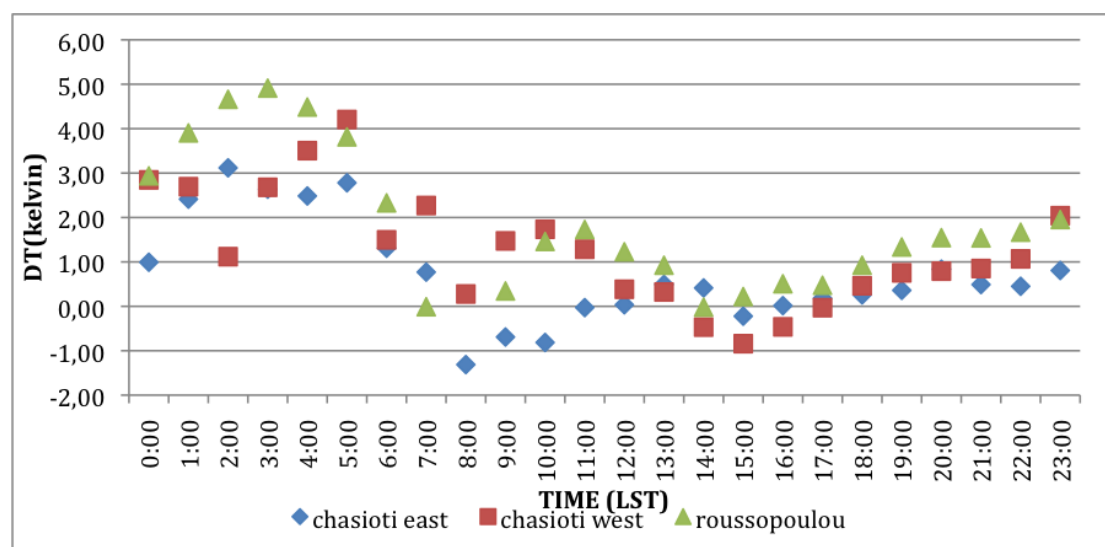
παρατηρούνται το διάστημα από τις 9:00 έως τις 15:00 LST, με την ανακλώμενη ακτινοβολία να φτάνει το 23% της προσπίπτουσας. Και στα τρία αίθρια ο σταθμός τοποθετήθηκε σε επιφάνεια τσιμέντου, αλλά παρόλα αυτά η ανακλώμενη ακτινοβολία δεν ξεπέρασε σε ποσοστό το 25% της προσπίπτουσας. Στους υπαίθριους χώρους η ανακλώμενη ακτινοβολία δεν ξεπέρασε σε ποσοστό το 42% της προσπίπτουσας, εκτός από το 'κίосκι', όπου οι τιμές της ανακλώμενης ακτινοβολίας παρουσιάζονται μεγαλύτερες από τις τιμές της προσπίπτουσας κατά 50% σε ωριαία βάση. Αυτό συμβαίνει διότι ο σταθμός ήταν τοποθετημένος κάτω από ξύλινο υπόστεγο με αποτέλεσμα τις πρωινές ώρες να δέχεται ελάχιστη προσπίπτουσα ακτινοβολία (τιμές έως  $56\text{W/m}^2$ ), ενώ η ανακλώμενη λόγω του ξύλινου δαπέδου έφτανε τα  $75\text{W/m}^2$ .



**Γράφημα 17** Ανακλώμενη μικρού μήκους κύματος ακτινοβολία προς στην προσπίπτουσα σε  $\text{W/m}^2$  στους αίθριους χώρους (επάνω) και στους υπαίθριους χώρους (κάτω) του Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών.

## B. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΩΝ ΑΕΡΟΣ ΜΕ ΣΤΑΘΜΟ ΑΝΑΦΟΡΑΣ

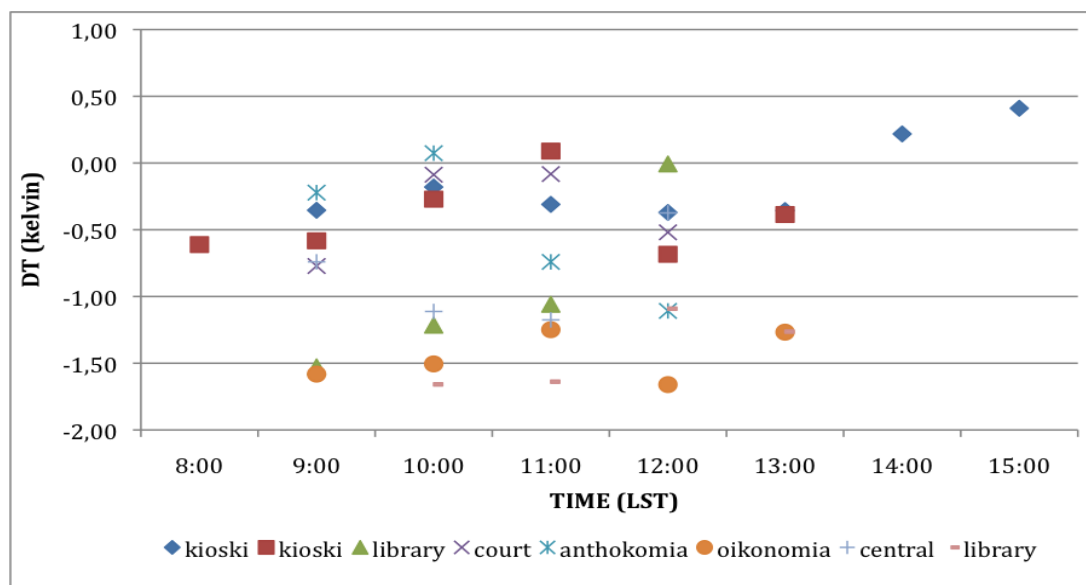
Στους αίθριους χώρους κατά τις νυχτερινές ώρες και μέχρι την ανατολή του ηλίου, παρατηρούνται αυξημένες θερμοκρασίες αέρος σε σχέση με τις τιμές που καταγράφηκαν στον αυτόματο μετεωρολογικό σταθμό του πανεπιστημίου, που αγγίζουν τους 5K στο αίθριο του κτιρίου ‘Ρουσσόπουλου’ και τους 4.1 και 3K στην δυτική και ανατολική πλευρά του κτιρίου ‘Χασιώτη’ αντίστοιχα. Πιο αναλυτικά, στο αίθριο στο κτίριο ‘Ρουσσόπουλου’ οι θετικές διαφορές μεταξύ του σταθμού και του σταθμού αναφοράς αρχίζουν στις 15:00 LST και αυξάνονται μέχρι τις 3:00 LST, όπου παρατηρείται και η μέγιστη διαφορά, ενώ μετά βαίνει μειούμενη μέχρι τις 7:00 LST όπου η διαφορά μηδενίζεται. Στην συνέχεια αυξάνεται φτάνοντας τους 1.8K διαφορά και μειώνεται μέχρι τις 14:00 LST, όπου οι διαφορές θερμοκρασιών μηδενίζονται. Γενικά στην θέση αυτή οι θερμοκρασίες που καταγράφηκαν στον φορητό μετεωρολογικό σταθμό είναι υψηλότερες ή ίσες με αυτές του σταθμού αναφοράς. Στην δυτική θέση στο κτίριο ‘Χασιώτη’, οι θετικές διαφορές αρχίζουν από τις 18:00 LST και συνεχίζουν μέχρι τις 13:00 LST, ενώ οι αρνητικές τιμές έως -1K παρουσιάζονται μόνο σε ένα μικρό χρονικό διάστημα τριών ωρών (14:00 – 16:00). Οι θετικές διαφορές φτάνουν τους 4.2K στις 6:00 LST. Στην ανατολική μεριά στο κτίριο ‘Χασιώτη’, οι θετικές διαφορές παρατηρούνται από τις 12:00 LST και συνεχίζουν μέχρι και τις 07:00 LST. Από τις 08:00 έως τις 10:00LST παρουσιάζονται χαμηλότερες θερμοκρασίες στην θέση απ’ ότι στον σταθμό αναφοράς που φτάνουν τους -1.2K.



**Γράφημα 18** Διαφορές θερμοκρασίας μεταξύ του σταθμού αναφοράς (Γ.Π.Α.) και του πρώτου σημείου μετρήσεων – κίосκι σε ° C.

Στους υπαίθριους χώρους, παρατηρούνται έντονες διαφοροποιήσεις μεταξύ των θέσεων. Στο κίосκι μεταξύ των δύο ημερών με διαφορετικές μετεωρολογικές συνθήκες δεν υπάρχουν ιδιαίτερες μεταβολές με την μέγιστη διαφορά θερμοκρασιών να μην ξεπερνά τον 0.5K, ενώ

τις περισσότερες ώρες οι διαφορές είναι αρνητικές και φτάνουν τον  $-0.7\text{K}$ . Στην ‘οικονομία’ και στην ‘βιβλιοθήκη’ οι θερμοκρασίες αέρος σε σχέση με τις τιμές που καταγράφηκαν στον αυτόματο μετεωρολογικό σταθμό του πανεπιστημίου, είναι μειωμένες και κυμαίνονται από  $-1.0$  έως  $-2.2\text{K}$ . Αντίστοιχα και για τις θέσεις ‘γήπεδο’, ‘ανθοκομία’ και ‘κεντρικό κτίριο’ όπου παρατηρείται κυρίως μία μικρή θετική επίδραση του σχεδιασμού των χώρων, με τις διαφορές θερμοκρασιών να μην ξεπερνούν τον  $-1.2\text{K}$ .



**Γράφημα 19** Διαφορές θερμοκρασίας μεταξύ του σταθμού αναφοράς (Γ.Π.Α.) και των αίθριων χώρων της βόρειας πλευράς του πανεπιστημίου σε  $^{\circ}\text{C}$ .

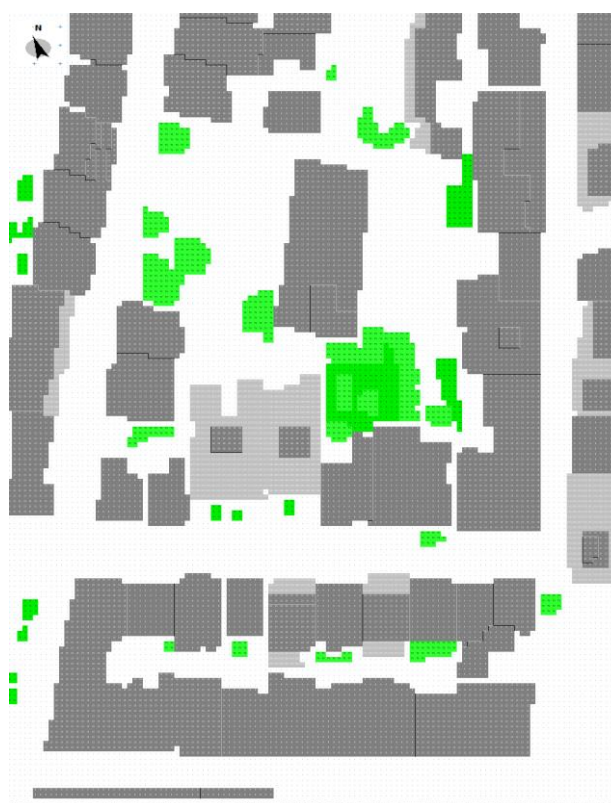
Συμπερασματικά, οι ανοιχτοί χώροι κατά τις πρωινές ώρες δεν έχουν αρνητική επίδραση στην διαμόρφωση θερμοκρασιών, με τις μέγιστες ωριαίες διαφορές των θερμοκρασιών να μην ξεπερνούν τον  $0.5\text{K}$ . Αντίθετα οι κλειστοί αίθριοι χώροι κατά το μεγαλύτερο μέρος της ημέρας ασκούν αρνητική επίδραση στην διαμόρφωση του θερμοκρασιακού προφίλ, καθώς οι θερμοκρασίες παρουσιάζονταν αυξημένες σε σχέση με τον σταθμό αναφοράς έως και  $6\text{K}$ .

## 5.2 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ

### 5.2.1 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΠΟΙΗΣΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

Το μοντέλο Envi-met, όπως προαναφέρθηκε, έχει χρησιμοποιηθεί κατά κόρον σε μελέτες για την πρόβλεψη της θερμικής άνεσης κάτω από διαφορετικές προοπτικές σχεδιασμού των χώρων, καθώς λαμβάνει υπόψη όλα τα αρχιτεκτονικά και δομικά στοιχεία μιας περιοχής, όπως κτίρια, φυσικά εμπόδια, ποσοστό φυτοκάλυψης, τύπος υλικών δόμησης και εδάφους, καθώς και τις μετεωρολογικές παραμέτρους ως αρχικές συνθήκες.

Για την προσομοίωση του μοντέλου, η ευρύτερη περιοχή της εσωτερικής αυλής των Πατησιών διαμορφώθηκε σε ένα πλεγματοειδές μοντέλο διαστάσεων 110 x 100 x 30 grids με ανάλυση στα 1.8m x 2m x 2m, με αποτέλεσμα μια συνολική έκταση 198 x 200 m σε οριζόντια αποτύπωση. Το μοντέλο περιστράφηκε κατά 18° από το βορρά. Η Εικόνα 12 δείχνει την αποτύπωση της περιοχής του μοντέλου, όπως δημιουργήθηκε με το Envi-met Editor, όπου φαίνονται η θέση των κτιρίων, αλλά και τα διαφορετικά είδη βλάστησης ως προς το ύψος και την πυκνότητα του φυλλώματος.



**Εικόνα 12** Τυπική μορφολογία περιοχής μελέτης όπως προέκυψε από το Envi-met Editor 3.1.

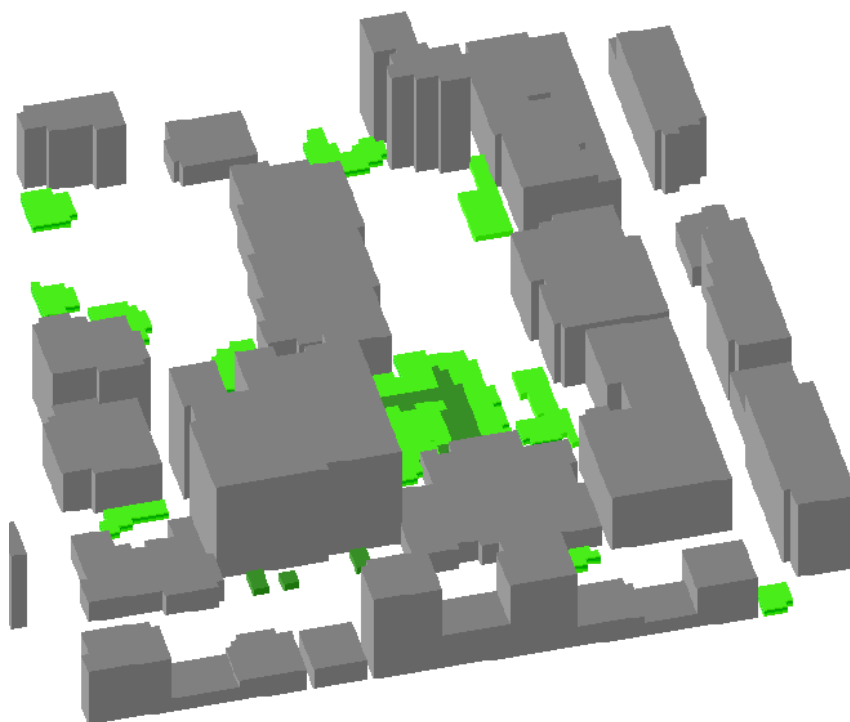
Η προσομοίωση του μοντέλου έγινε σε 24ωρη βάση ξεκινώντας από της 01:00 LST και τελειώνοντας στις 01:00LST της επόμενης ημέρας. Οι συνολικές ώρες της προσομοίωσης πρέπει να ξεπερνούν τις 6 ώρες ώστε να εξαλείφεται η επίδραση της αρχικοποίησης. Οι

επιλεγθείσες μέρες για την προσομοίωση ήταν η 30<sup>η</sup> Ιουλίου, η 8<sup>η</sup> και 22<sup>α</sup> Αυγούστου του έτους 2007, όπου χαρακτηρίζονται ως τυπικές ζεστές καλοκαιρινές ημέρες της Αθήνας. Οι παράμετροι εισόδου που χρησιμοποιήθηκαν για την προσομοίωση συνοψίζονται στον παρακάτω πίνακα. Οι πειραματικές μετρήσεις του 2007 χρησιμοποιήθηκαν για την βαθμονόμηση του μοντέλου, ενώ μετά εξήχθησαν και σενάρια ώστε να βρεθεί η επίδραση της βλάστησης και διαφόρων υλικών κάλυψης εδάφους στο μικροκλίμα των εσωτερικών αυλών.

**Πίνακας 2** Καιρικές συνθήκες των επιλεγμένων ημερών για την βαθμονόμηση του μοντέλου, όπως καταγράφηκαν από τον μετεωρολογικό σταθμό του ΝΟΑ<sup>3</sup> (Tsiros and Hoffman, 2013)

Date	Wind Speed m/sec	Wind Direction	RH %	Tair °C	Tmax °C	Tmin °C
30/07	2.6	NE	45	30.4	37.2	25.4
8/8	2.6	NNE	52	25.6	31.4	21.1
22/8	1.6	SW	49	30.8	37.2	25.2

Τα δεδομένα εισόδου, όπως τα μετεωρολογικά στοιχεία, εισήχθησαν στο μοντέλο μέσω του Envi-met Configuration editor.



**Εικόνα 13** Τρισδιάσταση αποτύπωση περιοχής μελέτης (οι διαφορετικές αποχρώσεις του πράσινου έγκειται στην διαφορετική πυκνότητα φυλλώματος).

<sup>3</sup> Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών – National Observatory Athens



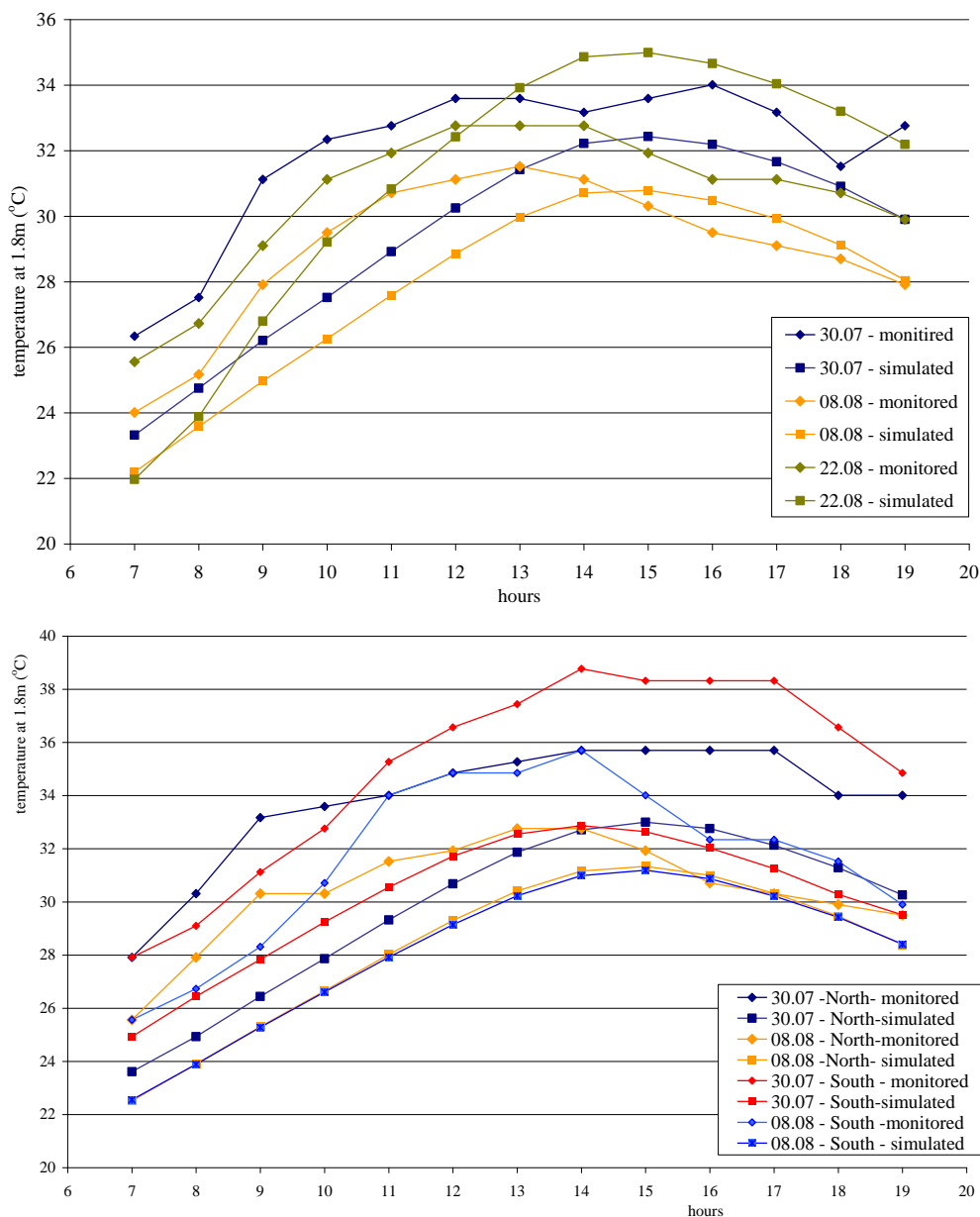
### 5.2.2 ΕΛΕΓΧΟΣ ΑΞΙΟΠΙΣΤΙΑΣ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

Η αξιοπιστία του μικροκλιματικού μοντέλου ελέγχθηκε με επί τόπου μετρήσεις των τιμών των θερμοκρασιών για τρεις ημέρες στις οποίες επικρατούσαν τυπικές καλοκαιρινές συνθήκες. Σύμφωνα με τα πειραματικά δεδομένα που καταγράφηκαν το καλοκαίρι του 2007 σε θέση μέσα στην εσωτερική αυλή, η θερμοκρασία του αέρα στις 30 Ιουλίου κυμάνθηκε από τους 26.3 ως τους 34°C, παρουσιάζοντας μια μέση τιμή στους 32 °C, ενώ η θερμοκρασία του αέρα όπως προέκυψε από την προσομοίωση για την μέρα αυτή μέσα στην εσωτερική αυλή κυμάνθηκε από τους 23.3 στους 32.4°C με μέση τιμή τους 29.4 °C. Στις 8 Αυγούστου η μέση θερμοκρασία του αέρα όπως καταγράφηκε ήταν 27.9 °C με ελάχιστη τους 24.0 °C και μέγιστη τους 31.5 °C. Οι αντίστοιχες τιμές που προήλθαν από την προσομοίωση είναι 30.6 °C για την μέση, ενώ κυμαίνεται από τους 22.2 ως τους 30.8 °C. Στις 22 Αυγούστου, η μετρούμενη θερμοκρασία αέρος κυμάνθηκε από τους 25.6 ως τους 32.8°C με μέση τιμή στους 30.6°C, με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης να δίνουν τιμές που κυμαίνονται κατά τη διάρκεια της ημέρας από τους 22 ως τους 35 °C με μέση τιμή στους 31 °C. Όπως φαίνεται στο παρακάτω γράφημα η μεγαλύτερη διαφορά παρατηρείται στις ελάχιστες θερμοκρασίες στις 22 Αυγούστου.

