



ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ
Εθνικόν και Καποδιστριακόν
Πανεπιστήμιον Αθηνών
— ΙΔΡΥΘΕΝ ΤΟ 1837 —

ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΦΥΣΙΚΗΣ

ΤΟΜΕΑΣ ΦΥΣΙΚΗΣ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ – ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΑΣ

**Εκτίμηση της συμβολής της αστικής μορφολογίας και
λειτουργίας στο αστικό θερμικό περιβάλλον με την ανάπτυξη
προηγμένων τεχνικών δορυφορικής τηλεπισκόπησης**

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

ΗΛΙΑΣ ΑΓΑΘΑΓΓΕΛΙΔΗΣ

Αθήνα, 2020

«Το έργο συγχρηματοδοτείται από την Ελλάδα και την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο) μέσω του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Ανάπτυξη Ανθρώπινου Δυναμικού, Εκπαίδευση και Διά Βίου Μάθηση», στο πλαίσιο της Πράξης «Ενίσχυση του ανθρώπινου ερευνητικού δυναμικού μέσω της υλοποίησης διδακτορικής έρευνας» (MIS-5000432), που υλοποιεί το Ίδρυμα Κρατικών Υποτροφιών (ΙΚΥ)»



**Επιχειρησιακό Πρόγραμμα
Ανάπτυξη Ανθρώπινου Δυναμικού,
Εκπαίδευση και Διά Βίου Μάθηση**
Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



Μέλη Τριμελούς Συμβουλευτικής Επιτροπής:

1. Κωνσταντίνος Καρτάλης, Καθηγητής Τμήματος Φυσικής – ΕΚΠΑ (*Επιβλέπων Καθηγητής*)
2. Ματθαίος Σανταμούρης, Καθηγητής – University of New South Wales (UNSW) Sydney
3. Νεκτάριος Χρυσουλάκης, Διευθυντής Ερευνών (Α') – Ίδρυμα Τεχνολογίας και Έρευνας (ΙΤΕ)

Μέλη Επταμελούς Εξεταστικής Επιτροπής (κατ' αλφαβητική σειρά):

1. Μαργαρίτα-Νίκη Ασημακοπούλου, Αναπληρώτρια Καθηγήτρια Τμήματος Φυσικής – ΕΚΠΑ
2. Κωνσταντίνος Βαρώτσος, Καθηγητής Τμήματος Φυσικής – ΕΚΠΑ
3. Κωνσταντίνος Καρτάλης, Καθηγητής Τμήματος Φυσικής – ΕΚΠΑ
4. Ιφιγένεια Κεραμιτσόγλου, Διευθύντρια Ερευνών (Α') – Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών (ΕΑΑ)
5. Βασιλική Κοτρώνη, Διευθύντρια Ερευνών (Α') – Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών (ΕΑΑ)
6. Ματθαίος Σανταμούρης, Καθηγητής – University of New South Wales (UNSW) Sydney
7. Νεκτάριος Χρυσουλάκης, Διευθυντής Ερευνών (Α') – Ίδρυμα Τεχνολογίας και Έρευνας (ΙΤΕ)

Πρόλογος

Η παρούσα διδακτορική διατριβή εκπονήθηκε στον Τομέα Φυσικής Περιβάλλοντος και Μετεωρολογίας του Τμήματος Φυσικής του Εθνικού και Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών και πραγματεύεται την επίδραση της αστικής μορφολογίας και λειτουργίας στο θερμικό περιβάλλον των πόλεων και ειδικότερα του πολεοδομικού συγκροτήματος της Αθήνας.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον Καθηγητή Κωνσταντίνο Κάρταλη για την ουσιαστική καθοδήγηση που μου παρείχε κατά τη διάρκεια αυτών των ετών· με τη συνεχή του υποστήριξη και τις συμβουλές του συνέβαλε καθοριστικά στην ολοκλήρωση της διατριβής.

Πολλά ευχαριστώ στον Καθηγητή Ματθαίο Σανταμούρη, ο οποίος με τις γνώσεις και την εμπειρία του είχε πάντα να προσφέρει πολύτιμα σχόλια και παρατηρήσεις επί των θεμάτων του αστικού κλίματος. Άκρως σημαντική ήταν η επίδραση και η συμβολή του Διευθυντή Ερευνών Νεκτάριου Χρυσουλάκη. Οι χρήσιμες συμβουλές και υποδείξεις του βελτίωσαν έμπρακτα την ερευνητική μελέτη. Ευχαριστίες και προς τα υπόλοιπα μέλη της Επταμελούς Εξεταστικής Επιτροπής.

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας μας παραχωρήθηκαν από διάφορους φορείς πολύτιμα δεδομένα, χωρίς τα οποία η εκπόνηση της μελέτης θα ήταν αδύνατη. Έτσι, θα ήθελα να ευχαριστήσω το Ελληνικό Κτηματολόγιο, την Ελληνική Στατιστική Αρχή, το Κέντρο Διαχείρισης Κυκλοφορίας της Περιφέρειας Αττικής, τον Διαχειριστή Ελληνικού Δικτύου Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΔΕΔΔΗΕ), την Ευρωπαϊκή Υπηρεσία Διαστήματος, τους συντελεστές του ερευνητικού προγράμματος Thermopolis —ειδικές ευχαριστίες στον κ. Σπυρίδωνα Ραψομανίκη— και το Ινστιτούτο Ερευνών Περιβάλλοντος και Βιώσιμης Ανάπτυξης του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών. Αναγνωρίζεται επίσης η συμβολή του Ιδρύματος Κρατικών Υποτροφιών (ΙΚΥ), το οποίο χρηματοδότησε μέσω υποτροφίας την πραγματοποιούμενη έρευνα.

Πολλές ευχαριστίες στους συναδέλφους μου Τάσο Πολύδωρο και Θάλεια Μαυράκου για την υποστήριξη, τη συνεργασία και το φιλικό περιβάλλον εργασίας στο Εργαστήριο Τηλεπισκόπησης.

Τέλος, ευχαριστώ τους φίλους μου και ειδικότερα την οικογένειά μου για τη στήριξη που μου παρείχε σ' όλα τα χρόνια των σπουδών μου.

Περίληψη

Η αστικοποίηση επιφέρει τον ριζικό μετασχηματισμό του τοπικού κλίματος μιας περιοχής. Ο μετριασμός της επίδρασής της επιτάσσει την καλύτερη κατανόηση των διεργασιών του αστικού κλίματος και τη λεπτομερή περιγραφή των χαρακτηριστικών της αστικής μορφολογίας και λειτουργίας. Επιπρόσθετα, αποτελεί άμεση προτεραιότητα η αποτύπωση της ενδοαστικής ανομοιογένειας και ο εντοπισμός των πιο ευάλωτων, από θερμική άποψη, χωρικών ενότητων εντός των αστικών κέντρων. Στο πλαίσιο της παρούσας διδακτορικής διατριβής επιχειρήθηκε μία πολυδιάστατη μελέτη του θερμικού περιβάλλοντος του πολεοδομικού συγκροτήματος της Αθήνας. Η ερευνητική προσπάθεια είχε ως στόχο την εκτίμηση της συμβολής της αστικής μορφολογίας και λειτουργίας στο αστικό θερμικό περιβάλλον, εστιάζοντας σε δύο βασικές χωρικές κλίμακες των διεργασιών του αστικού κλίματος (100 m και 1 km). Η μελέτη υλοποιήθηκε κατά κύριο λόγο με την ανάπτυξη τεχνικών δορυφορικής τηλεπισκόπησης και επικουρικά με την εφαρμογή Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών και αριθμητικής προσομοίωσης, μέσω του μοντέλου μέσης κλίμακας WRF σε συνδυασμό με μια μικροκλιματική αστική παραμετροποίηση.

Μέσω της τηλεπισκόπησης στο θερμικό υπέρυθρο είναι δυνατός ο προσδιορισμός της επιφανειακής θερμοκρασίας του εδάφους (Land Surface Temperature, LST). Τα υφιστάμενα δορυφορικά συστήματα δεν διαθέτουν ωστόσο την ταυτόχρονη υψηλή χωρική και χρονική διακριτική ικανότητα η οποία απαιτείται για τη λεπτομερειακή διερεύνηση των ενδοαστικών διαφοροποιήσεων. Για τον σκοπό αυτό, πραγματοποιήθηκε αρχικά βελτίωση των υφιστάμενων μεθοδολογιών της στατιστικής υποκλιμάκωσης, κατά την οποία το LST ενισχύεται χωρικά βάσει της σχέσης που εμφανίζει με επιφανειακές παραμέτρους. Η υποκλιμάκωση πραγματοποιήθηκε με τη χρήση πολλαπλών μεταβλητών πρόβλεψης, υψηλής χωρικής ανάλυσης τιμών του συντελεστή εκπομπής έπειτα από φασματική ταξινόμηση, και εξετάζοντας διαφορετικούς γραμμικούς και μη γραμμικούς αλγορίθμους παλινδρόμησης.

Η επιφανειακή ταξινόμηση —με χωρική διακριτική ικανότητα 10 m— πραγματοποιήθηκε μέσω τεχνικών μηχανικής μάθησης και συνδυάζοντας καταγραφές του δορυφόρου Sentinel-2 με υφιστάμενα δεδομένα χρήσεων γης· η ακρίβεια ταξινόμησης που προέκυψε ήταν ~90%. Η υποκλιμάκωση εφαρμόστηκε στις καταγραφές θερμικής ακτινοβολίας του αισθητήρα Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) των δορυφόρων Aqua και Terra, για τη χωρική ενίσχυσή τους από το 1 km στα 100 m. Η στατιστική αξιολόγηση των εκτιμώμενων επιφανειακών θερμοκρασιών έγινε μέσω δορυφορικών καταγραφών προερχόμενες από τον ανιχνευτή Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER), καθώς και μέσω επιτόπιων μετρήσεων. Βρέθηκε ότι η προτεινόμενη μέθοδος υποκλιμάκωσης —με τη χρήση του αλγορίθμου παλινδρόμησης τύπου ridge— παρείχε αξιόπιστες, χωρικά ενισχυμένες τιμές LST με σφάλμα

μικρότερο των 2 K (τετραγωνική ρίζα μέσου τετραγωνικού σφάλματος, Root Mean Square Error – RMSE) και με σταθερά καλύτερη ακρίβεια (~0.5 K) συγκριτικά με τις μεθόδους αναφοράς.

Στο επόμενο στάδιο της μελέτης πραγματοποιήθηκε, σε υψηλή χωρική διακριτική ικανότητα (100 m), ο προσδιορισμός των χαρακτηριστικών της αστικής μορφολογίας, της λειτουργίας και των ροών ενέργειας της Αθήνας, και επακόλουθα ο συνδυασμός τους σε έναν δείκτη θερμικής επιβάρυνσης. Χρησιμοποιώντας χωρικά δεδομένα από το Ελληνικό Κτηματολόγιο και την Ελληνική Στατιστική Αρχή, κατέστη δυνατή η πλήρης περιγραφή του κτηριακού περιβάλλοντος, συμπεριλαμβανομένου του λόγου του ύψους των κτηρίων προς το πλάτος των δρόμων —αναλογία διαστάσεων αστικής χαράδρας (H/W)— για κάθε οδό της πόλης.

Επακόλουθα, αξιοποιώντας το υψηλής χωρικής και χρονικής ανάλυσης LST το οποίο προέκυψε μέσω της μεθοδολογίας υποκλιμάκωσης από το πρώτο τμήμα της εργασίας, πραγματοποιήθηκε ο προσδιορισμός της αισθητής (Q_H) και της λανθάνουσας ροής θερμότητας (Q_E). Χρησιμοποιήθηκαν επιπρόσθετα παρατηρήσεις από μετεωρολογικούς σταθμούς και εφαρμόστηκε η μέθοδος της «αεροδυναμικής αντίστασης» («bulk» μεταφορά θερμότητας/υγρασίας τοπικής κλίμακας). Για την αξιολόγηση της ακρίβειας της εκτίμησης των ροών χρησιμοποιήθηκαν μετρήσεις μικρομετεωρολογικού πύργου από προγενέστερο ερευνητικό πρόγραμμα: βρέθηκε μέσο σφάλμα RMSE ~35 W m⁻² για το Q_H και ~15 W m⁻² για το Q_E . Από τις παραπάνω τυρβώδεις ροές ενέργειας υπολογίστηκε στη συνέχεια ο λόγος Bowen $\beta = Q_H / Q_E$. Η ανθρωπογενής ροή θερμότητας (Q_F) προσδιορίστηκε μέσω της ανάπτυξης αλγορίθμου που συνδυάζει τις «bottom-up» και «top-down» προσεγγίσεις και είναι προσαρμοσμένος στα διαθέσιμα ενεργειακά δεδομένα της Αθήνας. Παρότι οι συγκεντρωτικές τιμές του Q_F για το σύνολο του πολεοδομικού συγκροτήματος ήταν σχετικά μικρές, εντοπίστηκαν υψηλές ανθρωπογενείς εκπομπές θερμότητας για το κέντρο της πόλης ($Q_F > 100$ W m⁻² το καλοκαίρι κατά τη διάρκεια της ημέρας).

