

Εργαλεία εκτίμησης και υπολογισμού του μικροκλίματος υπαίθριων χώρων

Χατζηδημητρίου Αγγελική,

Εργαστήριο Οικοδομικής και Φυσικής των Κτιρίων, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πολυτεχνική Σχολή, ΑΠΘ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η μεγάλη σημασία της επίδρασης του μικροκλίματος των υπαίθριων χώρων στην ενεργειακή απόδοση των κτιρίων, στη χρήση των ίδιων των χώρων, αλλά και σε φαινόμενα όπως της αστικής θερμικής νησίδας έχει οδηγήσει σε εκτεταμένες έρευνες, διεθνώς, για τον ακριβή και αναλυτικό υπολογισμό του κυρίως μέσα στο αστικό περιβάλλον. Πολλά και διαφορετικά μοντέλα υπολογισμών και λογισμικά προσομοίωσης έχουν αναπτυχθεί και χρησιμοποιηθεί για τη μέτρηση και την τεκμηρίωση της επίδρασης του σχεδιασμού στο περιβάλλον των κτιρίων και στο μικροκλίμα των αστικών χώρων. Η παρούσα εργασία επιχειρεί να παρουσιάσει και κατηγοριοποιήσει ορισμένα από αυτά.

Οι ιδιαιτερότητες της μοντελοποίησης και προσομοίωσης του αστικού μικροκλίματος πηγάζουν από την πολυπλοκότητα των φυσικών διεργασιών που πραγματοποιούνται μέσα στον αστικό χώρο και την ανάγκη απλοποιήσεων, παραδοχών και ιεράρχησης παραμέτρων. Τα εργαλεία διερεύνησης του μικροκλίματος μπορούν να διαχωριστούν ανάλογα με τη μέθοδο υπολογισμών σε εμπειρικά και αναλυτικά, ανάλογα με την κλίμακα της ανάλυσης σε μοντέλα μεσοκλίμακας, μοντέλα μικροκλίμακας, και μοντέλα ενεργειακού ισοζυγίου του ανθρώπινου σώματος, και ανάλογα με τις φυσικές διεργασίες που αναπαριστούν σε μοντέλα ηλιακής γεωμετρίας και ακτινοβολίας, μοντέλα ροής αέρα, μοντέλα μεταφοράς ενέργειας και μάζας (υγρασίας), και σύνθετα λογισμικά που λαμβάνουν υπόψη συνδυασμούς των φυσικών διεργασιών. Τα μοντέλα που αναπαριστούν τις διεργασίες στις αστικές χαράδρες είναι τα μοντέλα μικροκλίμακας ή μοντέλα αστικού ιστού που συχνά συνδυάζονται με μετεωρολογικά μοντέλα μεσοκλίμακας και μοντέλα ανθρώπινου ενεργειακού ισοζυγίου. Για την αξιόπιστη αναπαράσταση του μικροκλίματος απαιτείται αξιολόγηση των σημαντικότερων παραμέτρων που επηρεάζουν τη διαμόρφωσή του και επιλογή των κατάλληλων εργαλείων για κάθε περίπτωση.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το μικροκλίμα των υπαίθριων χώρων των πόλεων διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στη διαμόρφωση της αστικής θερμικής νησίδας και κατ' επέκταση, λαμβάνοντας υπόψη τον σύγχρονο ρυθμό αστικοποίησης σε παγκόσμια κλίμακα, στη μεταβολή της θερμοκρασίας του πλανήτη και την κλιματική αλλαγή. Σύμφωνα με έρευνες (Oke 1987), το κλίμα της πόλης είναι ένας συνδυασμός των μικροκλιμάτων που διαμορφώνονται ανάμεσα στα κτίρια, στις αστικές χαράδρες, και εξαρτάται άμεσα και κατά μεγάλο μέρος από τον αστικό σχεδιασμό. Επομένως έχει ιδιαίτερη σημασία και η δυνατότητα υπολογισμού και πρόβλεψης του μικροκλίματος των ανοικτών χώρων με κατάλληλα και αξιόπιστα εργαλεία, για την αξιολόγηση του αστικού περιβάλλοντος και την ενημέρωση και βελτίωση του σχεδιασμού.

Η διερεύνηση και η ποσοτική αξιολόγηση του μικροκλίματος των υπαίθριων αστικών χώρων είναι εφικτή με δύο διαφορετικούς τρόπους: μέσω της επίδρασης στις ενεργειακές απαιτήσεις των

κτιρίων και μέσω της επίδρασης στην θερμική άνεση των πεζών. Η ενεργειακή απόδοση των κτιρίων στις πόλεις επηρεάζεται από το μικροκλίμα που διαμορφώνεται στο περιβάλλον τους, και ενώ για τις ενεργειακές απαιτήσεις των κτιρίων απαιτείται τεκμηριωμένος υπολογισμός με χρήση λογισμικών, για την εκτίμηση των μικροκλιματικών συνθηκών στο περιβάλλον των κτιρίων, χρησιμοποιούνται συνήθως δεδομένα μετεωρολογικών σταθμών, απλουστεύσεις και εμπειρικές παρατηρήσεις, χωρίς να θεωρείται απαραίτητη ειδική ανάλυση ή υπολογιστική τεκμηρίωση, με αποτέλεσμα ανακριβείς προβλέψεις. Από την άλλη πλευρά οι συνθήκες άνεσης των πεζών στους αστικούς χώρους εξαρτάται από πολλούς παράγοντες πέρα από τα δεδομένα του μικροκλίματος μέσα σε αυτούς, παρόλα αυτά η διαμόρφωση υπαίθριων χώρων με ποικιλία θερμικών συνθηκών που καλύπτουν διαφορετικές απαιτήσεις χρηστών σε διαφορετικές ώρες τις ημέρας και εποχές του έτους μπορεί να οδηγήσει σε μεγαλύτερη αξιοποίησή τους από τους κατοίκους της πόλης με όλα τα κοινωνικοοικονομικά και περιβαλλοντικά οφέλη που προκύπτουν από αυτήν. Και στις δύο περιπτώσεις χρειάζεται να υπολογιστούν τα στοιχεία του μικροκλίματος στον υπαίθριο χώρο δηλ. η θερμοκρασία και η υγρασία αέρα, η ταχύτητα ανέμου οι επιφανειακές θερμοκρασίες, και οι ροές ακτινοβολίας.

Η τεκμηριωμένη εκτίμηση των στοιχείων του μικροκλίματος των υπαίθριων χώρων με τη χρήση εργαλείων υπολογισμού, επιτρέπει τον έλεγχο των επιπτώσεων του σχεδιασμού στο αστικό περιβάλλον, την πρόβλεψη των αποτελεσμάτων συγκεκριμένων προτάσεων, τον υπολογισμό των συνθηκών άνεσης των πεζών τους αστικούς χώρους και μεγαλύτερη ακρίβεια στους υπολογισμούς ενεργειακής απόδοσης των κτιρίων. Η βελτίωση του αστικού κλίματος και η αναβάθμιση του αστικού περιβάλλοντος μέσω του σχεδιασμού μπορεί να συμβάλει ακόμη και στον περιορισμό της έντασης του φαινομένου της θερμικής νησίδας και των επιπτώσεων στην κλιματική αλλαγή.

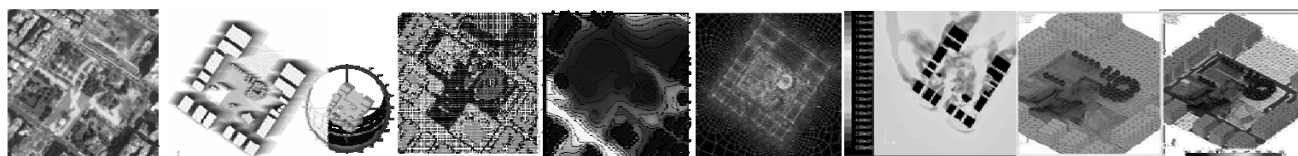
Πολλά και διαφορετικά μοντέλα υπολογισμών και λογισμικά προσομοίωσης έχουν αναπτυχθεί και χρησιμοποιηθεί για τη μέτρηση και την τεκμηρίωση της επίδρασης του κτισμένου περιβάλλοντος στο μικροκλίμα των ανοικτών χώρων. Η παρούσα εργασία επιχειρεί να παρουσιάσει και να κατηγοριοποιήσει ορισμένα από αυτά με βάση τη μέθοδο που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό των στοιχείων του μικροκλίματος, την κλίμακα στην οποία αναλύεται ο αστικός χώρος και τις φυσικές διεργασίες που λαμβάνονται υπόψη.

2. ΕΡΓΑΛΕΙΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΑΣΤΙΚΟΥ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

Το μεγάλο πλήθος και η ποικιλία των διαθέσιμων εργαλείων για την εκτίμηση ή και την προσομοίωση των συνθηκών στους υπαίθριους χώρους των πόλεων, που παρουσιάζονται στη διεθνή βιβλιογραφία οφείλονται στην πολυπλοκότητα του αστικού χώρου και των φυσικών διεργασιών που πραγματοποιούνται μέσα σε αυτόν και την ανάγκη απλοποιήσεων, παραδοχών και επιλογής ή ιεράρχησης παραμέτρων.