Παράλληλα με τα δεδομένα που καταγράφηκαν μέσα στην εσωτερική αυλή, ελήφθησαν και μετρήσεις θερμοκρασίας αέρος σε γειτονικό παρακείμενο πεζόδρομο σε απόσταση 1.5m από τις βόρειες προσανατολιζόμενες όψεις πλευρικών κτιρίων (στο Βορρά) και αντίστοιχα για το νότο. Έτσι από τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων και των μετρήσεων βρέθηκε ότι η θερμοκρασία αέρος για τις 30 Ιουλίου στην μεν πρώτη περίπτωση είχαν τιμές από 25.7 ως 35.7°C με μέση τους 38.5° C, ενώ στην περίπτωση των μετρούμενων οι τιμές κυμαίνονταν από 23.6 ως 33° C με μέση 29.7° C. Στην δεύτερη περίπτωση οι τιμές που προέκυψαν από την προσομοίωση ήταν από 27.9 μέχρι 38.32° C με μέση στους 35° και τις μετρούμενες να είναι από 24.93 μέχρι 32.87° με μέση στους 30.1°C. Τέλος, στις 8 Αυγούστου οι τιμές κυμαίνονταν από τους 25.5° έως τους 32.6° με μέση τους 30.4° C και από τους 22.51° ως τους 31.34° με μέση τους 28.3° C σύμφωνα με τα αποτελέσματα των μετρήσεων και των προσομοιώσεων αντίστοιχα για την βόρεια προσανατολιζόμενη όψη και από 25.5 ως 35.7° C με μέση στους 31.6° C και από 22.55° C ως 31.19° με μέση στους 28.2°C για τιμές από την προσομοίωση και τις μετρήσεις αντίστοιχα.

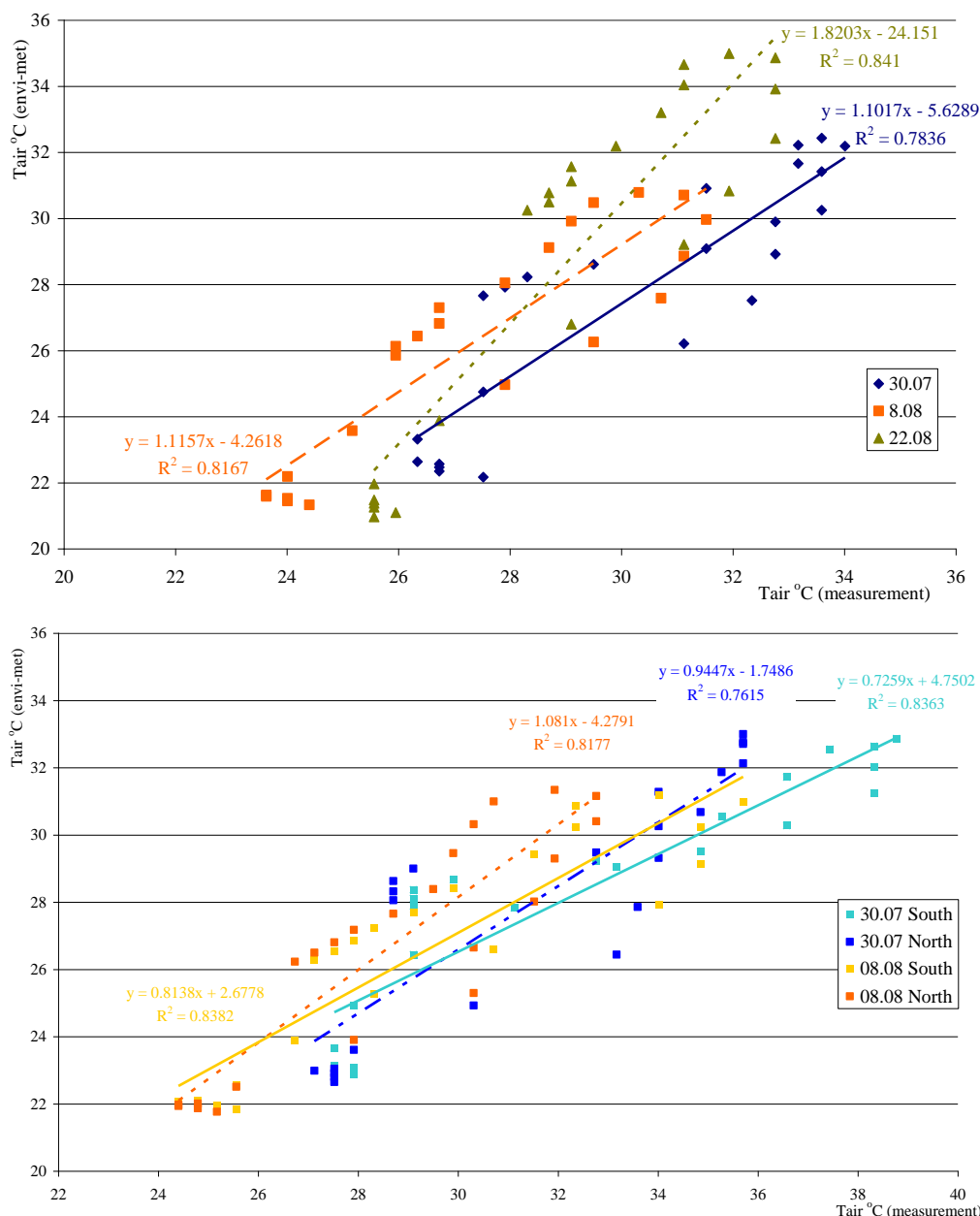
Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης της μελέτης δείχνουν ότι, σε γενικές γραμμές, δεν υπάρχουν σημαντικές διαφορές μεταξύ προσομοιωμένων τιμών και τιμών μέτρησης της θερμοκρασίας του αέρα σε ωριαία βάση. Ο συντελεστής προσδιορισμού που προκύπτει από τη γραμμική παλινδρόμηση δείχνει υψηλή συσχέτιση έως 0.84 μεταξύ των μετρηθέντων και προσομοιωμένων τιμών της θερμοκρασίας του αέρα μέσα στην αυλή και στον πεζόδρομο στο ύψος των 3.9m. Κατά τις πρωινές ώρες στις 30 Ιουλίου η διαφορά είναι μέχρι 0.20°C στις

09:00LST και μετά τις 12:00LST το σφάλμα ελαχιστοποιείται στους 0.03°C. Οι άλλες ημέρες δεν έχουν τόσο μεγάλη διαφορά στις τιμές της θερμοκρασίας αέρα κατά τις πρωινές ώρες. Επιπλέον, το μοντέλο υποεκτιμά τη θερμοκρασία του αέρα κατά τις πρωινές ώρες, ενώ κατά τις απογευματινές ώρες υπάρχει υπερεκτίμηση των τιμών της θερμοκρασίας.



**Γράφημα 20** Πορεία προσομοιωμένων και μετρούμενων τιμών θερμοκρασίας αέρος (σε °C), για 3 διαφορετικές ημέρες στην εσωτερική αυλή (α) και σε παράπλευρο πεζόδρομο (β).

Τέλος παρατηρείται ότι καλύτερα αποτελέσματα έδωσε το μοντέλο στις 22/07, όπου επικρατούσαν ιδιαίτερες ανεμομετρικές συνθήκες με θερμούς και ξηρούς ανέμους ΝΔ διεύθυνσης, σε αντίθεση με τις άλλες δύο ημέρες όπου επικρατούσαν οι ετησίες.

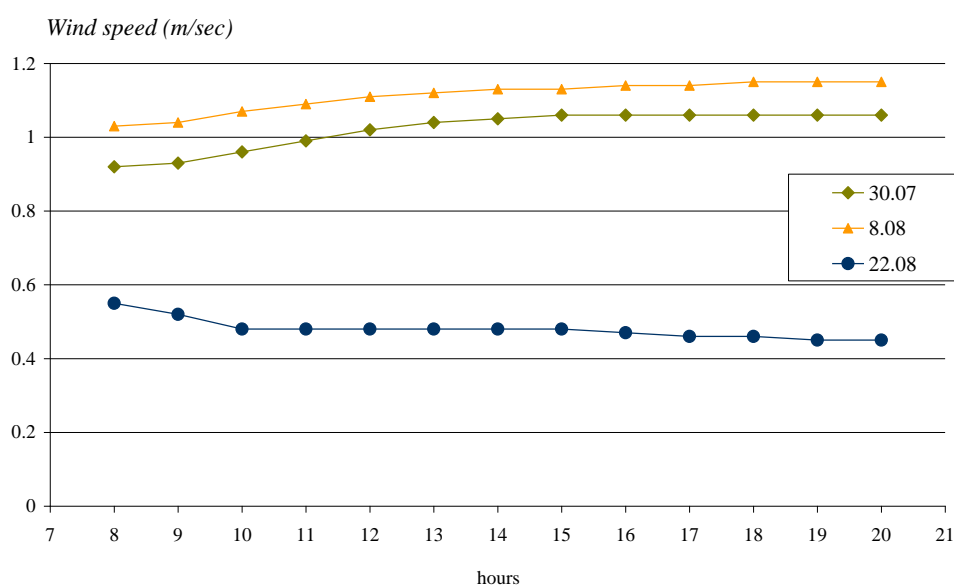


**Γράφημα 21** Σύγκριση προσομοιωμένων και μετρούμενων τιμών θερμοκρασίας αέρα (σε °C), για 3 διαφορετικές ημέρες στην εσωτερική αυλή (α) και σε παράπλευρο πεζόδρομο (β).

Κατά την βαθμονόμηση του μοντέλου με τα δεδομένα του 2007 προέκυψαν σφάλματα στα αποτελέσματα, που δημιουργήθηκαν λόγω των μεγάλων τιμών της μικρού μήκους κύματος ακτινοβολίας και του πολύπλοκου σχεδιασμού του χώρου. Τα σφάλματα οδηγούσαν σε τερματισμό το μοντέλο λόγω της μετέπειτα δημιουργίας προβλημάτων στην τυρβώδη ροή του αέρα. Τα αποτελέσματα βελτιώθηκαν με την μείωση των χρονικών βημάτων, η τιμή των οποίων εξαρτήθηκε και καθορίστηκε από το ύψος του ήλιου.

### 5.2.3 ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ

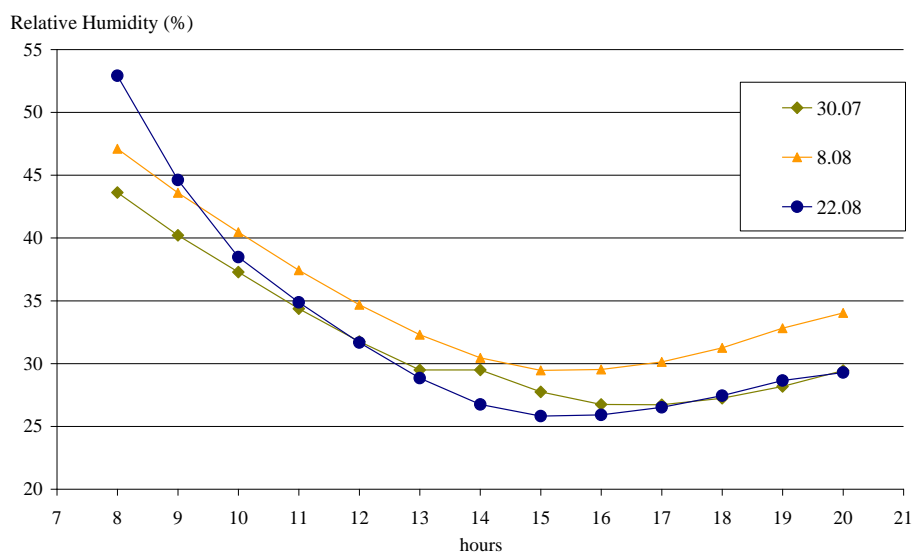
Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης της μελέτης αυτής, δείχνουν στην πραγματικότητα, ότι δεν υπάρχει μεγάλη διαφορά μεταξύ προσομοιούμενων και μετρούμενων τιμών της θερμοκρασίας του αέρος. Παρόλα αυτά κρίθηκε αναγκαία η διενέργεια μιας ανάλυσης ευαισθησίας του μοντέλου για να δειχθεί η απόκριση του στις αλλαγές των μικρομετεωρολογικών παραμέτρων με την αλλαγή των αρχικών συνθηκών. Απ' την ανάλυση φάνηκε ότι οι τιμές των μικροκλιματικών παραμέτρων δεν διαφέρουν μεταξύ τους, παρόλο το γεγονός ότι οι αρχικές συνθήκες ήταν διαφορετικές. Πιο αναλυτικά, στις 30/7 και 22/08 οι συνθήκες καιρού ήταν παρόμοιες (Πίνακας 2) και διέφεραν μόνο στην ταχύτητα του ανέμου αλλά και στην διεύθυνση. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων (Γράφημα 22) βρέθηκαν να συνάδουν με αυτή την παρατήρηση, δηλαδή παρατηρήθηκε ότι με μείωση της αρχικής ταχύτητας του ανέμου κατά περίπου 38,5%, η ωριαία τιμή της ταχύτητας παρουσίαζε τιμές μειωμένες κατά 43 με 60%, με τις μεγαλύτερες διαφορές να παρατηρούνται από τις μεσημεριανές ώρες και μετά. Στις 30/07 και 08/08 οι ταχύτητες του ανέμου ήταν ίδιες και διέφεραν μόνο στην διεύθυνση αλλά παρόλα αυτά τα αποτελέσματα παρουσίασαν διαφορές της τάξης του 8 με 15% υπέρ της ημέρας με τις ηπιότερες για την θερινή περίοδο συνθήκες.



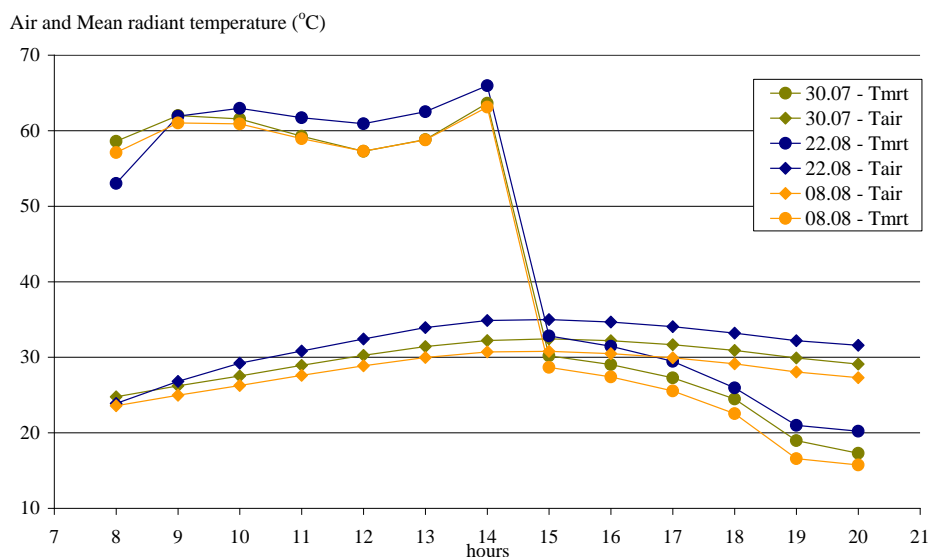
**Γράφημα 22** Ωριαία μεταβολή της ταχύτητας του ανέμου για τις τρεις ημέρες αναφοράς.

Ως προς την σχετική υγρασία του αέρα, όπως παρατηρείται στο παρακάτω γράφημα, οι τιμές δεν παρουσιάζουν μεγάλες διαφορές, σε σχέση με τη διαφορά στις αρχικές συνθήκες, με την ημερήσια πορεία να βαίνει μειούμενη κατά τις μεσημεριανές ώρες, όπως είναι λογικό. Η θερμοκρασία του αέρα σε ωριαία βάση που διαμορφώνεται όπως φαίνεται στο γράφημα, ακολουθεί μια αναλογική πορεία σε σχέση με τις αρχικές συνθήκες, καθώς στις 30/07 και 22/08 η θερμοκρασία ήταν σχεδόν ίδια, με την δεύτερη να είναι αυξημένη κατά  $0.4^{\circ}$  C, ενώ

στις 08/08 ήταν μειωμένη κατά 5° C. Η μεγαλύτερη διαφορά με την 8<sup>η</sup> Αυγούστου αγγίζει το 8% και παρατηρείται τις μεσημεριανές ώρες.

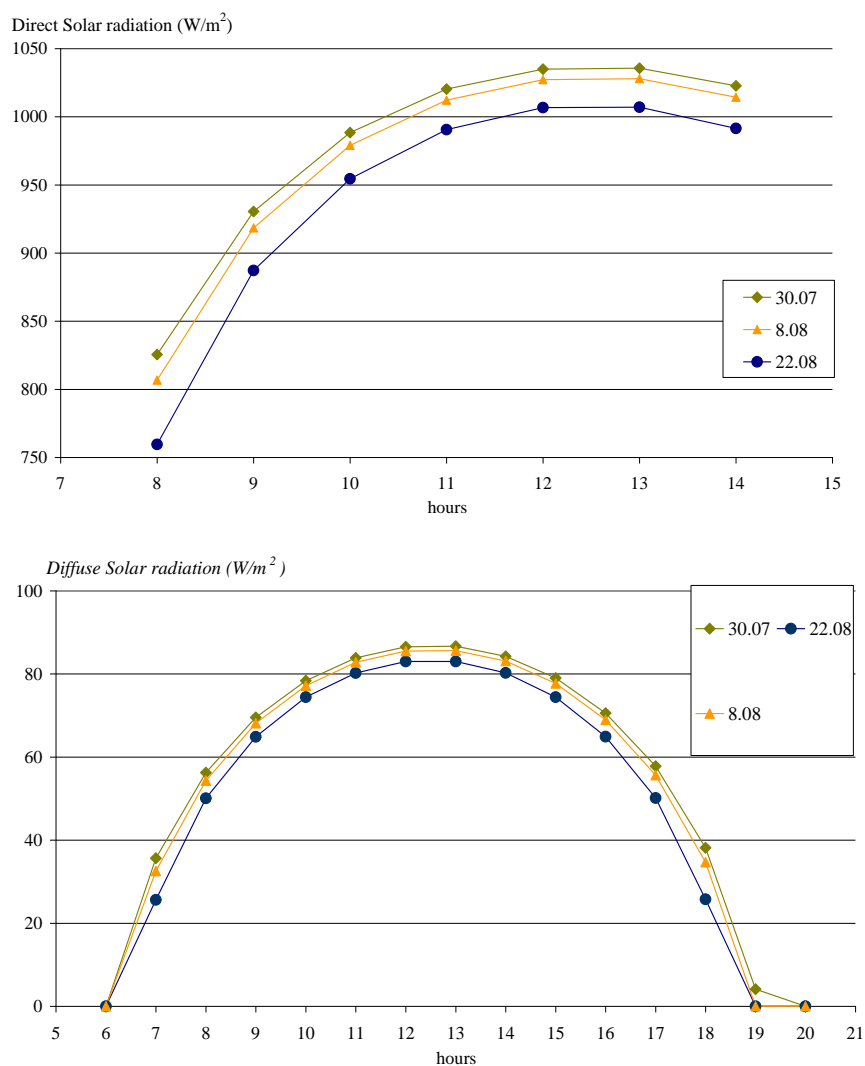


**Γράφημα 23** Ωριαία μεταβολή της σχετικής υγρασίας του αέρα για τις τρεις ημέρες αναφοράς.



**Γράφημα 24** Ωριαία μεταβολή της θερμοκρασίας αέρος και της μέσης θερμοκρασίας ακτινοβολίας για τις τρεις ημέρες αναφοράς.

Σε σχέση με αυτές τις αρχικές συνθήκες, παρατηρούμε πως διαμορφώνονται οι τιμές της ηλιακής ακτινοβολίας προσπίπτουσας και ανακλώμενης εντός του χώρου της εσωτερικής αυλής, διατηρώντας όλα τα αρχιτεκτονικά στοιχεία ίδια. Στο Γράφημα 25 βλέπουμε πως και στις τρεις ημέρες η έκθεση του χώρου στον ήλιο περιορίζεται από τις 8 το πρωί μέχρι τις 2 το μεσημέρι, με τη μέγιστη διαφορά στις τιμές να φτάνει το 7%. Στην ανακλώμενη μικρού μήκους κύματος ακτινοβολίας, οι διαφορές μεγιστοποιούνται κατά της απογευματινές ώρες. Η γενική πορεία της ακτινοβολίας έχει αυξημένες τιμές στις 30 Ιουλίου, ενώ ακολουθούν η 8<sup>η</sup> και η 22<sup>η</sup> Αυγούστου.



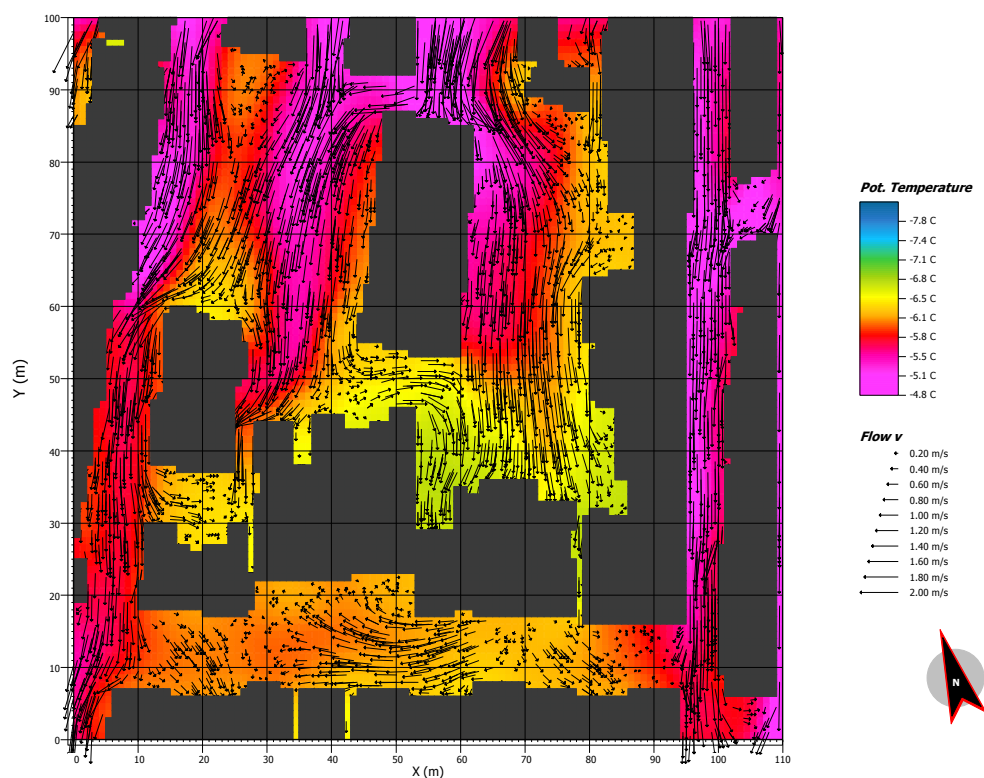
**Γράφημα 25** Ωριαία πορεία της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας (επάνω) και της ανακλώμενης (κάτω) για τις τρεις ημέρες αναφοράς.