Οι παραπάνω μεταβλητές (H/W , β και Q_F) μαζί με την εκτιμώμενη «καθαρή» μεταβολή του ρυθμού αποθήκευσης θερμότητας (ΔQ_s) ενσωματώθηκαν κατόπιν στον προτεινόμενο δείκτη θερμικής έκθεσης (Urban Heat Exposure, UHeatEx), χρησιμοποιώντας τη μέθοδο της ανάλυσης σε κύριες συνιστώσες (Principal Component Analysis, PCA). Ο παραπάνω δείκτης αποτύπωσε τα σημεία του αστικού ιστού της Αθήνας με τη δυσμενέστερη θερμική ποιότητα και κατά συνέπεια μπορεί να καταστεί ιδιαίτερα πολύτιμος σε μελέτες αστικού σχεδιασμού. Επιπρόσθετα, ο UHeatEx κατάφερε να αναδείξει τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά ως προς τη μορφολογία και το ενεργειακό ισοζύγιο της πόλης, κάτι που σε σημαντικό βαθμό δεν μπορούσε να επιτευχθεί μέσω της ταξινόμησης των «Τοπικών Κλιματικών Ζωνών» (Local Climate Zones, LCZ).

Στο τελευταίο μέρος, χρησιμοποιώντας τα χαρακτηριστικά της αστικής μορφολογίας και λειτουργίας όπως εκτιμήθηκαν στα προηγούμενα στάδια της μελέτης, το ενδιαφέρον μετατοπίστηκε στην αξιολόγηση της μέσης επίδρασης στο θερμικό περιβάλλον εκτενέστερων αστικών ενοτήτων τοπικής κλίμακας (1 km). Συγκεκριμένα, αρχικά διερευνήθηκε η επίδραση βασικών αστικών μορφολογικών παραμέτρων —το ποσοστό των αδιαπέρατων επιφανειών, το ποσοστό της επιφάνειας

κάλυψης από κτήρια και το ύψος των κτηρίων— στην επιφανειακή θερμοκρασία όπως αυτή καταγράφεται από τον δορυφορικό αισθητήρα MODIS. Με σκοπό μια ευρύτερη γενίκευση των συμπερασμάτων ως προς την επίδραση της αστικής μορφολογίας στο LST, παράλληλα με την περίπτωση της Αθήνας εξετάστηκαν 24 επιπλέον ευρωπαϊκές πόλεις. Η στατιστική ανάλυση κατέδειξε ότι η πυκνή και υψηλή δόμηση έχει εν γένει ασθενή θετική ή ακόμα και αρνητική σύνδεση με το LST κατά τη διάρκεια της ημέρας, ενώ αντίθετα εμφανίζει ισχυρή θετική επίδραση τη νύχτα. Το παραπάνω ήταν ιδιαίτερα εμφανές για την Αθήνα, όπου και εξετάστηκαν επιπλέον μορφολογικές παράμετροι και πραγματοποιήθηκε ερμηνεία των αποτελεσμάτων με βάση τις τάξεις των LCZ. Στη συνέχεια, τα χαρακτηριστικά της αστικής μορφολογίας και λειτουργίας της Αθήνας ενσωματώθηκαν στο ατμοσφαιρικό μοντέλο WRF για τη διερεύνηση της προγνωστικής ικανότητάς του, όσον αφορά το αστικό θερμικό περιβάλλον. Τα αποτελέσματα της εφαρμογής του WRF (σε πλέγμα χωρικής ανάλυσης 1 km) σε συνδυασμό με ένα τροποποιημένο σχήμα αστικής παραμετροποίησης έδειξαν ότι το μοντέλο μπορεί να αναπαραγάγει τις κύριες διαφοροποιήσεις εντός του αστικού ιστού, αναφορικά με την επιφανειακή θερμοκρασία (RMSE ~2.4 K) και τη θερμοκρασία αέρα κοντά στο έδαφος (RMSE ~1.7 K).

Λέξεις κλειδιά: Δορυφορική τηλεπισκόπηση, επιφανειακή θερμοκρασία, υποκλιμάκωση, αστική μορφολογία, αστικό θερμικό περιβάλλον, αστικές ροές ενέργειας, τοπικές κλιματικές ζώνες, αστικός σχεδιασμός

Abstract

Urbanization fundamentally transforms the local climate of a region. The mitigation of the corresponding effects requires a better understanding of the urban climate processes and a detailed mapping of the urban form and function. Moreover, it is a high priority to describe the intra-urban variations and to detect the more thermally vulnerable districts of a city. In this PhD thesis, a multifaceted study of the thermal environment of Athens was conducted. The motivation of the research work was assessing the influence of urban form and function on the urban thermal environment, across two main horizontal scales of urban climatic process (100 m and 1 km). The work was carried out primarily by applying and developing satellite remote sensing techniques, and to a lesser extent via Geographical Information Systems (GIS) methodologies and the implementation of numerical simulations, using the mesoscale WRF model along with an urban microclimate parameterization.

Using thermal infrared remote sensing observations, it is possible to retrieve the Land Surface Temperature (LST). However, the current satellite systems do not have the synchronous spatial and temporal frequency which is needed in a detailed study of intra-urban variability. To this end, an improvement of the standard statistical downscaling methodologies was firstly developed, where LST is disaggregated based on its relationship with surface parameters. The downscaling was accomplished using multiple predictor variables, high resolution land cover-based emissivity values, and assessing various linear and non-linear regression algorithms.

The surface classification —at a spatial resolution of 10 m— was derived through machine learning techniques and integrating Sentinel-2 satellite data with pre-existing land use information; the obtained classification accuracy was ~90%. The downscaling process was applied to sharpen the thermal observations of the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) from 1 km to 100 m. The validation of the modelled surface temperatures was conducted with the high level LST product from the Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) and with in situ surface temperature observations. It was found that the suggested downscaling method —using the ridge regression downscaling algorithm— produced a robust, spatially sharpened LST, with an average Root Mean Square Error (RMSE) less than 2 K and a consistent better performance compared to the reference methods.

At the next stage, the urban form, function, and energy fluxes were mapped at a high resolution (100 m) and subsequently combined in an urban heat exposure indicator. Utilizing spatial data provided by the Hellenic Cadastre and the Hellenic Statistical Authority, a full description of the building environment was accomplished, as well as the derivation of the building height to road width ratio —urban canyon aspect ratio (H/W)— at street level.

Next, using the downscaled satellite-derived LST from the first part of the study and meteorological observations, the sensible (Q_H) and latent heat flux (Q_E) were calculated applying the “aerodynamic resistance” methodology (bulk transfer of heat/humidity at local scale). To assess the accuracy of the calculations, micrometeorological observations from a previous research campaign were used; an overall RMSE error of $\sim 35 \text{ W m}^{-2}$ for Q_H and $\sim 15 \text{ W m}^{-2}$ for Q_E was obtained. From the above turbulent fluxes, the Bowen ratio $\beta = Q_H / Q_E$ was subsequently derived. To determine the anthropogenic heat flux (Q_F) a new algorithm was developed, combining the “bottom-up” and “top-down” methodologies, adapted to the available data for the study area. While the aggregated Q_F value for the total urban area was rather low, particularly high anthropogenic heat emissions were found for the city center ($Q_F > 100 \text{ W m}^{-2}$ for summer daytime hours).

Subsequently, the above urban parameters (H/W , β και Q_F) together with the net heat storage (ΔQ_s) were integrated into the proposed Urban Heat Exposure (UHeatEx) indicator through Principal Component Analysis (PCA). The indicator outlined the diverging thermal quality of the different building blocks in Athens and thereby can be valuable to urban planning adaptation responses. Moreover, UHeatEx managed to highlight the city-specific features of the urban form and energy budget of the city, which to a great extent could not be captured by the classification of the Local Climate Zones (LCZ).

At the final stage of the study, using the properties of urban form and function as they were calculated in the previous stages of the work, focus was shifted to the study of the integrated neighborhood-scale effect (1 km) on the urban thermal climate. Specifically, it was initially assessed how basic urban morphological parameters —the impervious fraction, the building fraction, and the building height— are interlinked to the surface temperature variations, as captured by a spaceborne sensor (MODIS). To promote the generalization of conclusions, in addition to Athens, 24 additional European cities were examined. The statistical analysis showed that the closely spaced and high-rise buildings have generally a weak positive or even a negative relation to LST in daytime and a strong positive effect at night. This finding was significantly pronounced for Athens, where further urban parameters were also evaluated and the results were linked to the LCZs classes. Finally, urban form and function of Athens were incorporated in the WRF model to study its ability to predict the urban thermal environment. Using WRF along with a modified urban parameterization scheme (at a 1 km grid), results indicated that the prevailing intra-urban spatial patterns can be reproduced in the simulations, regarding the surface temperature (RMSE $\sim 2.4 \text{ K}$) and the near-surface air temperature (RMSE $\sim 1.7 \text{ K}$).

Keywords: Satellite remote sensing, land surface temperature, downscaling, urban form, urban thermal environment, urban energy fluxes, local climate zones, urban planning

Πίνακας περιεχομένων

Πρόλογος.....	iv
Περίληψη	v
Abstract.....	viii
Πίνακας περιεχομένων.....	x
Κατάλογος πινάκων	xiii
Κατάλογος σχημάτων	xvi
Κατάλογος αρκτικόλεξων.....	xxi
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 Εισαγωγή	1
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 Αστικό Κλίμα	8
2.1 Αστικό οριακό στρώμα	8
2.2 Αστική επιφάνεια.....	10
2.3 Επιφανειακό ενεργειακό ισοζύγιο	14
2.3.1 Γενική περιγραφή	14
2.3.2 Ισοζύγιο ακτινοβολίας	15
2.3.3 Ανθρωπογενής ροή θερμότητας.....	17
2.3.4 Τυρβώδεις ροές αισθητής και λανθάνουσας θερμότητας	19
2.3.5 Καθαρή μεταβολή του ρυθμού αποθήκευσης θερμότητας	21
2.4 Αστική θερμική νησίδα.....	23
2.4.1 Γενική περιγραφή	23
2.4.2 Τεχνικές μετριάσμού.....	26
2.5 Θερμική δορυφορική τηλεπισκόπηση	28
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 Περιοχή Μελέτης.....	31
3.1 Γενική περιγραφή	31
3.2 Το θερμικό περιβάλλον της Αθήνας	35
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 Υποκλιμάκωση της Επιφανειακής Θερμοκρασίας.....	38
4.1 Εισαγωγή	38
4.2 Δεδομένα.....	44
4.3 Μεθοδολογία.....	52

4.3.1 Προεπεξεργασία δορυφορικών εικόνων	52
4.3.2 Μεθοδολογία στατιστικής υποκλιμάκωσης.....	52
4.4 Αποτελέσματα.....	66
4.4.1 Κάλυψη γης – Συντελεστής θερμική εκπομπής.....	66
4.4.2 Στατιστική υποκλιμάκωση.....	69
4.5 Σχολιασμός αποτελεσμάτων	82
4.6 Συμπεράσματα	84

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 Αστικές Ροές Ενέργειας και Δείκτης Αστικής

Θερμικής Έκθεσης.....	86
5.1 Εισαγωγή	86
5.2 Δεδομένα και μεθοδολογία	91
5.2.1 Αστική μορφολογία	91
5.2.2 Τοπικές κλιματικές ζώνες (LCZ).....	94
5.2.3 Τυρβώδεις ροές ενέργειας – Λόγος Bowen	95
5.2.4 Καθαρή μεταβολή του ρυθμού αποθήκευσης θερμότητας	99
5.2.5 Ανθρωπογενής ροή θερμότητας.....	100
5.2.6 Δείκτης Αστικής Θερμικής Έκθεσης (Urban Heat Exposure – UHeatEx)	106
5.2.7 Κλιματικές προβολές	107
5.3 Αποτελέσματα.....	108
5.3.1 Τοπικές κλιματικές ζώνες	108
5.3.2 Παράμετροι H/W , β_m , ΔQ_{sm} και Q_F	109
5.3.3 Δείκτης UHeatEx	118
5.4 Σχολιασμός αποτελεσμάτων	123
5.5 Συμπεράσματα	126

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 Σύνδεση Μεταξύ Αστικών Μορφολογικών Παραμέτρων

και Θερμικού Περιβάλλοντος με Χρήση Δορυφορικών Παρατηρήσεων και Αριθμητικής Προσομοίωσης.....	128
6.1 Εισαγωγή	128
6.2 Περιγραφή του ατμοσφαιρικού μοντέλου WRF.....	132
6.2.1 Γενικές εξισώσεις του μοντέλου	132
6.2.2 Χαρακτηριστικά του πλέγματος	133
6.2.3 Χρονική διαφόριση.....	134
6.2.4 Αρχικές και οριακές συνθήκες.....	135
6.2.5 Σχήματα παραμετροποίησης.....	135

6.3 Δεδομένα και μεθοδολογία	139
6.3.1 Περιοχή μελέτης	139
6.3.2 Δορυφορικές παρατηρήσεις και μορφολογικές παράμετροι.....	141
6.3.3 Στατιστική ανάλυση.....	145
6.3.4 Αριθμητική προσομοίωση	147
6.4 Αποτελέσματα.....	152
6.4.1 Σύνολο ευρωπαϊκών πόλεων	152
6.4.2 Αστική περιοχή της Αθήνας	161
6.5 Σχολιασμός αποτελεσμάτων	171
6.6 Συμπεράσματα	175
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 Συμπεράσματα	176
Βιβλιογραφία	185