Στα διαθέσιμα εργαλεία διερεύνησης του αστικού κλίματος συγκαταλέγονται από απλές εμπειρικές σχέσεις μέχρι και δυναμικά λογισμικά προσομοίωσης, που λαμβάνουν υπόψη διαφορετικές φυσικές διεργασίες, είτε μεμονωμένα είτε σε συνδυασμούς, σε διαφορετικές κλίμακες του αστικού περιβάλλοντος από το σύνολο του πολεοδομικού συγκροτήματος, μέχρι την αστική χαράδρα και το ανθρώπινο σώμα. Ενδεικτικά αναφέρονται τα λογισμικά υπολογιστικής ρευστοδυναμικής (CFD) που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της ροής του αέρα σε διαφορετικές κλίμακες, τα μοντέλα προσομοίωσης της ηλιακής γεωμετρίας και των ροών ηλιακής και θερμικής ακτινοβολίας, μοντέλα που βασίζονται στο ενεργειακό και το υδρολογικό ισοζύγιο της αστικής επιφάνειας για την εκτίμηση της ροής της λανθάνουσας θερμότητας εξαιτίας της υγρασίας του εδάφους, των φυτών και των υδάτινων στοιχείων, ή την εκτίμηση της επίδρασης της θερμοχωρητικότητας του αστικού ιστού, αναλυτικά λογισμικά που συνδυάζουν μοντέλα ατμόσφαιρας, εδάφους και κτιρίων, και ενίοτε περιλαμβάνουν μοντέλα φυτεύσεων, εξειδικευμένα μοντέλα που περιγράφουν το μικροκλίμα μέσω αστικής μορφολογίας, λογισμικά GIS για διαμόρφωση χαρτών μικροκλίματος κ.α.. Τα μοντέλα που αναπαριστούν τις διεργασίες γύρω από τα κτίρια και μέσα στις αστικές χαράδρες είναι τα μοντέλα μικροκλίμακας ή μοντέλα αστικού ιστού που συχνά συνδυάζονται με μετεωρολογικά μοντέλα μεσοκλίμακας και μοντέλα ανθρώπινου ενεργειακού ισοζυγίου. Για την αξιόπιστη αναπαράσταση του μικροκλίματος απαιτείται αξιολόγηση

των σημαντικότερων παραμέτρων που επηρεάζουν τη διαμόρφωσή του και επιλογή των κατάλληλων εργαλείων για κάθε περίπτωση (βλ. και Εικόνα 1).



Εικόνα 1 Αεροφωτογραφία (α), και γεωμετρικά μοντέλα και αποτελέσματα προσομοιώσεων μιας αστικής πλατείας, με διαφορετικά λογισμικά προσομοίωσης μικροκλίματος (β. ECOTECT, γ. ENVI-met, δ. Fluent, ε. RadTherm)

3. ΜΕΘΟΔΟΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΩΝ

Ανάλογα με τη μέθοδο υπολογισμών ή προσομοίωσης τα εργαλεία διακρίνονται σε αριθμητικά ή εμπειρικά μοντέλα και σε αναλυτικά μοντέλα.

Τα εμπειρικά μοντέλα προέρχονται κυρίως από την επεξεργασία δεδομένων μετρήσεων και εμπειρικών παρατηρήσεων. Πρόκειται για εύχρηστα εργαλεία που προσφέρουν ευκολία και ταχύτητα υπολογισμών, όμως περιλαμβάνουν σε μεγάλο βαθμό την επίδραση των ιδιοτεροτήτων της τοποθεσίας, της μεθόδου και των συνθηκών της έρευνας, με αποτέλεσμα η ισχύς τους να περιορίζεται σε συγκεκριμένο τόπο ή παρόμοιους και σε συγκεκριμένες ή παρόμοιες συνθήκες. Η εφαρμογή τέτοιων μοντέλων σε περιπτώσεις με διαφορετικά χαρακτηριστικά (γεωγραφική θέση, ανάγλυφο εδάφους, τύπος αστικού περιβάλλοντος, κλιματικά δεδομένα κ.α.) είναι πιθανόν να οδηγήσει σε ανακριβή αποτελέσματα και πρέπει να εξετάζεται προσεκτικά. Εμπειρικά μοντέλα έχουν δημιουργηθεί μεταξύ άλλων για τον υπολογισμό της αστικής θερμικής νησίδας (Oke 1987), για τον υπολογισμό θερμοκρασιών περιβάλλοντος μέσα σε αστικά αίθρια (Cadima 2005), για την εκτίμηση θερμικών δεικτών (Nikolopoulou και άλλοι 2004, Givoni και άλλοι 2003) κ.α.. Αξίζει να αναφερθεί ότι εμπειρικά μοντέλα έχουν συνδυαστεί και με λογισμικά GIS για την παρεμβολή τιμών, την διαμόρφωση χαρτών μικροκλίματος και τον ενεργειακό σχεδιασμό αστικών περιοχών (Adolphe και άλλοι 2002, Crawford 2002, Andrade και Alcoforado 2008, Balocco και Grazzini 2000, Vieira και Vasconcelos 2003).

Τα αναλυτικά μοντέλα χρησιμοποιούν μαθηματικές σχέσεις για να περιγράψουν φυσικά φαινόμενα και διεργασίες και πραγματοποιούν υπολογισμούς στον χώρο και τον χρόνο. Πρόκειται είτε για μεμονωμένες σχέσεις που βασίζονται σε νόμους της φυσικής είτε για σύνολα εξισώσεων που περιλαμβάνονται σε στατικά ή δυναμικά λογισμικά προσομοίωσης. Η προσομοίωση του μικροκλίματος σε υπαίθριους χώρους περιλαμβάνει σημαντικές παραδοχές και απλοποιήσεις, σε καμία περίπτωση δεν μπορεί να αναπαραστήσει ακριβώς τις πολύπλοκες φυσικές διεργασίες, ενώ συχνά τα μοντέλα εμπεριέχουν και εμπειρικούς συντελεστές. Σύμφωνα με τον Ρουμελιώτη (2001) η δημιουργία μοντέλων για προσομοίωση είναι μια δύσκολη τεχνική που πρέπει να εξισορροπήσει αντικρουόμενους παράγοντες. Το μοντέλο πρέπει να είναι αρκετά απλό για να κατασκευαστεί και να μελετηθεί αλλά και αρκετά πολύπλοκο ώστε να αντιπροσωπεύει πιστά το υπό μελέτη σύστημα. «Η κατασκευή του μοντέλου αποτελεί ίσως το πιο σημαντικό βήμα για την προσομοίωση του συστήματος, επειδή η ποιότητα και η αξιοπιστία του καθορίζουν και την αξιοπιστία της προσομοίωσης». Όσο πιο λεπτομερές είναι η περιγραφή των φυσικών διεργασιών και των γεωμετρικών στοιχείων τόσο πιο χρονοβόρα και απαιτητική σε υπολογιστική ισχύ είναι η διαδικασία της προσομοίωσης.

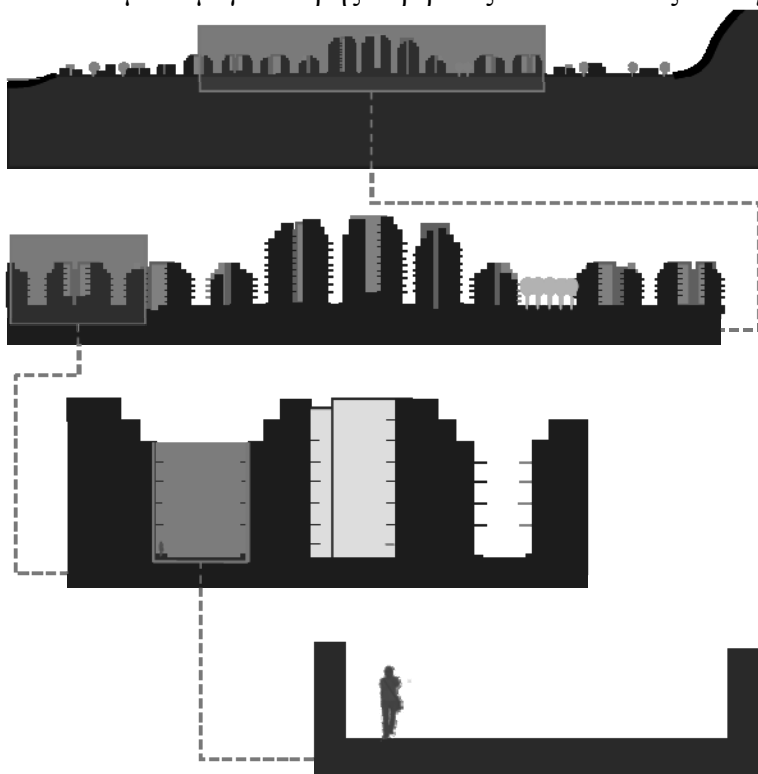
4. ΚΛΙΜΑΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

Τα μοντέλα που χρησιμοποιούνται για την προσομοίωση του αστικού περιβάλλοντος διακρίνονται, ανάλογα με τη κλίμακα ανάλυσης, σε μοντέλα μεσοκλίμακας και μοντέλα μικροκλίμακας, και σε

πολλές περιπτώσεις συνδυάζονται και με μοντέλα ανάλυσης του ενεργειακού ισοζυγίου του ανθρώπινου σώματος (βλ. και Εικόνα 2).