Σε γενικές γραμμές, τα αποτελέσματα της ανάλυσης ευαισθησίας του μοντέλου δείχνουν ότι εντός του χώρου οι μικρομετεωρολογικές συνθήκες είναι αρκετά σταθερές και δεν επηρεάζονται, καταρχήν από τις μέσο-κλιματικές καιρικές συνθήκες, ενώ οι μικρές διαφορές στις αρχικές μετεωρολογικές συνθήκες έχουν ως αποτέλεσμα αισθητές διαφορές στις τελικές τιμές των μικρομετεωρολογικών παραμέτρων, κάτι που καταδεικνύει την υψηλή ευαισθησία του μοντέλου στις μικρές μεταβολές των παραμέτρων εισόδου.

## 5.2.4 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΜΟΝΤΕΛΟΥ - ΣΕΝΑΡΙΑ

Επιλεγμένα σενάρια βιοκλιματικού σχεδιασμού εξετάστηκαν με σκοπό να υπολογιστεί η επίδραση της βλάστησης, των επιφανειακών εδαφικών υλικών κάλυψης, η γεωμετρία και ο προσανατολισμός της περιοχής στην μικροκλιματολογία της εσωτερικής αυλής και της ευρύτερης περιοχής. Οι μετεωρολογικές συνθήκες, που εκφράζονται ως αρχικές συνθήκες στο μοντέλο, διατηρήθηκαν σταθερές σε όλα τα σενάρια, ώστε η τυχόν διαφοροποίηση να οφείλεται μόνο στο σχεδιασμό του χώρου. Στις εικόνες που ακολουθούν φαίνονται η θερμοκρασία του αέρα, η μέση θερμοκρασία ακτινοβολίας, η ταχύτητα και η διεύθυνση του ανέμου στο ύψος των 1.6m (σε ύψος χαμηλότερο από την φυτοκόμη), καθώς και η θερμοκρασία των επιφανειών. Ουσιαστικά στο κεφάλαιο αυτό εξετάζεται η χωροχρονική μεταβολή των παραμέτρων αυτών γι' αυτό η ανάλυση τους γίνεται σε τρίωρη βάση από τις 6:00 μέχρι τις 21:00 LST (αναλυτικά γραφήματα στο παράρτημα). Ακολουθούν γραφήματα σχετικά με την χωρική απεικόνιση των μεταβλητών που προαναφέρθηκαν στην παρούσα κατάσταση στις 12:00 LST, όπως προέκυψαν από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης.

Στο γράφημα που ακολουθεί, καταγράφονται σημειακά οι διαφορές θερμοκρασιών που επικρατούν στην ευρύτερη περιοχή μελέτης σε σχέση με τις θερμοκρασίες που καταγράφηκαν για την δεδομένη στιγμή σε σταθμό αναφοράς στην παρούσα κατάσταση.



**Γράφημα 26** Απεικόνιση διαφορών θερμοκρασιών στις 12:00 LST με δεδομένα σταθμού αναφοράς για την δεδομένη χρονική στιγμή σε °C. Κλίμακα θερμοκρασιών από -7.8° C (σκούρο μπλε) έως -4.8° C (ροζ) και οριζόντια ροή αέρα από 0.20m/sec ως 2.00m/sec.

Στην εσωτερική αυλή η διαφορά θερμοκρασίας αγγίζει τοπικά μέχρι και τους  $-7^{\circ}\text{C}$  κοντά στα κτίρια, ενώ από το μέσον της αυλής και βορειότερα η διαφορά είναι στους  $-6^{\circ}\text{C}$ . Στους δρόμους με ΒΑ-ΝΔ προσανατολισμό, παρόλο που είναι παράλληλοι στην ροή του αέρα, οι διαφορές θερμοκρασιών μειώνονται κάτω από τους  $-4^{\circ}\text{C}$ , ενώ στους δρόμους με ΒΔ-ΝΑ προσανατολισμό που είναι κάθετοι στην ροή αέρα η διαφορά θερμοκρασιών αυξάνεται στους  $-6^{\circ}\text{C}$ . Έτσι παρατηρείται ότι η διαμόρφωση του θερμοκρασιακού προφίλ, εξαρτάται από την ροή του αέρα που εντείνεται από την γεωμετρία του χώρου, των κτιρίων και των δρόμων.

Η βλάστηση παίζει καθοριστικό ρόλο στις θερμικές βιοκλιματικές συνθήκες καθώς μειώνει την θερμοκρασία του αέρα, λόγω της άμεσης σκίασης των επιφανειών και περιορισμού της αποθήκευσης ηλιακής θερμότητας, μέσω της εξατμισοδιαπνοής των φυτών και την μετατροπή της ηλιακή ακτινοβολίας σε λανθάνουσα θερμότητα (Dimouidi and Nikolopoulou, 2013). Έτσι έγινε επανασχεδιασμός της περιοχής μελέτης με αλλαγές που αφορούν στην φυτοκάλυψη. Το πρώτο σενάριο αφορά σε αντικατάσταση της υψηλής βλάστησης της εσωτερικής αυλής με καλά αρδευόμενο γρασίδι ύψους 40cm, ενώ στον ακάλυπτο χώρο αφαιρείται τελείως η βλάστηση και η επιφάνεια καλύπτεται με αργιλοπηλώδες χώμα. Στο δεύτερο σενάριο, η βλάστηση στην αυλή αντικαθίστανται από πλάκες τσιμέντου και στο τρίτο σενάριο από αργιλώδες έδαφος, ενώ η βλάστηση στους δρόμους και στην αυλή του σχολείου έχει αντικατασταθεί από ξηροφυτικούς θάμνους.

Κατά τη διάρκεια της ημέρας δεν παρατηρούνται ιδιαίτερες μεταβολές στην ταχύτητα και στην διεύθυνση του ανέμου στα διάφορα σενάρια βλάστησης και κάλυψης εδάφους, παρά μόνο στα όρια της περιοχής του μοντέλου, ενώ στον πυρήνα η ανεμομετρική κατάσταση παραμένει σταθερή. Η κύρια διεύθυνση του ανέμου, όπως ορίστηκε στις αρχικές συνθήκες, ήταν ΒΑ με ταχύτητα 2.6m/sec. Η μέση ταχύτητα μέσα στην αυλή αγγίζει τα 1.40m/sec, ενώ κοντά στα κτίρια βαίνει μειούμενη. Στις περιπτώσεις των τριών σεναρίων, η ταχύτητα του ανέμου ταυτίζεται στο ύψος των 2m και τοπικά παίρνει τιμές μεγαλύτερες των 3.20m/sec, ενώ κοντά στα κτίρια είναι κάτω από 2.0m/sec, καθώς λόγω της γεωμετρίας της περιοχής, της διεύθυνσης του ανέμου και της έλλειψης υψηλής βλάστησης ή άλλου φυσικού εμποδίου, δημιουργούνται ισχυρά ρεύματα αέρα, τόσο στην εσωτερική αυλή όσο και στους κάθετους δρόμους. Παράλληλα οι συνθήκες στον ακάλυπτο χώρο είναι σταθερές σε όλα τα σενάρια με τον αέρα να μην ξεπερνά το 1m/sec.

Ως προς τις θερμομετρικές συνθήκες που επικρατούν στην εσωτερική αυλή, στις 6:00 LST, η θερμοκρασία σε όλα τα σενάρια βλάστησης και επιφανειών και στον παρών σχεδιασμό βρίσκεται σε επίπεδα κάτω των  $25^{\circ}\text{C}$ , ενώ μετά της 9:00 LST, η θερμοκρασία στα τρία σενάρια φτάνει τους  $30^{\circ}\text{C}$  στο ύψος των 2m. Σύμφωνα με τη χωρική ανάλυση του μοντέλου, σε όλη την προσομοιούσα περιοχή οι συνθήκες ακολουθούν το ίδιο μοτίβο. Στις 12:00 LST στα σενάρια, η θερμοκρασία αγγίζει τους  $40^{\circ}\text{C}$ , ενώ κοντά στα κτίρια είναι κατά



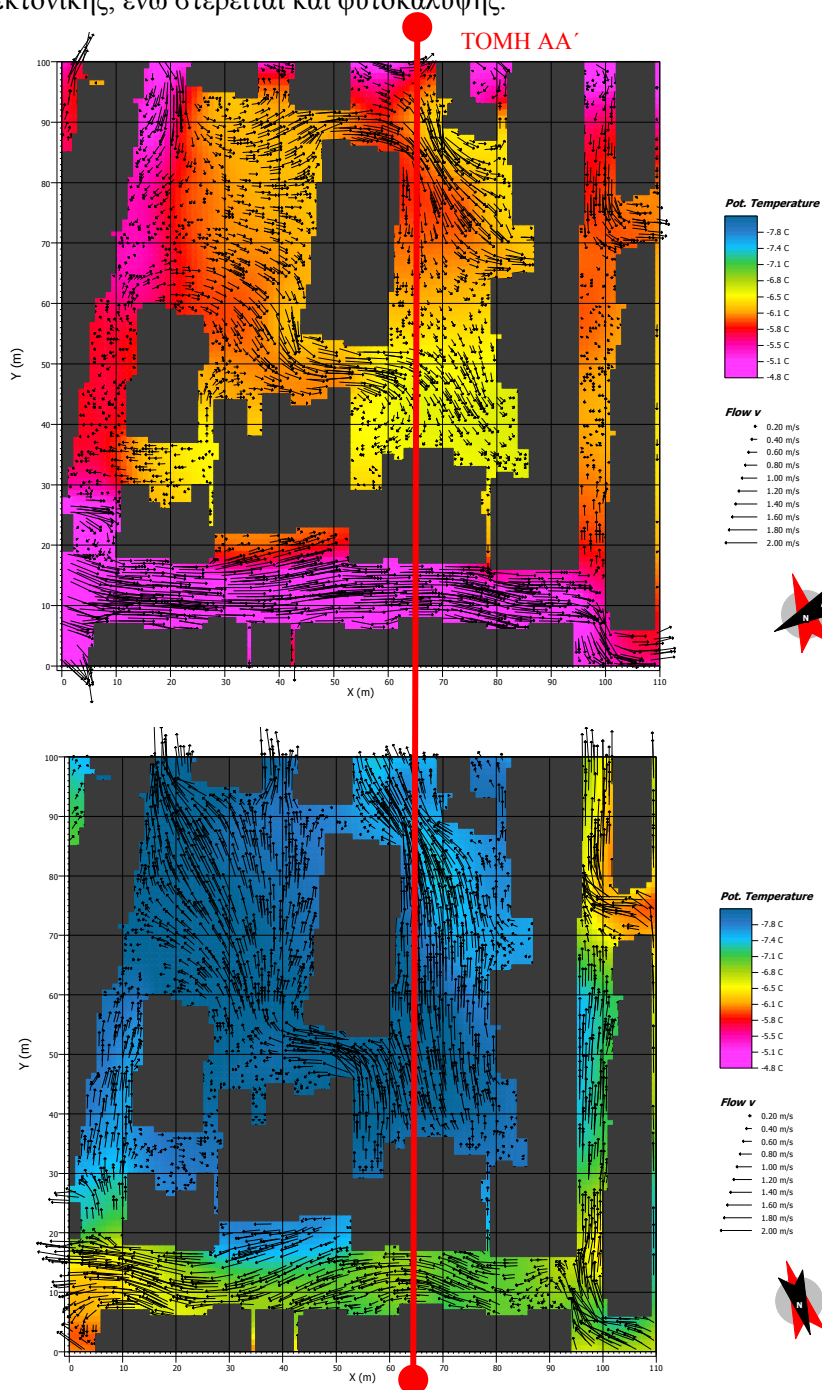
1° χαμηλότερη, ενώ στον ακάλυπτο χώρο είναι κατά 2° C χαμηλότερη. Στις 15:00 LST στην παρούσα κατάσταση η θερμοκρασία είναι στους 35° C και τοπικά στους 32° C και στα υπόλοιπα σενάρια η θερμοκρασία ξεπερνά τους 44° C σε όλη την περιοχή, με την ίδια δηλαδή θερμομετρική κατάσταση να επικρατεί και στον ακάλυπτο χώρο. Στις 18:00 LST οι θερμοκρασίες ακολουθούν την ίδια πορεία που ακολουθούσαν στις 12:00 LST, δηλαδή παρατηρούνται τιμές κάτω των 32° στην παρούσα κατάσταση ενώ στις προτάσεις σχεδιασμού, η θερμοκρασία διατηρείται στο υψηλό επίπεδο των 40° C. Η θερμοκρασία στις 21:00 LST στην παρούσα κατάσταση είναι κάτω από τους 30° C, με την θερμοκρασία στα σενάρια να μειώθηκε κατά 3° C στην εσωτερική αυλή και στον ακάλυπτο χώρο.

Εκτός από την βλάστηση, ο προσανατολισμός παίζει καθοριστικό ρόλο στην διαμόρφωση των συνθηκών άνεσης, καθώς επηρεάζει την ταχύτητα του ανέμου και τις στροβιλώδους κινήσεις του αέρα. Έτσι εκτελέστηκαν δύο ακόμα σενάρια, τα οποία αφορούν στην αλλαγή του προσανατολισμού, που όπως αναφέρεται σε πολλές εργασίες επιδρά καθοριστικά στις εξωτερικές θερμικές συνθήκες. Η αλλαγή του προσανατολισμού του συνόλου της περιοχής μελέτης από BBA σε ANA και NNA ουσιαστικά επηρεάζει την ροή του αέρα μέσα στα αστικά φαράγγια και στις καταβόθρες διαμορφώνοντας κάθε φορά ένα διαφορετικό μωσαϊκό θερμοκρασιών. Η θερμοκρασία του αέρα στο ύψος των 2m και στις τρεις περιπτώσεις παρατηρείται μειωμένη σε σχέση με την θερμοκρασία που καταγράφηκε σε σταθμό αναφοράς για την ώρα εκείνη, που τοπικά η διαφορά αυτή άγγιξε τους 8° C. Στην παρούσα κατάσταση (BBA) παρατηρείται αυξημένη ροή θερμότητας στους δρόμους με BA-NΔ προσανατολισμό, ενώ στους κάθετους σε αυτούς δρόμους η θερμοκρασία είναι μειωμένη κατά 1°C. Στην εσωτερική αυλή η ροή είναι αυξημένη αλλά η θερμοκρασία παρουσιάζεται χαμηλότερη από την ευρύτερη περιοχή εξαιτίας της έντονης φυτοκάλυψης.

Κατά τη διάρκεια της ημέρας δεν παρατηρούνται ιδιαίτερες μεταβολές στην ταχύτητα και στην διεύθυνση του ανέμου στα διάφορα σενάρια, παρά μόνο στα όρια της περιοχής του μοντέλου, ενώ στον πυρήνα η ανεμομετρική κατάσταση παραμένει σταθερή. Η κύρια διεύθυνση του ανέμου, όπως ορίστηκε στις αρχικές συνθήκες, ήταν BA με ταχύτητα 2.6m/sec. Η μέση ταχύτητα μέσα στην αυλή αγγίζει τα 1.40m/sec, ενώ κοντά στα κτίρια βαίνει μειούμενη. Με την αλλαγή του προσανατολισμού της περιοχής παρατηρούμε ότι η ταχύτητα του ανέμου μειώνεται κάτω από 1m/sec στο εσωτερικό της αυλής, καθώς το ρεύμα αέρα εμποδίζεται από την βόρεια πλευρά απ' τα κτίρια.

Στον ANA προσανατολισμό της περιοχής, παρατηρείται μία μειωμένη ροή στο μεγαλύτερο μέρος της περιοχής, με την ελάχιστη ροή να εντοπίζεται στην εσωτερική αυλή, στον ακάλυπτο χώρο και στην πίσω αυλή του σχολικού κτιρίου, στις οποίες θέσεις παρατηρείται και η μέγιστη διαφορά θερμοκρασιών που φτάνει τους 6.7° C. Στον δρόμο με διεύθυνση BA-NΔ παρατηρείται έντονη ροή που ξεπερνά τα 2m/sec, ενώ οι θερμοκρασίες είναι στα ίδια επίπεδα με αυτές του σταθμού αναφοράς. Να σημειωθεί ότι το αστικό αυτό

φαράγγι έχει μικρό πλάτος, με το βάθος του να ποικίλει λόγω της ανομοιόμορφης εξέλιξης της αρχιτεκτονικής, ενώ στερείται και φυτοκάλυψης.

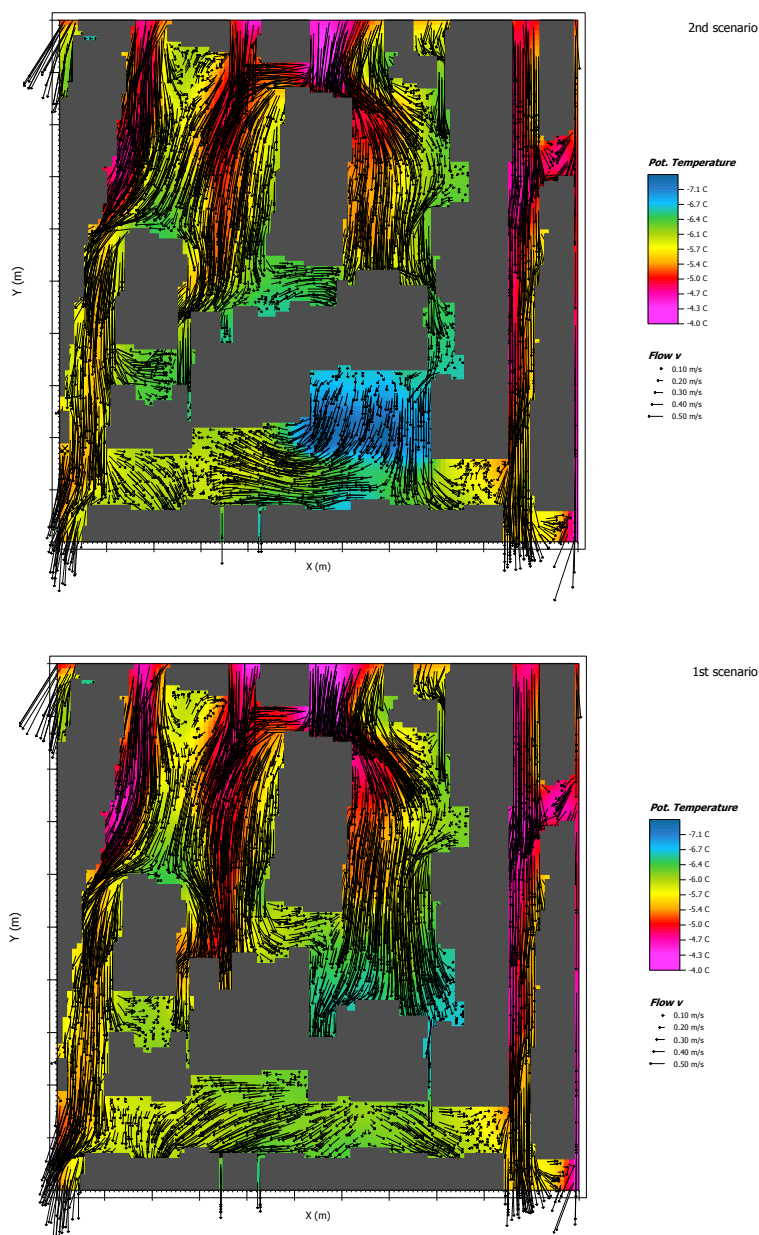


**Γράφημα 27** Χωρική κατανομή της διαφοράς θερμοκρασίας του αέρος σε σχέση με δεδομένα σταθμού αναφοράς σε ύψος 2m στις 12:00 LST στα δύο σενάρια αλλαγής προσανατολισμού. Κλίμακα θερμοκρασιών από  $-7.8^{\circ}\text{C}$  (σκούρο μπλε) έως  $-4.8^{\circ}\text{C}$  (ροζ) και οριζόντια ροή αέρα από 0.20m/sec ως 2.00m/sec.

Στον NNA προσανατολισμό της περιοχής μελέτης παρατηρείται αντίρροπη ροή σε σχέση με την αρχική κατάσταση, η οποία παίρνει ελάχιστες τιμές μόνο στον ακάλυπτο χώρο, όπου και μηδενίζεται. Στην εσωτερική αυλή η ροή είναι αυξημένη, με την διαφορά θερμοκρασίας να αγγίζει τους  $8^{\circ}\text{C}$ , ενώ η τιμή αυτή παρατηρείται και στο μεγαλύτερο μέρος της περιοχής.

Εξαίρεση αποτελούν οι δρόμοι στους οποίους η διεύθυνση ταυτίζεται με την διεύθυνση του ανέμου.