Κατάλογος πινάκων

Πίνακας 1-1	Τα σημαντικότερα σε λειτουργία συστήματα δορυφορικής τηλεπισκόπησης που πραγματοποιούν καταγραφές στην περιοχή του θερμικού υπέρυθρου και καλύπτουν την Ευρώπη.	4
Πίνακας 2-1	Βασικές παράμετροι για την περιγραφή της κάλυψης γης, των βασικών διαστάσεων και της γεωμετρικής δομής μιας αστικής περιοχής.....	12
Πίνακας 3-1	Κλιματικές παράμετροι για την Αθήνα – μετεωρολογικός σταθμός Νέας Φιλαδέλφειας. Πηγή δεδομένων: ΕΜΥ (http://www.hnms.gr/emv/el/climatology/climatology_city?perifereia=Attiki&poli=Nea_Filadelfia).....	33
Πίνακας 3-2	Δημογραφική εξέλιξη του Πολεοδομικού Συγκροτήματος Πρωτεύουσας (1951 –2011). Πηγή δεδομένων: ΕΛΣΤΑΤ – Ψηφιακή Βιβλιοθήκη (http://dlib.statistics.gr/portal/page/portal/ESYE) και Απογραφή Πληθυσμού-Κατοικιών 2011 (http://www.statistics.gr/el/2011-census-pop-hous).....	35
Πίνακας 4-1	Φασματικές περιοχές και χωρική διακριτική ικανότητα του δορυφόρου Sentinel-2.	45
Πίνακας 4-2	Φασματικές περιοχές και χωρική διακριτική ικανότητα του αισθητήρα MODIS (δίνονται μόνο τα κανάλια που αντιστοιχούν στην περιοχή του θερμικού υπέρυθρου).	48
Πίνακας 4-3	Φασματικές περιοχές και χωρική διακριτική ικανότητα του δορυφόρου Landsat 5.	48
Πίνακας 4-4	Φασματικές περιοχές και χωρική διακριτική ικανότητα του δορυφόρου Landsat 8.	49
Πίνακας 4-5	Φασματικές περιοχές και χωρική διακριτική ικανότητα του αισθητήρα ASTER.	50
Πίνακας 4-6	Το σύνολο των δορυφορικών δεδομένων τα οποία χρησιμοποιήθηκαν κατά τη διαδικασία της υποκλιμάκωσης.	51
Πίνακας 4-7	Οι κατηγορίες χρήσεων/κάλυψης γης (Land Use / Land Cover, LULC) των χαρτογραφικών δεδομένων του Urban Atlas.....	55
Πίνακας 4-8	Σύνδεση μεταξύ των χρήσεων/κάλυψης γης (Land Use / Land Cover, LULC) και της δυνατότητας απόδοσης συγκεκριμένης τάξης κατά τη διαδικασία της φασματικής ταξινόμησης.....	56

Πίνακας 4-9	Τα επιλεγόμενα δείγματα υλικών από τις χρησιμοποιούμενες φασματικές βιβλιοθήκες, κατά τον υπολογισμό του συντελεστή εκπομπής.....	59
Πίνακας 4-10	Εξισώσεις υπολογισμού των φασματικών δεικτών των οποίων έγινε χρήση κατά τη διαδικασία της υποκλιμάκωσης.....	61
Πίνακας 4-11	Πίνακας ακρίβειας της ταξινομημένης εικόνας κάλυψης γης, χωρικής διακριτικής ικανότητας 10 m.....	67
Πίνακας 4-12	Στατιστικές παράμετροι κατά τον προσδιορισμό του LST σε χωρική διακριτική ικανότητα 1000 m.....	70
Πίνακας 4-13	Σφάλμα RMSE (K) μεταξύ του LST της υποκλιμάκωσης MODIS και του ASTER–LST για διαφορετικά μοντέλα υποκλιμάκωσης, σε χωρική διακριτική ικανότητα 100 m. Σε παρένθεση δίνεται το πηλίκο του σφάλματος RMSE προς την τυπική απόκλιση (STD) των εικόνων ASTER.....	78
Πίνακας 5-1	Το σύστημα των Τοπικών Κλιματικών Ζωνών (Local Climate Zones, LCZ). Πηγή: Stewart and Oke (2012).....	88
Πίνακας 5-2	Οι συντελεστές του μοντέλου Objective Hysteresis Model (OHM) για τις επιμέρους ανθρωπογενείς και φυσικές επιφάνειες.....	100
Πίνακας 5-3	Ετήσια μέση ημερήσια κυκλοφορία (EMHK) (αριθμός οχημάτων ανά ώρα) ανά κατηγορία αστικής οδού.....	104
Πίνακας 5-4	Συγκεντρωτική παρουσίαση των κυκλοφοριακών και άλλων συναφών μελετών οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν για την εξαγωγή των τιμών του Πίνακα 5-3.....	105
Πίνακας 5-5	Παρουσίαση των προσομοιώσεων του προγράμματος EURO-CORDEX που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία.....	108
Πίνακας 5-6	Ανάλυση ευαισθησίας ως προς τις εκτιμώμενες ροές ενέργειας και τον λόγο Bowen (κατ' απόλυτη τιμή) χρησιμοποιώντας τη μέθοδο της αεροδυναμικής αντίστασης για τον Ιούλιο του 2009. Βλέπε κείμενο για την επεξήγηση των συμβόλων.....	113
Πίνακας 5-7	Οι προκύπτουσες τιμές των συντελεστών της ανάλυσης σε κύριες συνιστώσες.....	119
Πίνακας 5-8	Σύγκριση της μέσης ελάχιστης θερμοκρασίας (T_{amin}) σε πέντε τοποθεσίες τάξης LCZ 2, για την περίοδο 2013-2018 (Μάιος – Σεπτέμβριος). Οι κωδικοί των σταθμών αναφέρονται στην αρίθμηση του Σχήματος 5-9.....	122
Πίνακας 6-1	Κλιματική ταξινόμηση Köppen-Geiger των εξεταζόμενων ευρωπαϊκών πόλεων. Πηγή: Kottek et al. (2006).....	140

Πίνακας 6-2	Οι χρησιμοποιούμενες αστικές παράμετροι για το σχήμα παραμετροποίησης SLUCM. Το σύνολο των συμβόλων δίνεται στο κείμενο.	150
Πίνακας 6-3	Οι χρησιμοποιούμενοι μετεωρολογικοί σταθμοί κατά την αξιολόγηση του WRF.....	151
Πίνακας 6-4	Γραμμικός συντελεστής συσχέτισης Pearson (r) μεταξύ των μορφολογικών παραμέτρων και του LST (MODIS – Aqua) κατά τη διάρκεια της ημέρας για το σύνολο των εξεταζόμενων πόλεων.	153
Πίνακας 6-5	Όμοια με τον Πίνακα 6-4, για τις παρατηρήσεις κατά τη διάρκεια της νύχτας.	154
Πίνακας 6-6	Κανονικοποιημένοι συντελεστές παλινδρόμησης και συντελεστής προσδιορισμού R^2 για τα μοντέλα γραμμικής παλινδρόμησης OLS μεταξύ των αστικών μορφολογικών παραμέτρων και του LST.....	158
Πίνακας 6-7	Κανονικοποιημένοι συντελεστές παλινδρόμησης (ολική επίδραση) για τα μοντέλα χωρικής παλινδρόμησης SAR μεταξύ των αστικών μορφολογικών παραμέτρων και του LST.	160
Πίνακας 6-8	Μέση (\pm μία τυπική απόκλιση), ελάχιστη και μέγιστη επιφανειακή θερμοκρασία (βαθμοί Kelvin) των δορυφορικών παρατηρήσεων MODIS – Aqua για την Αθήνα ανά LCZ (Ιούνιος – Αύγουστος 2017).	163
Πίνακας 6-9	Μέση παρατηρούμενη και εκτιμώμενη επιφανειακή θερμοκρασία αέρα στο αστικό τμήμα της κυψελίδας του πλέγματος ($T_{as,urb}$) για την Αθήνα ανά LCZ (βαθμοί Κελσίου) (7 – 11 Αυγούστου 2017).....	170

Κατάλογος σχημάτων

Σχήμα 2-1	Τα διαφορετικά ατμοσφαιρικά στρώματα εντός του UBL. Προσαρμογή από Barlow (2014)9
Σχήμα 2-2	Διαφορετικοί ορισμοί της αστικής επιφάνειας: α) ολική, β) επιφάνεια εδάφους, γ) κορυφή κτηρίων, δ) κάτοψη και ε) επίπεδο μηδενική μετατόπισης. Προσαρμογή από Voogt (1995).11
Σχήμα 2-3	Σχηματική απεικόνιση των κυριότερων παραμέτρων για την περιγραφή της κάλυψης γης, των βασικών διαστάσεων και της γεωμετρικής δομής μιας αστικής περιοχής. A_T , A_b και A_w το εμβαδόν της ολικής οριζόντιας επιφάνειας, της επιφάνειας των οροφών και της επιφάνειας των τοίχων αντίστοιχα, H το ύψος ενός κτηρίου, L το μήκος μιας χαράδρας και W το πλάτος ενός δρόμου. Προσαρμογή από Grimmond and Oke (1999a).13
Σχήμα 2-4	Το επιφανειακό ενεργειακό ισοζύγιο για έναν αστικό όγκο (βλ. κυρίως κείμενο για επεξήγηση των συμβόλων). Προσαρμογή από Oke (1988).15
Σχήμα 3-1	Διοικητική διαίρεση της περιοχής μελέτης. Πηγή δεδομένων: http://www.statistics.gr/digital-cartographical-data).32
Σχήμα 3-2	Δορυφορική απεικόνιση της περιοχής μελέτης: εικόνα Landsat 8 (28 Ιουνίου 2017) σε χρωματική σύνθεση κόκκινο-πράσινο-μπλε (RGB).32
Σχήμα 3-3	Κατανομή του υψομέτρου για την περιοχή μελέτης. Πηγή δεδομένων: ψηφιακό υψομετρικό μοντέλο εδάφους EU-DEM, Copernicus Land Monitoring Service, (https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/copernicus-land-monitoring-service-eu-dem).32
Σχήμα 4-1	Χωρική αποτύπωση του συντελεστή εκπομπής μέσω του προϊόντος συντελεστή εκπομπής – MODIS για (α) το Κανάλι 31 (10.780 – 11.280 μm) και (β) το Κανάλι 32 (11.770 – 12.270 μm) του αισθητήρα MODIS.43
Σχήμα 4-2	Χάρτης των χρήσεων και κάλυψης γης για την Αθήνα μέσω των δεδομένων του Urban Atlas.46
Σχήμα 4-3	Χωρική αποτύπωση (α) του DEM, (β) του DSM και (γ) του κανονικοποιημένου ύψους για την περιοχή του κέντρου της Αθήνας.47
Σχήμα 4-4	Διάγραμμα ροής για το σύνολο της μεθοδολογίας υποκλιμάκωσης του LST.63

Σχήμα 4-5	Εικόνα ταξινόμησης των χρήσεων γης για την Αθήνα σε χωρική διακριτική ικανότητα 10 m.	68
Σχήμα 4-6	Όμοια με το Σχήμα 4-5, για την περιοχή του κέντρου της πόλης της Αθήνας. Αριστερό πάνελ: ©2019 Google.....	68
Σχήμα 4-7	Χωρική αποτύπωση του συντελεστή εκπομπής μέσω της χαρτογράφησης της κάλυψης γης για (α) το κανάλι 31 (10.780 – 11.280 μm) και (β) το κανάλι 32 (11.770 – 12.270 μm) του αισθητήρα MODIS.....	69
Σχήμα 4-8	Ιστογράμματα της κατανομής των τιμών LST για τις (α) 29/09/2013, (β) 09/04/2014, (γ) 14/05/2015, (δ) 17/07/2015, (ε) 06/11/2015 και (ζ) 14/10/2016, και για τα (i) MODIS _{1000-A} , (ii) MODIS _{1000-B} , (iii) MODIS _{1000-C} και (iv) ASTER ₁₀₀₀	71
Σχήμα 4-9	Σφάλμα RMSE (K) κατά τη σύγκριση του LST της υποκλιμάκωσης MODIS με το ASTER–LST για τα μοντέλα LST–NDVI, Radiance–NDVI, Radiance–RR, Radiance–ANN και Radiance–RF.	73
Σχήμα 4-10	Κατανομή μέσων σφαλμάτων κατά τη σύγκριση του LST της υποκλιμάκωσης MODIS με το ASTER–LST για τις (α) 29/09/2013, (β) 09/04/2014, (γ) 14/05/2015, (δ) 17/07/2015, (ε) 06/11/2015 και (ζ) 14/10/2016, και για τα (i) LST–NDVI και (ii) Radiance–RR.....	74
Σχήμα 4-11	Διαγράμματα διασποράς μεταξύ του LST της υποκλιμάκωσης MODIS και του ASTER–LST για τις (α) 29/09/2013, (β) 09/04/2014, (γ) 14/05/2015, (δ) 17/07/2015, (ε) 06/11/2015 και (ζ) 14/10/2016, και για τα (i) LST–NDVI και (ii) Radiance–RR.	75
Σχήμα 4-12	Χωρική κατανομή του LST (K) για τις περιπτώσεις (α) του ASTER–LST (100 m), (β) του MODIS–LST (1000 m) και (γ) του LST της υποκλιμάκωσης (μοντέλο Radiance–RR) (100 m) για τις 29/09/2013.	79
Σχήμα 4-13	Όμοια με το Σχήμα 4-12, για τις 09/04/2014.	79
Σχήμα 4-14	Όμοια με το Σχήμα 4-12, για τις 14/05/2015.	79
Σχήμα 4-15	Όμοια με το Σχήμα 4-12, για τις 17/07/2015.	80
Σχήμα 4-16	Όμοια με το Σχήμα 4-12, για τις 06/11/2015.	80
Σχήμα 4-17	Όμοια με το Σχήμα 4-12, για τις 14/10/2016.	80
Σχήμα 4-18	Χωρική κατανομή του αριθμητικού μέσου του μέσου σφάλματος κατά τη σύγκριση του LST της υποκλιμάκωσης MODIS (μοντέλο Radiance–RR) με το ASTER–LST για το σύνολο των εξεταζόμενων ημερομηνιών (αρνητικές τιμές αντιστοιχούν σε υποεκτίμηση).	81