Τα μοντέλα μεσοκλίμακας αναπαριστούν διεργασίες από το στρώμα του αστικού ορίου (Urban Boundary Layer) και πέρα από τα όρια του αστικού χώρου. Στα μοντέλα αυτά περιλαμβάνονται επιδράσεις από τη γενική εδαφοκάλυψη, τη μορφολογία εδάφους γειτονικών περιοχών και ορεινών όγκων, θαλάσσιες επιρροές κ.α.. Τα αποτελέσματα αφορούν κλιματικά στοιχεία για ευρείες περιοχές, με λεπτομέρεια της τάξης του τετραγωνικού χιλιομέτρου και είναι χρήσιμα για την περιγραφή ροών αέρα, έντασης της θερμικής νησίδας, επίδραση μεγάλων εκτάσεων νερού, επίδραση αστικής πυκνότητας και μεγάλων αστικών πάρκων, διαφορές λόγω εδαφοκάλυψης, τραχύτητας ή ανακλαστικότητας της αστικής επιφάνειας κ.α. (Akbari και άλλοι 2001, Rosenfield και άλλοι 1998, Rosenfield και άλλοι 1995, Taha 1997a, Taha 1996, Taha και άλλοι 1997, Taha 1997b, Fan και Sailor 2005, Grossman-Clarke και άλλοι 2008, Olafsson 2005, Avissar 1996, Kuwagata και άλλοι 1994, Martilli 2007, Rotach 1999, Pielke και άλλοι 1992).

Σύμφωνα με τον Ooka (2007) τα μετεωρολογικά μοντέλα μεσοκλίμακας διαφοροποιούνται επίσης και σε απλά μοντέλα μεσοκλίμακας και σε μονοδιάστατα μοντέλα του αστικού ιστού που αρχικά αναπτύχθηκαν ως τμήμα μετεωρολογικού μοντέλου (μοντέλο επιφανειακού υποστρώματος για τον καθορισμό οριακών συνθηκών) και στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκαν και ανεξάρτητα για την εκτίμηση της επίδρασης της θερμικής νησίδας και ενίοτε σε συνδυασμό με μοντέλα ενεργειακής συμπεριφοράς κτιρίων. Έρευνες αναφέρουν πως τα μετεωρολογικά μοντέλα παράγουν αποτελέσματα μεγαλύτερης ακρίβειας όταν συνδυάζονται με τα μοντέλα του αστικού ιστού.



Εικόνα 2 Σχηματικές τομές αστικού περιβάλλοντος σε διαφορετικές κλίμακες (από το πολεοδομικό συγκρότημα, στην γειτονιά, στην αστική χαράδρα και στο ανθρώπινο σώμα)

Τα μοντέλα μικροκλίμακας αναπαριστούν διεργασίες μέσα στο στρώμα αστικού ιστού (Urban Canopy Layer) και στην αστική χαράδρα, δηλαδή στον χώρο που επηρεάζει τις συνθήκες άνεσης των πεζών και τη λειτουργία των κτιρίων. Στα μοντέλα αυτά περιλαμβάνονται επιδράσεις από τη μορφολογία των κτιρίων, από τα υλικά των επιφανειών των τοίχων και των δαπέδων, από την παρουσία φυτεύσεων κ.α.. Τα αποτελέσματα αφορούν τα στοιχεία του μικροκλίματος ενός αστικού υπαίθριου χώρου και των επιφανειών του, είτε ως μέσες τιμές για το σύνολο του χώρου (όπως πχ μιας τυπικής αστικής χαράδρας), είτε ως σημειακές τιμές για τα διαφορετικά τμήματα του χώρου,

ανάλογα με την ανάλυση κάθε μοντέλου ή λογισμικού, που μπορεί να φτάνει σε λεπτομέρεια της τάξης του τετραγωνικού μέτρου. Έχουν αναφερθεί και ορισμένα μοντέλα αστικού ιστού (urban canopy models), δηλαδή μικροκλίμακας, που συσχετίζονται άμεσα με μοντέλα μεσοκλίμακας (Freitas και άλλοι 2007, Hamdi και Schayes 2008, Kawamoto και Ooka 2006, Kawai και άλλοι 2007, Mills 1997, Oleson και άλλοι 2008α και 2008β).

Τα μοντέλα του ανθρώπινου θερμικού ισοζυγίου και των θερμο-φυσιολογικών αντιδράσεων του ανθρώπινου σώματος χρησιμοποιούνται για την περιγραφή των θερμικών συνθηκών σε κλειστούς και υπαίθριους χώρους με τον υπολογισμό των κατάλληλων δεικτών όπως π.χ. PMV (Fanger 1982), PET (μοντέλο MEMI, Hoppe 1999), PT (μοντέλο KMM, Jendritzky και άλλοι 2001) κ.α.. Για τον υπολογισμό των θερμικών δεικτών σε υπαίθριους χώρους είναι απαραίτητη η προσομοίωση του περιβάλλοντος ακτινοβολίας για τον υπολογισμό της μέσης ακτινοβολούμενης θερμοκρασίας MRT (Matzarakis και άλλοι 2000). Σύμφωνα με τον Ooka (2007) ένα από τα προβλήματα των μοντέλων του ανθρώπινου θερμικού ισοζυγίου είναι η ανακρίβεια στην πρόβλεψη της ανταλλαγής θερμότητας μεταξύ του ανθρώπινου σώματος και του περιβάλλοντος, που μπορεί να βελτιωθεί από τον υπολογισμό του συντελεστή μετάδοσης θερμότητας με συναγωγή στην επιφάνεια του σώματος με τη βοήθεια ανάλυσης CFD. Ένα παράδειγμα προσομοίωσης ανταλλαγής θερμότητας μεταξύ του ανθρώπινου σώματος και του περιβάλλοντος αναφέρει και ο Murakami και άλλοι (1999), ως μια από τις δυνατότητες ανάλυσης CFD σε διαφορετικές κλίμακες του αστικού περιβάλλοντος. Για τον καθορισμό των θερμικών συνθηκών έχουν αναπτυχθεί και εμπειρικά μοντέλα βασισμένα σε μετρήσεις και ερωτηματολόγια (ASV Νικολοπούλου και άλλοι 2004)..

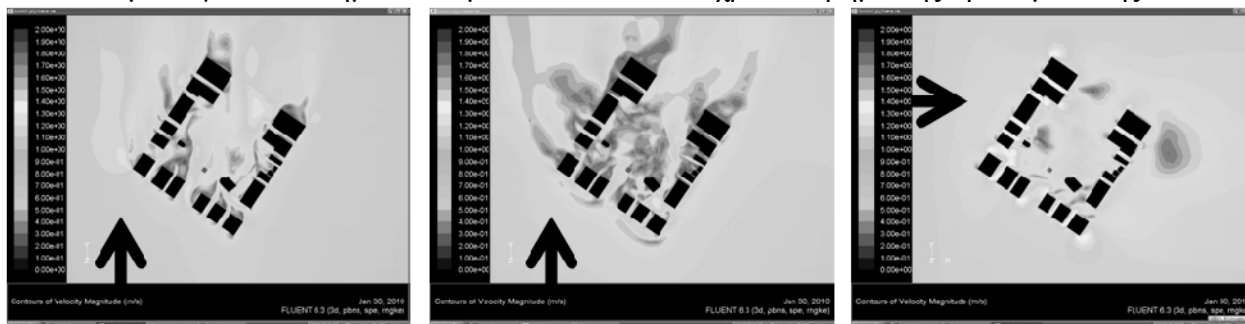
Σύμφωνα με μετρήσεις σε διάφορες πόλεις, το μικροκλίμα των αστικών χώρων δεν είναι ομοιογενές αλλά ποικίλει σημαντικά ακόμη και μεταξύ κοντινών σημείων σε οποιοδήποτε τμήμα της πόλης δεδομένων των διαφορών στην πυκνότητα και τη γεωμετρία του αστικού ιστού, και την παρουσία φυτεύσεων και νερού, επομένως «γενικευμένα μοντέλα του αστικού κλίματος έχουν μικρή αξία είτε για τη διάγνωση των συνθηκών είτε για την ενημέρωση του σχεδιασμού» των ανοικτών χώρων (Yannas 2001). Για την μελέτη του μικροκλίματος των υπαίθριων χώρων γύρω από και ανάμεσα στα κτίρια χρησιμοποιούνται τα μοντέλα μικροκλίμακας ή αλλιώς μοντέλα του αστικού ιστού και συνδυάζονται με μετεωρολογικά μοντέλα για τον καθορισμό οριακών συνθηκών και με μοντέλα ανθρώπινου ενεργειακού ισοζυγίου για τον υπολογισμό θερμικών δεικτών.

5. ΦΥΣΙΚΕΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ ΣΕ ΜΟΝΤΕΛΑ ΑΣΤΙΚΟΥ ΙΣΤΟΥ

Τα μοντέλα για την περιγραφή και τη μελέτη των συνθηκών στο αστικό περιβάλλον σπάνια πραγματοποιούν πλήρη προσομοίωση του μικροκλίματος, αλλά συνήθως περιλαμβάνουν την ανάλυση ορισμένων μόνο στοιχείων του μικροκλίματος, όπως π.χ. η ροή ακτινοβολίας, η ροή αέρα, η μεταφορά θερμότητας και υγρασίας, και χρησιμοποιούνται είτε μεμονωμένα είτε σε συνδυασμό με άλλα μοντέλα ή λογισμικά για πληρέστερη ανάλυση. Σύμφωνα με τον Ooka (2007) τα χαρακτηριστικά στοιχεία που καθορίζουν τα μοντέλα αστικού ιστού είναι το μοντέλο τύρβης, ο τρόπος υπολογισμού της ακτινοβολίας και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά με κύριο στοιχείο την πυκνότητα δόμησης. Τα μοντέλα μικροκλίματος συνήθως βασίζονται σε τρισδιάστατα μοντέλα υπολογιστικής ρευστοδυναμικής, που προσομοιώνουν τη ροή του αέρα ανάμεσα σε κτίρια, σε συνδυασμό με μοντέλα ακτινοβολίας και μετάδοσης θερμότητας με αγωγή, και χρησιμοποιούνται για την πρόβλεψη της λεπτομερούς κατανομής ροών και θερμοκρασιών σε πολύπλοκα αστικά περιβάλλοντα (βλ. και Εικόνα 3). Κάποια μοντέλα περιλαμβάνουν και την επίδραση των φυτεύσεων και της εξάτμισης υγρασίας. Στις περιπτώσεις που δεν περιλαμβάνεται μοντέλο CFD για την πρόβλεψη της ροής του αέρα, χρησιμοποιούνται δεδομένα μετρήσεων, εμπειρικοί συντελεστές ή απλουστευτικές παραδοχές.