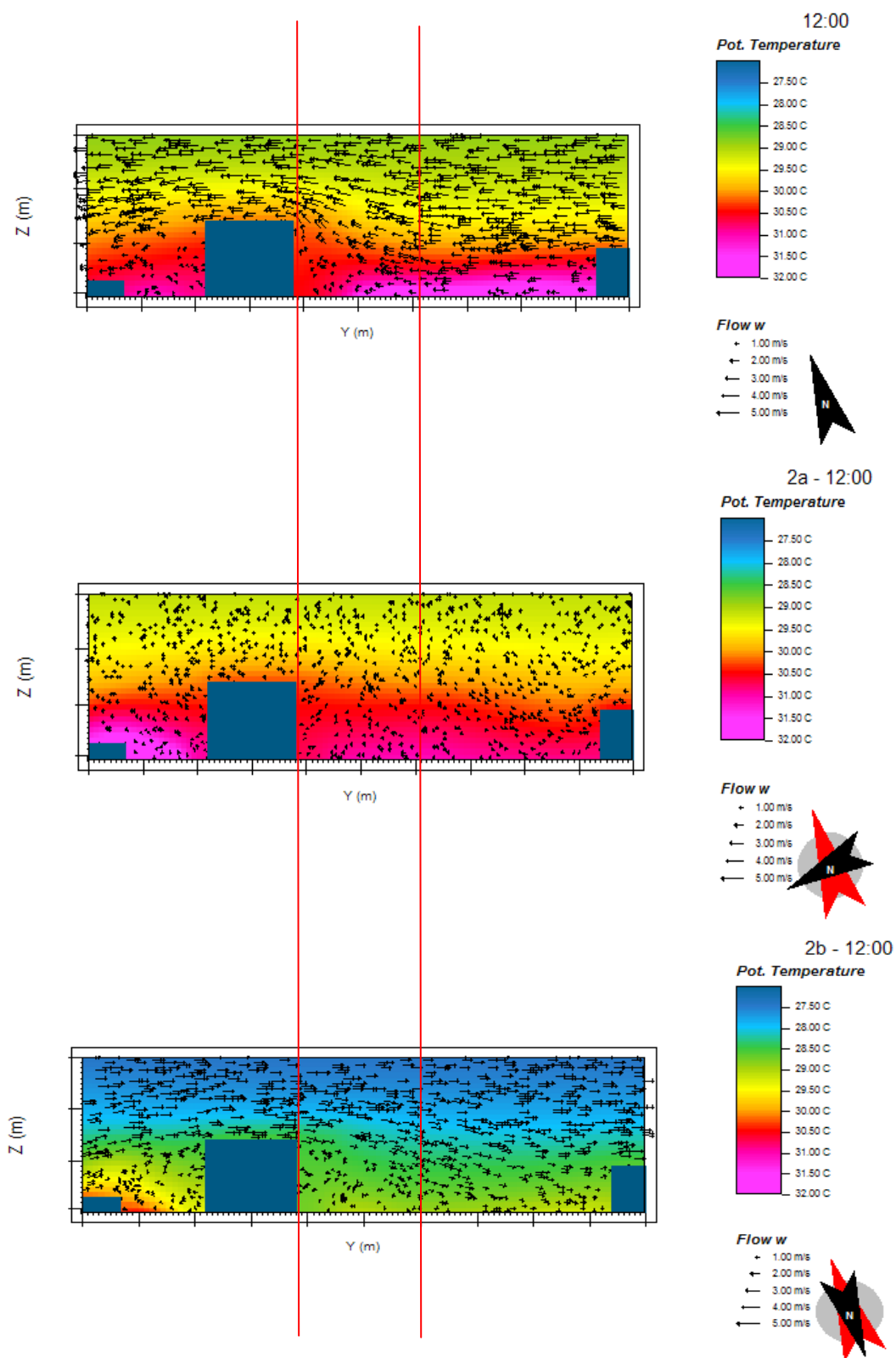
Η γεωμετρία του χώρου παίζει επίσης σημαντικό ρόλο στην διαμόρφωση των μικροκλιματικών συνθηκών αλλά και των βιοκλιματικών καθώς διαμορφώνει καταβόθρες και φαράγγια επηρεάζοντας έτσι την ροή του αέρα και άρα τις θερμομετρικές συνθήκες που διαμορφώνονται. Έτσι διεξήχθησαν δύο σενάρια αλλαγής γεωμετρίας που αφορούν σε μείωση του ύψους των κτιρίων που γειτνιάζουν με την εσωτερική αυλή (1<sup>ο</sup> σενάριο) και σε μετατόπιση της αυλής έμπροσθεν του διώροφου κτιρίου (2<sup>ο</sup> σενάριο).



**Γράφημα 28** Χωρική κατανομή των διαφορών των θερμοκρασιών του αέρα σε σχέση με σταθμό αναφοράς σε °C στις 12:00 LST. Κλίμακα θερμοκρασιών από -7.1° C (σκούρο μπλε) έως -4.0° C (ροζ) και οριζόντια ροή αέρα από 0.10m/sec ως 0.50m/sec.

Η θερμοκρασία του αέρα στην μελετώμενη αυλή κάτω από το ύψος της φυτοκόμης, στα δύο αυτά σενάρια δεν διαφοροποιείται ιδιαίτερα, με την διαφορά θερμοκρασίας στο πρώτο σενάριο να είναι μειωμένη κατά  $6^{\circ}\text{C}$  σε σχέση με το σταθμό αναφοράς, ενώ κοντά στα κτίρια η διαφορά φτάνει και τους  $7^{\circ}\text{C}$ . Στο δεύτερο σενάριο η διαφορά θερμοκρασίας στην αυλή ξεπερνά τους  $-7^{\circ}\text{C}$ , ενώ στον προσκείμενο δρόμο η θερμοκρασία είναι κατά  $0.5^{\circ}\text{C}$  υψηλότερη απ' ό τι στο πρώτο σενάριο. Παράλληλα κατά τη διάρκεια της ημέρας δεν παρατηρούνται ιδιαίτερες μεταβολές στην ταχύτητα και στην διεύθυνση του ανέμου, με τη μέση ταχύτητα μέσα στην αυλή να αγγίζει το  $1.0\text{m/sec}$ , ενώ η οριζόντια ροή του αέρα ξεπερνά τα  $2\text{m/sec}$ .

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η αλλαγή της ροής του αέρα και η σχέση της με τη θερμοκρασία αέρος όπως φαίνεται σε κάθετη αποτύπωση στο γράφημα 29, σε σχέση με την αρχική κατάσταση και τις αλλαγές του προσανατολισμού της περιοχής μελέτης. Η y-z αποτύπωση αφορά σε τομή της περιοχής όπως φαίνεται στο γράφημα 27. Είναι φανερό ότι η βλάστηση που βρίσκεται στην προσήνεμη πλευρά, μειώνει αρκετά τη ροή του αέρα μέσα στην αυλή στη παρούσα κατάσταση, ενώ στην πλευρά αυτή παρατηρούνται ανοδικά ρεύματα αέρα, ενώ στην προσήνεμη πλευρά καθοδικά ρεύματα αέρα. Στον ANA προσανατολισμό είναι μειωμένη η ροή του αέρα σε όλη την περιοχή μελέτης και σε αρκετό ύψος πάνω από τα κτίρια, λόγω της γεωμετρίας των κτιρίων-εμποδίων που δεν επιτρέπουν της είσοδο του αέρα μέσα στον αστικό κλοιό, διαμορφώνοντας όμως μία σταθερή θερμομετρική κατάσταση, ακόμα και  $30\text{m}$  μακριά από τη βλάστηση. Στον NNA προσανατολισμό, σε όλη την περιοχή εμφανίζονται θερμοκρασίες μειωμένες, ενώ στην αυλή η μείωση αυτή φτάνει έως και τους  $3^{\circ}\text{C}$ , ενώ είναι έντονη οι στροβιλισμοί στην προσήνεμη και υπήνεμη μεριά.



Γράφημα 29 Κατακόρυφη κατανομή θερμοκρασιών αέρα σε °C στις 12:00 LST στην παρούσα κατάσταση (επάνω), στο πρώτο και στο δεύτερο σενάριο αλλαγής προσανατολισμού (μέση και κάτω). Κλίμακα θερμοκρασιών 27.5° C (σκουρό μπλε) ως 32° C (ροζ) και ροή αέρα από 1 - 5m/sec.

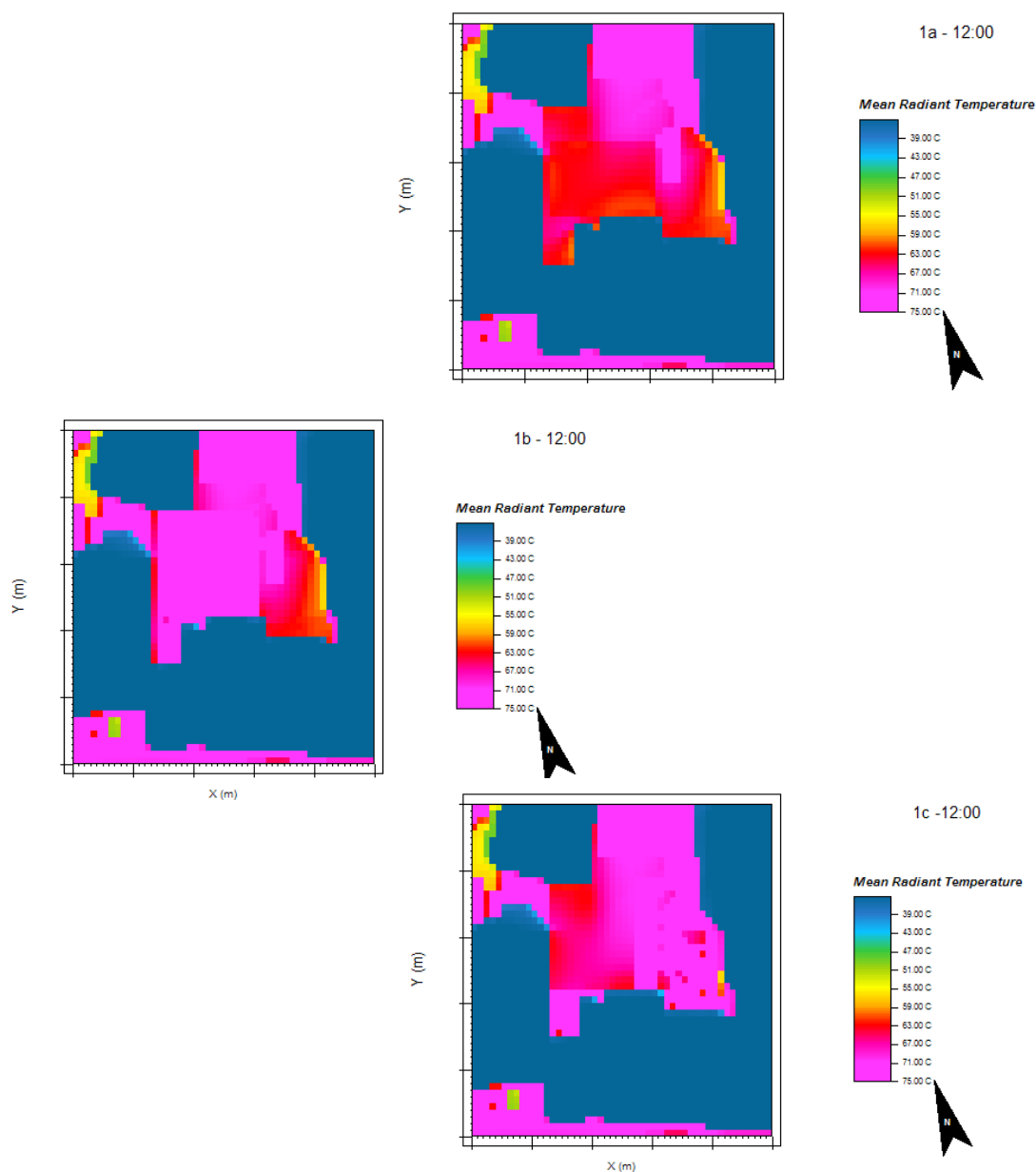
### ΜΕΣΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΟΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ (MEAN RADIANT TEMPERATURE)

Εκτός από τις θερμομετρικές και ανεμομετρικές συνθήκες, για την διερεύνηση των θερμικών βιοκλιματικών συνθηκών απαιτείται ο υπολογισμός της μέσης ακτινοβόλου θερμοκρασίας (mean radiant temperature -  $T_{mrt}$ ), η οποία αφορά στις ροές ακτινοβολίας μικρού και μεγάλου μήκους κύματος. Η τιμή της μέσης ακτινοβόλου θερμοκρασίας στις 6:00 LST στην παρούσα κατάσταση στην εσωτερική αυλή διαμορφώνεται στους 16°C στο ύψος των 2m, ενώ στο πρώτο σενάριο αλλαγής βλάστησης παρουσιάζεται κατά 2ο υψηλότερη. Στο δεύτερο σενάριο φτάνει τους 20°C, ενώ στο τρίτο σενάριο τους 18°C. Στις 9:00 LST στην παρούσα κατάσταση, δημιουργείται ένα μωσαϊκό, με την τιμή της  $T_{mrt}$  να κυμαίνεται από 56 μέχρι 60°C, ενώ στον ακάλυπτο από 23 μέχρι 25°C, ενώ στα σενάρια παίρνει τιμές άνω των 70°C στην εσωτερική αυλή. Στις 12:00 LST η  $T_{mrt}$ , στην υπάρχουσα κατάσταση διαμορφώνεται στα ίδια επίπεδα, με την τιμή της να κυμαίνεται σημειοκά στην εσωτερική αυλή από 50 μέχρι 55°C και στον ακάλυπτο χώρο γύρω στους 60°C. Στο πρώτο σενάριο την ώρα αυτή και στους δύο χώρους, η  $T_{mrt}$  κυμαίνεται στους 60 με 65°C, ενώ στο δεύτερο σενάριο η τιμή φτάνει και τους 80°C, ενώ στο τρίτο σενάριο ξεκινάει από 65 και φτάνει τους 80°C. Στις 15:00 LST, επέρχεται σκίαση της δυτικής πλευράς της εσωτερικής αυλής, με αποτέλεσμα στο σκιαζόμενο αυτό μέρος στην υπάρχουσα κατάσταση η τιμή της  $T_{mrt}$  να φτάνει στους 32°C, στο πρώτο σενάριο τους 35 με 40°C, στο δεύτερο σενάριο τους 40 και στο τρίτο τους 38 με 40°C, ενώ στο υπόλοιπο μέρος της αυλής ξεπερνά τους 70°C. Στις 18:00 LST στην υπάρχουσα κατάσταση η mean radiant temperature παρουσιάζεται αρκετά μειωμένη με τιμές που κυμαίνονται από 23 σε 25°C, με τα τρία σενάρια να παρουσιάζουν τιμές από 28 ως 34°C. Στις 21:00 LST οι τιμές παρουσιάζονται σε χαμηλά επίπεδα, περίπου στους 26°C για τα τρία σενάρια.

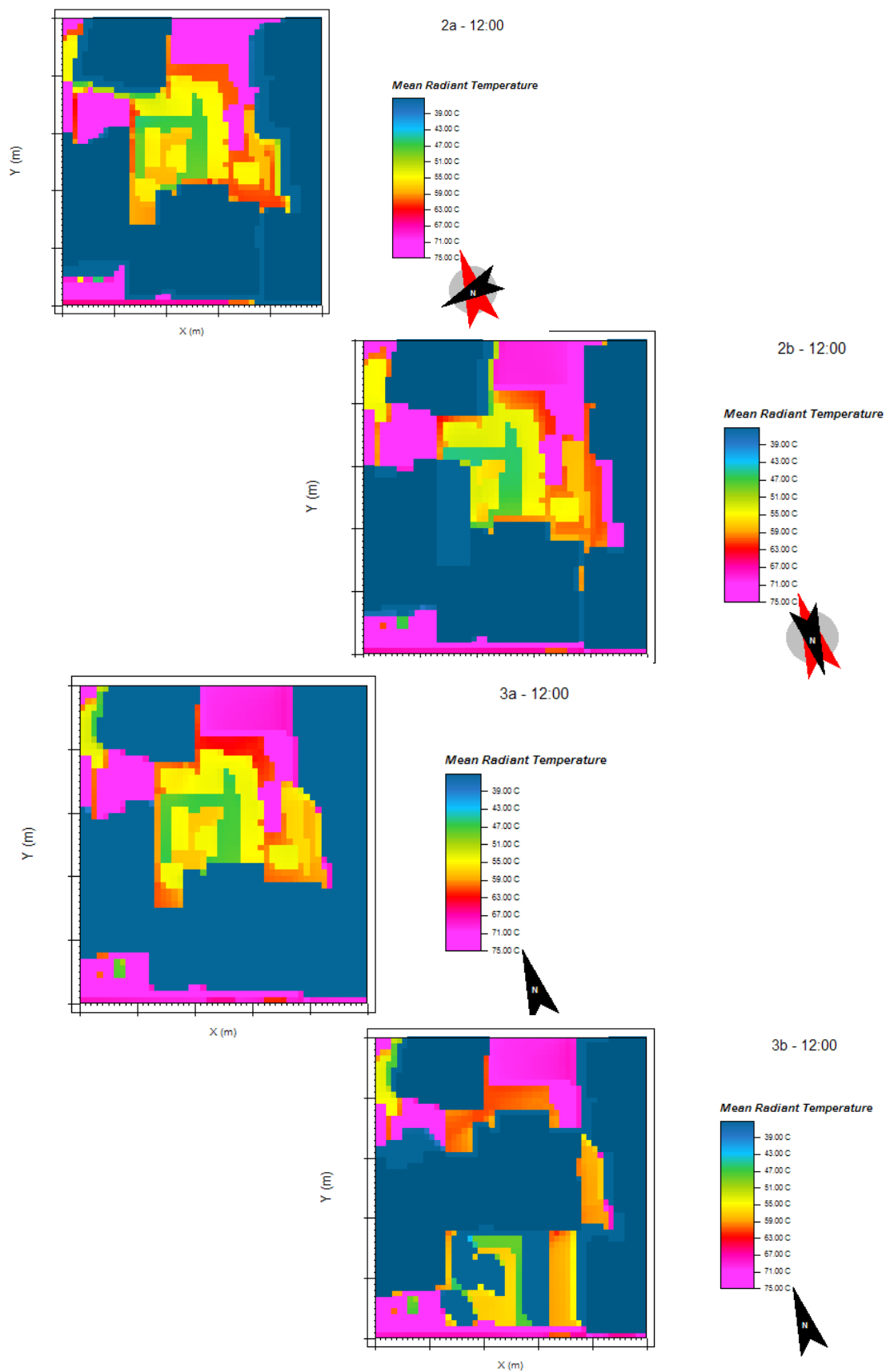
Στα σενάρια αλλαγής προσανατολισμού, η μέση ακτινοβόλος θερμοκρασία στις 12:00 LST, όπως παρουσιάζεται στο γράφημα, δεν διαφοροποιείται στις διάφορες καταστάσεις, με την τιμή της να φτάνει τους 70°C σε θέσεις όπου απουσιάζει οποιαδήποτε μορφή σκίασης τεχνητή ή φυσική, καθώς η μικρού μήκους κύματος ακτινοβολία βρίσκεται σε πολύ υψηλά επίπεδα. Η ελάχιστη τιμή των 35°C εντοπίζεται στις σκιαζόμενες από τα ψηλά κτίρια θέσεις. Στην εσωτερική αυλή η τιμή είναι κατά 10 με 15°C χαμηλότερη και στις τρεις καταστάσεις.

Πιο αναλυτικά, στις 6:00 LST η τιμή της  $T_{mrt}$  στο πρώτο σενάριο προσανατολισμού στην εσωτερική αυλή διαμορφώνεται στους 20°C και στον γειτονικό ακάλυπτο χώρο κατά 1 με 2°C υψηλότερη. Στις 9:00 LST η  $T_{mrt}$  κυμαίνεται από 56° ενώ σημειοκά φτάνει τους 70°C, ενώ ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι τιμές στον ακάλυπτο χώρο, όπου στην βόρεια μεριά του η τιμή φτάνει τους 70°C και στην νότια τους 25°C. Στις 15:00 LST, στην εσωτερική αυλή η τιμή της  $T_{mrt}$  ξεπερνά τους 70°C ενώ τοπικά σημειώνονται τιμές γύρω στους 60°C. Στην ανατολική πλευρά του ακάλυπτου χώρου έχει τιμή 32 με 34° και στον υπόλοιπο χώρο

70°C. Στις 18:00 LST στην υπάρχουσα κατάσταση η mean radiant temperature παρουσιάζεται αρκετά μειωμένη με τιμές που κυμαίνονται από 23 σε 25°C και στο σενάριο με την αλλαγή του προσανατολισμού δεν παρατηρείται τόσο μεγάλη μείωση στην τιμή της  $T_{mrt}$ , παρά μόνο στην βόρεια πλευρά που παρουσιάζονται τιμές γύρω στους 26°C. Στις 21:00 LST οι τιμές παρουσιάζονται σε χαμηλά επίπεδα, περίπου στους 20°C.



**Γράφημα 30** Οριζόντια χωρική κατανομή της  $T_{mrt}$  σε °C στις 12:00 LST στο πρώτο (1α), δεύτερο (1β) και στο τρίτο σενάριο (1γ) αλλαγής βλάστησης και επιφανειών κάλυψης. Κλίμακα τιμών 39.0° C (σκούρο μπλε) ως 75° C (ροζ).



**Γράφημα 31** Οριζόντια χωρική κατανομή της  $T_{mrt}$  στις 12:00 LST στα σενάρια αλλαγής προσανατολισμού και αλλαγής γεωμετρίας (3α και 3β). Κλίμακα τιμών 39.0° C (σκούρο μπλε) ως 75° C (ροζ).



Η μέση ακτινοβόλος θερμοκρασία στις 12:00 LST, όπως παρουσιάζεται στο γράφημα, διαφοροποιείται στα δύο σενάρια αλλαγής γεωμετρίας στον χώρο της αυλής, ενώ στον περιβάλλοντα χώρο η  $T_{mrt}$  είναι σταθερή και υψηλότερη από τους  $72^{\circ}\text{C}$ , καθώς η μικρού μήκους κύματος ακτινοβολία παίρνει τη μέγιστη τιμή της. Στις θέσεις που σκιάζονται από τα κτίρια η τιμή είναι μικρότερη από  $25^{\circ}\text{C}$ , ενώ οι θέσεις αυτές έχουν μειωθεί χωρικά στο πρώτο κυρίως σενάριο λόγω της μείωσης του ύψους των κτιρίων.