Σχήμα 4-19	Διάγραμμα διασποράς μεταξύ του LST της υποκλιμάκωσης MODIS (μοντέλο Radiance-RR) και των παρατηρούμενων επιφανειακών θερμοκρασιών για τις διαθέσιμες ημερομηνίες του Ιουλίου 2009.81
Σχήμα 5-1	Περιοχή ανάπτυξης και εφαρμογής του δείκτη αστικής θερμικής έκθεσης, χρήσεις γης, και τοποθεσία των μετεωρολογικών σταθμών. Πηγές δεδομένων: χρήσεις γης: Urban Atlas, θέσεις σταθμών: Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών.90
Σχήμα 5-2	Διάγραμμα ροής της μεθοδολογίας για τον υπολογισμό του δείκτη αστικής θερμικής έκθεσης (UHeatEx). Το σύνολο των συμβόλων δίνεται στο κείμενο.91
Σχήμα 5-3	Βήματα προσδιορισμού της αναλογίας διαστάσεων αστικής χαράδρας (H/W): (α) ύψος αστικών στοιχείων (m) (με κόκκινη γραμμή δίνονται τα περιγράμματα των κτηρίων), (β) το μέσο ύψος (m) της πλευράς κάθε οδού και (γ) το H/W για κάθε οδό.93
Σχήμα 5-4	Χωρική κατανομή των ταχυδρομικών κωδικών εντός της περιοχής μελέτης.102
Σχήμα 5-5	(α) Συνάρτηση σύνδεσης της ηλεκτρικής κατανάλωσης με τη μέση ημερήσια θερμοκρασία και (β) ημερήσια διακύμανση των συντελεστών στάθμισης της ηλεκτρικής κατανάλωσης (μέσες ετήσιες τιμές). Πηγές δεδομένων: (Psiloglou et al., 2009; διαΝΕΟσις, 2017; PEPESEC).....102
Σχήμα 5-6	Χαρτογράφηση της αστικής περιοχής της Αθήνας σε Τοπικές Κλιματικές Ζώνες (LCZ), σε χωρική διακριτική ικανότητα 400 m.....109
Σχήμα 5-7	Αποτύπωση σε χωρική διακριτική ικανότητα 100 m των: (α) αναλογία διαστάσεων αστικής χαράδρας (H/W), (β) μέσος λόγος Bowen (β_m) για τον Ιούλιο του 2017 (~12:00), (γ) μέση καθαρή μεταβολή του ρυθμού αποθήκευσης θερμότητας (ΔQ_{sm}) για τον Ιούλιο του 2017 (~12:00) και (δ) μέση ανθρωπογενής ροή θερμότητας (Q_F) για τον Ιούλιο του 2012 (τιμή 24ώρου).....111
Σχήμα 5-8	Διαγράμματα διασποράς μεταξύ των παρατηρούμενων και των εκτιμώμενων τυρβωδών ροών ενέργειας: (α) για το Q_H και (β) για το Q_E , για τις διαθέσιμες ημερομηνίες του Ιουλίου του 2009.112
Σχήμα 5-9	Χωροθέτηση συγκεκριμένων εξεταζόμενων περιοχών εντός της αστικής περιοχής της Αθήνας. Υπόβαθρο: εικόνα Landsat 8 (28 Ιουνίου 2017) σε χρωματική σύνθεση κόκκινο-πράσινο-μπλε (RGB).115
Σχήμα 5-10	Χρονική κατανομή του μέσου ωριαίου Q_F για τον Ιούλιο του 2012, σε έξι επιλεγμένα σημεία της περιοχής μελέτης: (α) το Εμπορικό

	Τρίγωνο Αθήνας, (β) ένα σημείο αιχμής ανθρωπογενών εκπομπών (ευρύτερη περιοχή Ομόνοιας), (γ) η περιοχή του προγράμματος Thermopolis (οδός Πατησίων), (δ) ένα σημείο υψηλής κίνησης οχημάτων (Λεωφόρος Κηφισού), (ε) μία τυπική πυκνοκατοικημένη συνοικία (Ζωγράφου) και (ζ) μία τυπική αραιοκατοικημένη συνοικία (Βριλήσσια).....	117
Σχήμα 5-11	Ετήσια διακύμανση του συνολικού Q_F και των επιμέρους συνιστωσών του Q_F για το σύνολο του Πολεοδομικού Συγκροτήματος της Πρωτεύουσας, για το έτος 2012.	118
Σχήμα 5-12	Αποτελέσματα της ανάλυσης στις κύριες συνιστώσες: (α) PC1, (β) PC2, (γ) PC3 και (δ) PC4.	119
Σχήμα 5-13	Δείκτης αστικής θερμικής έκθεσης (UHeatEx) σε χωρική διακριτική ικανότητα 100 m. Η κλίμακα κυμαίνεται από χαμηλή (0) σε υψηλή (10) θερμική περιβαλλοντική ποιότητα.....	121
Σχήμα 5-14	Συσχέτιση μεταξύ του οικογενειακού εισοδήματος και του δείκτη UHeatEx ανά ταχυδρομικό κωδικό της περιοχής μελέτης.	123
Σχήμα 5-15	Μελλοντική προβολή της θερμοκρασίας αέρα για την πόλη της Αθήνας, χρησιμοποιώντας το σύνολο των μοντέλων EURO-CORDEX για το χρονικό διάστημα 2020–2070. Το σκιασμένο τμήμα στο σχήμα αντιπροσωπεύει ± μία τυπική απόκλιση.	123
Σχήμα 6-1	Το σύνολο των εξεταζόμενων ευρωπαϊκών πόλεων. Οι διακεκομμένες μαύρες γραμμές υποδεικνύουν τα τέσσερα επάλληλα πλέγματα της προσομοίωσης με το μοντέλο WRF, με αρίθμηση από το χαμηλότερης (D1) στο υψηλότερης χωρικής ανάλυσης πλέγμα (D4).	140
Σχήμα 6-2	Το Πολεοδομικό Συγκρότημα της Πρωτεύουσας και η τοποθεσία των εξεταζόμενων μετεωρολογικών σταθμών. Η αντιστοίχιση των κωδικών των σταθμών δίνεται στον Πίνακα 6-2. Υπόβαθρο: εικόνα Landsat 8 (28 Ιουνίου 2017) σε χρωματική σύνθεση κόκκινο-πράσινο-μπλε (RGB).....	141
Σχήμα 6-3	Χωρική αποτύπωση μορφολογικών παραμέτρων για την περιοχή της Αθήνας σε χωρική διακριτική ικανότητα 1 km: (α) λ_{imp} , (β) λ_b , (γ) H , (δ) H/W , (ε) λ_c και (ζ) λ_i	143
Σχήμα 6-4	Χαρτογράφηση της αστικής περιοχής της Αθήνας σε Τοπικές Κλιματικές Ζώνες (LCZ), σε χωρική διακριτική ικανότητα 1 km.....	144
Σχήμα 6-5	Η σχέση μεταξύ του LST και των λ_{imp} , λ_b και H για το σύνολο των εξεταζόμενων πόλεων: κατά τη διάρκεια της ημέρας (α), (β) και (γ),	

	και κατά τη διάρκεια της νύχτας (δ), (ε) και (ζ) αντίστοιχα. Οι καμπύλες μαύρου χρώματος αντιστοιχούν στη γραμμή παλινδρόμησης τύπου lowess.....	155
Σχήμα 6-6	Η σχέση μεταξύ του LST και του H ανά εξεταζόμενη πόλη κατά τη διάρκεια της ημέρας. Οι καμπύλες μαύρου χρώματος αντιστοιχούν στη γραμμή παλινδρόμησης τύπου lowess.....	156
Σχήμα 6-7	Όμοια με το Σχήμα 6-6, κατά τη διάρκεια της νύχτας.	157
Σχήμα 6-8	Χωρική αποτύπωση της μέσης τιμής της περιόδου Ιούνιος – Αύγουστος 2017 του MODIS – LST (Aqua) για την Αθήνα), (α) ~14.30 τοπική ώρα και (β) ~02.30 τοπική ώρα.	163
Σχήμα 6-9	Όμοια με το Σχήμα 6-8, για τις ισοπληθείς καμπύλες της διαφοράς ως προς τη μέση τιμή του συνόλου της περιοχής μελέτης.	164
Σχήμα 6-10	Η σχέση μεταξύ του LST και των H/W , λ_c και λ_i για το πολεοδομικό συγκρότημα της Αθήνας: κατά τη διάρκεια της ημέρας (α), (β) και (γ), και κατά τη διάρκεια της νύχτας (δ), (ε) και (ζ) αντίστοιχα. Οι καμπύλες μαύρου χρώματος αντιστοιχούν στη γραμμή παλινδρόμησης τύπου lowess.....	165
Σχήμα 6-11	Όμοια με το Σχήμα 6-10, για το ευρύτερο κέντρο της Αθήνας.	166
Σχήμα 6-12	Διάγραμμα διασποράς μεταξύ του MODIS – LST και της εκτιμώμενης επιφανειακής θερμοκρασίας από το μοντέλο WRF (T_s) (7 – 11 Αυγούστου 2017).....	167
Σχήμα 6-13	Χωρική αποτύπωση της εκτιμώμενης επιφανειακής θερμοκρασίας για την Αθήνα (7 – 11 Αυγούστου 2017) μέσω του μοντέλου WRF (T_s) και του MODIS – LST (Aqua) κατά τη διάρκεια της ημέρας (α) και (γ) (~14.30 τοπική ώρα), και κατά τη διάρκεια της νύχτας (β) και (δ) (~02.30 τοπική ώρα) αντίστοιχα.....	167
Σχήμα 6-14	Διαγράμματα διασποράς μεταξύ της παρατηρούμενης και της εκτιμώμενης επιφανειακής θερμοκρασίας αέρα από το μοντέλο WRF (διαγνωστική μεταβλητή T_{as}) (7 – 11 Αυγούστου 2017).	169
Σχήμα 6-15	Όμοια με το Σχήμα 6-14, για τη διαγνωστική μεταβλητή $T_{as,urb}$	170
Σχήμα 6-16	Χωρική αποτύπωση της εκτιμώμενης επιφανειακής θερμοκρασίας αέρα από το μοντέλο WRF (διαγνωστική μεταβλητή $T_{as,urb}$) (7 – 11 Αυγούστου 2017), κατά τη διάρκεια της ημέρας (α) και κατά τη διάρκεια της νύχτας (β).	171

Κατάλογος αρκτικόλεξων

ΑΔΜΗΕ	Ανεξάρτητος Διαχειριστής Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας
ΓΣΠ	Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών
ΔΔΣ	Διεθνής Διαστημικός Σταθμός
ΔΕΔΔΗΕ	Διαχειριστής Ελληνικού Δικτύου Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας
ΔΕΣΦΑ	Διαχειριστής Εθνικού Συστήματος Φυσικού Αερίου
ΕΛΣΤΑΤ	Ελληνική Στατιστική Αρχή
ΕΜΗΚ	Ετήσια Μέση Ημερήσια Κυκλοφορία
ΕΜΥ	Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία
ΚΔΚ	Κέντρο Διαχείρισης Κυκλοφορίας
ΠΣΠ	Πολεοδομικό Συγκρότημα της Πρωτεύουσας
ΣΕΑΑ	Σύνδεσμος Εισαγωγέων Αντιπροσώπων Αυτοκινήτων
ANN	Τεχνητά νευρωνικά δίκτυα
ARW	Advanced Research WRF
ASTER	Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer
BEM	Ενεργειακό μοντέλο κτηρίων
BEP	Building Effect Parameterization
BH	Building Height
BI	Bare Soil Index
CLMS	Copernicus Land Monitoring Service
CORDEX	Coordinated Regional Downscaling Experiment
DEM	Ψηφιακό υψομετρικό μοντέλο εδάφους
DisTrad	Disaggregation Procedure for Radiometric Surface Temperature
DOS	Αφαίρεση σκοτεινών στόχων
DSM	Ψηφιακό μοντέλο επιφανείας
EBBI	Enhanced Built-Up and Bareness Index
EC	Τυρβώδης συνδιακύμανση
ECMWF	Ευρωπαϊκό Κέντρο Μεσοπρόθεσμης Πρόγνωσης Καιρού
ECOSTRESS	Ecosystem Spaceborne Thermal Radiometer Experiment on Space Station
ESA	Ευρωπαϊκή Υπηρεσία Διαστήματος
ESTM	Element surface temperature method
EVI	Ενισχυμένος δείκτης βλάστησης
GIS	Γεωγραφικό σύστημα πληροφοριών
GCM	Παγκόσμιο κλιματικό μοντέλο
IGBP	International Geosphere Biosphere Programme

IMD	Impervious Density
ISL	Αδρανειακό υπόστρωμα
LAEA	Lambert Azimuthal Equal Area
LCZ	Τοπική Κλιματική Ζώνη
lowess	Locally weighted scatterplot smoothing
LP DAAC	Land Processes Distributed Active Archive Center
LSM	Land Surface Model
LST	Επιφανειακή θερμοκρασία του εδάφους
LULC	Land use / Land cover
MAE	Μέσο απόλυτο σφάλμα
ME	Μέσο σφάλμα
MLP	Multilayer Perceptron
MNDWI	Modified Normalized Difference Water Index
MODIS	Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer
MOST	Θεωρία ομοιότητας Monin-Obukhov
NDBI	Normalized Difference Built-up Index
NDVI	Κανονικοποιημένος διαφορικός δείκτης βλάστησης
NMM	Nonhydrostatic Mesoscale Model
OHM	Objective Hysteresis Model
OLS	Ελαχίστων τετραγώνων
PAR	Φωτοσυνθετικά ενεργός συνιστώσα της ηλιακής ακτινοβολίας
PCA	Ανάλυση στις κύριες συνιστώσες
RCM	Περιοχικό κλιματικό μοντέλο
RF	Τυχαία δάση
RMSE	Τετραγωνική ρίζα μέσου τετραγωνικού σφάλματος
RR	Παλινδρόμηση ridge
RRTM	Rapid Radiative Transfer Model
RSL	Υπόστρωμα τραχύτητας
SAR	Spatial Autoregressive
SAVI	Soil Adjusted Vegetation Index
SEB	Επιφανειακό ενεργειακό ισοζύγιο
SEM	Spatial Error Model
SLM	Spatial Lag Model
SLUCM	Single-Layer Urban Canopy Model
SLUM	Spectral Library of impervious Urban Materials
SSR	Αθροισμα των τετραγώνων των υπολοίπων
SUHI	Επιφανειακή αστική θερμική νησίδα
SURFRAD	Surface Radiation Budget Network
SW	(Αλγόριθμος) διαχωρισμού παραθύρων
TES	Temperature emissivity separation
TIR	Θερμικό υπέρυθρο