Η πολυπλοκότητα των μοντέλων εξαρτάται από τον αριθμό των μεταβλητών παραμέτρων και των παραδοχών που υιοθετούνται αλλά και από το μέγεθος και τη λεπτομέρεια της αναπαράστασης της υπό μελέτη περιοχής. Κάποια μοντέλα χρησιμοποιούν εμπειρικά δεδομένα, απλουστευτικές παραδοχές και απλές γεωμετρίες αστικής χαράδρας (περιγραφή ύψους και πλάτους) και περιορίζονται στην περιγραφή και αναζήτηση κάποιων μεμονωμένων μικροκλιματικών στοιχείων

όπως πχ η μέση τιμή της θερμοκρασίας αέρα ανάμεσα στα κτίρια για τη σύνδεσή τους με μοντέλα ενεργειακής συμπεριφοράς κτιρίων. Άλλα περιγράφουν ένα μεγάλο τμήμα των φυσικών διεργασιών που συμβάλλουν στη διαμόρφωσή του μικροκλίματος, λύνουν εξισώσεις δυναμικά στο χώρο και το χρόνο, χρησιμοποιούν πολύπλοκα τρισδιάστατα γεωμετρικά μοντέλα, και υπολογίζουν αναλυτικά αποτελέσματα για κάθε σημείο του μοντέλου και κάθε χρονικό βήμα της προσομοίωσης.



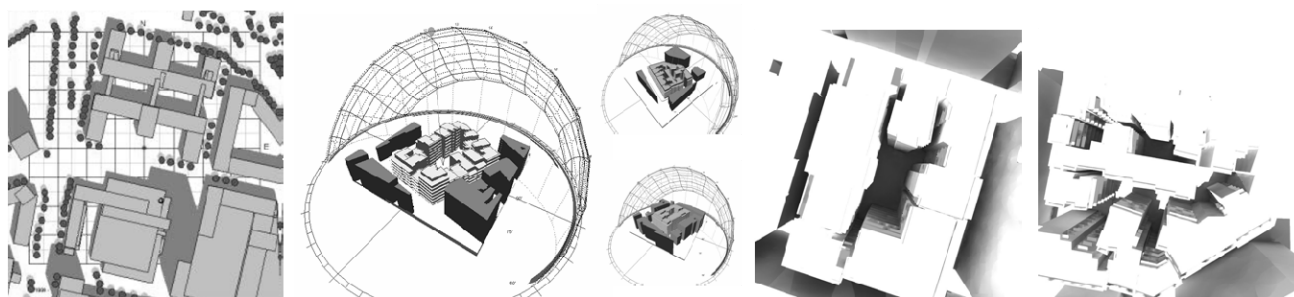
Εικόνα 3 Αποτελέσματα προσομοίωσης ροής αέρα με CFD (Fluent) που απεικονίζουν τη διαφοροποίηση της ροής σε μια αστική πλατεία (ταχύτητα ανέμου) ανάλογα με τη διεύθυνση και την ταχύτητα του επικρατούντος ανέμου

Μεταξύ των μοντέλων CFD για την πρόβλεψη της ροής αέρα, τα μοντέλα LES (large eddy simulation) κάνουν πιο ακριβείς προβλέψεις από τα μοντέλα RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes), όμως σημειώνεται εκτενής και γενικευμένη χρήση των μοντέλων RANS, λόγω της ευκολίας στη χρήση τους και των χαμηλών απαιτήσεών τους σε υπολογιστική ισχύ (Ooka 2007, Franke και άλλοι 2004). Στις περισσότερες περιπτώσεις προσομοίωσης υπαίθριων χώρων με μοντέλα RANS, χρησιμοποιείται το μοντέλο τύρβης k-ε και συνδυάζεται με επιπλέον μοντέλα, ή με άλλα λογισμικά (βλ. μεταξύ άλλων Ashie και άλλοι 1999, Benson και άλλοι 2008, Chen και άλλοι 2004, Huang και άλλοι 2004, Kim και Baik 2004, Lee και Fernando 2004, Massa 2002, Murakami και άλλοι 1999, Rajapaksha και άλλοι 2002, Robitu και άλλοι 2006, Skote και άλλοι 2005, Takahashi και άλλοι 2004, Takebayashi και Moriyama 2004).

Από τα μοντέλα προσομοίωσης του αστικού μικροκλίματος κάποια περιλαμβάνουν και την επίδραση των φυτεύσεων όπως το λογισμικό ENVI-met που περιλαμβάνει και μοντέλο τύρβης k-ε (Bruse 2004,), το αναλυτικό Green CTTC model (Shashua-Bar και Hoffman 2004), το εμπειρικό μοντέλο πρόβλεψης της επίδρασης των δέντρων σε αστικές περιοχές των Shashua-Bar και Hoffman 2000, το δισδιάστατο αναλυτικό μοντέλο των Alexandri και Jones (2008), το αριθμητικό μοντέλο ανάλυσης φυτεμένων δωματίων της Palomo del Barrio (1999) κ.α.. Άλλα μοντέλα δίνουν αποτελέσματα για το μικρόκλιμα της αστικής χαράδρας που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ανάλυση της ενεργειακής απόδοσης κτιρίων όπως το Canyon Air Temperature model (Erell και Williamson 2006) ή συνδυάζονται με μοντέλο ενεργειακής συμπεριφοράς κτιρίου όπως το Green Canyon (Sanchez de la Flor και Alvarez Dominguez 2004, Lopes και άλλοι 2001) που περιλαμβάνει επίσης την επίδραση φυτεύσεων και νερού, και το Architectural Urban Soil Simultaneous Simulation Model ή AUSSSM TOOL (Tanimoto και άλλοι 2004). Άλλα μοντέλα πρόβλεψης στοιχείων του αστικού μικροκλίματος που έχουν αναφερθεί είναι το URBANm code (Erell και Williamson 2002), το CTTC model (Swaid 1993), και άλλα απλά μοντέλα και αλγόριθμοι μικροκλίμακας (Sakakibara 1996, Nakamura και Oke 1988). Σημειώνονται, επίσης, ορισμένα μοντέλα υπολογισμού θερμοκρασίας περιβάλλοντος σε αυλές και αίθρια που βασίζονται είτε σε εμπειρικά δεδομένα είτε σε θεωρητικές σχέσεις (Cadima 2005, Alvarez και άλλοι 1998).

Για την περιγραφή και την μελέτη των συνθηκών στο αστικό περιβάλλον, έχουν χρησιμοποιηθεί μοντέλα που βασίζονται στο ενεργειακό ισοζύγιο των επιφανειών ή επιφανειών και ατμόσφαιρας και επικεντρώνονται στην ανάλυση επιμέρους δεδομένων όπως πχ. η εξάτμιση υγρασίας από το έδαφος, από πορώδη δάπεδα ή από φυτεύσεις (Asaeda και Ca 2000, Ca και άλλοι 1998, Pennman 1948, Ventura και άλλοι 2006, Michalakakou 2002, Michalakakou και άλλοι 1997), η ροή αποθήκευσης θερμότητας στην επιφάνεια της αστικής χαράδρας (Arnfield και Grimmond 1998, Grimmond και Oke 1999a, Grimmond και άλλοι 1991, Barzyk και Frederick 2008), η έκθεση των επιφανειών στην ηλιακή ακτινοβολία ή γενικότερα το περιβάλλον ακτινοβολίας κ.α...

Ειδικότερα για την ανάλυση του περιβάλλοντος ακτινοβολίας έχουν χρησιμοποιηθεί μεμονωμένα ή σε συνδυασμό με άλλα μοντέλα, μεταξύ άλλων τα προγράμματα SOLENE (Dessi 2001, Lehtihet και άλλοι 2002, Masmoudi και Mazouz 2004, Robitu και άλλοι 2006) και RadTherm (Echave και Cuchi 2005), καθώς και τα προγράμματα RayMan (Matzarakis και άλλοι 2000), και SOLWEIG 1.0 (Lindberg και άλλοι 2008) για τον υπολογισμό της μέσης θερμοκρασίας ακτινοβολίας MRT και θερμικών δεικτών, και τα προγράμματα ECOTECT (Alexandri και Jones 2008), SHADING (Yeziro και άλλοι 2002), TOWNSCOPE (Katzshner και άλλοι 2003, Massa 2002) και HelioDat (Mertens 1999) για τον υπολογισμό του σκιασμού των επιφανειών (βλ. και Εικόνα 4). Το πρόγραμμα Radiance έχει χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό της απορροφητικότητας της αστικής επιφάνειας και την επίδραση στο φαινόμενο της θερμικής νησίδας (Steeemers και άλλοι 1998). Επίσης έχουν δημιουργηθεί μοντέλα για την εκτίμηση της θερμικής ακτινοβολίας από τον ουρανό που προσπίπτει στις επιφάνειες (Iziomon και άλλοι 2003), και μοντέλα που βασίζονται στο ανθρώπινο ενεργειακό ισοζύγιο για την περιγραφή των θερμικών συνθηκών στην αστική χαράδρα (Pearlmutter και άλλοι 2007, 2006, 1999 και Pearlmutter 1998).