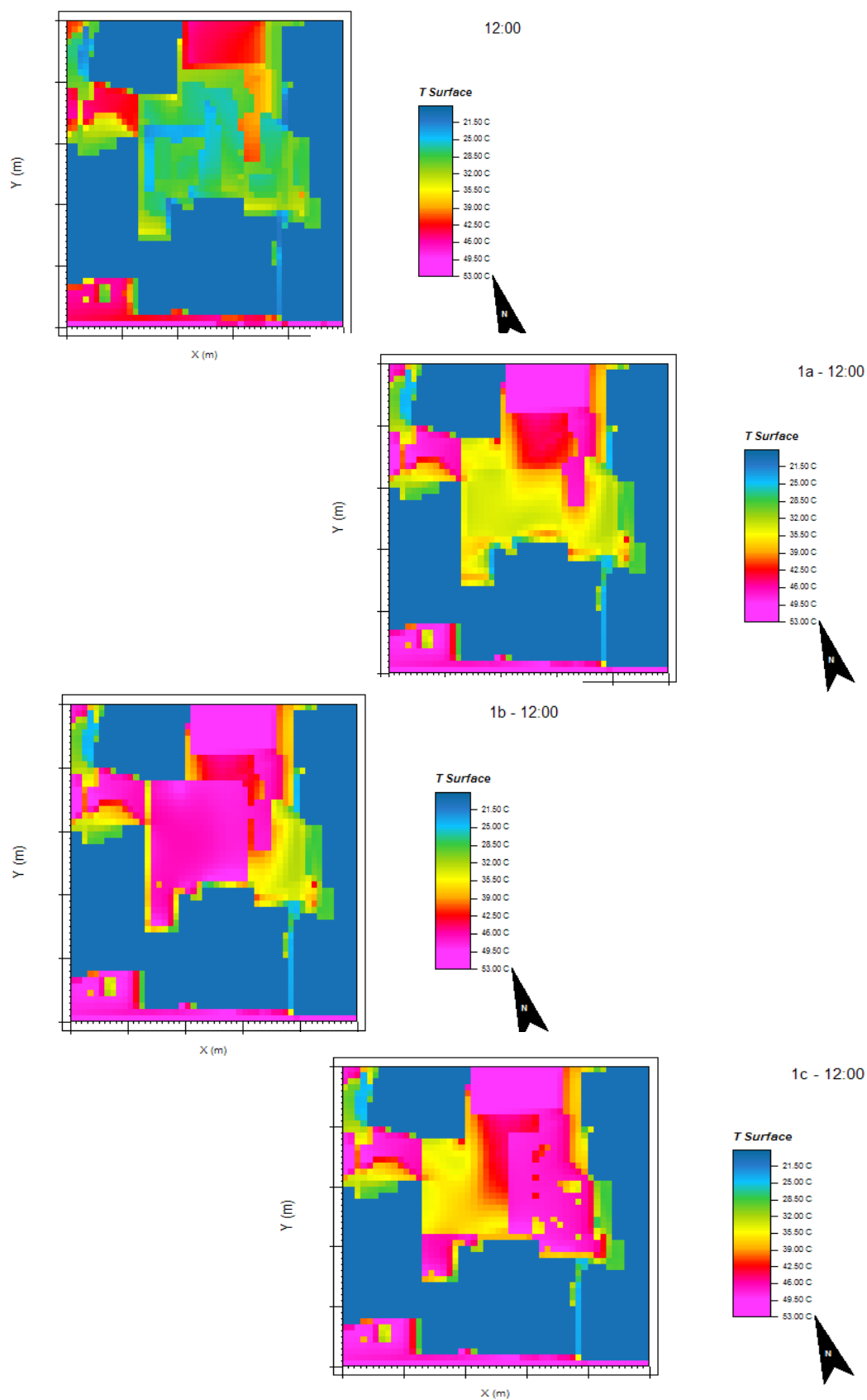
Αναλυτικότερα, στις 6:00 LST στην εσωτερική αυλή η τιμή της  $T_{mrt}$  διαμορφώνεται στους  $13^{\circ}\text{C}$  στο ύψος των 2m στα δύο σενάρια. Στις 9:00 LST στο δεύτερο σενάριο η τιμή της  $T_{mrt}$  φτάνει τους  $28^{\circ}\text{C}$  μέσα στην εσωτερική αυλή ενώ στους δρόμους ξεπερνάει τους  $70^{\circ}\text{C}$ , ενώ στο πρώτο σενάριο η  $T_{mrt}$  παίρνει τιμές άνω των  $55^{\circ}\text{C}$ . Στα σημεία όπου σκιάζονται από τα κτίρια η  $T_{mrt}$  δεν ξεπερνά τους  $28^{\circ}\text{C}$ . Στις 15:00 LST, στην εσωτερική αυλή η τιμή της  $T_{mrt}$  ξεπερνά τους κυμαίνεται από τους  $35$  έως τους  $55^{\circ}\text{C}$ , στο σενάριο με την αυλή εμπροσθεν του κτιρίου, ενώ στο πρώτο σενάριο με το μειωμένο ύψος των κτιρίων η τιμή της φτάνει τους  $68^{\circ}\text{C}$ . Στις 18:00 LST στο πρώτο σενάριο η mean radiant temperature παρουσιάζεται αρκετά μειωμένη με τιμές που κυμαίνονται από  $28$  σε  $46^{\circ}\text{C}$  και στο δεύτερο σενάριο δεν ξεπερνά τους  $28^{\circ}\text{C}$ . Στους δρόμους με ΒΑ-ΝΔ διεύθυνση η  $T_{mrt}$  παρουσιάζεται με τιμές κάτω από  $30^{\circ}\text{C}$ , ενώ στους κάθετους σε αυτούς δρόμους η τιμή ξεπερνά τους  $70^{\circ}\text{C}$  και στα δύο σενάρια. Στις 21:00 LST οι τιμές παρουσιάζονται σε χαμηλά επίπεδα, περίπου στους  $17^{\circ}\text{C}$  εντός της αυλής, ενώ στους δρόμους με ΒΔ-ΝΑ και ΒΑ-ΝΔ διεύθυνση η  $T_{mrt}$  παίρνει τιμές  $24$  και  $21^{\circ}\text{C}$  αντίστοιχα.

### ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΕΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ (SURFACE TEMPERATURE)

Η θερμοκρασία των επιφανειών ( $T_{\text{surface}}$ ) είναι μία παράμετρος που δείχνει το ποσό της θερμότητας που απορροφάται ή όχι από ένα υλικό, που εξαρτάται από τις ιδιότητες του υλικού, την έκθεση του στην ηλιακή ακτινοβολία και την γωνία πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας.

Στις 6:00 LST στο πρώτο και στο τρίτο σενάριο αλλαγής βλάστησης στην εσωτερική αυλή και στον ακάλυπτο χώρο η θερμοκρασία των επιφανειών διαμορφώνεται στους 16° C, ενώ στο δρόμους είναι κατά 4° υψηλότερη. Στο δεύτερο σενάριο φτάνει τους 19 με 20° C σε όλη την περιοχή μελέτης. Στις 9:00 LST στο πρώτο σενάριο με το γρασίδι, δημιουργείται ένα μωσαϊκό, με την τιμή της  $T_{\text{surface}}$  να κυμαίνεται στους 22 με 23° C, ενώ στον ακάλυπτο είναι κατά 2° C χαμηλότερη. Με κάλυψη της αυλής με τσιμέντο η επιφάνεια αποκτά θερμοκρασίες που ξεπερνούν τους 26° C, ενώ τρεις βαθμούς χαμηλότερη είναι η επιφανειακή θερμοκρασία στο τρίτο σενάριο. Στις 12:00 LST η  $T_{\text{surface}}$ , στην φυτοκαλυμμένη με γρασίδι αυλή, διαμορφώνεται στους 34 με 37° C, ενώ στους γύρω δρόμους ξεπερνά τους 50° C, όπως και στην τσιμεντοστρωμένη αυλή. Στην περίπτωση κάλυψης με φυσικό έδαφος η θερμοκρασία της επιφάνειας την ώρα αυτή διαμορφώνεται στους 38 με 42° C. Στις 15:00 LST, επέρχεται σκίαση της δυτικής πλευράς της εσωτερικής αυλής, με αποτέλεσμα στο σκιαζόμενο αυτό μέρος στο πρώτο σενάριο η τιμή της  $T_{\text{surface}}$  να φτάνει στους 52 με 54° C, στο δεύτερο και στο τρίτο σενάριο είναι κατά 2° υψηλότερη. Στους γύρω δρόμους η τιμή αγγίζει τους 61° C, ενώ η αυλή δυτικά του σχολικού κτιρίου τους 57° C και η άλλη ανατολικά τους 58° C. Στις 18:00 LST στην φυτοκαλυμμένη με γρασίδι αυλή η  $T_{\text{surface}}$  παρουσιάζεται αρκετά μειωμένη με τιμές που κυμαίνονται από 35 σε 41° C, όπως και στην κάλυψη του εδάφους με φυσικό έδαφος, ενώ στην περίπτωση του τσιμέντου κυμαίνεται μεταξύ 44 με 48° C. Οι δρόμοι παρουσιάζουν επιφανειακές θερμοκρασίες μειωμένες κατά 10° C, ενώ δεν διαφοροποιούνται οι θερμοκρασίες με τον προσανατολισμό των δρόμων. Στις 21:00 LST οι τιμές παρουσιάζονται σε χαμηλά επίπεδα, περίπου στους 31 με 34° C για το πρώτο και το τρίτο σενάριο, ενώ στο δεύτερο 37 με 40° C, ενώ αυτές οι τιμές παρατηρούνται και στους δρόμους.

Οι θερμοκρασίες των επιφανειών όπως διαμορφώνονται στην παρούσα κατάσταση στην εσωτερική αυλή και στον ακάλυπτο χώρο είναι κάτω από τους 30°C, κοντά στους τοίχους είναι αυξημένη κατά 3° C, ενώ τοπικά εμφανίζονται επιφάνειες με θερμοκρασίες 24°C. Οι δρόμοι που στερούνται φυτοκάλυψης εμφανίζουν θερμοκρασίες μεγαλύτερες των 50°, ενώ κοντά στην δυτική πλευρά των κτιρίων είναι κατά 15° χαμηλότερες. Ανάλογες είναι και οι επιφανειακές θερμοκρασίες που διαμορφώνονται στον ΑΝΑ προσανατολισμό, με τις θερμοκρασίες των επιφανειών της εσωτερικής αυλής που είναι προσκείμενες στα κτίρια να αγγίζουν τους 41°C, ενώ στην ευρύτερη περιοχή είναι αυξημένες κατά 6°C.



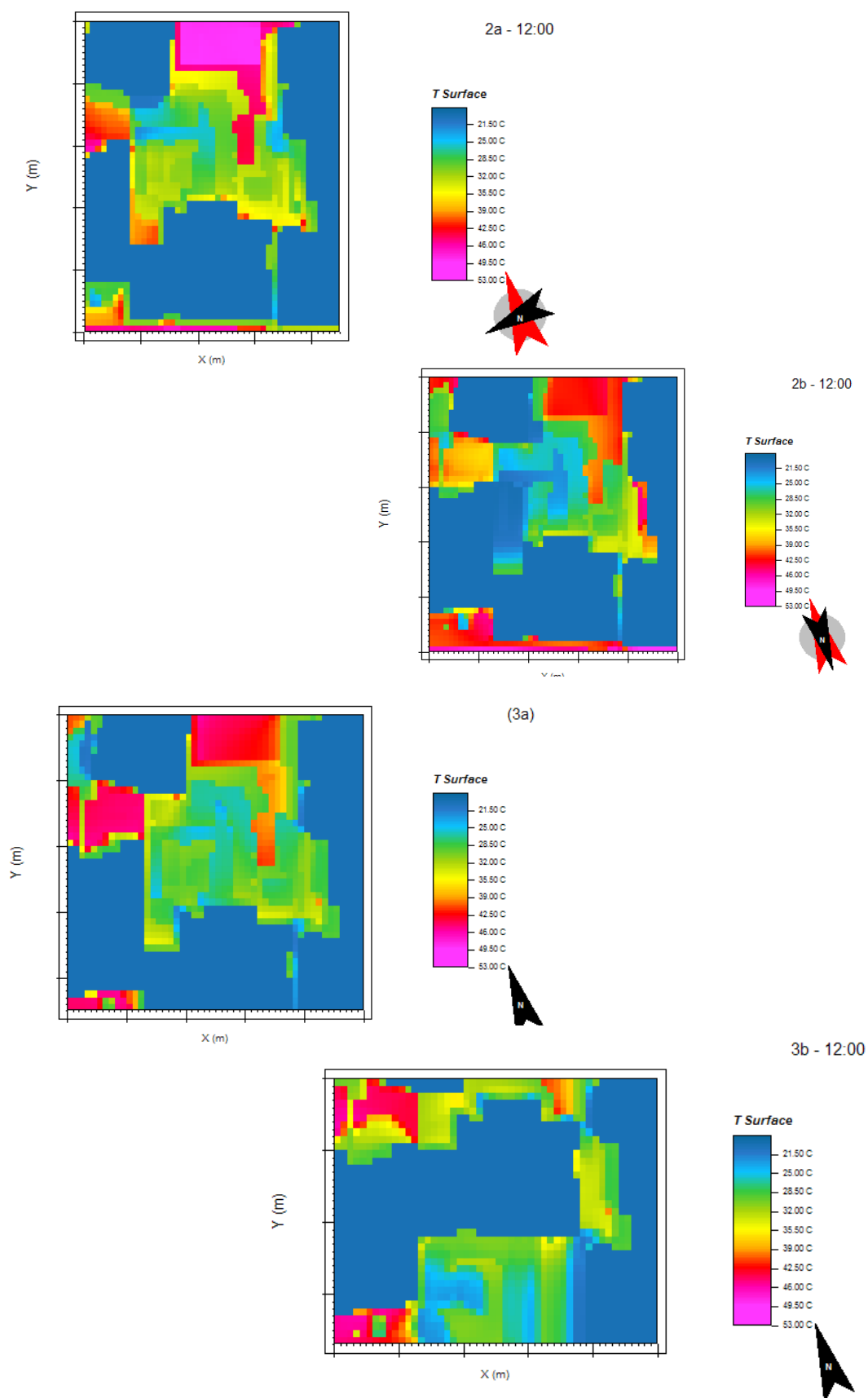
**Γράφημα 32** Χωρική κατανομή της θερμοκρασίας των επιφανειών σε °C στις 12:00 LST στην παρούσα κατάσταση, στο πρώτο (1α), στο δεύτερο (1β) και στο τρίτο σενάριο (1γ) αλλαγής βλάστησης και επιφανειών κάλυψης. Η κλίμακα κυμαίνεται από τους 21.5° C (σκούρο μπλε) ως τους 53° C (ροζ).

Διαφορετικό είναι το σκηνικό των επιφανειακών θερμοκρασιών στον ΝΝΑ προσανατολισμό της περιοχής μελέτης. Στην εσωτερική αυλή οι τιμές κυμαίνονται από 20 έως 28°C, με το ελάχιστο όριο να εμφανίζεται πλησίον των κτιρίων, ενώ το μέγιστο στα όρια της φυτοκαλυμμένης αυλής με τον υπαίθριο χώρο όπισθεν του σχολείου. Στους δρόμους με βορειοανατολική-νοτιοδυτική διεύθυνση οι θερμοκρασίες των επιφανειών την ώρα αυτή αγγίζουν τους 32°C, ενώ στους κάθετους σε αυτούς δρόμους οι τιμές ξεπερνάνε τους 50°C.

Οι θερμοκρασίες των επιφανειών όπως διαμορφώνονται στα δύο σενάρια γεωμετρίας δεν διαφοροποιούνται σε σχέση με τον παρών σχεδιασμό. Οι επιφανειακές θερμοκρασίες της εσωτερικής αυλής στα δύο σενάρια κυμαίνονται από τους 29 έως τους 33°C, ενώ στο πρώτο σενάριο κοντά στους τοίχους είναι αυξημένη κατά 3-4° C. Οι δρόμοι με ΒΑ-ΝΔ διεύθυνση εμφανίζουν θερμοκρασίες που διαμορφώνονται γύρω στους 42°, ενώ στον δρόμο με διεύθυνση ΒΔ – ΝΑ οι επιφανειακές θερμοκρασίες παρουσιάζονται κατά 10°C υψηλότερες.

Από την εξέταση αυτών των δύο σεναρίων σχετικά με την γεωμετρία μιας περιοχής, γίνεται αντιληπτή η θετική επίδραση της υψηλής δόμησης στα Μεσογειακά κλίματα κατά τους θερμούς μήνες του έτους, λόγω της σκίασης που προσφέρουν, ενώ όταν η κατάλληλη γεωμετρία συνδυαστεί με αντίστοιχη φυτοκάλυψη των ημι-υπαίθριων χώρων, τότε βελτιώνονται στο μέγιστο οι συνθήκες θερμικής άνεσης και περιορίζεται χρονικά το διάστημα δυσφορίας. Παράλληλα η δημιουργία αυλών προσκείμενων σε δρόμους μικρού πλάτους και ήπιας κυκλοφορίας οχημάτων παρατηρήθηκε ότι δεν βελτιώνει τις συνθήκες του περιβάλλοντος χώρου, το οποίο πιθανόν να οφείλεται και στην μειωμένη ροή του αέρα στον δρόμο αυτόν.

Σε γενικές γραμμές, παρατηρήθηκε ότι τα δέντρα με αρκετή πυκνότητα φυλλώματος, παρέχουν σημαντικές βελτιώσεις στη θερμική άνεση κυρίως κατά το μεσημέρι και νωρίς το απόγευμα, καθώς με τη σκίαση, αποδυναμώνουν την ηλιακή ακτινοβολία, παρέχοντας επίσης χαμηλότερες μέσες θερμοκρασίες ακτινοβολίας.



Γράφημα 33 Οριζόντια απεικόνιση θερμοκρασιών επιφάνειας σε °C στις 12:00 LST στο πρώτο (2α) και στο δεύτερο (2β) σενάριο προσανατολισμού και στο πρώτο (3α) και δεύτερο (3β) αλλαγής γεωμετρίας. Κλίμακα τιμών 21.5° C (σκούρο μπλε) ως 53° C (ροζ).

## ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η παρούσα μελέτη διεξήχθη σε πολλά επίπεδα. Ο τελικός σκοπός ήταν να αναλυθούν οι μικροκλιματικές συνθήκες που επικρατούν σε εσωτερικές αυλές ενός αστικού δομημένου χώρου σε τυπικές Μεσογειακές καλοκαιρινές συνθήκες, αλλά και να βρεθεί ο βέλτιστος αστικός σχεδιασμός των χώρων αυτών σε σχέση με τις βιοκλιματικές συνθήκες.

Από την μικροκλιματική μελέτη που διεξήχθη στην εσωτερική αυλή και στον ακάλυπτο χώρο στην περιοχή των Πατησιών καθώς και στον αίθριο χώρο στην Νέα Σμύρνη διαπιστώθηκε ότι οι ευνοϊκότερες συνθήκες παρατηρήθηκαν στις θέσεις όπου ήταν μετριασμένη η επίδραση του ήλιου είτε λόγω της σκίασης και της γεινίασης με τα κτίρια, είτε λόγω της πυκνής βλάστησης. Στις θέσεις όπου υπήρχε αραιή βλάστηση, οι τιμές της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας έφταναν τα  $900\text{W/m}^2$ , οι οποίες κατά το πλείστον οδηγούσαν σε αυξημένες τιμές της θερμοκρασίας αέρος και μειωμένες τιμές σχετικής υγρασίας. Στο σύνολο λοιπόν των δύο μεγάλων χώρων θα μπορούσαμε να πούμε ότι παρουσιάζεται ένα μωσαϊκό μικροκλιματικών συνθηκών άμεσα εξαρτώμενο από την σκίαση μέσω της βλάστησης και των κτιρίων, ενώ στον γειτονικό ακάλυπτο χώρο μικρής έκτασης οι συνθήκες που διαμορφώνονται είναι αρκετά σταθερές και δεν επηρεάζονται άμεσα από τις μετεωρολογικές συνθήκες που επικρατούν, λόγω του ευρύτατα δομημένου όγκου και της μειωμένης ροής του αέρα με το περιβάλλοντα χώρο και τους παρακείμενους δρόμους. Ουσιαστικά δηλαδή προκύπτει ότι μικρή θέαση του ουράνιου θόλου έχει ως αποτέλεσμα ευνοϊκότερες μικροκλιματικές συνθήκες σε σχέση με τους άλλους χώρους.

Οι μετρήσεις που διεξήχθησαν στο Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών, έδειξαν ότι οι αίθριοι χώροι κτιρίων λόγω της μειωμένης ανταλλαγής αέρα με τον περιβάλλοντα χώρο, έχουν αυξημένες θερμοκρασίες, ενώ σε συνδυασμό με τον μη μετριασμό της έκθεσης στον ήλιο δημιουργούν συνθήκες δυσφορίας. Αντίθετα, ανοιχτοί χώροι στους οποίους υπήρχε φυτοκάλυψη οι συνθήκες ήταν ευνοϊκότερες, ενώ στο κιόσκι που περιβάλλεται από γρασίδι χαμηλού ύψους οι συνθήκες ήταν δυσμενείς.

Τα αποτελέσματα, από την αριθμητική μελέτη - προσομοίωση που διεξήχθη, κατέδειξαν ότι οι μικροκλιματικές συνθήκες μέσα σε μία τυπική φυτοκαλυμμένη εσωτερική αυλή ενός αστικού δομικού τετραγώνου, είναι αρκετά σταθερές και δεν επηρεάζονται από άμεσα από της μεσο-κλιματικές μετεωρολογικές συνθήκες, επιβεβαιώνοντας τα αποτελέσματα από τις επί τόπου μετρήσεις. Συμπερασματικά, το εφαρμοσμένο μικροκλιματικό μοντέλο Envi-met είναι ικανό να προβλέψει σε λογικά επίπεδα την θερμοκρασία του αέρα μέσα στην αυλή και σε θέσεις κοντά σε αυτήν. Βρέθηκε όμως ότι έχει την τάση να υποεκτιμά την θερμοκρασία του αέρος κατά τις πρωινές ώρες, ενώ τις απογευματινές τις υπερεκτιμούσε.

Παράλληλα, σύμφωνα με τα εξεταζόμενα σενάρια, υπάρχει ισχυρή συσχέτιση μεταξύ βλάστησης και θερμικής άνεσης, όπως εκφράζεται μέσω της  $T_{mrt}$  (mean radiant temperature), καταλήγοντας έτσι στο συμπέρασμα ότι η φυτοκάλυψη με υψηλή βλάστηση έχει θετική επίδραση στις θερμικές συνθήκες, ενώ σύμφωνα με το σενάριο με την χαμηλή βλάστηση, η θερμοκρασία του αέρα που διαμορφώνεται σε ένα ύψος πάνω από την επιφάνεια του εδάφους δεν επηρεάζεται από τη υποκείμενη βλάστηση. Αξίζει δε να σημειωθεί ότι οι μικροκλιματικές και βιοκλιματικές συνθήκες παρουσιάζονται ευνοϊκότερες στα σενάρια στα οποία εξετάζονται δομικές τροποποιήσεις, όπως αλλαγή προσανατολισμού της αυλής, καταδεικνύοντας έτσι ότι τα οφέλη από μία κατάφυτη εσωτερική αυλή αυξάνονται όταν υπάρχει κατάλληλη δόμηση της ευρύτερης περιοχής, ενώ οι συνθήκες δυσχεραίνονται όταν μειωθεί το ύψος των κτιρίων.

Περαιτέρω μελέτη θα αποτελούσε ιδιαίτερο ενδιαφέρον, ώστε να διερευνηθεί η αποτελεσματικότητα του μοντέλου Envi-met στις χειμερινές συνθήκες που επικρατούν στην Αθήνα και να διεξαχθούν ολοκληρωμένα σενάρια βιοκλιματικού σχεδιασμού για όλες τις εποχές του έτους, λαμβάνοντας φυσικά υπόψη εκτός των μικρομετεωρολογικών συνθηκών και τις διαφορετικές συνθήκες της βλάστησης.