TMS	Thermal mass scheme
TOA	Κορυφή της ατμόσφαιρας
TsHARP	Thermal imagery Sharpening
UBL	Αστικό οριακό στρώμα
UCL	Κτηριακό στρώμα
UHeatEx	Δείκτης Αστικής Θερμικής Έκθεσης
UHI	Αστική θερμική νησίδα
UHI _{UCL}	Αστική θερμική νησίδα του κτηριακού στρώματος
UMEP	Urban Multi-scale Environmental Predictor
UTM	Παγκόσμια Εγκάρσια Μερκατορική (προβολή)
VIF	Variance Inflation Factor
VZA	Ζενίθια γωνία επόπτευσης
WPS	WRF Pre-processing System
WRF	Weather Research and Forecasting Model
WUDAPT	World Urban Database and Access Portal Tools
YSU	Yonsei University

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

Εισαγωγή

Με τον όρο αστικοποίηση περιγράφεται τόσο η μετακίνηση των ανθρώπων προς τα αστικά κέντρα όσο και η διάχυση του αστικού χώρου προς την ύπαιθρο (Mills, 2007). Τα τελευταία 50 έτη σημειώθηκε μία ραγδαία αύξηση του παγκόσμιου αστικού πληθυσμού κατά περίπου 3 δισεκατομμύρια, με αποτέλεσμα πλέον σήμερα ο μισός πληθυσμός της γης να κατοικεί σε πόλεις. Το παραπάνω είναι ιδιαίτερα εντυπωσιακό ειδικά εάν συνεκτιμηθεί ότι η έκταση που καταλαμβάνουν τα αστικά κέντρα αποτελεί προσεγγιστικά μόνο το 1% της συνολικής (μη υδάτινης) επιφάνειας του πλανήτη (Schneider et al., 2009). Επιπλέον, εκτιμάται ότι ο πληθυσμός των πόλεων θα συνεχίσει να αυξάνεται σημαντικά στο μέλλον, υπερβαίνοντας το 65% του συνολικού πληθυσμού της Γης το 2050 —το 80% του πληθυσμού για την περίπτωση της Ευρώπης— (United Nations, 2018).

Η αστικοποίηση παρουσιάζει μία αδιαμφισβήτητη διασύνδεση με την οικονομική πρόοδο και την αύξηση της κοινωνικής ευημερίας που σημειώθηκε κατά τον 20^ο αιώνα στον αναπτυγμένο κόσμο (Spence et al., 2008). Παρ' όλα αυτά, η επέκταση του ανθρωπογενούς περιβάλλοντος συνοδεύεται με μια σειρά περιβαλλοντικών επιπτώσεων (Johnson, 2001; Grimmond, 2007; Kennedy et al., 2007; Gurjar et al., 2008; Jakovljevic et al., 2009): η κίνηση των οχημάτων και οι λοιπές ανθρωπογενείς δραστηριότητες επιδεινώνουν την ποιότητα του ατμοσφαιρικού αέρα και τα επίπεδα του θορύβου, η επέκταση του αστικού ιστού λειτουργεί σε βάρος των φυσικών οικοσυστημάτων και της βιοποικιλότητας, η μείωση της κατεΐσδυσης των υδάτων και η ταυτόχρονη αύξηση της απορροής στην επιφάνεια της πόλης αυξάνει τον κίνδυνο των πλημμυρικών επεισοδίων, η μη σωστή διαχείριση των στερεών και υγρών αποβλήτων οδηγεί συχνά στη μόλυνση του εδάφους και των υδάτων, και τέλος η παρουσία της πόλης έχει επίδραση στο σύνολο σχεδόν των ατμοσφαιρικών παραμέτρων και ειδικότερα του τοπικού θερμικού περιβάλλοντος μιας πόλης.

Ο αντίκτυπος της αστικής επίδρασης στις ατμοσφαιρικές διεργασίες είναι ιδιαίτερα εμφανής και έντονος σε ότι αφορά τις τιμές της θερμοκρασίας αέρα. Ειδικότερα, οι αστικές περιοχές εμφανίζουν κατά κανόνα υψηλότερες θερμοκρασίες αέρα σε σχέση με τις γειτονικές υπαίθριες περιοχές, ιδίως κατά τις νυχτερινές ώρες (Oke, 1982). Το παραπάνω φαινόμενο είχε παρατηρηθεί ήδη από τις αρχές του 19^{ου} αιώνα (Howard, 1818), ενώ έχει καθιερωθεί να αναφέρεται ως «αστική θερμική νησίδα» (urban heat island, UHI) —με τον παραπάνω όρο να εμφανίζεται για πρώτη φορά πριν περίπου 70 χρόνια στους Balchin and Pye (1947) (Stewart, 2011a). Τις τελευταίες δεκαετίες έχει πραγματοποιηθεί εκτενής καταγραφή και κατανόηση των αιτιών του φαινομένου μέσα από πλήθος ερευνητικών μελετών (π.χ., Taesler, 1980; Arnfield, 1990; Santamouris et al., 2001; Fortuniak et al., 2006; Skarbit et al., 2017).

Τόσο η αστική θερμική νησίδα όσο και η γενικότερη τροποποίηση του μικροκλίματος των πόλεων μπορούν να θεωρηθούν απόρροια δύο διακριτών αλλά και αλληλοσυνδεδεμένων εκφάνσεων της πόλης: της αστικής μορφολογίας και της αστικής λειτουργίας (Mills, 2007). Η αστική μορφολογία περιλαμβάνει τα ειδικά χαρακτηριστικά που παρουσιάζει μια αστική περιοχή όσον αφορά την κάλυψη γης, τις ιδιότητες των υλικών και την τρισδιάστατη δομή της. Οι ιδιότητες των υλικών περιλαμβάνουν τον τρόπο με τον οποίο αυτά αλληλοεπιδρούν με την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, την ικανότητά τους να λαμβάνουν, να μεταδίδουν στο εσωτερικό τους και να διατηρούν θερμότητα και νερό (υγρασία), καθώς και τα αεροδυναμικά τους χαρακτηριστικά (Oke et al., 2017). Από την άλλη πλευρά, η αστική λειτουργία εμπερικλείει το σύνολο των ανθρώπινων δραστηριοτήτων εντός μίας πόλης οι οποίες σχετίζονται με την κατανάλωση καυσίμων, πρώτων υλών και νερού για την κάλυψη των ανθρωπίνων αναγκών, και την επακόλουθη παραγωγή ρύπων και αποβλήτων (Mills, 2007) —δηλ. με τις διεργασίες του αστικού μεταβολισμού (Chrysoulakis et al., 2014).

Η υποβάθμιση του αστικού θερμικού περιβάλλοντος έχει βρεθεί ότι παρουσιάζει ιδιαίτερα δυσχερή αντίκτυπο στην υγεία του πληθυσμού (Basu, 2009) και στην ενεργειακή κατανάλωση για τις ανάγκες ψύξης των κτηριακών χώρων (Santamouris et al., 2015). Η ολοένα και εντεινόμενη αστικοποίηση επιτάσσει επομένως την ανάπτυξη και εφαρμογή πολιτικών που θα καταστήσουν τις πόλεις βιώσιμες και ανθεκτικές. Το παραπάνω καθίσταται επιτακτικό εξαιτίας του μεταβαλλόμενου κλίματος της Γης, μέσω της ανθρωπογενούς ενίσχυσης του φαινομένου του θερμοκηπίου (Stocker, 2014). Έτσι, στην υφιστάμενη επιβάρυνση από το φαινόμενο της αστικής θερμικής νησίδας οι κάτοικοι των πόλεων αντιμετωπίζουν το προστιθέμενο θερμικό φορτίο της κλιματικής αλλαγής, καθώς και συχνότερα και εντονότερα επεισόδια καύσωνα (Rosenzweig et al., 2011). Παράλληλα, οι πόλεις αποτελούν αφενός πηγή της κλιματικής αλλαγής —παράγοντας το ~50% του συνόλου των εκπομπών CO₂—, και αφετέρου κύριοι φορείς για την αντιμετώπισή της (Mills, 2007).

Οι αστικές περιοχές αποτελούν ένα πολύπλοκο, δυναμικό σύστημα με σημαντικές χωρικές και χρονικές διακυμάνσεις στο εσωτερικό τους. Η δορυφορική τηλεπισκόπηση αποτελεί ένα ιδιαίτερα πολύτιμο εργαλείο για τη μελέτη του αστικού περιβάλλοντος καθώς επιτρέπει (Yang, 2011): α) την ταυτόχρονη κάλυψη όλης της έκτασης μιας πόλης, β) τη δειγματοληψία της περιοχής μελέτης με ομοιογενή και οικονομικά αποδοτικό τρόπο, γ) την περιοδικότητα των πραγματοποιούμενων παρατηρήσεων και τη δυνατότητα κατασκευής μακροχρόνιων χρονοσειρών δεδομένων, δ) την αξιοποίηση της πληροφορίας η οποία προέρχεται από διαφορετικά τμήματα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος και ε) τη μελέτη φαινομένων σε διαφορετικές χωρικές και χρονικές κλίμακες με τον συνδυασμό διαφορετικών δορυφορικών συστημάτων.

Μεταξύ των δυνατοτήτων που παρέχει η χρήση τηλεπισκόπησης ξεχωρίζει η εξαγωγή της επιφανειακής θερμοκρασίας του εδάφους (Land Surface Temperature, LST) μέσω των καταγραφών αισθητήρων οι οποίοι λειτουργούν στο θερμικό υπέρυθρο τμήμα του φάσματος. Το LST αποτελεί μία από τις σημαντικότερες περιβαλλοντικές μεταβλητές με έντονη επίδραση στον καιρό και το κλίμα του πλανήτη. Συμβάλλει στη διαμόρφωση σχεδόν του συνόλου των ατμοσφαιρικών διεργασιών της

επιφάνειας, ρυθμίζοντας την εξερχόμενη θερμική ακτινοβολία και τις τυρβώδεις ροές ενέργειας. Πρόσφατα, το LST προστέθηκε στις «Βασικές Κλιματικές Μεταβλητές» (Essential Climate Variables, ECV) του «Παγκόσμιου Συστήματος Παρατήρησης του Κλίματος» (Global Climate Observing System, GCOS) (<https://gcos.wmo.int/en/essential-climate-variables>). Η χρησιμότητα της επιφανειακής θερμοκρασίας αναδεικνύεται μέσα από μεγάλο αριθμό εφαρμογών σε πληθώρα πεδίων (Stathopoulou and Cartalis, 2007; Kuenzer and Dech, 2013; Li, Tang, et al., 2013; Guillevic et al., 2018): χρησιμοποιείται μεταξύ άλλων: για την παρακολούθηση της ξηρότητας του εδάφους και των διεργασιών της εξατμισοδιαπνοής, την πρόβλεψη της ωρίμανσης και της απόδοσης των καλλιεργειών, τη διαχείριση των υδατικών αποθεμάτων, τη διενέργεια μελετών σχετιζόμενες με την ανθρώπινη υγεία και τη διάδοση των επιδημιών, και την αξιολόγηση της αυξητικής τάσης της θερμοκρασίας του πλανήτη λόγω κλιματικής αλλαγής. Ειδικότερα για το αστικό περιβάλλον, η επιφανειακή θερμοκρασία του εδάφους είναι θεμελιώδους σημασίας, καθώς συνδέεται άμεσα με τις ροές ενέργειας και τη θερμοκρασία αέρα, διαμορφώνει το αστικό επιφανειακό ενεργειακό ισοζύγιο, αναδεικνύει τις χωρικές διακυμάνσεις του θερμικού περιβάλλοντος και συνεισφέρει στην κατανόηση της ενεργειακής συμπεριφοράς των κτηρίων (Voogt and Oke, 2003).

Ωστόσο, όπως παρατηρείται από τον Πίνακα 1-1, τα υπάρχοντα δορυφορικά συστήματα με δυνατότητα παρατηρήσεων στο θερμικό υπέρυθρο δεν διαθέτουν την ικανότητα για ταυτόχρονη λεπτομερή χωρική και χρονική κάλυψη. Οι μετεωρολογικοί δορυφόροι παρέχουν πολύ υψηλή χρονική συχνότητα παρατηρήσεων, όμως η χωρική διακριτική ικανότητά τους είναι ιδιαίτερα χαμηλή. Οι δορυφόροι με ημερήσια χρονική επαναληπτικότητα (π.χ. Terra, Aqua, Sentinel-3A/B) διαθέτουν χωρική ανάλυση της τάξης του 1 km. Η παραπάνω ανάλυση, αν και χρήσιμη για τη χωρική διερεύνηση των βασικών διαφοροποιήσεων της επιφανειακής θερμοκρασίας εντός του αστικού χώρου (Roth et al., 1989) —όπως θα αποδειχθεί και στην παρούσα μελέτη—, δεν επιτρέπει την ανάδειξη των θερμικών επιδράσεων των επιμέρους αστικών στοιχείων (Voogt and Oke, 2003). Επομένως, για την ημερήσια καταγραφή του LST εντός του αστικού ιστού σε επίπεδο οικοδομικού τετραγώνου (100 m) είναι απαραίτητη η χρήση μεθόδων οι οποίες θα ενισχύουν τη χωρική διακριτική ικανότητα —δηλ. θα πραγματοποιούν «υποκλιμάκωση»— των εικόνων οι οποίες προέρχονται από αισθητήρες με καθημερινές καταγραφές.