Εικόνα 4 Εικόνες από προσομοίωση ηλιακής γεωμετρίας και σκιασμού επιφανειών α. RayMan (Matzarakis και άλλοι 2006), β & γ. ECOTECT, δ&ε. Radiance (LBNL)

Επίσης έχουν αναπτυχθεί μοντέλα επεξεργασίας εικόνας με αλγόριθμους ανάλυσης της αστικής «υψής» που περιγράφουν το μικρόκλιμα με βάση την μορφή του αστικού περιβάλλοντος (DEM: Digital Elevation Models), υπολογίζουν παραμέτρους σχετικές με τη ροή αέρα και την διασπορά ρύπων, και συσχετίζουν τα δεδομένα του αστικού χώρου με την ενεργειακή συμπεριφορά κτιρίων (Ratti, Di Sabatino και Britter 2005 Ratti, Baker και Steemers 2005 & Ratti, Raydan και Steemers 2003, Steemers 2003 και Nikolopoulou και άλλοι 2004) αλλά και μοντέλα που υπολογίζουν το μέγιστο όγκο και μορφή κτιρίων που επιτρέπει την ανεμπόδιστη ηλιακή πρόσβαση σε κτίρια και υπαίθριους χώρους για ορισμένο χρονικό διάστημα του έτους (Capeluto και Shavin 2000), ή τη μέση ηλιακή ανακλαστικότητα (albedo) ενός τμήματος της αστικής επιφάνειας (Chimklai και άλλοι 2004, Tsangrassoulis και Santamouris 2003).

Τέλος σημειώνεται ότι στο ερευνητικό πρόγραμμα RUROS (Nikolopoulou και άλλοι 2004) μελετήθηκε η αναβάθμιση των υπαίθριων χώρων σε διάφορες πόλεις της Ευρώπης, ως προς το μικρόκλιμα και τις συνθήκες άνεσης των πεζών, με τη χρήση πλήθους διαφορετικών λογισμικών. Ειδικότερα, πραγματοποιήθηκε ανάλυση της αστικής μορφολογίας με συνδυασμό λογισμικών σχεδιαστικής αναπαράστασης, επεξεργασίας εικόνας και animation, προγράμματα μαθηματικής ανάλυσης και προγραμματισμού και μοντέλα υπολογιστικής ρευστοδυναμικής (AutoCAD, 3d Studio, Maya, Lightwave, Adobe Photoshop, Corel Photopaint, Matlab, Flovent, Fluent, DEM).

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα εργαλεία υπολογισμού του μικροκλίματος ανοικτών χώρων παρέχουν χρήσιμες πληροφορίες για τις επιπτώσεις του αρχιτεκτονικού και του αστικού σχεδιασμού στο περιβάλλον των πόλεων, για τον ακριβή υπολογισμό της ενεργειακής απόδοσης των κτιρίων και τον έλεγχο των θερμικών συνθηκών και την αναβάθμιση των ίδιων των υπαίθριων χώρων. Η ποσοτική αξιολόγηση των στοιχείων του μικροκλίματος είναι εφικτή αλλά και αναγκαία τόσο για την βελτίωση της

ενεργειακής απόδοσης κτιρίων όσο και για τη διαμόρφωση βιώσιμων και ελκυστικών υπαίθριων χώρων με στόχο την αξιοποίησή τους από τους κατοίκους της πόλης και όλα τα κοινωνικοοικονομικά και περιβαλλοντικά οφέλη που προκύπτουν από αυτήν. Το πλήθος και η ποικιλία των διαθέσιμων υπολογιστικών εργαλείων για την πρόβλεψη των συνθηκών στο αστικό περιβάλλον, με τις διαφορετικές δυνατότητες και περιορισμούς, επιβάλουν την αναζήτηση των σημαντικότερων παραμέτρων που επηρεάζουν τη διαμόρφωση του μικροκλίματος σε κάθε περίπτωση και την επιλογή των κατάλληλων εργαλείων και της κατάλληλης μεθόδου για την αξιόπιστη αναπαράστασή του.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Adolphe, L., M. Maizia, J.L. Izard, A. Chatelet, A. Boussoulim, K. Ait-Ameur, A. Barlet, A. Casal, K. Lehtihet και J. Marcillat (2002). Sagacities: Towards a management aided system for integrating outdoor climate into the design of urban spaces. Proceedings of the 19th PLEA Conference, Toulouse, France.
- Akbari, H., S. Menon και A. Rosenfeld (2007). Global cooling: effect of urban albedo on global temperature. 2nd PALENC Conference, 28th AIVC Conference on Building Low Energy Cooling and Advanced Ventilation Technologies in the 21st Century, September 2007, Crete, Greece.
- Akbari, H., M. Pomerantz και H. Taha (2001). Cool surfaces and shade trees to reduce energy use and improve air quality in urban areas. *Solar Energy Journal* Vol. 70 No 3 pp295-310, Elsevier Science Limited.
- Alexandri E. και P. Jones (2008). Temperature decreases in an urban canyon due to green walls and green roofs in diverse climates. *Building and Environment* vol. 43, pp480-493
- Alvarez, S., F. Sanchez και J.L. Molina (1998). "Airflow Patterns at Courtyards" in *Environmentally Friendly Cities*, Proceedings of PLEA '98. James & James Science Publishers Ltd, London, pp503-506.
- Andrade, H. και M.J. Alcoforado (2008). Microclimatic variation of thermal comfort in a district of Lisbon (Telheiras) at night. *Theoretical and Applied Climatology* vol. 92, pp225-237
- Arnfield, A.J. και C.S.B. Grimmond (1998). An urban canyon energy budget model and its application to urban storage heat flux modelling. *Energy and Buildings* vol. 27 pp61-68.
- Arthur-Hartranft S. T., T. N. Carlson και K.C. Clarke (2003). Satellite and ground based microclimate and hydrologic analyses coupled with a regional urban growth model. *Remote Sensing of Environment* vol. 86, pp385-400.
- Asaeda, T. και V.T. Ca (2000). Characteristics of permeable pavement during hot summer weather and impact on the thermal environment. *Building and Environment*, 35, pp363-375.
- Ashie, Y., V.T. Ca και T. Asaeda (1999). Building canopy model for the analysis of urban climate. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* vol. 81, pp237-248.
- Avisar, R. (1996). Potential effects of vegetation on the urban thermal environment. *Atm. Env.* 30, 3 pp 437-448
- Balocco, C. και G. Grazzini (2000). Thermodynamic parameters for energy sustainability of urban areas. *Solar Energy Journal* vol.69 No. 4 pp351-356.
- Barzyk, T.M. και J.E. Frederick (2008). A Semiempirical Microscale Model of the Surface Energy Balance and Its Application to Two Urban Rooftops. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, Vol. 47, no3, pp819-834
- Benson, J., T. Ziehn, N.S. Dixon και A.S. Tomlin (2008). Global sensitivity analysis of a 3D street canyon model - Part II: Application and physical insight using sensitivity analysis. *Atmospheric Environment* Vol. 42, pp1874-1891
- Bruse, M. (2004). ENVI-met v.3.0: Updated Model Overview. <http://www.envi-met.com/>
- Bruse, M. και H. Fleer (1998). Simulating surface-plant-air interactions inside urban environments with a three dimensional model. *Environmental Modelling & Software* vol.13 pp373-384.
- Ca, V.T., T. Asaeda, και E.M. Abu (1998). Reduction in air conditioning energy caused by a nearby park, *Journal of Energy and Buildings* 29 pp83-92.
- Cadima, P. (2005). Form and Microclimate: Spatial Confinement and Heat in the Urban Patio. Proceedings of the 22nd Conference of Passive and Low Energy Architecture, Beirut, Lebanon, November 2005.
- Cadima, P. (1998). "The effect of design parameters on environmental performance of the urban patios: a case study in Lisbon". *Environmentally Friendly Cities*, PLEA '98. James & James Science Publishers Ltd, London, pp171-174.
- Capeluto, I.G. και E. Shaviv (2001). On the use of 'solar volume' for determining the urban fabric. *Solar Energy*, 70, 3, pp275-280
- Chalfoun, N.V. (2002). Sustainable urban design and outdoor space analysis using MRT and photography of scale models; a case study of the Rio Nuevo project in Tucson, Arizona, USA. 19th PLEA Conference, Toulouse, France.
- Chen, H., R. Ooka, K. Harayama, S. Kato, και X. Li (2004). Study on outdoor thermal environment of apartment block in Shenzhen, China with coupled simulation of convection, radiation and conduction. *Energy & Buildings*, 36, pp1247-1258
- Chimklai, P., A. Hagishima και J. Tanimoto (2004). A computer system to support albedo calculation in urban areas. *Building and Environment* Volume 39, Issue 10, pp 1213-1221