---

## BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Al-Masri N., Abu-Hijleh B., 2012. Courtyard housing in midrise buildings: An environmental assessment in hot – arid climate. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16; 1892 – 1898. **doi:10.1016/j.rser.2012.01.008**
- Ali-Toudert F., 2005. Dependence of Outdoor Thermal Comfort on Street Design in Hot and Dry Climate. Berichte des Meteorologischen Institutes der Universität Freiburg Nr. 15. Ph. D. Thesis.
- Ali-Toudert F., Mayer H., 2006. Numerical study on the effects of aspect ratio and orientation of an urban street canyon on thermal comfort in hot and dry climate. *Building and Environment* 41; 94 – 108. **doi:10.1016/j.buildenv.2005.01.013**
- Ali-Toudert F., Mayer H., 2007. Effects of asymmetry, galleries, overhanging facades and vegetation on thermal comfort in urban street canyons. *Solar energy* 81; 742 – 754. **doi:10.1016/j.solener.2006.10.007**
- Attia S., 2006. The role of landscape design in improving the microclimate in traditional courtyard-building in hot arid climates. *PLEA 2006. The 23<sup>rd</sup> Conference on passive and low energy architecture*, Geneva, Switzerland, 6-8 September.
- Attia S., Duchhart I., 2011. Bioclimatic landscape design in extremely hot and arid climates. *PLEA 2011 - 27th Conference on Passive and Low Energy Architecture*, Louvain-la-Neuve, Belgium, 13-15 July 2011, pp. 459 – 464
- Axarli K., Chatzidimitriou A., 2012. Redesigning urban open spaces based on bioclimatic criteria: two squares in Thessaloniki, Greece. *PLEA2012 - 28th Conference, Opportunities, Limits & Needs Towards an environmentally responsible architecture* Lima, Perú 7-9 November 2012
- Barrabas V.L., 1991. Air temperature and humidity and human comfort index of some city parks of Mexico city. *International Journal of biometeorology* 35: 24 – 28
- Berkovic S., Yezioro A., Bitan A., 2012. Study of thermal comfort in courtyards in a hot arid climate. *Solar Energy* 86; 1173 – 1186. **doi:10.1016/j.solener.2012.01.010**
- Bernatzky A., 1982. The Contribution of Trees and Green Spaces to a Town Climate. *Energy and Buildings*, 5: 1 - 10
- Bougatioti F., 2006. Effect of urban geometry on surface temperatures of ‘skin’ materials in Greek cities. *PLEA 2006. The 23<sup>rd</sup> Conference on passive and low energy architecture*, Geneva, Switzerland, 6-8 September.
- Bourbia F., Boucheriba F., 2010. Impact of design on urban microclimatic for semi arid climate (Constantine). *Renewable Energy* 35; 343 – 347. **doi:10.1016/j.renene.2009.07.017**
- Bozonnet E., Belarbi R., Allard F., Modeling solar effects on the heat and mass transfer in a street canyon, a simplified approach. *Solar Energy* 79 (2005) 10–24. **doi:10.1016/j.solener.2004.10.007**



- 
- Bruse M., 1999. Modelling and Strategies for improved urban climates An overview paper prepared for the Urban Climate Conference in Sydney 1999. *Proceedings International Conference on Urban Climatology & International Congress of Biometeorology 1999*, Sydney, Australia, 6 pages
- Bruse, M., 2007: Simulating human thermal comfort and resulting usage patterns of urban open spaces with a Multi-Agent System, in: Wittkopf, St. and Tan, B. K. (eds.): *Proceedings of the 24th International Conference on Passive and Low Energy Architecture PLEA*, p.699-706
- Bruse M., Fler H., 1998. Simulating surface – plant – air interactions inside urban environments with a three dimensional numerical model. *Environmental Modeling & Software* 13: 373 – 384. **doi: 10.1016/S1364-8152(98)00042-5**
- Charalampopoulos I., Tsiros I., Chronopoulou-Sereli A., Matzarakis A., 2013. Analysis of thermal bioclimate in various urban configurations in Athens, Greece. *Urban Ecosystem*, 16: 217–233. **doi: 10.1007/s11252-012-0252-5**
- Chatzidimitriou A., Chrissomalidou N., Yannas S., 2006. Ground surface materials and microclimates in urban open spaces. *PLEA 2006. The 23<sup>rd</sup> Conference on passive and low energy architecture*, Geneva, Switzerland, 6-8 September.
- Chen L., Ng E., 2013. Simulation of the effect of downtown greenery on thermal comfort in subtropical climate using PET index: a case study in Hong Kong. *Architectural Science Review*, 56:4, 297-305. **doi:10.1080/00038628.2012.684871**
- Dimoudi A., Nikolopoulou M., 2013. Vegetation in the urban environment: microclimatic analysis and benefits. *Energy and Buildings*, 35: 69 – 76. **DOI: 10.1016/S0378-7788(02)00081-6**
- De Ridder K., Adamec V., Bañuelos A., Bruse M., Bürger M., Damsgaard O., Dufek J., Hirsch J., Lefebvre F., Perez-Lacorzana J.M., Thierry A., Weber C., 2004. An integrated methodology to assess the benefits of urban green space. *Science of the total environment* 334 – 335; 489 – 497. **doi:10.1016/j.scitotenv.2004.04.054**
- Elnabawi M., Hamza N., Dudek S., 2013. Use and evaluation of the envi-met model for two different urban forms in Cairo, Egypt: measurements and model simulations. *Proceedings of 13th Conference of International Building Performance Simulation Association*, Chambéry, France, August 26-28, pp. 2800 – 2806.
- Elnabawi M., Hamza N., Dudek S., 2014. Numerical modelling evaluation for the microclimate of an outdoor urban form in Cairo, Egypt. *HBRC Journal (Housing and Building National Research Center)*; 10(2). **Doi: 10.1016/j.hbrj.2014.03.004**
- Emmanuel R., 2005. Thermal comfort implications of urbanization in a warm – humid city: the Colombo Metropolitan Region (CMR), Sri Lanka. *Building and Environment* 40; 1591 – 1601. **doi:10.1016/j.buildenv.2004.12.004**
- Ernest R., Ford B., 2012. The role of multiple-courtyards in the promotion of convective cooling. *Architectural Science Review*, Vol. 55, No. 4, 241-249. **doi: 10.1080/00038628.2012.723400**
- Erell E., Pearlmutter D., Williamson T., 2010. *Urban Microclimate, designing the spaces between buildings*. Routledge, London, 288 p.

- 
- Erell E., Williamson T., 2006. Simulating air temperature in an urban street canyon in all weather conditions using measured data at a reference meteorological station. *Int. J. Climatol.* 26: 1671–1694. **doi: 10.1002/joc.1328**
- Fahmy M., Sharples S., 2009. On the development of an urban passive thermal comfort system in Cairo, Egypt. *Building and Environment* 44; 1907 – 1916. **doi:10.1016/j.buildenv.2009.01.010**
- Fröhlich D., Matzarakis A., 2013. Modeling of changes in thermal bioclimate: examples based on urban spaces in Freiburg, Germany. *Theoretical and Applied Climatology*, 111: 547 – 558. **doi:10.1007/s00704-012-0678-y**
- Gao Y., Yao R., Li B., Turkbeyer E., Luo Q., Short A., 2012. Field studies on the effect of built forms on urban wind environments. *Renewable Energy* 46; 148 – 154. **doi:10.1016/j.renene.2012.03.005**
- Givoni B., 1994. Urban design for hot humid regions. *Renewable Energy*, Vol. 5, Part II, pp. 1047 - 1053
- Gomez-Munoz V.M., Porta-Gandara M.A., Fernandez J.L., 2010. Effect of tree shades in urban planning in hot – arid climatic regions. *Landscape and Urban Planning* 94; 149 – 157. **doi:10.1016/j.landurbplan.2009.09.002**
- Gulyas A., Unger J., Matzarakis A., 2006. Assessment of the microclimatic and human comfort conditions in a complex urban environment: Modelling and measurements. *Building and Environment* 41; 1713 – 1722. **doi: 10.1016/j.buildenv.2005.07.001**
- Håkansson H., Exploring the Courtyard Microclimate through an Example of Anatolian Seljuk Architecture: The Thirteenth-Century Sahabiye Madrassa in Kayseri. *Sustainability in Energy and Buildings*, SIST 22, pp. 59–69. **doi: 10.1007/978-3-642-36645-1\_6**
- Herrmaan J., Matzarakis A., 2010. Influence of mean radiant temperature on thermal comfort of humans in idealized urban environments. Proceedings of the 7th Conference on Biometeorology, At Freiburg. 12 – 14 April 2010, pagina 522-527
- Jesionek K., Bruse M., 2003. Impacts of vegetation on the microclimate: Modelling standardized building structures with different greening level. *ICUC5*, Lodz 1-5-September 2003, 4 pages
- Johansson E., 2006. Influence of urban geometry on outdoor thermal comfort in a hot dry climate: A study in Fez, Morocco. *Building and Environment* 41; 1326 – 1338. **doi:10.1016/j.buildenv.2005.05.022**
- Johansson E., Spangenberg J., Gouvea M.L., Freitas E.D., 2013. Scale-integrated atmospheric simulations to assess thermal comfort in different urban tissues in the warm humid summer of Sao Paulo, Brazil. *Urban Climate* 6; 24 – 43. **doi:10.1016/j.uclim.2013.08.003**
- Kakuya A., He J., Hoyano A., 2007. A numerical method for analyzing the microclimatic effect of bioclimatic design using a combination of CFD and outdoor thermal simulation. PLEA 2007. The 24th Conference on passive and low energy architecture pp. 317- 324.

- 
- Kastendeuch P.P., Najjar G., 2009. Simulation and validation of radiative transfers in urbanised areas. *Solar energy* 83; 333 – 341. **doi:10.1016/j.solener.2008.08.006**
- Lahme E., Bruse M., 2003. Microclimatic effects of a small urban park in densely built-up areas: Measurements and model simulations. *ICUC5*, Lodz 1-5- September 2003, 4 pages
- Li R., Pitts A., 2006. Thermal comfort and environmental modeling in atrium buildings. *PLEA2006 - The 23rd Conference on Passive and Low Energy Architecture*, Geneva, Switzerland, 6-8 September 2006
- Lin T., Matzarakis A., Hwang R., 2010. Shading effect on long-term outdoor thermal comfort. *Energy* 45; 213–221. **doi:10.1016/j.buildenv.2009.06.002**
- Makaremi N., Salleh E., Jaafar M.Z., GhaffarianHoseini A., 2012. Thermal comfort conditions of shaded outdoor spaces in hot and humid climate of Malaysia. *Building and Environment* 48; 7 – 14. **doi:10.1016/j.buildenv.2011.07.024**
- Μαριολόπουλος Η.Γ., 1936. Η διανομή των μετεωρολογικών στοιχείων εν Ελλάδι. *Υπόμνημα του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών*. Σειρά II. Μετεωρολογία, Αρ. 1. Αθήνα 1936
- Martins T., Adolphe L., Krause C., 2012. Microclimate effects of urban geometry on outdoor thermal comfort in the brazilian tropical semi-arid climate. *PLEA 2012. 28th conference, Opportunities, Limits & Needs Towards an environmentally responsible architecture* Lima, Perú 7-9 November 2012
- Ματζαράκης Α., 1995. Ανθρωποβιομετεωρολογική εκτίμηση του κλίματος της Ελλάδος. Διδακτορική διατριβή. Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.
- Matzarakis A., Mayer H., 1991. The extreme heat wave in Athens in July 1987 from the point of view of human biometeorology. *Atmospheric Environment* Vol. 25B, No. 2, pp. 203 – 211
- Matzarakis A, Mayer H., 2000. Atmospheric conditions and human thermal comfort in urban areas. *11<sup>th</sup> Seminar on Environmental Protection, "Environment and health"*, 20-23 November 2000, Thessaloniki, Greece, 155-166.
- Mayer E., 1993a. Objective criteria for thermal comfort. *Building and Environment*, Vol. 28. No. 4, pp. 399 – 403
- Mayer E., 1993b. Urban bioclimatology. *Experientia*; 49(11):957-63. **DOI: 10.1007/BF02125642**
- Mayer E., Hoppe P., 1987. Thermal comfort of man in different urban environments. *Theoretical and Applied Climatology*; 38(1):43-49. **DOI: 10.1007/BF00866252**
- Mc Gregor G.R., 2012. Human biometeorology. *Progress in Physical Geography*. 36: 93 – 109. **DOI: 10.1177/0309133311417942**
- Meir I.A., Pearlmutter D., Etzion Y., 1995. On the micloclimatic behavior of two semi-enclosed attached courtyards in a hot dry region. *Building and Environment*, Vol. 30, No.4 , pp. 563 – 572.

- 
- Munn R.E., 1970. *Biometeorological methods*. Academic Press, New York and London. 336p.
- Νάστος Π.Θ., Ματζαράκης Α., 2008. Βιοκλιματικές συνθήκες, τάσεις και μεταβλητότητα στην Πανεπιστημιούπολη της Αθήνας. 9<sup>ο</sup> COMECAP. Πρακτικά συνεδρίου Θεσσαλονίκης, σελ. 925 – 932
- Nikolopoulou M., Lykoudis S., 2006. Thermal comfort in outdoor urban spaces: Analysis across different European countries. *Building and Environment* 41; 1455 – 1470. **doi:10.1016/j.buildenv.2005.05.031**
- Ng E., Chen L., Wang Y., Yaun C., 2012. A study on the cooling effects of greening in a high-density city: An experience from Hong Kong. *Building and Environment* 47: 256-271. **doi:10.1016/j.buildenv.2011.07.014**
- Oke, T.R., 1987. *Boundary-Layer Climates, second edition*. Routledge, London, 435 p.
- Oke, T.R., 1988. Street design and urban canopy layer climate. *Energy and Buildings*, 11; 103 – 113
- Oke, T.R. 2006. Initial Guidance to Obtain Representative Meteorological Observations at Urban Sites. *IOM Report* No.81, WMO/TD. No. 1250. World Meteorological Organization, Geneva, 2006.
- Oke T.R., Johnson G.T., Steyn D.G., Watson I.D., 1991. Simulation of surface urban heat islands under ideal conditions at night. Part 2. Diagnosis of causation. *Boundary-Layer Meteorology* 1991; 56: 258–339.
- Park M., Hagishima A., Tanimoto J., Narita K., 2012. Effect of urban vegetation on outdoor thermal environment: Field measurement at a scale model site. *Building and Environment* 56; 38 – 46. **doi:10.1016/j.buildenv.2012.02.015**
- Pearlmutter D., Bitan A., Berliner P., 1999. Microclimatic analysis of “compact” urban canyons in an arid zone. *Atmospheric Environment* 33; 4143 – 4150
- Rajapaksha I., Nagai H., Okumiya M., 2003. A ventilated courtyard as a passive cooling strategy in the warm humid tropics. *Renewable Energy* 28; 1755 – 1778. **doi:10.1016/S0960-1481(03)00012-0**
- Rizk A.A., Henze G.P., 2010. Improved airflow around multiple rows of buildings in hot arid climates. *Energy and Buildings* 42; 1711 – 1718. **doi:10.1016/j.enbuild.2010.05.005**
- Romero G.V., 2012. Simulations of the influence of the vegetation in the urban microclimate in Carmen Alto, Arequipa. *PLEA 2012. 28th Conference, Opportunities, Limits & Needs Towards an environmentally responsible architecture* Lima, Perú 7-9 November 2012
- Rosenberg N.J., Blad B.L., Verna S.B., 1983. *Microclimate: the biological environment*. John Wiley & Sons, New York. 495p.
- Samaali M., Courault D., Bruse M., Oliosio A., Occeli R., 2007. Analysis of a 3D boundary layer model at a local scale: Validation on soybean surface radiative measurements. *Atmospheric Research* 85; 183 – 198. **doi:10.1016/j.atmosres.2006.12.005**

- 
- Saranti K., 2011. Microclimatic Interventions on an Urban Square in Patras, Greece (38°15'N, 21°45'E). *PLEA 2011. The 27th Conference on Passive and Low Energy Architecture*, pp. 419 – 424.
- Σέττας Ν., 1975. *Η Ελλάδα και το κλίμα της*. Ακαδημία Αθηνών. Αθήνα 1975.
- Sharples S., Bensalem R., 2001. Airflow in courtyard and atrium buildings in the urban environment: a wind tunnel study. *Solar energy* Vol. 70, No. 3, pp. 237 – 244.
- Shashua-Bar L., Hoffman L., 2004. Quantitative evaluation of passive cooling of the UCL microclimatic in hot regions in summer, case study: urban streets and courtyards with trees. *Building and Environment* 39; 1087 – 1099. **doi:10.1016/j.buildenv.2003.11.007**
- Shashua-Bar L., Pearlmutter D., Erell E., 2009. The cooling efficiency of urban landscape strategies in a hot dry climate. *Landscape and Urban Planning* 92; 179 – 186. **doi:10.1016/j.landurbplan.2009.04.005**
- Shashua-Bar L., Pearlmutter D., Erell E., 2010. The influence of trees and grass on outdoor thermal comfort in a hot-arid environment. *International journal of climatology*. **doi: 10.1002/joc.2177**
- Shashua-Bar L., Tsiros I.X., Hoffman M.E., 2010. A modeling study for evaluating passive cooling scenarios in urban streets with trees. Case study: Athens, Greece. *Building and Environment* 45; 2798 – 2807. **doi:10.1016/j.buildenv.2010.06.008**
- Shashua-Bar L., Tsiros I.X., Hoffman M.E., 2012. Passive cooling design options to ameliorate thermal comfort in urban streets of a Mediterranean climate (Athens) under hot summer conditions. *Building and Environment* 57; 110 – 119. **doi:10.1016/j.buildenv.2012.04.019**
- Shashua-Bar L., Tzamir Y., Hoffman M.E., 2004. Thermal effects of building geometry and spacing on the urban canopy layer microclimate in a hot-humid climate in summer. *International journal of climatology*, 24: 1729 – 1742. **doi: 10.1002/joc.1092**
- Spangenberg J., Shinzato P., Johansson E., Duarte D., 2007. The Impact of Urban Vegetation on Microclimate in Hot Humid São Paulo. *PLEA2007. The 24th Conference on Passive and Low Energy Architecture*, pp. 809 – 810
- Spangenberg J., Shinzato P., Johansson E., Duarte D., 2008. Simulation of the influence of vegetation on microclimate and thermal comfort in the city of Sao Paulo. *Rev. SBAU, Piracicaba*, v.3, n.2, jun. 2008, p. 1-19
- Thorsson S., Lindberg F., Eliasson I., Holmer B., 2007. Different methods for estimating the mean radiant temperature in an outdoor urban setting. *International Journal of Climatology*, 27: 1983 – 1993. **doi: 10.0002/joc.1537**
- Tselepidaki I.G., Asimakopoulos D.N., Katsouyanni K., Moustiris C., Touloumi G., Pantazopoulou A., 1995. The use of a complex thermohygrometric index in predicting adverse health effects in Athens. *International Journal of biometeorology*, 38: 194 - 198
- Tseliou A., Tsiros I.X., Lykoudis S., Nikolopoulou M., 2010. An evaluation of three biometeorological indices for human thermal comfort in urban outdoor areas under real

---

climatic conditions. *Building and Environment* 45; 1346 – 1352.  
**doi:10.1016/j.buildenv.2009.11.009**

Tsianaka E., 2006. The role of courtyards in relation to air temperature of urban dwellings in Athens. PLEA 2006. *The 23<sup>rd</sup> Conference on Passive and Low Energy Architecture*, Geneva, Switzerland, 6-8 September 2006, volume II, pp 833-838.

Tsiros I.X., 2010. Assessment and energy implications of street air temperature cooling by shade trees in Athens (Greece) under extremely hot weather conditions. *Renewable Energy* 35; 1866–1869.

Tsiros I.X., Efthimiadou A.P., Hoffman M.E., Tseliou A., 2012. Summer thermal environment and human comfort in public outdoor urban spaces in a Mediterranean climate (Athens). *PLEA2012 - 28th Conference, Opportunities, Limits & Needs Towards an environmentally responsible architecture*. Lima, Perú 7-9 November 2012

Tsiros I.X., Hoffman M., 2013. Thermal and comfort conditions in a semi-closed rear wooded garden and its adjacent semi-open spaces in a Mediterranean climate (Athens) during summer, *Architectural Science Review*. **doi: 10.1080/00038628.2013.829021**

Tsitoura M., Michailidou M., Tsoutsos T., 2011. Evaluation of comfort conditions and sustainable design of urban open spaces in Crete. *PLEA2011 - 27th International conference on Passive and Low Energy Architecture*, Louvain-la-Neuve, Belgium, 13-15 July 2011

WMO, 1999. *Climate and human health*. World climate news 14, 3-5

Χαραλαμπίδης Ι.Ν., 2009. Ανάπτυξη μεθοδολογίας και εφαρμογές για την αξιολόγηση των βιοκλιματικών συνθηκών υπαίθριων χώρων με διαφορετική διαμόρφωση. Διδακτορική διατριβή. Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών

Χρονοπούλου-Σέρελη Α., Φλόκας Α., 2010. *Μαθήματα γεωργικής μετεωρολογίας και κλιματολογίας*. Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη. Σελ. 557.

Χρονοπούλου-Σέρελη Α., Χρονόπουλος Ι., 2011. *Βιομετεωρολογία – Βιοκλιματολογία*. Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη. Σελ. 240.

Yang X., Li Y., Yang L., 2012. Predicting and understanding temporal 3D exterior surface temperature distribution in an ideal courtyard. *Building and Environment* 57; 38 – 48.  
**doi:10.1016/j.buildenv.2012.03.022**

---

**Ιστοσελίδες:**

<http://www.envi-met.com> - ENVI-met 3 by Michael Bruse & Team [Τελευταία επίσκεψη: 15/01/14]

<http://www.hnms.gr> – Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία [Τελευταία επίσκεψη: 10/12/13]

<https://maps.google.gr> - Χάρτες Google [Τελευταία επίσκεψη: 25/11/13]

<http://www.meteo.gr/> - Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών [Τελευταία επίσκεψη: 10/12/13]

<http://gis.ktimanet.gr> - Εθνικό κτηματολόγιο και χαρτογράφηση Α.Ε. [Τελευταία επίσκεψη: 30/11/13]

<http://www.sciencedirect.com> – Science Direct [Τελευταία επίσκεψη: 25/02/14]

---

## **ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ**



# ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΙΚΡΟΚΑΙΜΑΤΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ENVI-MET ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΥΡΥΤΕΡΗ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΩΝ ΠΑΤΗΣΙΩΝ

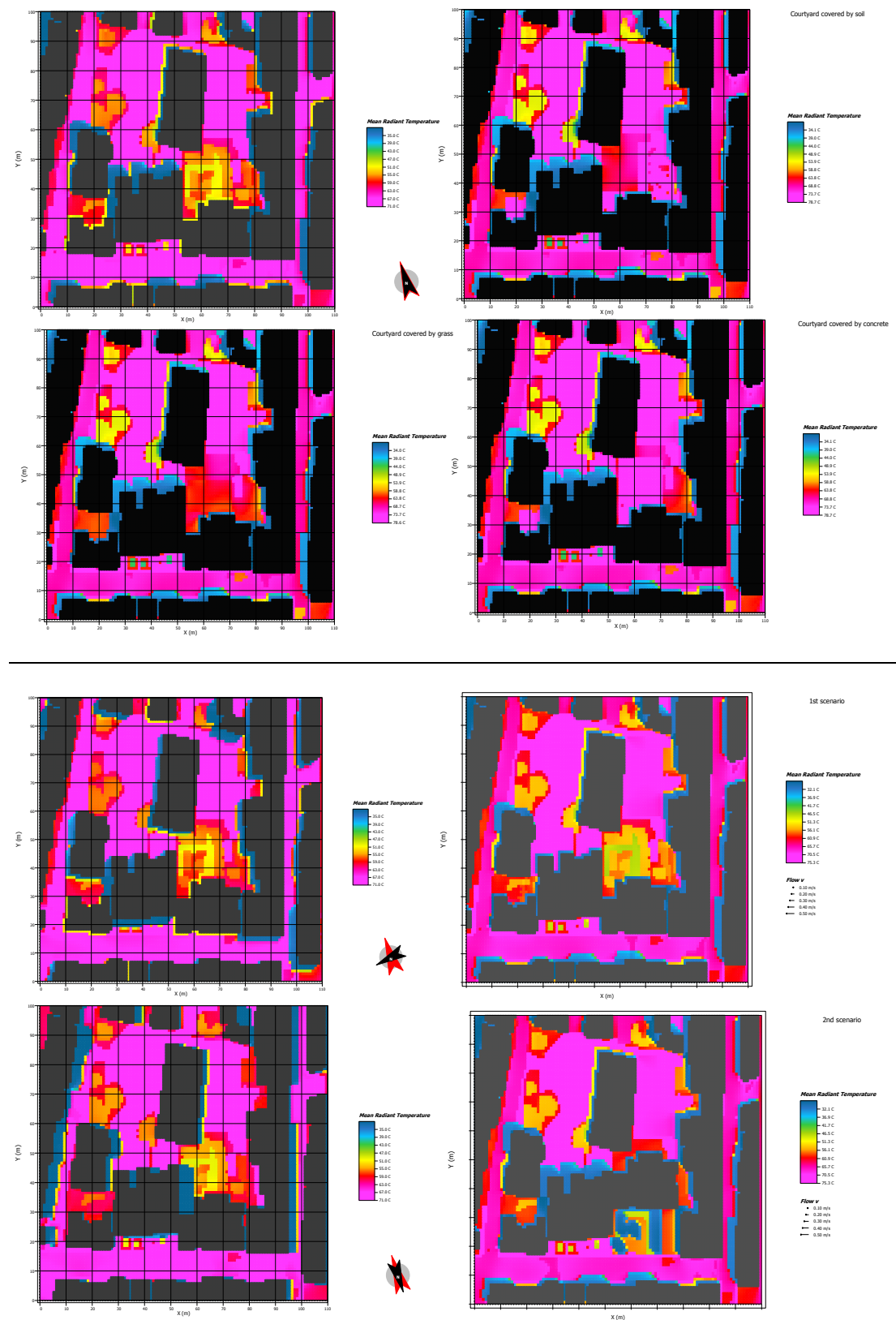


Figure 1 Mean radiant temperature at 12:00 LST in different scenarios.