Οι μεθοδολογίες για την υποκλιμάκωση του LST είναι ένα καίριο θέμα διερεύνησης της επιστημονικής κοινότητας, με την «στατιστική υποκλιμάκωση» να λαμβάνει το μεγαλύτερο ενδιαφέρον ανάμεσα στις διαφορετικές προσεγγίσεις (Zhan et al., 2013). Σύμφωνα με αυτήν τη μέθοδο, το LST υποκλιμακώνεται βάσει της στατιστικής σχέσης που εμφανίζει με επιφανειακές παραμέτρους. Η στατιστική υποκλιμάκωση έχει χρησιμοποιηθεί σε σημαντικό αριθμό μελετών στο παρελθόν· ωστόσο, εντοπίζεται ότι υπάρχει σημαντική ασυμφωνία ανάμεσα στις εργασίες ως προς τις καταλληλότερες μεταβλητές πρόβλεψης, δεν υπάρχει επαρκής διερεύνηση για την εφαρμογή της σε αστικό περιβάλλον, ο συντελεστής εκπομπής δεν ενσωματώνεται στον αλγόριθμο υποκλιμάκωσης και η απόδοση των διαφορετικών αλγορίθμων συχνά δεν συγκρίνεται μεταξύ τους.

Πίνακας 1-1 Τα σημαντικότερα σε λειτουργία συστήματα δορυφορικής τηλεπισκόπησης που πραγματοποιούν καταγραφές στην περιοχή του θερμικού υπέρυθρου και καλύπτουν την περιοχή της Ευρώπης.

Δορυφόρος/ πλατφόρμα	Αισθητήρας	Χωρική ανάλυση (m)	Επαναληπτικότητα	Έτος εκκίνησης
Terra	ASTER	90	Μη συνεχείς λήψεις	1999
Terra	MODIS	1000	2 λήψεις ανά ημέρα	1999
Aqua	MODIS	1000	2 λήψεις ανά ημέρα	2002
MSG	SEVIRI	3000	15 λεπτά	2002
Metop	AVHRR	1000	2 λήψεις ανά ημέρα	2007
Landsat 8	TIRS	100	16 ημέρες	2013
Sentinel-3A	SLSTR	1000	2 λήψεις ανά ημέρα	2016
Sentinel-3B	SLSTR	1000	2 λήψεις ανά ημέρα	2018
ΔΔΣ ¹	ECOSTRESS	70	~3 ημέρες	2018

¹ Διεθνής διαστημικός σταθμός

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η καταγραφόμενη επιφανειακή θερμοκρασία μέσω δορυφορικών αισθητήρων μπορεί να αξιοποιηθεί για τον προσδιορισμό των αστικών ροών ενέργειας (Chrysoulakis et al., 2018). Αυτές διαδραματίζουν θεμελιώδη ρόλο στη διαμόρφωση του θερμικού περιβάλλοντος και της αστικής θερμικής νησίδας μιας πόλης, παρουσιάζοντας επιπλέον σημαντική χωρική διακύμανση. Γενικότερα, τα αστικά κέντρα αποτελούν ένα έντονα ανομοιογενές περιβάλλον με απότομες αλλαγές των χαρακτηριστικών της αστικής μορφολογίας και λειτουργίας μεταξύ γειτονικών περιοχών. Οι παραπάνω διαφοροποιήσεις συμβάλλουν στη δημιουργία διακριτών ζωνών στο εσωτερικό των πόλεων με συγκεκριμένα κλιματικά χαρακτηριστικά, δηλ. διαφορετικών «τοπικών κλιματικών ζωνών» (Local Climate Zones, LCZ) (Stewart and Oke, 2012). Παρότι στο παρελθόν είχε αναπτυχθεί το πλαίσιο για ανάλογες κατηγοριοποιήσεις των χωρικών ενοτήτων μιας πόλης με βάση τα μορφολογικά χαρακτηριστικά τους (π.χ., Oke, 2004), η πληρότητα της θεώρησης των LCZ έχει προσελκύσει ιδιαίτερο επιστημονικό ενδιαφέρον τα τελευταία έτη και έχει υιοθετηθεί σε πλήθος εφαρμογών, μεταξύ άλλων για την αποτύπωση του θερμικού περιβάλλοντος μιας πόλης (Alexander and Mills, 2014; Kaloustian and Bechtel, 2016).

Παρ' όλα αυτά, η ταξινόμηση των LCZ αναπτύχθηκε κατά κύριο λόγο με γνώμονα τη συστηματοποίηση της καταγραφής των σταθμών μέτρησης του UHI, προκειμένου να καταστεί εφικτή η καλύτερη επικοινωνία και σύγκριση των αποτελεσμάτων από διαφορετικές πόλεις (Stewart, 2011b). Συνεπώς, οι κατηγορίες των LCZ είναι σε έναν βαθμό γενικευμένες και παρουσιάζουν σημαντικό εύρος τιμών για τις παραμέτρους κάθε τάξης. Κατά συνέπεια, έχει παρατηρηθεί περιοχές μιας αστικής περιοχής με τον ίδιο τύπο LCZ να παρουσιάζουν σημαντικά διαφορετική θερμική συμπεριφορά (Quanz et al., 2018). Οι αστικοί θερμικοί δείκτες μπορούν να ενσωματώνουν με πιο συνεχή τρόπο τις ενδοαστικές διαφοροποιήσεις και να προσαρμόζονται ευκολότερα στα ειδικά χαρακτηριστικά της εκάστοτε περιοχής μελέτης. Ωστόσο, στους υφιστάμενους θερμικούς δείκτες η

τριδιάστατη διάσταση των πόλεων κατά κανόνα παραλείπεται και σημαντικές δυναμικές παράμετροι —όπως οι ανθρωπογενείς ροές ενέργειας— δεν λαμβάνονται υπόψη. Συχνά, οι εν λόγω δείκτες βασίζονται μόνο στις τιμές που παρουσιάζει η επιφανειακή θερμοκρασία για μια πόλη.

Για το LST έχει καταγραφεί στη βιβλιογραφία μία σαφής αρνητική σύνδεση με το ποσοστό βλάστησης για τις αστικές περιοχές (π.χ., Weng et al., 2004). Δηλαδή, τα φυτά παρέχουν δροσιστική επίδραση στο αστικό περιβάλλον, κυρίως μέσω της διαδικασίας της εξάτμισης του νερού μέσω από την επιφάνεια των φύλλων, καταναλώνοντας έτσι την ηλιακή ενέργεια, η οποία σε διαφορετική περίπτωση θα χρησιμοποιούνταν για τη θέρμανση της επιφάνειας. Από την άλλη πλευρά, η μελέτη της διασύνδεσης του LST με επιφανειακές παραμέτρους οι οποίες περιγράφουν την τρισδιάστατη αστική μορφολογία είναι σχετικά περιορισμένη. Επιπλέον, οι αντίστοιχες ερευνητικές προσπάθειες περιορίζονται εν γένει σε μικρό αριθμό εικόνων για μια συγκεκριμένη πόλη, ενώ συχνά χρησιμοποιούνται δορυφορικές παρατηρήσεις μόνο κατά τη διάρκεια της ημέρας.

Η χρησιμοποίηση ατμοσφαιρικών μοντέλων σε σύζευξη με κάποιο σχήμα αστικής παραμετροποίησης μπορεί να αποτελέσει έναν εναλλακτικό τρόπο μελέτης του αστικού θερμικού περιβάλλοντος, παράλληλα με τις επιτόπιες μετρήσεις και τις δορυφορικές καταγραφές (Chen et al., 2011). Τα τελευταία έτη, επιχειρείται η ενσωμάτωση των ενδοαστικών διαφοροποιήσεων των παραμέτρων της αστικής επιφάνειας στις αριθμητικές προσομοιώσεις σε υψηλή χωρική ανάλυση (Ronda et al., 2017). Η ικανότητα των μοντέλων να αναπαράγουν τις αστικές χωρικές διακυμάνσεις της επιφανειακής θερμοκρασίας και της θερμοκρασίας του αέρα εξακολουθεί ωστόσο να αποτελεί ένα ανοιχτό ζήτημα προς διερεύνηση.

Όπως προκύπτει από την παραπάνω συζήτηση, η μελέτη του αστικού θερμικού περιβάλλοντος και η διασύνδεσή του με την αστική μορφολογία, λειτουργία και ροές ενέργειας αποτελεί ένα καίριο ερευνητικό θέμα. Η πόλη της Αθήνας (Πολεοδομικό Συγκρότημα της Πρωτεύουσας, ΠΣΠ) αποτελεί ένα ιδιαίτερα ενδιαφέρον πεδίο μελέτης, με υψηλή συγκέντρωση πληθυσμού, υποβαθμισμένο θερμικό περιβάλλον και έντονη ανομοιομορφία στο εσωτερικό της. Η επίδραση του οικοδομικού κορεσμού της Αθήνας στις ατμοσφαιρικές παραμέτρους έχει αποτελέσει αντικείμενο μελέτης ήδη από τη δεκαετία του '50 (Karariperis, 1954). Έκτοτε, έχουν πραγματοποιηθεί αρκετές έρευνες με επίκεντρο την αστική θερμική νησίδα της πόλης (π.χ., Katsoulis and Theoharatos, 1985; Livada et al., 2002; Kourtidis et al., 2015), χωρίς όμως μέχρι στιγμής να έχει πραγματοποιηθεί μια λεπτομερής καταγραφή των γνωρισμάτων της αστικής μορφολογίας και λειτουργίας για το σύνολο του συγκροτήματος.

Με βάση τα παραπάνω, στόχος της παρούσας διδακτορικής διατριβής είναι μια πολυπαραγοντική διερεύνηση του θερμικού περιβάλλοντος της Αθήνας —σε δύο βασικές χωρικές κλίμακες της αστικής επιφάνειας: α) στα 100 m και β) στο 1 km—, με έμφαση στις υφιστάμενες ενδοαστικές διαφοροποιήσεις. Ειδικότερα, τα βασικά θέματα στα οποία επικεντρώνεται η μελέτη αφορούν τα εξής:

- i. Βελτιστοποίηση των υφιστάμενων τεχνικών στατιστικής υποκλιμάκωσης από το 1 km στα 100 m· διερεύνηση της ταυτόχρονης ενσωμάτωσης πολλαπλών μεταβλητών πρόβλεψης για την ενίσχυση της ικανότητας πρόβλεψης και γενίκευσης του μοντέλου, χρησιμοποιώντας αλγορίθμους γραμμικής παλινδρόμησης και διεργασίες μηχανικής μάθησης.
- ii. Φασματική ταξινόμηση της κάλυψης γης για την Αθήνα στη βέλτιστη δυνατή χωρική διακριτική ικανότητα, αξιοποιώντας ελεύθερα (μη εμπορικά) δορυφορικά δεδομένα.
- iii. Εκτίμηση της δυνατότητας υπολογισμού με ικανοποιητική ακρίβεια των τυρβωδών ενέργειας, μέσω της επιφανειακής θερμοκρασίας υψηλής χωρικής ανάλυσης που προκύπτει από την εφαρμογή της υποκλιμάκωσης.
- iv. Αξιολόγηση της κατανομής και της έντασης των ανθρωπογενών ροών θερμότητας στην Αθήνα.
- v. Ανάπτυξη ενός νέου δείκτη αστικής θερμικής ποιότητας σε υψηλή χωρική διακριτική ικανότητα, ο οποίος θα ενσωματώνει τα κύρια αίτια ανάπτυξης της αστικής θερμικής νησίδας.
- vi. Αποτύπωση των τοπικών κλιματικών ζωνών για την Αθήνα και σύγκρισή τους με τον προαναφερθέντα δείκτη.
- vii. Αξιολόγηση της επίδρασης στο LST βασικών μορφολογικών παραμέτρων σε ευρύτερη χωρική κλίμακα (1 km) —ποσοστό των αδιαπέρατων επιφανειών, ποσοστό της επιφάνειας κάλυψης από κτήρια και ύψος των κτηρίων.
- viii. Εξέταση της ικανότητας του μετεωρολογικού μοντέλου WRF να αποτυπώσει τις ενδοαστικές διαφοροποιήσεις του αστικού θερμικού μικροκλίματος (προσομοίωση σε χωρική ανάλυση 1 km), ενσωματώνοντας στο μοντέλο τις παραμέτρους που προέκυψαν από τα προηγούμενα στάδια της εργασίας.

Η διάρθρωση των κεφαλαίων της παρούσας ερευνητικής μελέτης είναι η εξής: Στο κεφάλαιο που ακολουθεί (Κεφάλαιο 2) γίνεται η παρουσίαση των σημαντικότερων διεργασιών του αστικού κλίματος. Εισάγονται οι έννοιες και οι παράμετροι που χρησιμοποιούνται για την περιγραφή του αστικού οριακού στρώματος και της αστικής επιφάνειας. Επιπρόσθετα, πραγματοποιείται μια σύντομη περιγραφή των όρων του επιφανειακού ενεργειακού ισοζυγίου, των αιτιών ανάπτυξης της αστικής θερμικής νησίδας, καθώς και των σημαντικότερων τεχνικών για τον μετριάσμό της. Τέλος, συμπεριλαμβάνεται μία εισαγωγή στις μεθόδους της δορυφορικής τηλεπισκόπησης στο θερμικό υπέρυθρο.