- Crawford C.A. (2002). Analysing the extent to which morphological indicators give a useful description of the urban form. Proceedings of the 19th PLEA Conference, Toulouse, France.
- Dessi, V. (2001). Evaluation of microclimate and thermal comfort in open urban space. In proceedings of 18th PLEA conference, Florianopolis, Brazil.
- Echave C. και A. Cuchi (2005). Influence of Material's Thermal Inertia on Long Wave Radiation Balance and Outdoors Comfort. In proceedings of 22nd PLEA conference, Beirut, Lebanon.
- Erell, E. και T. Williamson (2006). Simulating air temperature in an urban street canyon in all weather conditions using measured data at a reference meteorological station. *International Journal of Climatology* Vol.26, pp1671-1694
- Erell, E. και T. Williamson (2002). Predicting Air Temperatures in the Urban Canopy Layer from Measured Reference Data. Proceedings of the 19th PLEA Conference, Toulouse, France.
- Fan, H. και D.J. Sailor (2005). Modeling the impacts of anthropogenic heating on the urban climate of Philadelphia: a comparison of implementations in two PBL schemes. *Atmospheric*
- Fanger, P.O. (1982). *Thermal Comfort; Analysis and Applications in Environmental Engineering*. Robert E. Krieger Publishing Company, Malabar, Florida.
- Franke, J., C. Hirsch, A.G. Jensen, H.W. Krus, M. Schatzmann, P.S. Westbury, S.D. Miles, J.A. Wisse και N.G. Wright (2004). Recommendations on the use of CFD in predicting pedestrian wind environment. COST Action C14 "Impact of Wind and Storms on City Life and Built Environment. Working group 2-CFD techniques. 17.05.2004. Version 1.0
- Freitas, E.D., C.M. Rozoff, W.R. Cotton και P.L. Silva Dias (2007). Interactions of an urban heat island and sea-breeze circulations during winter over the metropolitan area of Sao Paulo, Brazil. *Boundary Layer Meteorology* 122, pp43-65
- Givoni, B., M. Noguchi, H. Saaroni, O. Pochter, Y. Yaacov, N. Feller και S. Becker (2003). Outdoor comfort research issues. *Energy and Buildings* Vol. 35, Issue 1, pp77-86.
- Grimmond, C. S. B., και Oke, T. R. (1999). Heat Storage in Urban Areas: Local-Scale Observations and Evaluation of a Simple Model. *Journal of Applied Meteorology*, 38, 1262-1292
- Grimmond, C.S.B., H.A. Cleugh και T.R. Oke (1991). An objective urban heat storage model and its comparison with other schemes. *Atmospheric Environment* Vol.25B, No.3, pp311-326
- Grossman-Clarke, S., Y. Liu, J.A. Zehnder και J.D. Fast (2008). Simulations of the Urban Planetary Boundary Layer in an Arid Metropolitan Area. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, Vol.47, no3, pp752-768
- Hamdi, R. και G. Schayes (2008). Sensitivity study of the urban heat island intensity to urban characteristics. *International Journal of Climatology* Vol.28, pp973-982
- Hoppe, P. (1999). The Physiological equivalent temperature - a universal index for the biometeorological assessment of the thermal environment. *International Journal of Biometeorology* Vol. 43, pp71-75
- Hoyano, A., M. Marui, S. Yoon και A. Ino (2002). "Proposal of sustainable urban blocks and evaluation of their thermal environments in Metro Manila". Proceedings of the 19th PLEA Conference, Toulouse, France.
- Huang, H. R. Ooka και S. Kato (2004). Study on outdoor environment around cooling towers of large heating and cooling system in summer in Tokyo- field measurement and coupled simulation of convection, radiation and conduction. 5th Conference on Urban Environment, 23-26 August 2004.
- Iziomon, M.G., H. Mayer και A. Matzarakis (2003). Downward atmospheric longwave irradiance under clear and cloudy skies: Measurement and parameterization. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* Vol.65, pp1107-1116.
- Jendritzky, G., H. Staiger, K. Bucher, A. Graetz και G. Laschewski (2001). The Perceived temperature: The Method of the Deutscher Wetterdienst for the Assessment of Cold Stress and Heat Load for the Human Body. In ISB Commission 6 for the development of a Universal Thermal Climate Index (UTCI). Meeting Report, June 7-8, 2001, Freiburg, Germany. *International Society of Biometeorology*.
- Katzshner, L., U. Bosch και M. Rottgen (2003). A methodology for bioclimatic microscale mapping of open spaces. Fifth International Conference on Urban Climate, Lodz, 2003. Proceedings, Vol. 2, pp61-65
- Kawai, T., M. Kanda, K. Narita και A. Hagishima (2007). Validation of a numerical model for urban energy-exchange using outdoor scale-model measurements. *International Journal of Climatology* vol. 27, pp1931-1942
- Kawamoto, Y. και R. Ooka (2006). Analysis of the radiation field at pedestrian level using a meso-scale meteorological model incorporating the urban canopy model. 6th International Conference on the Urban Climate (ICUC6), 12-16 June 2006.
- Kim, J.J. και J.J. Baik (2004). A numerical study of the effects of ambient wind direction on flow and dispersion in urban street canyons using the RNG k-ε turbulence model. *Atmospheric Environment* Vol.38, pp3039-3048.
- Kuwagata, T., J. Kondo και M. Sumioka (1994). Thermal effect of the sea breeze on the structure of the boundary layer and the heat budget over land. *Boundary-Layer Meteorology* vol.67, pp119-144.
- Lee, S.M. και H.J.S. Fernando (2004). CFD modelling of fine scale flow and transport in the Houston Metropolitan Area, Texas. 5th Conference on Urban Environment, 23-26 August 2004
- Lehtihet, K., J.L. Izard, και J. Marciliat (2002). Urban trees effects in Mediterranean city. 19th PLEA Conference, Toulouse, France.
- Lindberg, F., B. Holmer και S. Thorsson (2008). SOLWEIG 1.0 - Modelling spatial variations of 3d radiant fluxes and mean radiant temperature in complex urban settings. *International Journal of Biometeorology* Vol.52 pp697-713

- Lopes, C., J. Adnot, M. Santamouris, N. Klitsikas, S. Alvarez και F. Sanchez (2001). Managing the Growth of the Demand for Cooling in Urban Areas and Mitigating the Urban Heat Island Effect. In Proceedings of ECEEE Congress, Mandaliou, France, 11-16 June 2001, Vol II, pp130-143
- Martilli, A. (2007). Current research and future challenges in urban mesoscale modelling. *Int J of Clim*, 27, pp1909-1918
- Masmoudi, S. και S. Mazouz (2004). Relation of geometry and thermal comfort around buildings in urban settings, the case of hot arid regions. *Energy and Buildings* Vol. 36, pp710-719
- Massa, H. (2002). The Potential of Convective Heat Exchange Mechanisms in the Cooling and Ventilation of Urban Microclimates. Proceedings of the 19th PLEA Conference, Toulouse, France.
- Matzarakis, A., F. Rutz και H. Mayer (2007). Modelling radiation fluxes in simple and complex environments—application of the RayMan model. *International Journal of Biometeorology*. Vol. 51, pp323-334
- Matzarakis, A., H. Mayer και F. Rutz (2002). Radiation and thermal comfort. In proceedings of 6th Hellenic Conference in Meteorology Climatology and Atmospheric Physics, September 2002, Ioannina, Greece
- Matzarakis, A., F. Rutz και H. Mayer (2000). Estimation and calculation of the mean radiant temperature within urban structures. In *Biometeorology and Urban Climatology at the Turn of the Millenium* (ed.by R.J. de Dear, J.D. Kalma, T.R. Oke and A. Auliciems): Selected Papers from the Conference ICB-ICUC '99, Sydney, WCASP-50, WMO/TD No 1026, 273-278
- Mertens, E. (1999). Bioclimate and city planning-open space planning. *Atmospheric Environment* Vol.33, pp4115-4123.
- Mihalakakou, G. (2002). On estimating soil surface temperature profiles. *Energy and Buildings* Vol. 34, pp251-259
- Michalakakou, G., M. Santamouris, N. Papanikolaou, C. Cartalis και A. Tsangrassoulis (2004). Simulation of the Urban Heat Island Phenomenon in Mediterranean Climates. *Pure and Applied Geophysics* vol.161 pp429-451
- Mihalakakou, G., H.A. Flocas, M. Santamouris και C.G. Helmis (2002). Application of Neural Networks to the Simulations of the Heat Island over Athens, Greece, Using Synoptic Types as a Predictor. *J of Ap Met* 41, pp519-527
- Michalakakou, G., M. Santamouris, J.O. Lewis and D.N. Asimakopoulos (1997). On the application of the energy balance equation to predict ground temperature profiles. *Solar Energy* vol. 60 pp181-190
- Mills, G. (1997). An Urban Canopy - Layer Climate Model. *Theoretical and Applied Climatology* Vol.57, pp229-244
- Montavez, J.P., J.F. Gonzalez-Rouco και F. Valero (2008). A simple model for estimating the maximum intensity of the nocturnal urban heat island. *International Journal of Climatology* Vol.28, pp235-242
- Murakami, S., R. Ooka, A. Mochida, S. Yoshida και S. Kim (1999). CFD analysis of wind climate from human scale to urban scale. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol 81, pp57-81.
- Nakamura, Y. και T. R. Oke (1988). Wind, temperature and stability conditions in an east-west oriented urban canyon. *Atmospheric Environment* Vol.22, No 12, pp2691-2700
- Nikolopoulou, M., N.Chrisomallidou, K. Steemers, R. Compagnon, J. Kang, N. Kofoed, G. Scudo, και L. Katschner (2004). Rediscovering the Urban Realm and Open Spaces (RUROS), 2001-2003. Key Action 4, "City of Tomorrow and Cultural Heritage", from the program "Energy, Environment and Sustainable Development", within the Fifth Framework Program of the EU. ISBN: 960-86907-2-2
- Oke, T.R. (1987) "Boundary Layer Climates" second ed. Methuen & Co, London.
- Olafsson, H. (2005). Surface roughness and local winds. ICAM, May 2005, Croatia
- Oleson, K.W., G.B. Bonan, J. Feddema, M. Vertenstein και C.S.B. Grimmond (2008a). An Urban Parametrization for a Global Climate Model. Part I: Formulation and Evaluation for two cities. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, Vol. 47, no4, pp1038-1060
- Oleson, K.W., G.B. Bonan, J. Feddema και M. Vertenstein (2008β). An Urban Parametrization for a Global Climate Model. Part II: Sensitivity to Input Parameters and the Simulated Urban Heat Island in Offline Simulations. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, Vol. 47, no4, pp1061-1076
- Ooka, R. (2007). Recent development of assessment tools for urban climate and heat-island investigation especially based on experiences in Japan. *International Journal of Climatology* vol. 27, pp1919-1930
- Palomo del Barrio, E. (1998). Analysis of the green roofs cooling potential in buildings. *Energy & Buildings* 27, pp179-193
- Pearlmutter, D., P. Berliner και E. Shaviv (2007). Integrated modelling of pedestrian energy exchange and thermal comfort in urban street canyons. *Building and Environment* Vol. 42, pp2396-2409
- Pearlmutter, D., P. Berliner και E. Shaviv (2006). Physical modeling of pedestrian energy exchange within the urban canopy. *Building and Environment* Vol. 41, Issue 6 pp783-795
- Pearlmutter, D., A. Bitan και P. Berliner (1999). Microclimatic analysis of "compact" urban canyons in an arid zone. *Atmospheric environment* Vol. 33, pp4143-4150.
- Pearlmutter, D. (1998). Street Canyon Geometry and Microclimate: Designing for Urban Comfort under Arid Conditions. *Environmentally Friendly Cities, PLEA '98*. James & James Science Publishers Ltd, London, pp163-166.
- Penman, H.L. (1948). Natural Evaporation from Open Water, Bare Soil and Grass. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Science*, Vol. 193, No. 1032, pp120-145.
- Pielke, R.A., W.R. Cotton, R.L. Walko, C.J. Tremback, W.A. Lyons, L.D. Grasso, M.E. Nicholls, M.D. Moran, D.A. Wesley, T.J. Lee και J.H. Copeland (1992). A Comprehensive Meteorological Modeling System - RAMS. *Meteorology and Atmospheric Physics*, Vol. 49, pp69-91