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΙΚΡΟΚΑΙΜΑΤΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ENVI-MET ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΥΡΥΤΕΡΗ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΩΝ ΠΑΤΗΣΙΩΝ

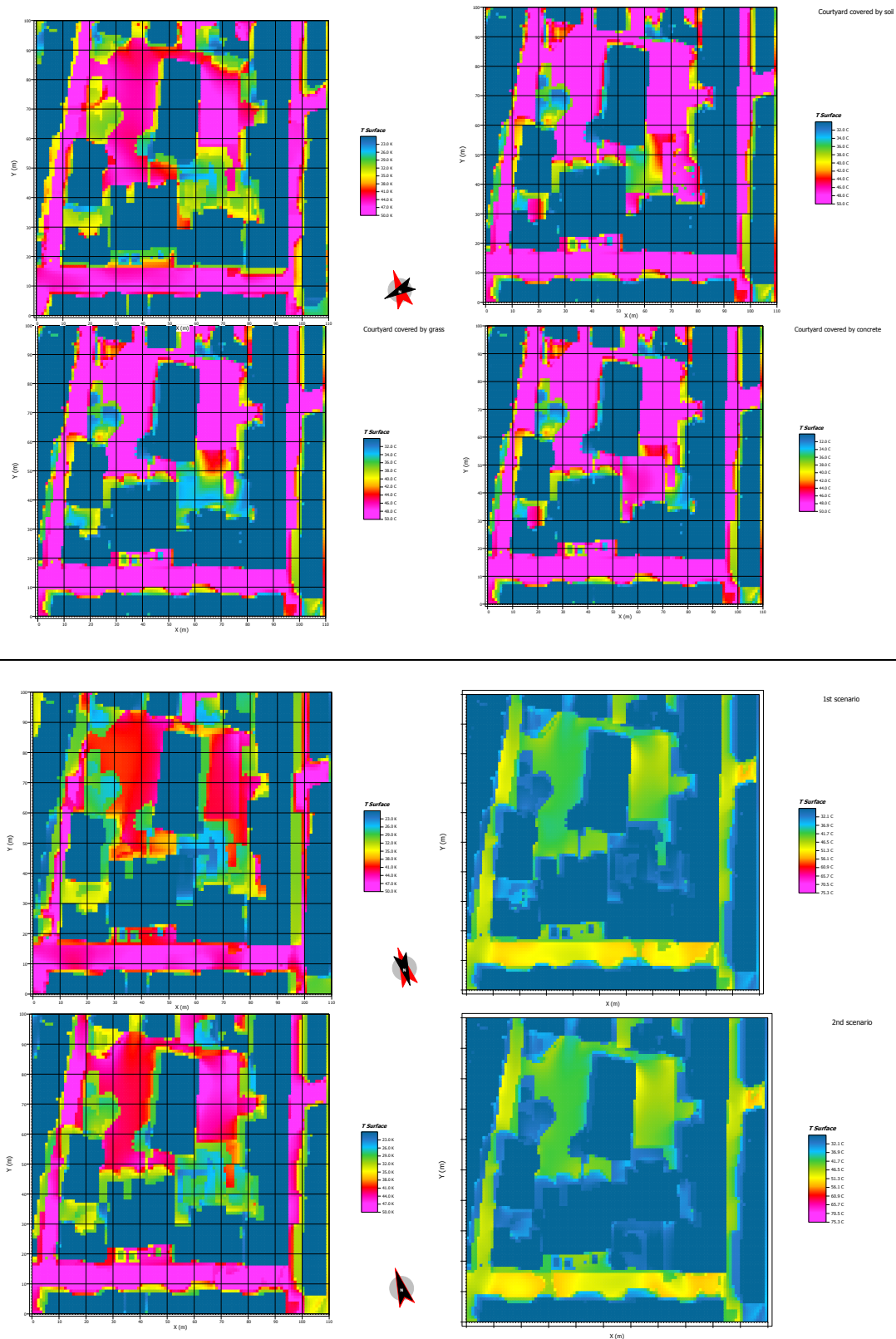


Figure 2 Surface temperature at 12:00 LST in different scenarios.



University Of Crete



Hellenic Meteorological  
Society



ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΟΣ ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΣ  
ΕΤΕΡΩΝ ΟΡΓΑΝΙΣΜΩΝ ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

12 International  
Conference of  
Meteorology, Climatology  
and Physics of the  
Atmosphere  
Heraklion 28 – 31 May 2014

COMECAP 2014 e-book of proceedings ISBN: 978-960-524-430-9 Vol 1 Page | 193

## An application of the numerical microclimatic model ENVI-met to evaluate thermal and bioclimatic conditions in an urban cluster with a vegetated courtyard.

Christopoulou V., Tsiros I.

Courtyards are common architectural solutions, traditionally associated with the Mediterranean region. Depending on their detailed design (geometry, vegetation presence and materials), they can be positive or negative climatic elements in the urban environment. Especially in the Mediterranean area, due to the extended use of both outdoor and semi-outdoor spaces during summertime where the urban heat island phenomenon is present, a more sustainable design becomes always a critical issue for their viability. The present study deals with microclimatic and thermal comfort conditions of a courtyard located in downtown Athens. Microclimatic conditions were estimated using the numerical microclimate model ENVI-met which integrates data from the area design, vegetation, climate, and building materials. Continuous measurements of selected microclimatic parameters were also carried out during a hot summer period and they were used to validate model simulations. Then, the model was used to evaluate design and vegetation scenarios that may improve microclimatic and bioclimatic conditions inside the courtyard and the surrounding area. It is concluded that appropriately designed semi-open spaces may function effectively as positive bioclimatic elements and may thus be integrated in a sustainable urban design context for Mediterranean climates.

---

Christopoulou V.<sup>1</sup>, Tsiros I.<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> Agricultural University of Athens

\*corresponding author e-mail: [itsiros@aua.gr](mailto:itsiros@aua.gr)

## 1 Introduction

It is well known that the geometry of an urban area, the choice of the building material and the surface properties of the dwellings, significantly affects its micro-climate (e.g., Johansson 2006). In this context, vegetation is considered to be one of the main strategies to mitigate the Urban Heat Island (UHI) effect, to reduce energy and improve air quality. Especially, in arid environments, the landscape planning, the composition of vegetations and water elements and also the choice of the planting material all have important consequences in creating a thermally – pleasant environment (e.g., Attia 2006).

Courtyards are common architectural solutions, traditionally associated with the Mediterranean region. In arid environments, the courtyards were used as cool reservoirs to improve the microclimate (Attia 2006). In addition to this, in warm and humid tropics, the courtyard as a passive cooling tool, may provide appropriate airflow from the courtyard to the building and improve thus indoor conditions (Rajapaksha et al. 2003). Multiple courtyards in semi-arid areas improve convective cooling and mitigate the heat load (Ernest and Ford 2012).

Outdoor conditions, however, may often be less comfortable within the courtyard than in the open surroundings depending on the orientation (Meir et al. 1995). Solar radiation and urban structure is the most important factors in determining the courtyard thermal environment (Yang et al. 2012). The correct orientation of semi-enclosed open spaces can improve their thermal behavior, while orienting them irrespective of solar angles and wind direction may create thermal discomfort in them (Meir et al. 1995). An appropriately designed vegetated courtyard is capable of functioning as a positive climatic element in urban design in the Mediterranean climate of Athens (Tsiros and Hoffman 2014).

The purpose of the present work is to evaluate the effects of vegetation and building form on the microclimate and the thermal conditions in a courtyard area and to evaluate alternative design and vegetation scenarios that may improve microclimatic and bioclimatic conditions inside the courtyard and the surrounding area.

## 2. Study area and methodology

### 2.1 Study area and data

For the purpose of the present study, an urban block with a courtyard in the city of Athens was selected. In Athens, the courtyard, as a result of regulations due to the high building density, is an irregularly shaped space, usually without plants and trees, designed mainly for daylight and ventilation to the backrooms (Tsiianaka 2006). The chosen study area, however, has a vegetated courtyard and is characterized by a dense building morphology with a building of eight stores attached to the NW side of the courtyard. The courtyard has NNE orientation since it is attached to the NNE side of the two-storey building. The garden is a densely wooded area with high coverage of irrigated vegetation (more than 85% of the floor area). In the northern side is a three storey building school with front and back school's courtyard. A detailed monitoring study inside the courtyard was carried out during the summer 2007 including continuous measurements of air temperature and humidity and sporadic measurements of wind speed and solar radiation. The present study makes use of the data reported in detail in Tsiros and Hoffman (2013). The experimental measurements of 2007 were used to calibrate an appropriate urban microclimate model in order to simulate the thermal conditions inside the courtyard.

**Table 1.** Weather conditions of the selected days for calibration the model recorded at NOA meteorological station (Tsiros and Hoffman, 2013).

Date	Wind Speed (m/sec)	Wind Direction	RH (%)	Tair (°C)	Tmax (°C)	Tmin (°C)
30/7	2,6	NE	45	30,4	37,2	25,4
8/8	2,6	NNE	52	25,6	31,4	21,1
22/8	1,6	SW	40	30,8	37,2	25,2

## 2.2 Model parameterization

The model simulations have been carried out with the three-dimensional non-hydrostatic climate model ENVI-met Version 3.0 (Bruse and Fleer 1998). This model has been used in a number of studies to predict the thermal comfort under different design options. For model simulations, the area around the courtyard has been transformed in a model grid with the dimension 110 x 100 x 30 grids with a resolution of 1.8m x 2m x 2m resulting in a total area of 198 x 200 m in the horizontal extension. The model area is rotated 18° out of grid north. Figure 1b shows the arrangement of the model area as well as the position of the buildings, the vegetation and the reference points. The different shades of green indicate different densities of vegetation.

Model simulations were performed for 24 h starting 01:00 LST and ending 01:00 LST the day after. This is because the total running hour should be longer than 6 h to overcome the influence of the initialization. The selected simulation dates were July 30<sup>th</sup> and August 8<sup>th</sup> and 22<sup>nd</sup>. These days represent typical hot summer days in Athens. The meteorological entries are summarized in Table 1.

The experimental measurements of 2007 were used to calibrate the ENVI-Met. A variety of scenarios were then examined to evaluate the influence of vegetation and other ground surface materials on the microclimate of a courtyard.



**Fig. 1.** Typical morphology of the study area (Source: Google –maps) (a) and modeled by ENVI-met (b).

## 3 Results

### 3.1 Measurements vs simulations

According to the monitored data the air temperature inside the courtyard on July 30th fluctuates from 26.3 to 34. °C with an average of 32 °C whereas the simulated air temperature fluctuates from 23.3 °C to 32.4 °C with an average of 29.4 °C. On August 8th the measured air temperature varies from 24. to 31.5 °C and the simulated from 22.2 to 30.8 °C with an average of 27.9 °C and on August 22nd the measured air temperature varies from 25.6 to 32.8 °C with an average of 30.6 °C and the simulated from 22 to 35 °C with an average of 31 °C. As it can be seen in fig. 2, the biggest difference is on the minimum temperature on August 22<sup>nd</sup>.

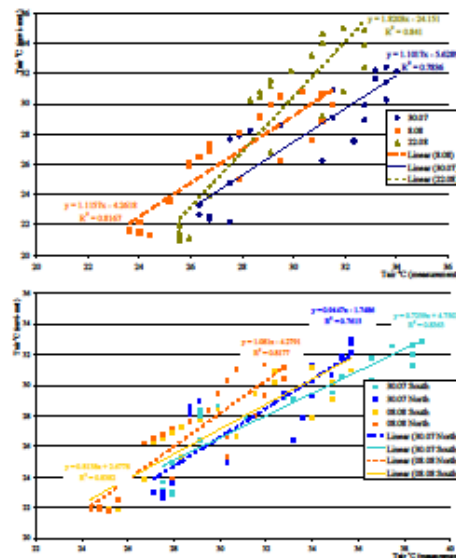


Fig. 2. Comparison of simulated and measured air temperature values (°C) for 3 different days inside the courtyard (above) and at the sidewalk of a nearby pedestrian way: 1.5 m away from the north facing street's flanking buildings walls (North) and similarly away from the south facing walls (South) (below)

The simulation results of the study show that, in general, there is no significant difference between simulated and measured air temperature values. In addition, it is shown that the microclimatic parameters do not differ with each other despite the fact that the initial conditions were different. Furthermore, the 30/7 and 22/08 days had similar weather conditions (Table 1) but differ in wind speed and direction and the simulation results were found to be in line with this observation. In addition to this, August 8th has the same initial conditions with the July 30th, differing only in air temperature but the results do not show any discrepancy. In general, model results indicate that inside the courtyard area the micrometeorological conditions are quite stable and they are not affected, in principal, by meso-scale weather conditions. The effect of solar radiation is limited in this area due to the heavy shades of the buildings and the vegetation. The direct solar radiation acquires nonzero values between 08:00 LST and 14:00 LST. Wind speed values remain, in general, to low levels in relation to the initial conditions. The values of the mean radiant temperature are high during the morning hours and they start to decrease after 14:00 LST when solar radiation inside the courtyard is minimal.

### 3.2 Modeling design scenarios

Selected scenarios were examined to evaluate the influence of vegetation and ground surface materials on the microclimate of the courtyard. Figure 3 shows air temperature at 2m, PMV index (Fanger, 1972) and mean radiant temperature ( $T_{mrt}$ ) in the study and surrounding area at 11:00 and 15:00 LST. In the first scenario all the vegetation from the courtyard has been removed and the ground surface is covered by concrete material. In the second and third scenario the vegetation is simply replaced by grass and loamy soil respectively, where it becomes clear that the vegetation has an important role in creating thermal comfort

conditions. As shown the present situation is the best of all and only between 13:00 LST and 15:00 LST the conditions may be characterized as less comfortable since the first scenario indicates uncomfortable thermal comfort conditions during the whole daytime. The mean radiant temperature at 2m height stays in high level and it is greatly affected by the vegetation and ground surface materials in which the  $T_{mrt}$  is increased inside the courtyard up to 30°C. In the values of mean radiant temperature and PMV index there were not observable changes in relation to height.

#### 4 Conclusions

The results of the present numerical study indicate that the microclimatic conditions inside a typical vegetated courtyard of an urban block are quite stable and they are not affected readily by the meso-scale prevailing weather conditions. The applied urban microclimate Envi-met model was able to predict reasonably air temperature values inside the courtyard and also at various sites close to it. It was found, however, that the model tended to underestimate air temperature values during the morning hours whereas during the afternoon hours there was a model overestimate. Furthermore, according to the examined scenarios there is a strong relationship between the vegetation and the thermal comfort conditions as expressed by the PMV index (predicted mean vote). It is concluded that the high vegetation coverage of the area has a positive affect on the thermal conditions whereas, according to the low cover vegetation scenario, vegetation does not affect the air temperature pattern at a height above ground surface.

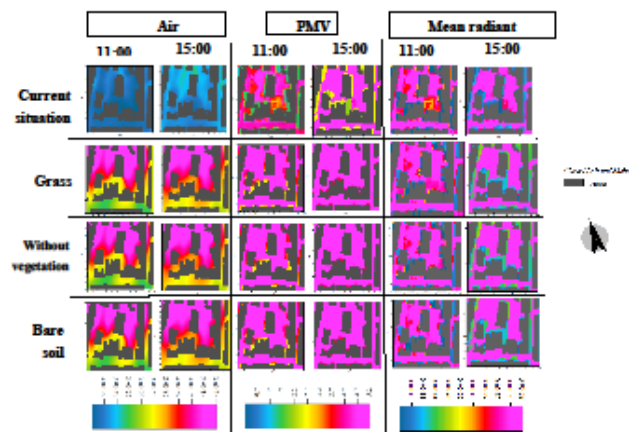


Fig. 3. Present situation and examined design scenarios: Patterns of air temperature at 2m height, PMV index and mean radiant temperature at 11:00 LST and 15:00 LST

#### References

- Attia S, Duchhart I (2011) Bioclimatic landscape design in extremely hot and arid climates. PLEA 2011 - 27th Conference on Passive and Low Energy Architecture, Louvain-la-Neuve, Belgium, 13-15 July 2011, pp. 459 - 464  
 Bruse M, Fleer H (1998) Simulating surface - plant - air interactions inside urban environments with a three dimensional numerical model. Environmental Modelling & Software 13: 373 - 384

- Ernest R, Ford B (2012) The role of multiple-courtyards in the promotion of convective cooling. *Architectural Science Review*, Vol. 55, No. 4, 241-249
- Fanger PO (1972) *Thermal comfort: Analysis and applications in environmental engineering*. McGraw-Hill, New York.
- Johansson E (2006) Influence of urban geometry on outdoor thermal comfort in a hot dry climate: A study in Fez, Morocco. *Building and Environment* 41: 1326 – 1338
- Meir IA, Pearlmuter D, Etzion Y (1995) On the microclimatic behavior of two semi-enclosed attached courtyards in a hot dry region. *Building and Environment*, Vol. 30, No.4, pp. 563 – 572.
- Rajapaksha I, Nagai H, Okuzumiya M (2003) A ventilated courtyard as a passive cooling strategy in the warm humid tropics. *Renewable Energy* 28, 1755 – 1778
- Tsianaka E (2006) The role of courtyards in relation to air temperature of urban dwellings in Athens. PLEA 2006 – 23rd Conference on Passive and Low Energy Architecture, Switzerland, 6-8 September 2006.
- Tsiros IX, Hoffman M (2013) Thermal and comfort conditions in a semi-closed rear wooded garden and its adjacent semi-open spaces in a Mediterranean climate (Athens) during summer. *Architectural Science Review*. DOI: 10.1080/00038628.2013.829021
- Yang X, Li Y, Yang L (2012) Predicting and understanding temporal 3D exterior surface temperature distribution in an ideal courtyard. *Building and Environment* 57: 38 – 48





## Summer and winter thermal and comfort conditions inside a vegetated courtyard area of a Mediterranean city (Athens)

Vasiliki Christopoulou,  
[Agricultural University of Athens, Greece]

Aspasia Efthimiadou,  
[Open University of Cyprus]

Christina Zelioti,  
[Enel Green Power Hellas Ltd]

Milo Hoffman,  
[Technion-Israel Institute of Technology, Haifa]

Ioannis Tsiros,  
[Agricultural University of Athens, Greece]

### ABSTRACT

*Appropriately designed open and semi-open spaces may function effectively as positive bioclimatic elements in the urban environment and thus they may be integrated in a sustainable urban design context. Courtyards are common architectural solutions; depending on their detailed design (geometry, vegetation presence and materials), they can be positive or negative climatic elements in the urban environment. In the present study the microclimatic and thermal comfort conditions of a vegetated courtyard area located in an urban cluster of the city of Athens (Greece) are estimated and evaluated. In the selected courtyard area, continuous measurements of microclimatic parameters (air temperature, relative humidity, wind speed, net radiation and global solar radiation) were carried out during a summer and also a winter time period. In addition, an urban microclimatic model was used to evaluate combined building and vegetation design scenarios that may improve microclimatic and bioclimatic conditions inside the courtyard and also in the surrounding urban cluster area. The implications of the study's results on the architectural design for Athens are mainly associated with propositions to have high mass residential buildings with backyard vegetated areas to moderate the extremely high or low air temperature values and to ameliorate, to a certain degree, comfort conditions of occupants.*

### INTRODUCTION

A microclimate-based design strategy in urban areas is mainly related to control of solar access and air flow inside the various urban clusters. It is well known that the geometry of an urban area, the choice of the building material and the surface properties of the dwellings significantly affects its micro-climate (e.g., Shashua-Bar et al. 2012; 2010). Courtyards are common architectural solutions, traditionally associated with the Mediterranean region. The courtyard as a result of regulations due to the high building density is an irregularly shaped space, usually without plants and trees, designed mainly for daylight and ventilation to the backroom (Tsioukaki, 2006). Researches in arid and semi arid climates showed that the courtyards used as cool reservoirs to improve the microclimate (Attia 2006). Multiple courtyards were also found to improve convective cooling and mitigate additional heat loads (Ernest and Ford 2012). In addition to this, in warm and humid tropics, the courtyard as a passive cooling tool, may provide appropriate airflow from the courtyard to the building and improve thus indoor conditions (Rajapaksha et al 2003). In the Mediterranean climate of Athens an appropriately designed garden is capable of functioning as a positive climatic element in urban design (Tsiros and Hoffman 2014).

Christopoulou V. has an MSc in Atmospheric Environment. Efthimiadou S. is a lecturer at Open University of Cyprus. Zelioti C. has an MSc in Atmospheric Environment. Hoffman M., is a Professor at Technion-Israel Institute of Technology, Haifa. Tsiros I. is a professor at Agricultural University of Athens, Greece.