Στο Κεφάλαιο 3 ακολουθεί η περιγραφή της περιοχής μελέτης —Αθήνα, Πολεοδομικό Συγκρότημα της Πρωτεύουσας— με μια συνοπτική αναδρομή στην πολεοδομική εξέλιξη της πόλης. Επιπλέον, γίνεται ανασκόπηση της υπάρχουσας βιβλιογραφίας όσον αφορά το θερμικό περιβάλλον της Αθήνας.

Το Κεφάλαιο 4 περιλαμβάνει τη μεθοδολογία και τα αποτελέσματα της στατιστικής υποκλιμάκωσης. Αρχικά, παρουσιάζεται η κατηγοριοποίηση των διαφόρων ανθρωπογενών και φυσικών στοιχείων της Αθήνας έπειτα από τη φασματική ταξινόμηση μέσω του δορυφόρου Sentinel-2, και η μεθοδολογία για τον προσδιορισμό του συντελεστή θερμικής εκπομπής. Στη συνέχεια, πραγματοποιείται εκτενής αξιολόγηση των ποσοτικών και ποιοτικών χαρακτηριστικών των εκτιμώμενων θερμοκρασιών της στατιστικής υποκλιμάκωσης, και η επιλογή του βέλτιστου προτεινόμενου μοντέλου.

Στο Κεφάλαιο 5 πραγματοποιείται ο προσδιορισμός των χαρακτηριστικών της αστικής μορφολογίας και λειτουργίας της Αθήνας και ειδικότερα τεσσάρων καθοριστικών παραμέτρων για τη διαμόρφωση του αστικού θερμικού περιβάλλοντος: της αναλογίας διαστάσεων αστικής χαράδρας (H/W), του λόγου Bowen (β), της καθαρής μεταβολής του ρυθμού αποθήκευσης θερμότητας (ΔQ_s) και των ανθρωπογενών ροών θερμότητας (Q_F). Οι παραπάνω μεταβλητές συνδυάζονται για την ανάπτυξη ενός δείκτη αστικής θερμικής έκθεσης. Παράλληλα, στο ίδιο κεφάλαιο γίνεται η χαρτογράφηση των τοπικών κλιματικών ζωνών και η συνεξέτασή τους με τον προαναφερθέντα δείκτη.

Στο Κεφάλαιο 6, αξιοποιώντας τα υπολογιζόμενα χαρακτηριστικά της αστικής επιφάνειας από τα δύο προηγούμενα κεφάλαια, θα μελετηθεί η σχέση μεταξύ του LST και της αστικής μορφολογίας σε χωρική ανάλυση 1 km. Η σχετική ομογένεια στο εσωτερικό των επιμέρους διαμορφούμενων χωρικών ενοτήτων κατά τη συγκεκριμένη χωρική κλίμακα επιτρέπει την αξιολόγηση της επίδρασης της αστικής επιφάνειας στο LST με βάση τρία θεμελιώδη χαρακτηριστικά της: α) το ποσοστό ανθρωπογενών επιφανειών, β) την πυκνότητα κτηριακής κάλυψης και γ) το ύψος των κτηρίων. Στο συγκεκριμένο κομμάτι της εργασίας θα συμπεριληφθούν επιπρόσθετα άλλες 24 ευρωπαϊκές πόλεις, ώστε να αξιολογηθεί εάν τα αποτελέσματα για την Αθήνα μπορούν να επεκταθούν σε διαφορετικές αστικές περιοχές. Επιπλέον, στο Κεφάλαιο 6, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της εφαρμογής του ατμοσφαιρικού μοντέλου WRF για την πόλη της Αθήνας, διερευνώντας τη δυνατότητα αριθμητικής προσομοίωσης της συμβολής της αστικής μορφολογίας και λειτουργίας στο θερμικό της περιβάλλον.

Τέλος, στο Κεφάλαιο 7 συνοψίζονται τα κυριότερα αποτελέσματα και αναπτύσσονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την εκπόνηση της παρούσας μελέτης. Στο ίδιο κεφάλαιο παρατίθενται προτάσεις προς μελλοντική διερεύνηση για την περαιτέρω εξέλιξη της ερευνητικής προσπάθειας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

Αστικό Κλίμα

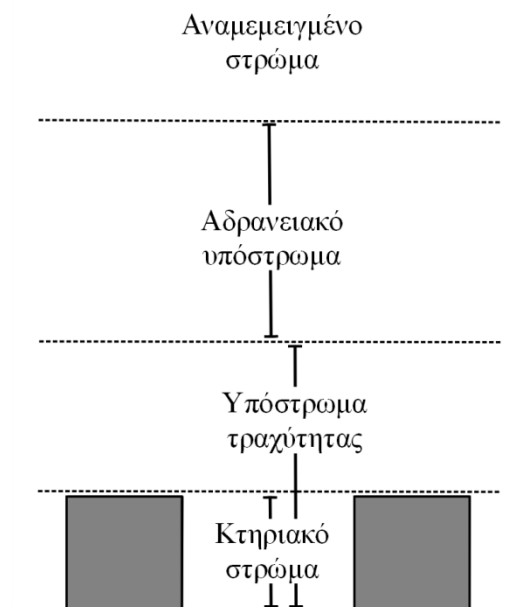
2.1 Αστικό οριακό στρώμα

Κάθε αστική περιοχή ασκεί έντονη επίδραση στις παραμέτρους και τις διεργασίες της υπερκείμενης ατμόσφαιρας μέσω ποικίλων μηχανισμών που σχετίζονται: α) με την αστική μορφολογία (urban form) —δηλ. τις ιδιότητες των υλικών, την κάλυψη γης και τη γεωμετρική δομή μιας πόλης— και β) με την αστική λειτουργία (urban function) —το σύνολο των ανθρωπογενών δραστηριοτήτων εντός του αστικού ιστού— (Oke et al., 2017). Η παραπάνω επίδραση της επιφάνειας στην ατμόσφαιρα εκτείνεται κατά κανόνα έως ένα ύψος λίγων χιλιομέτρων, όπου και καθίσταται αμελητέα. Το τμήμα της ατμόσφαιρας από την επιφάνεια μιας πόλης μέχρι το παραπάνω ύψος ορίζεται ως «αστικό οριακό στρώμα» (Urban Boundary Layer, UBL). Το UBL αποτελεί το πεδίο δράσης πλήθους διαφορετικών διεργασιών και αλληλοεπιδράσεων μεταξύ της ατμόσφαιρας και της επιφάνειας, των οποίων η συστηματική πειραματική μελέτη και η περιγραφή μέσω θεωρητικών μοντέλων έχει αποτελέσει αντικείμενο έντονης έρευνας κατά τις τελευταίες δεκαετίες (Barlow, 2014). Όπως αποτυπώνεται στο Σχήμα 2-1, εντός του UBL μπορούν να εντοπιστούν τέσσερα επιμέρους ατμοσφαιρικά στρώματα (Roth, 2000), το καθένα από τα οποία εμφανίζει διαφορετικά γνωρίσματα και εσωτερικούς μηχανισμούς:

- Κτηριακό στρώμα (Urban Canopy Layer, UCL): Αντιστοιχεί στο χαμηλότερο στρώμα της αστικής ατμόσφαιρας και εκτείνεται από την επιφάνεια του εδάφους έως το μέσο ύψος των κτηρίων. Το στρώμα χαρακτηρίζεται από ιδιαίτερα έντονη ετερογένεια· οι διεργασίες της ροής του ανέμου και των ανταλλαγών ενέργειας εντός αυτού καθορίζονται από τη μικροκλίμακα και από τα συγκεκριμένα χαρακτηριστικά του άμεσου κτηριακού περιβάλλοντος (Arnfield, 2003). Επιπλέον, η κατακόρυφη κατατομή του ανέμου και των υπολοίπων μετεωρολογικών παραμέτρων εμφανίζει σημαντικό βαθμό πολυπλοκότητας (Roth, 2000).
- Υπόστρωμα τραχύτητας (Roughness Sublayer, RSL): Άνω του επιπέδου των οροφών των κτηρίων έως 2-5 φορές το ύψος τους εκτείνεται το RSL, το μεταβατικό στρώμα ανάμεσα στην έντονα ετερογενή επιφάνεια και στα πιο ομογενή, ανώτερα στρώματα του UBL. Εντός του RSL, η ροή του ανέμου είναι ακόμα υπό την επίδραση των επιμέρους κτισμάτων (Oke, 1988), αποτελούμενη από τους αλληλοεπιδρώντες ολκούς (wakes) — τους στροβίλους που αναπτύσσονται στο υπήνεμο μέρος των κτηρίων— και τα αναδύμενα λοφία (plumes) θερμού αέρα (Arnfield, 2003). Η τύρβη του συγκεκριμένου

υποστρώματος παρουσιάζει ιδιαίτερα σημαντική ένταση και ισχυρή οριζόντια ανομοιομορφία (Roth, 2000; Christen et al., 2009). Το RSL τυπικά θεωρείται ότι εκκινεί από την επιφάνεια του εδάφους, εμπεριέχοντας το UCL ως διακριτό τμήμα του (Raupach et al., 1991).

- Αδρανειακό υπόστρωμα (Inertial Sublayer, ISL): Στο τμήμα του οριακού στρώματος που εμπεριέχεται στο ISL η επίδραση των επιμέρους κτηρίων έχει αποκτήσει πλέον ενιαία μορφή λόγω τυρβώδους ανάμιξης (Oke et al., 2017). Εν γένει, η τύρβη του στρώματος χαρακτηρίζεται από σημαντική ομοιογένεια, ενώ επιπλέον η μεταβολή των τυρβωδών ροών καθ' ύψος είναι αμελητέα. Λόγω της παραπάνω ιδιότητας του, το ISL αναφέρεται επίσης και ως «στρώμα σταθερών ροών» (Oke, 2002). Οι μετρήσεις των μετεωρολογικών παραμέτρων εντός του ISL θεωρούνται αντιπροσωπευτικές της ευρύτερης αστικής περιοχής (Oke, 2007).
- Αναμεμιγμένο στρώμα: Είναι το ανώτερο και εκτενέστερο στρώμα του UBL, αποτελώντας προσεγγιστικά το 90% της κατακόρυφης έκτασής του (Barlow, 2014). Οι ατμοσφαιρικές παράμετροι εντός του στρώματος είναι σχεδόν πλήρως ομογενοποιημένες, ενώ η κορυφή του συνοδεύεται κατά τη διάρκεια της ημέρας από μια θερμοκρασιακή αναστροφή. Κατά τις νυκτερινές ώρες το αναμεμιγμένο στρώμα δίνει τη θέση του στο «υπολειπόμενο στρώμα» (Oke, 2002).



Σχήμα 2-1 Τα διαφορετικά ατμοσφαιρικά στρώματα εντός του UBL. Προσαρμογή από Barlow (2014)

Όπως μπορεί να συνάγει κανείς από την παραπάνω περιγραφή των χαρακτηριστικών της κατακόρυφης κατατομής του UBL, έχει ιδιαίτερη σημασία για την κατανόηση των διεργασιών του αστικού κλίματος ο εντοπισμός της χωρικής κλίμακας στην οποία αυτές δρουν (Harman, 2003). Οι σημαντικότερες ατμοσφαιρικές κλίμακες ως προς τα συνήθη μελετώμενα φαινόμενα της αστικής κλιματολογίας είναι οι εξής (Oke, 1984; Oke et al., 2017):

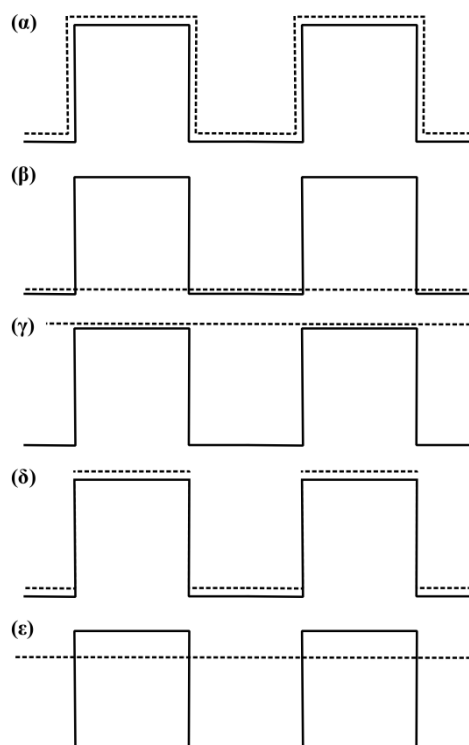
- Μικροκλίμακα: Αντανακλά τα αστικά στοιχεία μικρής χωρικής διάστασης (μεμονωμένοι δρόμοι, τοίχοι και κτήρια) και διεργασίες όπως το ισοζύγιο ενέργειας των επιμέρους αστικών επιφανειών και η ροή του ανέμου δια μέσω των κτηρίων. Η μικροκλίμακα εμφανίζει οριζόντια διάσταση της τάξης των 10–200 m και συμπεριλαμβάνει τις ατμοσφαιρικές διεργασίες του οριακού στρώματος που συντελούνται εντός του UCL.
- Η τοπική κλίμακα (100 m – 20 km) χρησιμοποιείται για τη περιγραφή των ιδιοτήτων και του κλίματος ευρύτερων περιοχών εντός του αστικού ιστού (π.χ. οικοδομικό τετράγωνο, γειτονιά/συννοικία). Στη συγκεκριμένη κλίμακα πραγματοποιείται κατά κανόνα η περιγραφή του επιφανειακού ενεργειακού ισοζυγίου μιας αστικής περιοχής (βλ. Ενότητα 2.2) και των αναπτυσσόμενων τοπικών κυκλοφοριών του αέρα μεταξύ γειτονικών περιοχών διαφορετικής θερμοκρασίας. Η τοπική κλίμακα αντιστοιχεί στα χαρακτηριστικά των παραμέτρων εντός του υποστρώματος ISL, ενώ αντίθετα το RSL θεωρείται ότι υπόκειται στην επίδραση τόσο της μικροκλίμακας όσο και της τοπικής κλίμακας.
- Η μέση κλίμακα περιγράφει διεργασίες χωρικής έκτασης μερικών δεκάδων χιλιομέτρων και αποτυπώνει την ολική επίδρασή του αστικού συγκροτήματος στην ατμόσφαιρα — όπως παρουσιάζεται σε ύψος εντός του αναμειγμένου στρώματος. Σε αυτή τη κλίμακα περιλαμβάνονται ακόμα ποικίλα ατμοσφαιρικά φαινόμενα, όπως η θαλάσσια αύρα και τα καταιγιδοφόρα νέφη.