- Rajapaksha, I., H. Nagai και M. Okumiya, (2002). A tropical courtyard building as an upwind air funnel. A computational analysis. Proceedings of the 19th PLEA Conference, Toulouse, France.
- Ratti, C., N. Baker και K. Steemers (2005). Energy consumption and urban texture. *Energy & Buildings*, 37,7, pp762-776
- Ratti, C., S. Di Sabatino και R. Britter (2005). Urban texture analysis with image processing techniques: winds and dispersion. *Theoretical and Applied Climatology* Vol. 84, No 1-3, pp77-90
- Ratti, C., D. Raydan, και K. Steemers (2003). Building form and environmental performance: archetypes, analysis and an arid climate. *Energy and Buildings* Vol. 35, pp49-59
- Robitu, M., M. Musy, C. Inard και D. Groleau (2006). Modeling the influence of vegetation and water pond on urban microclimate. *Solar Energy* vol. 80 pp435-447
- Rosenfeld, A.H., J.J. Romn, H. Akbari και M. Pomerantz (1998). Cool communities: strategies for heat island mitigation and smog reduction. *Energy and Buildings* vol.28, pp51-62.
- Rosenfeld, A.H., H. Akbari, S. Bretz, B.L. Fishman, D.M. Kurn, D. Sailor, και H. Taha (1995). Mitigation of urban heat islands: materials, utility, programs, updates. *Journal of Energy and Buildings* 22 pp255-265.
- Rotach, M.W. (1999). On the influence of the urban roughness sublayer on turbulence and dispersion. *Atmospheric Environment* Vol. 33, pp4001-4008
- Sailor, D.J. και H. Fan (2002). Modeling the diurnal variability of effective albedo for cities. *Atm. Env.* 36, pp713-725
- Sakakibara, Y., (1996). A numerical study of the effect of urban geometry upon the surface energy budget. *Atm. Env.* 30, 3, pp. 487-496.
- Sánchez de la Flor, F. και S. Alvarez Domínguez (2004). Modelling microclimate in urban environments and assessing its influence on the performance of surrounding buildings. *Energy and Buildings* Vol. 36, Issue 5, pp 403-413
- Shashua-Bar, L. και M.E. Hoffman (2004). Quantitative evaluation of passive cooling of the UCL microclimate in hot regions in summer, case study: urban streets and courtyards with trees. *Building and Environment*, 39,9, pp1087-1099
- Shashua-Bar, L. και M.E. Hoffman (2000). Vegetation as a climatic component in the design of an urban street. An empirical model for predicting the cooling effect of urban green areas with trees. *Energy & Buildings*, 31, pp221-235.
- Skote, M., M. Sandberg, U. Westerberg, L. Claesson και A.V. Johansson (2005). Numerical and experimental studies of wind environment in an urban morphology. *Atmospheric Environment* Vol. 39 pp6147-6158
- Steemers, K. (2003). Energy and the city: density, buildings and transport. *Energy and Buildings* Vol 35, Issue1, pp 3-14
- Steemers, K., N. Baker, D. Crowther, J. Dubiel και M. Nikolopoulou (1998). Radiation absorption and urban texture. *Building Research & Information* Vol. 26(2), pp103-112
- Swaid, H. (1993). Urban climate effects of artificial heat sources and ground shadowing by buildings. *International Journal of Climatology* Vol.13 pp797-812.
- Swaid H. και M.E. Hoffman (1989). The prediction of impervious ground surface temperature by the surface thermal time constant (STTC) model. *Energy and Building* 13, pp149-157.
- Taha, H. (1997a). Modelling the impacts of large-scale albedo changes on ozone air quality in the South Coast Air Basin. *Atmospheric Environment* vol.31, No 11, pp1667-1676
- Taha, H. (1997β). Urban climates and heat islands: albedo, evapotranspiration and anthropogenic heat. *Energy and Buildings* Vol. 25, pp99-103
- Taha, H. (1996). Modelling the impacts of increased urban vegetation on ozone air quality in the South Coast Air Basin. *Atmospheric Environment* vol.30, No 20, pp3423-3430
- Taha, H., S. Douglas και J. Haney (1997). Mesoscale meteorological and air quality impacts of increased urban albedo and vegetation. *Energy and Buildings* Vol. 25, pp169-177
- Takahashi, K., H. Yoshida, Y. Tanaka, N. Aotake και F. Wang (2004). Measurement of thermal environment in Kyoto city and its prediction by CFD simulation. *Energy and Building* Vol. 36, pp771-779
- Takebayashi, H. και M. Moriyama (2004). Study on the influence of sensible heat flux distribution on air temperature in the built-up area. Fifth Conference on Urban Environment, 23-26 August 2004.
- Tanimoto, J., A. Hagishima και P. Chimklai (2004). An approach for coupled simulation of building thermal effects and urban climatology. *Energy and Buildings*, Vol. 36, Issue 8, pp781-793
- Tsangrassoulis, A. και M. Santamouris (2003). Numerical estimation of street canyon albedo consisting of vertical coated glazed facades. *Energy and Buildings* Vol. 35, pp527-531
- Ventura, F., R.L. Snyder και K.M. Bali (2006). Estimating Evaporation from Bare Soil Using Soil Moisture Data. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. ASCE March-April 2006. pp153-158.
- Vieira, H. και J.Vasconcelos (2003). Urban morphology characterisation to include a GIS for climatic purposes in Lisbon. Discussion of two different methods. 5th ICUC Conference. Faculty of Geographical Sciences, Department of Meteorology and Climatology, University of Lodz, Poland. ISBN 83-916728-0-8
- Yannas, S. (2001). Toward More Sustainable Cities. *Solar Energy Journal*, 70,3 pp281-294, Elsevier Science Publishers, Oxford
- Yezioro, A., I.G. Capeluto και E. Shaviv (2002). Solar rights in the design of urban squares. 19th PLEA Conference, Toulouse, France.
- Ρουμελιώτης, Μ. (2001). Μοντελοποίηση και προσομοίωση. Προγραμμα Σπουδών: Πληροφορική, Θεματική Ενότητα: Γραμμικός προγραμματισμός και Μοντελοποίηση, Τόμος Α'. Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο, Σχολή Θετικών Επιστημών και τεχνολογίας, Πάτρα.