Tsianaka (2006) concluded that in high building density areas narrow courtyards are more beneficial than wider courtyards, indicating the crucial role of the geometry of space. Outdoor conditions within the courtyard, however, may often be less comfortable than in the open surroundings depending on the orientation (Meir et al. 1995). Solar radiation and urban structure is the most important factors in determining the courtyard thermal environment (Yang et al 2012). The correct orientation of semi-enclosed open spaces can improve their thermal behavior, while orienting them irrespective of solar angles and wind direction may create thermal discomfort in them (Meir et al. 1995). At the same time Shashua-Bar et al. (2010) confirm that these architectural solutions may have positive or negative climatic elements in urban environment depending on combinations of mature trees, grass, overhead shading mesh and paving.

The present study deals with the microclimatic and thermal comfort conditions of a vegetated courtyard area located in an urban cluster of the city of Athens (Greece). Courtyards in Athens are mainly the result of regulations due to high building density construction where the old family houses have been replaced to a large degree by small apartment blocks (Tsianaka, 2006). In the selected courtyard area, continuous measurements of microclimatic parameters (air temperature, relative humidity, wind speed, net radiation and global solar radiation) were carried out during a summer and a winter time period. In addition, an urban microclimatic model (ENVI-met 3.1) was used to evaluate combined building and vegetation design scenarios that may improve microclimatic and bioclimatic conditions inside the courtyard and the also in the surrounding urban cluster area.

#### STUDY SITES AND DATA

For the purpose of the study, an urban block with a courtyard area in downtown Athens was selected. The location is shown in the map (Figure 1). The chosen study area has a dense building morphology with a building of eight stores attached to the NW side of the courtyard. The courtyard has NNE orientation since it is attached to the NNE side of the two-storey building. The garden is a densely wooded area with high coverage of irrigated vegetation (more than 85% of the floor area). In the northern side is a three storey building school with front and back school's courtyard.

A detailed monitoring study based on in-situ measurements of air temperature, humidity, wind speed and solar radiation inside the courtyard was carried out during the summer of 2013 and the next winter. The measurements were carried out from 22nd of July to 01st August 2013 for summer period and from 21st February to 12th March 2014 for winter period. The summer of 2013 was characterized as mild when the temperature fluctuates on hourly base from 19 to 38° C, while generally prevailing in stable weather conditions. The weather during the winter measurements was too unstable day by day beginning from cloudy days with a possibility of rain to sunny days.



Figure 1 Typical morphology of the study area (Source: Google -maps)

Continuous measurements of air temperature and relative humidity were carried out using Rotronic Hygromer MP100A with accuracy  $\pm 0.3\text{K}$  and  $\pm 1.5\%$  RH at  $23 \pm 5\text{ }^\circ\text{C}$ ; housed in foil-covered reflective radiation protective shields. The horizontal wind speed measured by a cup anemometer, consisting of three cups arranged in a center pivot. The measurement accuracy is 0.1-0.3m/sec with a range of 0-75m/sec. Further, a CM7b Kipp & Zonnen albedometer was used for measuring the irradiance and net global radiation with spectral range of 310-2800nm and response time less than 18sec. Recorded data were stored in the Campbell CR800 datalogger every 1min. For its operation, a battery 12V and 7.2 AH, closed (Sealed Lead Acid) with dimensions of 151mm x 65mm x 94mm was used whereas a solar panels was used for charging the battery. The micrometeorological station was placed under the vegetation canopy at a height of about 1.7 m above the ground. Finally meteorological data for summer and winter period was obtained from the official meteorological station of the Agricultural University of Athens (AUA) located inside the university campus.

#### MODEL OVERVIEW AND PARAMETERIZATION

The model simulations have been carried out with the three-dimensional non-hydrostatic climate model ENVI-met Version 3.0 (Bruse and Fleer 1998). This model has been used in a number of studies to predict the thermal comfort in different design mostly in outdoor conditions (Ali-Toudert and Mayer, 2006; Attia and Duchhart, 2011; Johansson et al., 2013; Tsitoura et al., 2011). For the model simulations, the area around the courtyard has been transformed in a model grid with the dimension 110 x 100 x 30 grids with a resolution of 1.8m x 2m x 2m resulting in a total area of 198 x 200 m in the horizontal extension. The model area is rotated 18° out of grid north. Model simulations were performed for 24 hours because the total running hour should be longer than 6 hours to overcome the influence of the initialization. The selected input data for simulation was referred to two representative days of typical summer and winter period. The meteorological entries are summarized in Table 1. Also some experimental measurements of 2007 were used first to calibrate the ENVI-Met model for summer period and then a variety of scenarios were examined to evaluate the influence of vegetation and other ground surface materials on the microclimate of a courtyard.

**Table 1. Weather conditions of the selected examined days recorded at NOA and AUA meteorological stations for summer and winter period respectively**

Day	Wind Speed (m/sec)	Main Wind Direction	RH (%)	Tair (°C)	Tmax (°C)	Tmin (°C)
summer	2.6	NE	45	30.4	37.2	25.4
winter	3.6	N	70	12.3	14.6	10.7

#### RESULTS

##### Warming and cooling effects during summer and winter period

Figures 2 and 3 show the diurnal pattern of hourly values of air temperature differences between the examined sites and the meteorological station of Agricultural University of Athens for summer and winter period respectively in two sites inside the vegetated courtyard (as seen in figure 1). The first one refers to a position close to the two-storey building in which there is a strong impact from the building shading and the second one is in the centre of the courtyard away of all surrounding buildings so the shade occurs only from the nearby trees. Positive values of air temperature differences indicate the existence of a 'heat island' effect whereas negative values indicate the existence of a 'cool island' effect. For the summer period (Figure 2) the positive differences are observed during nighttime and last until sunshine in both cases and sites indicating the existence of a heat island effect. The maximum median value of the differences was observed two hours after midnight and reaches 5 °C close to the building and 4.6 °C in the centre of courtyard at 23:00. After sunrise the cool island effect is observed with a temperature difference of 3 °C in both sites. During the midday the temperature close to the building is 2 – 2.5 °C lower than this in the reference site while in the centre of courtyard the difference is 0 – 1 °C. It's obvious that in the centre of courtyard there is a weak cool island effect during the day explained by the design of the site and the lack of natural and artificial shading unlike the first site. It is remarkable to note that in the centre of courtyard the scatter of boxplot is squeezed which means that there were not

significant hourly temperature differences with the reference site for the examined days during the summertime.

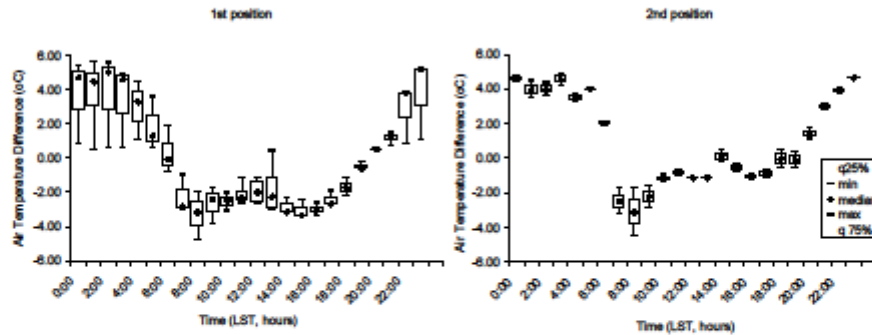


Figure 2 Boxplots of hourly values of air temperature differences (°C) between two positions in the courtyard and the reference site for summer period.

As can be seen in figure 3 close to the building a weak heat island (0 - 0.5 °C) is observed in winter during night time and early morning hours for 12 hours from 21:00h to 8:00h. The absolute maximum value of mean hourly air temperature differences was found to be 3 °C at 7:00h. Around 09:00h the site starts to be cooler than the reference site since 20:00h with the same cooling intensity for 12 consecutive hours with a maximum value of 2.7 °C at 14:00h. The second position presents similar results with the heat island to start at 21:00h and continues for 12 hours with median values of about 0 – 1.5 °C and absolute maximum values less than 3 °C. During daytime there is a continuous change of weak heat and cool island per hour but in both cases the median value is up to 0.7 °C.

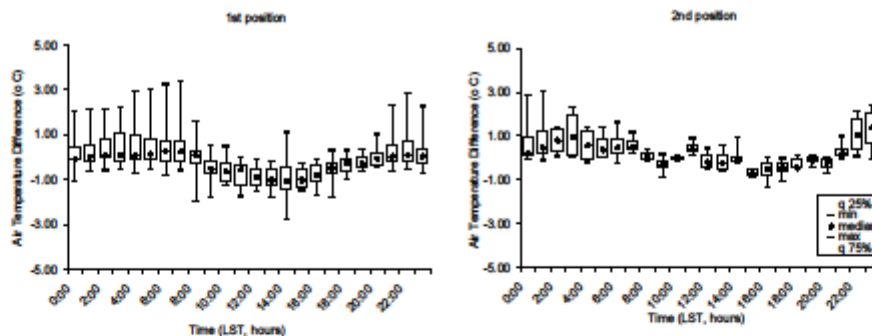


Figure 3 Boxplots of hourly values of air temperature differences (°C) between two positions in the courtyard and the reference site for winter period.

#### Simulation results and scenarios

Selected scenarios were examined to evaluate the influence of vegetation, ground surface materials and geometry on the microclimate of the courtyard for summer and winter weather conditions. In order to identify the comfort conditions in the courtyard the mean radiant temperature was used which sums up all the short and long wave radiation fluxes which absorbed or emitted by a body; while represents the weighted average temperature of an imaginary enclosure that gives the same radiation as the complex urban environment.

Figure 4 and 5 present the values of mean radiant temperature ( $T_{\text{sur}}$ ) and surface temperature ( $T_{\text{surf}}$ ) at 12:00 LST inside the study area and also in the surrounding area at 2m height. In the first scenario all vegetation from the courtyard has been removed and replaced by irrigated grass 50cm height while the vegetation of the surrounding area was replaced by bushes. In the second scenario the buildings of eight and seven storeys attached to the NW side of the courtyard replaced by three and two storey buildings

respectively.

In the summertime, during the hours when the courtyard receives solar radiation (10:00 to 17:00), trees have a great impact by lowering the surface temperature by up to 8 °C in relation to the grass. The mean radiant temperature is generally characterized by high values almost during the whole daytime and is greatly affected by the vegetation and ground surface materials (Figure 4a and 4b). Inside the courtyard in the current design the mean radiant temperature at 12:00LST varies from 45 to 55°C while in the surrounding area and mostly in the nearby asphalt roads exceed 70°C. The difference of 10°C observed inside the courtyard lies in the diversity of vegetation on the density of foliage. At the same time in the second scenario with the reduced building height the T<sub>mrt</sub> in the courtyard has values from 50 to 60 °C while early in the morning and at late afternoon the T<sub>mrt</sub> is up to 23 °C. The difference at 12:00 LST between the current design and this scenario caused by the shade of tall building in the present design.

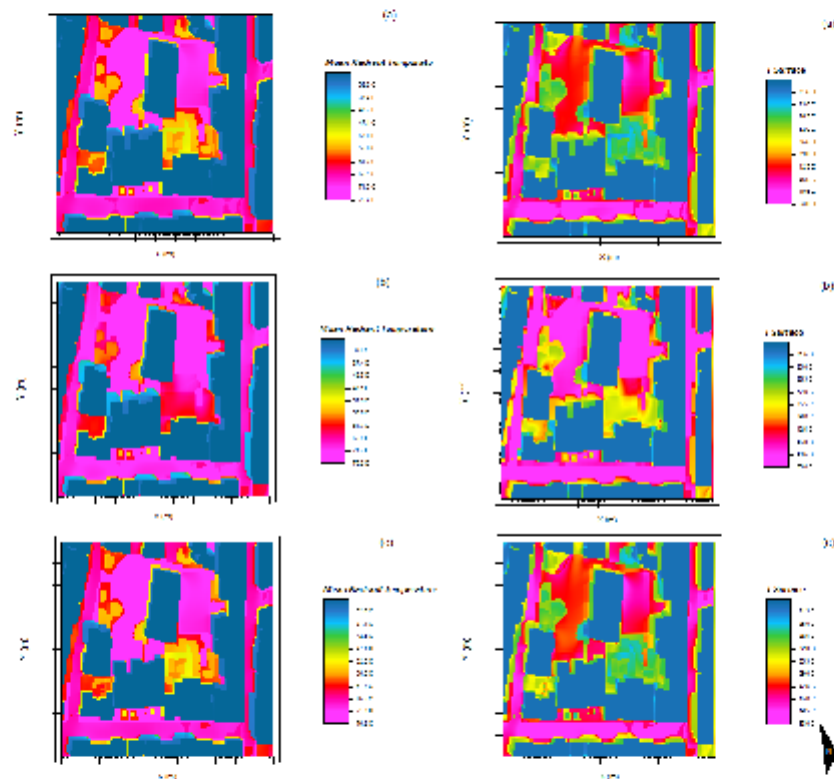


Figure 4 Simulated mean radiant temperature (left) and surface temperature (right) for typical summer day at 12:00LST at 2m height at current situation (a), scenario with grass coverage (b) and change of geometry (c). The range of data is 32.6 (dark blue) to 76.2°C (light red) for T<sub>mrt</sub> and 21.5 (dark blue) to 53 °C (light red) for T<sub>surf</sub>.

The high irrigated vegetation has a huge impact in thermal comfort by lowering the MRT by up to 15 °C in relation to grass cover. In the case of first scenario in the mean radiant temperature there were not observable changes in relation to the height above the grass; the mean radiant temperature exceed 60 °C while the surface temperature is up to 37° C and this is caused by increasing the solar radiation and decreasing the shade of the tree coverage. At 7:00 LST the T<sub>mrt</sub> in the courtyard is up to 18 °C in the current design and the first scenario; while in the afternoon the T<sub>mrt</sub> in the current design is up to 26°C and in the scenario with the grass may vary from 34 to 38 °C. At 21:00 LST in the whole simulated area

it varies from 17 to 18 °C and from 24 to 26 °C in high and low vegetation coverage respectively.

In addition, the surface temperature showed to be much higher inside the courtyard with the grass coverage rather than the high tree vegetation; there were no differences, however, between the current design and the second scenario. The surface temperature values at 12:00 LST vary from 25 to 34 °C and 33 to 36 °C in the current and the first scenario respectively. In the nearby asphalt streets the surface temperature is up to 50 °C in both cases. In the schoolyard the replacement of high-tree vegetation with bushes increase the T<sub>surface</sub> up to 10 °C. At 7:00LST inside the courtyard the surface temperature is the same in both cases (18 °C) whereas at 17:00 LST the difference between the current and first scenario is up to 9 °C. During the hours where the courtyard receives solar radiation the trees have a huge impact on the surface temperature. The trees lower the temperature by up to 8 °C in case of grass coverage. Forming a shallower courtyard by reducing building height the surface temperature during the midday is at the same level as the current design (up to 34 °C) while late the afternoon the surface temperature is much higher because of the decreasing of shading by the buildings.

The mean radiant temperature during a sunny winter day at 12:00 showed to be reduced by half in relation to a typical summer day because of the relatively limited solar radiation reaching values no more than 450W/m<sup>2</sup>. Inside the courtyard the T<sub>mrt</sub> varies from 28 to 33 °C in the current design while in the surrounding area and mostly in the nearby roads is up to 43 °C. In the morning time the T<sub>mrt</sub> inside the courtyard is 1-2 °C and in the surrounding area does not exceed 7 °C. At 17:00 LST the T<sub>mrt</sub> is up to 12 °C.

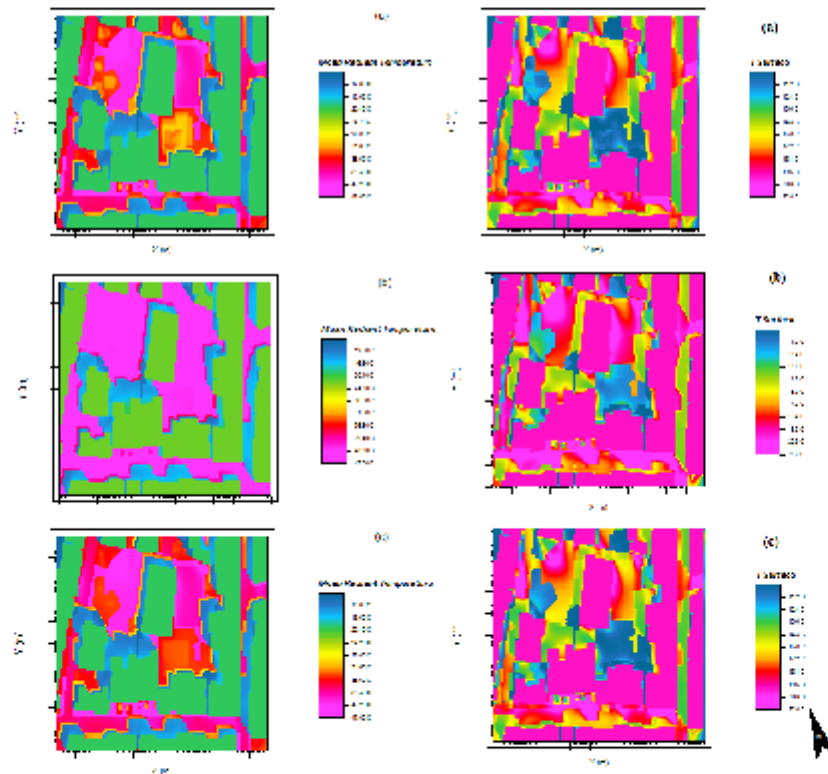


Figure 5 Simulated mean radiant temperature (left) and surface temperature (right) for a sunny winter day at 12:00LST at 2m height at current situation (a), scenario with grass coverage (b) and change of geometry (c). The range of data is 12.8 (dark blue) to 47°C (light red) for T<sub>mrt</sub> and 11.2 (dark blue) to 22 °C (light red) for T<sub>surf</sub>.

The same regime occurs in scenarios during the whole day but in the one with the grass coverage the mean radiant temperature at 12:00 inside the courtyard reaches 25°C. In the courtyard the mean radiant temperature is increased in relation to height. At 12:00 LST at a height of 0.80m above ground the  $T_{mrt}$  varies from 16 to 23 °C and at 1.20m from 20 to 30 °C. In the case of the surface temperature there were not observable differences between the current design and the scenario. Values at 12:00 LST vary from 10 to 12°C inside the courtyard and 16 to 22°C in the surrounding area depending on surface materials and the shade by buildings. Early in the morning the  $T_{surf}$  is 9°C and 15 °C in the courtyard and the nearby trees respectively while the same temperature values occur at 17:00 LST.

From the simulation results it becomes clear that during a typical summer day the vegetation and the ground cover material highly affect the surface temperature and the thermal comfort conditions as expressed by mean radiant temperature. In a sunny winter day, however, these parameters were not affected by the considered changes in the vegetation.

## CONCLUSION

The results obtained in the present study indicate that in the Mediterranean climate insufficient vegetation (such as grass) in courtyards may lead to local overheating conditions in summer mainly due to surface temperature increases. The average difference between mean radiant temperatures (up to 30 °C) inside the courtyard and the surrounding streets depends on vegetation. The most overheated area was found to be the asphalt streets and paved school courtyard which has limited vegetation. To improve thermal comfort in such cases, additional shading by using shade with large tree canopies is required. From the simulation results it becomes clear that the scenarios indicate uncomfortable thermal comfort conditions during the whole daytime in relation to the present design mainly because of the reduction of shading. In a sunny winter day the surface and the mean radiant temperature is minimally affected by the height or type of vegetation. Additional continuous measurements during summer and winter provide results such as the positive effect of courtyard close to attached building. Results showed the existence of a cool island effect during the daytime in the summer period reaching 3 °C close to the building and 1°C in the center of courtyard in a site without shading either from plants or buildings. In winter, however, a weak heat island effect during night time inside the courtyard creates comfortable thermal conditions.

## REFERENCES

- Ali-Toudert F. and Mayer H., 2006. Numerical study on the effects of aspect ratio and orientation of an urban street canyon on outdoor thermal comfort in hot and dry climate. *Building and Environment* 41: 94–108. doi:10.1016/j.buildenv.2005.01.013
- Attia S. and Duchhart I., 2011. Bioclimatic landscape design in extremely hot and arid climates. PLEA 2011 - 27th Conference on Passive and Low Energy Architecture, Louvain-la-Neuve, Belgium, 13-15 July 2011, pp. 459 - 464
- Bruse M. and Fleer H., 1998. Simulating surface – plant – air interactions inside urban environments with a three dimensional numerical model. *Environmental Modelling & Software* 13: 373 – 384
- Ernest R. and Ford B., 2012. The role of multiple-courtyards in the promotion of convective cooling. *Architectural Science Review*, Vol. 55, No. 4, 241-249
- Frohlich D. and Matzarakis A., 2013. Modelling of changes in thermal bioclimate: examples based on urban spaces in Freiburg, Germany. *Theoretical Applied Climatology* (2013) 111:547–558. DOI 10.1007/s00704-012-0678-y.
- Johansson E., 2006. Influence of urban geometry on outdoor thermal comfort in a hot dry climate: A study in Fez, Morocco. *Building and Environment* 41: 1326–1338. doi:10.1016/j.buildenv.2005.05.022
- Johansson E., Spangenberg J., Gouvea M. and Freitas E., 2013. Scale-integrated atmospheric simulations to assess thermal comfort in different urban tissues in the warm humid summer of São Paulo, Brazil. *Urban Climate* 6: 24–43.
- Meir I.A., Pearlmutter D. and Etzion Y., 1995. On the microclimatic behaviour of two semi-enclosed attached courtyards in a hot dry region. *Building and Environment*, Vol. 30, No.4, pp. 563 – 572.

- Rajapaksha I., Nagai H. and Okumiya M., 2003. A ventilated courtyard as a passive cooling strategy in the warm humid tropics. *Renewable Energy* 28; 1755 – 1778
- Shashua-Bar L., Tsiros I.X., Hoffman M. (2012) Passive cooling design options to ameliorate thermal comfort in urban streets of a Mediterranean climate (Athens) under hot summer conditions. *Building and Environment* 57 (0):110-119. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.04.019>
- Shashua-Bar L., Pearlmutter D. and Erell E., 2010. The influence of trees and grass on outdoor thermal comfort in a hot-arid environment. *International Journal of Climatology*. DOI: 10.1002/joc.2177
- Tsianaka E., 2006. The role of courtyards in relation to air temperature of urban dwellings in Athens. PLEA 2006 – 23rd Conference on Passive and Low Energy Architecture, Switzerland, 6-8 September 2006.
- Tsiros I.X. and Hoffman M., 2013. Thermal and comfort conditions in a semi-closed rear wooded garden and its adjacent semi-open spaces in a Mediterranean climate (Athens) during summer, *Architectural Science Review*. DOI: 10.1080/00038628.2013.829021
- Tsitoura M., Michailidou M. and Tsoutsos T., 2011. Evaluation of comfort conditions and sustainable design of urban open spaces in Crete. PLEA 2011 – 27th Conference on Passive and Low Energy Architecture, Louvain-la-Neuve, Belgium, 13-15 July 2011, pp. 439 -444.
- Yang X., Li Y. and Yang L., 2012. Predicting and understanding temporal 3D exterior surface temperature distribution in an ideal courtyard. *Building and Environment* 57; 38 – 48