Πίνακας Π.1 Μοντέλα και λογισμικά που έχουν χρησιμοποιηθεί για την προσομοίωση υπαίθριων χώρων

<p>A. Μοντέλα αστικού ιστού & ενεργειακού ισοζυγίου 1. ENVI-met (Bruse και Fleer 1998, Bruse 2004) 2. Δισδιάστατο δυναμικό προγνωστικό μοντέλο μεταφοράς θερμότητας και μάζας σε μία τυπική αστική χαράδρα (Alexandri και Jones 2008) 3.Canyon Air Temperature model CAT (Erell και Williamson 2006) 4. URBANm code (Erell και Williamson 2002) 5.Green CTTC model (Shashua-Bar και Hoffman 2004) 6. CTTC Cluster Thermal Time Constant model (Swaid 1993) 7. STTC Surface Thermal Time Constant model (Swaid και Hoffman 1989) 8. Urban Canyon/Green Canyon (Sánchez de la Flor και Alvarez Domínguez 2004) 9.AUSSSM TOOL (Tanimoto κ.α.2004) 10. Αλγόριθμοι για A-Δ αστική χαράδρα (Nakamura και Oke 1988) 11. μοντέλο αστικού ιστού (Sakakibara 1996) 12 θερμοκρασία αιθρίου σε σχέση με γεωμετρία και ροή αέρα (Alvarez κ.α. 1998), 13.Objective Hysteresis Model (Grimmond κ.α. 1991), 14.Space Confinement factor (Cadima 2005), 15 Μονοδιάστατο ημι-εμπειρικό μοντέλο αστικού ενεργειακού ισοζυγίου (Barzyk και Frederick 2008), 16.Εμπειρικό μοντέλο πρόβλεψης επίδρασης δενδροφύτευσης.(Shashua-Bar και Hoffman 2000)</p>
<p>B. Μοντέλα CFD 1. winAir4 (Alexandri και Jones 2008), 2. 3d CFD μοντέλο τύρβης k-ε με μοντέλο κτιρίων και μοντέλο φυτεύσεων (Ashie κ.α. 1999), 3. MISKAM (Benson κ.α. 2008), 4. 3d CFD μοντέλο τύρβης k-ε με τρισδιάστατο μοντέλο ακτινοβολίας και μονοδιάστατο μοντέλο μεταφοράς θερμότητας με αγωγή (Chen κ.α.2004), 5. STAR-CD (Huang κ.α. 2004), 6. 3d CFD μοντέλο τύρβης k-ε RNG (Kim και Baik 2004), 7. SABRE v1.0 (Massa 2002), 8. 3d CFD μοντέλο τύρβης k-ε με μοντέλο ακτινοβολίας (Murakami κ.α. 1999), 9. CFD a-flow Microscale analysis μοντέλο τύρβης k-ε (Rajapaksha κ.α. 2002), 10. Fluent (Robitu κ.α. 2006) 11. CFD μοντέλο τύρβης k-ε με μοντέλο μεσοκλίμακας MM5 (Lee και Fernando 2004), 12.CFX Ansys Inc (Skote κ.α. 2005), 13. CFD με επιπλέον όρους εξάτμισης, τύρβης και ορμής για να περιλάβει την επίδραση των δέντρων σε συνδυασμό με μετάδοση θερμότητας με αγωγή και με ακτινοβολία (Takahashi κ.α. 2004), 14. CFD μοντέλο τύρβης k-ε (Takebayashi και Moriyama 2004)</p>
<p>Γ. Μοντέλα ακτινοβολίας (μοντέλα που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της ηλιακής ή και της θερμικής ακτινοβολίας και της μέσης ακτινοβολούμενης θερμοκρασίας και σε συνδυασμό με άλλα μοντέλα όπως CFD, θερμικών δεικτών) 1.RayMan (Matzarakis κ.α. 2000), 2.SOLWEIG (Lindberg κ.α. 2008), 3.ECOTECT σε συνδυασμό με 2d μοντέλο μικροκλίμακας (Alexandri και Jones 2008), 4.TOWNSCOPE (Katzshner κ.α. 2003, Massa 2002) 5. SOLENE (Dessi 2001, Lehtihet κ.α.2002, Masmoudi & Mazouz 2004, Robitu κ.α.2006) 6. HelioDat (Mertens 1999) 7. SHADING (Yezioro κ.α. 2002) 8. Radiance (Stemmers κ.α.1998) 9.RadTherm (Echave και Cuchi 2005), 12.MRT© (Chalfoun 2002) 11. μοντέλα ανταλλαγής ενέργειας μεταξύ πεζών και αστικού περιβάλλοντος (Pearlmutter κ.α. 2007), 10..Μοντέλο θερμικής ακτινοβολίας από τον ουρανό (Iziomon κ.α. 2003).</p>
<p>Δ. Μοντέλα εξάτμισης υγρασίας (από έδαφος νερό και φυτεύσεις) 1.μοντέλα επιφανειακού ενεργειακού ισοζυγίου μεταφοράς θερμότητας και υγρασίας από το έδαφος μέσω υλικών διαπέδων (Asaeda & Ca 2000, Ca κ.α. 1998), 2. μοντέλα εξάτμισης υγρασίας από επιφάνεια του εδάφους με νερό, χώμα, γρασιδί (Pennman 1948), 3. υπολογισμοί εξάτμισης υγρασίας από το έδαφος (Ventura κ.α. 2006), 4. μοντέλα επιφανειακών θερμοκρασιών εδάφους (Michalakakou 2002), 5. μοντέλα αλληλεπίδρασης χώματος, φυτών και ατμόσφαιρας σε φυτεμένα δώματα (Palomo del Barrio 1999)</p>
<p>E. Αστική μορφολογία και Ανακλαστικότητα Αστικής Επιφάνειας 1..Sustainable Architecture, SustArc, όγκος κτιρίων και ηλιακή πρόσβαση (Capeluto και Shavin 2000) 2. Digital Elevation Models, αλγόριθμοι ανάλυσης της αστικής «υψής» (Ratti, Baker και Stemmers 2005, Ratti, Raydan και Stemmers 2003, Ratti Di Sabatino και Britter 2005) 3.LT-urban (Stemmers 2003), 4.Albedo Calculation Model (Chimklai κ.α. 2004), 5.μοντέλο ανακλαστικότητας αστικής χαράδρας με γυάλινες επιφάνειες (Tsangrassoulis και Santamouris 2003)</p>
<p>ΣΤ. Γεωγραφικά συστήματα πληροφοριών (GIS) 1.MORPHOLOGIC, GIS και μορφολογικοί δείκτες σε συνδυασμό με μοντέλο ενεργειακής απόδοσης κτιρίων ESP-r (Adolphe κ.α. 2002, Crawford 2002), 2.GIS & ενεργειακός προγραμματισμός σε αστικές περιοχές (Balocco και Grazzini 2000) 3.GIS, παλινδρόμηση, χάρτες αστικής μορφολογίας, τύποι θερμικής συμπεριφοράς (Vieira και Vasconcelos 2003), 4.GIS, Green Canyon & TRNSYS (Lopes κ.α. 2001), 5. GIS & RayMan, παρεμβολή τιμών του δείκτη PET με πολλαπλή παλινδρόμηση (Andrade και Alcoforado 2008)</p>
<p>Z. αστική θερμική νησίδα 1.Εμπειρικά μοντέλα έντασης αστικής θερμικής νησίδας (Oke 1987, Montavez κ.α.2008), 2.Μοντέλο κατανομής επιφανειακών θερμοκρασιών (παλινδρόμηση) και έντασης της θερμικής νησίδας (Hoyano κ.α. 2002), 3. Μέθοδος εκτίμησης έντασης αστικής θερμικής νησίδας με νευρωνικά δίκτυα (Michalakakou κ.α.2002, 2004)</p>
<p>H. Μοντέλα μεσοκλίμακας 1.Colorado State University Mesoscale Model, CSUMM (Akbari κ.α.2001, Rosenfield κ.α.1998, Taha 1997a, 1997b, 1996, Taha κ.α.1997) 2. Urban Airshed Model UAM, 3d φωτοχημικό μοντέλο ποιότητας αέρα (Akbari κ.α.2001, Rosenfield κ.α.1998, Taha 1997a, 1996, Taha κ.α.1997), 3.URBMET model (Taha 1997b), 4. MM5, 5th generation Mesoscale Model, (Fan και Sailor 2005, Grossman-Clarke κ.α.2008, Olafsson 2005). 5. MRF Medium Range Forecast Model, (Grossman-Clarke κ.α. 2008), 6.RAMS Regional Atmospheric Modelling System, (Pielke κ.α. 1992) 7. Ατμοσφαιρικό μοντέλο μεσοκλίμακας με πολύπλοκη διάταξη επιφάνειας εδάφους (Avissar 1996), 8. μοντέλο μεσοκλίμακας (Kuwapata κ.α. 1994), 9. Μοντέλο μεσοκλίμακας (Martilli 2007), 10..Δισδιάστατο μοντέλο μεσοκλίμακας, τύρβης και διασποράς σε πρόαστια (Rotach 1999), 11. Μοντέλο μεσοκλίμακας, ακτινοβολίας για 4 κατηγορίες αστικών χρήσεων (Sailor και Fan 2002), 12. Harte's simple global model (Akbari κ.α. 2007) 13. NASA GISS GCM General Circulation Model (Akbari κ.α. 2007), 14. SLEUTH, Μοντέλο αστικής ανάπτυξης (Arthur-Hartranft, Carlson και Clarke 2003), 15. CFD ανάλυση ροής ανέμου και θερμοκρασίας περιβάλλοντος σε ευρεία αστική περιοχή (Murakami κ.α. 1999)</p>
<p>Θ. Μοντέλα αστικού ιστού σε συνδυασμό με μοντέλα μεσοκλίμακας 1. Town Energy Budget model, TEB + RAMS & LEAF-2 (Freitas κ.α. 2007), 2. Martilli's urban boundary layer scheme (Hamdi και Schayes 2008), 3. Αναθεωρημένο μοντέλο αστικού ιστού σε μετεωρολογικό μοντέλο μεσοκλίμακας (Kawamoto και Ooka 2006), 4.SUMM (Kawai κ.α. 2007) 5.UCL climate model, ανταλλαγής ενέργειας μεταξύ UCL και UBL (Mills 1997), 6.Community Land Model of Community Climate System Model (Oleson και άλλοι 2008a &2008b)</p>