2.2 Αστική επιφάνεια

Τα χαρακτηριστικά του UBL μιας αστικής περιοχής είναι κατά κύριο λόγο το αποτέλεσμα των ανταλλαγών ενέργειας και ορμής μεταξύ της αστικής επιφάνειας και του υπερκείμενου αέρα (Oke, 1988). Οι ιδιότητες των δομικών υλικών, καθώς και η τρισδιάστατη αστική δομή, έχουν καθοριστική επίδραση στον καταμερισμό της προσλαμβάνουσας ηλιακής ακτινοβολίας και επακόλουθα άμεση επίδραση στα κλιματικά γνωρίσματα των κατωτέρων στρωμάτων της ατμόσφαιρας. Εν γένει, η αστική επιφάνεια χαρακτηρίζεται από ιδιαίτερες, διακριτές ιδιότητες, οι οποίες μπορούν να διαχωριστούν στις εξής (Oke, 1988; Oke et al., 2017): α) ιδιότητες ακτινοβολίας (π.χ. ανακλαστικότητα και συντελεστής εκπομπής), β) θερμικές ιδιότητες (π.χ. θερμική αγωγιμότητα και ειδική θερμότητα), γ) ιδιότητες υγρασίας (π.χ. περιεκτικότητα σε υδρατμούς και πορώδης δομή) και δ) αεροδυναμικές ιδιότητες (π.χ. τραχύτητα εδάφους). Ωστόσο, δεν είναι εύκολο να αποδοθεί ένας

καθολικής εφαρμογής ορισμός στην αστική επιφάνεια ή να θεωρηθεί μία μοναδική προσέγγιση κατά την αντιμετώπισή της σε πρακτικό επίπεδο λόγω της μεγάλης πολυπλοκότητας που εμφανίζει (Voogt, 1995).

Στο Σχήμα 2-2 παρουσιάζονται κάποιες συνήθεις προσεγγίσεις για την περιγραφή της αστικής επιφάνειας, όπως εμφανίζονται κατά τις ερευνητικές μελέτες του αστικού κλίματος (Voogt and Oke, 1997). Η «ολική αστική επιφάνεια» (complete urban surface) (Σχήμα 2-2α) αποτελεί την ιδανική περίπτωση όπου λαμβάνεται υπόψη το σύνολο των επιμέρους οριζόντιων και κάθετων επιφανειών μιας περιοχής· αυτό κατά κανόνα στην πράξη καθίσταται από δύσκολο έως ανέφικτο να επιτευχθεί. Έτσι ανάλογα με την περίπτωση και τους στόχους μιας μελέτης πραγματοποιούνται ορισμένες απλουστεύσεις. Για παράδειγμα, ως αστική επιφάνεια μπορεί να θεωρηθεί μόνο η επιφάνεια του εδάφους (Σχήμα 2-2β) ή το επίπεδο του ύψους των κτηρίων (Σχήμα 2-2γ) —αγνοώντας στην τελευταία περίπτωση το υποκείμενο UCL ή αντιμετωπίζοντας την επίδρασή του σαν «μαύρο κουτί». Το Σχήμα 2-2δ αντιστοιχεί στην αστική επιφάνεια όπως αυτή καταγράφεται από ένα σύστημα αισθητήρων εγκατεστημένο σε σημαντικό ύψος από το έδαφος (π.χ. μέσω ενός δορυφορικού συστήματος παρακολούθησης) με κάθετη επόπτευση, ενώ το επίπεδο μηδενικής μετατόπισης (Σχήμα 2-2ε) αποτελεί το κατώτερο (θεωρητικό) επίπεδο κατά τη περιγραφή των τυρβωδών ανταλλαγών ορμής και θερμότητας. Ένα ιδιαίτερο γνώρισμα της αστικής επιφάνειας, και σημαντικό σημείο διαφοροποίησής του αστικού από το φυσικό περιβάλλον, αποτελεί η «αστική χαράδρα» (urban canyon). Η αστική χαράδρα αντιστοιχεί στη γεωμετρική διάταξη που σχηματίζεται από την



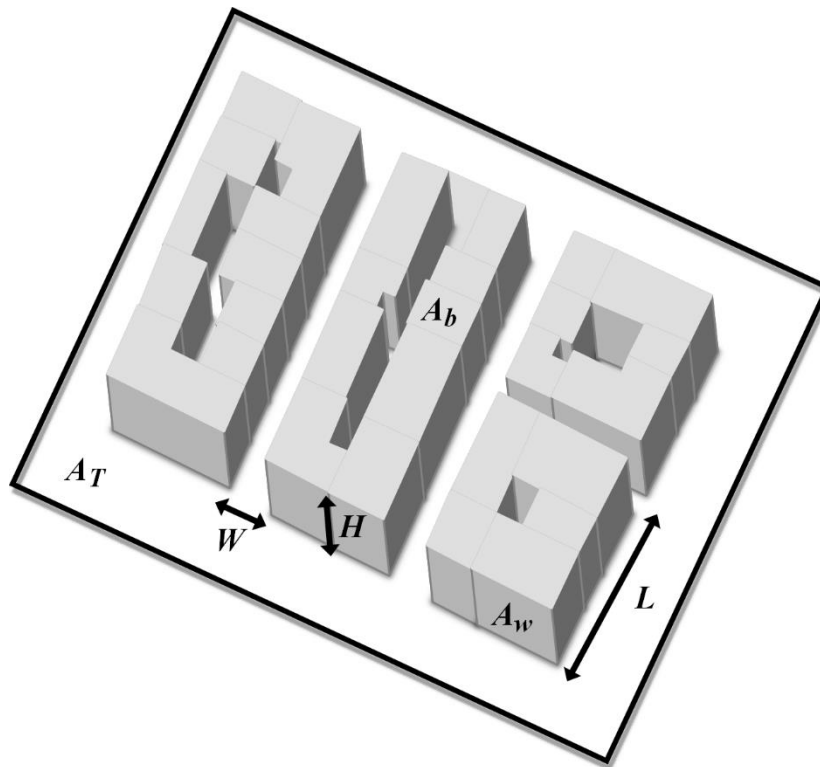
Σχήμα 2-2 Διαφορετικοί ορισμοί της αστικής επιφάνειας: α) ολική, β) επιφάνεια εδάφους, γ) κορυφή κτηρίων, δ) κάτοψη και ε) επίπεδο μηδενική μετατόπισης. Προσαρμογή από Voogt (1995).

ταυτόχρονη θεώρηση ενός δρόμου και των παράπλευρων κτηρίων του. Η αστική χαράδρα διαμορφώνει σε μεγάλο βαθμό τα ιδιαίτερα μικροκλιματικά χαρακτηριστικά των πόλεων.

Για την αναπαράσταση και την περιγραφή της αστικής επιφάνειας μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι χωρικές διαστάσεις των τυπικών αστικών στοιχείων (κτήρια, δρόμοι και δέντρα), το εμβαδόν κάλυψης των διαφορετικών επιφανειών (ή αντίστοιχα η ποσοστιαία τιμή τους ως προς το συνολικό εμβαδόν της περιοχής ενδιαφέροντος), καθώς και συνδυαστικοί παράμετροι που αποτυπώνουν την τρισδιάστατη δομή μιας αστικής ενότητας. Στον Πίνακα 2-1 ακολουθεί μια συγκεντρωτική παρουσίαση των πιο συχνά χρησιμοποιούμενων παραμέτρων, ενώ στο Σχήμα 2-3 αποτυπώνονται σχηματικά οι σημαντικότεροι εξ αυτών.

Πίνακας 2-1 Βασικές παράμετροι για την περιγραφή της κάλυψης γης, των βασικών διαστάσεων και της γεωμετρικής δομής μιας αστικής περιοχής.

Σύμβολο	Περιγραφή
A_T	Ολική οριζόντια επιφάνεια
A_c	Ολική επιφάνεια (τρειςδιάστατη αποτύπωση)
A_b	Επιφάνεια οροφών κτηρίων
A_i	Επιφάνεια αδόμητου, αδιαπέρατου εδάφους (π.χ. δρόμοι, πεζοδρόμια)
A_{floor}	Επιφάνεια ορόφων κτηρίων
A_w	Επιφάνεια τοίχων
A_v	Επιφάνεια βλάστησης
A_s	Επιφάνεια χώματος
A_f	Μετωπική επιφάνεια κτηρίων/δέντρων (προσήνεμη επιφάνεια)
H	Ύψος κτηρίων/δέντρων
L	Μήκος αστικής χαράδρας
W	Πλάτος δρόμου
H/W	Αναλογία διαστάσεων αστικής χαράδρας
ψ_{sky}	Συντελεστής θέασης ουρανού



Σχήμα 2-3 Σχηματική απεικόνιση των κυριότερων παραμέτρων για την περιγραφή της κάλυψης γης, των βασικών διαστάσεων και της γεωμετρικής δομής μιας αστικής περιοχής. A_T , A_b και A_w το εμβαδόν της ολικής οριζόντιας επιφάνειας, της επιφάνειας των οροφών και της επιφάνειας των τοίχων αντίστοιχα, H το ύψος ενός κτηρίου, L το μήκος μιας χαράδρας και W το πλάτος ενός δρόμου. Προσαρμογή από Grimmond and Oke (1999a).

Η αναλογία διαστάσεων της αστικής χαράδρας (canyon aspect ratio) (H/W) υπολογίζεται ως η μέση τιμή του ύψους (H) των κτηρίων ενός δρόμου προς το πλάτος του (W). Το H/W αποτελεί μια ιδιαίτερα σημαντική παράμετρο του αστικού μικροκλίματος έχοντας ισχυρή επίδραση στο σύνολο σχεδόν των διεργασιών εντός του UCL (Oke, 1982). Στενά συσχετιζόμενη με το H/W είναι η σημειακή παράμετρος του «συντελεστή θέασης ουρανού» (sky view factor) (ψ_{sky}) —το ποσοστό ακτινοβολίας το οποίο εκκινώντας από ένα σημείο της αστικής επιφάνειας κατορθώνει να φθάσει στην ατμόσφαιρα. Η μετωπική (frontal) επιφάνεια (A_f) των κτηριακών τοιχωμάτων υπολογίζεται μέσω της κάθετης προβολής των ελεύθερων επιφανειών των τοίχων στο διάνυσμα της ταχύτητας ανέμου. Το A_f λαμβάνει διαφορετική τιμή ανά εξεταζόμενη κατεύθυνση, ενώ κατά τον υπολογισμό του συμπεριλαμβάνεται ιδανικά και η αντίστοιχη επιφάνεια των δέντρων της αστικής περιοχής (Kent et al., 2017). Για κάθε παράμετρο i (π.χ. επιφάνεια κάλυψης κτηρίων) μπορεί να οριστεί η ποσοστιαία κάλυψη λ_i , δηλ. του ποσοστού κάλυψης της συγκεκριμένης παραμέτρου A_i ως προς την ολική οριζόντια επιφάνεια A_T :

$$\lambda_i = \frac{A_i}{A_T} \quad (2.1)$$

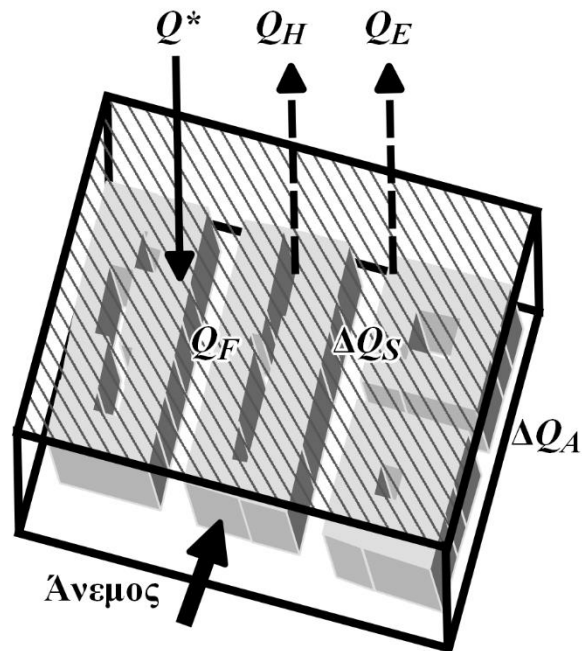
2.3 Επιφανειακό ενεργειακό ισοζύγιο

2.3.1 Γενική περιγραφή

Το επιφανειακό ενεργειακό ισοζύγιο (Surface Energy Balance, SEB) αποτελεί ίσως τον σημαντικότερο φυσικό μηχανισμό του αστικού μικροκλίματος, περιλαμβάνοντας τις διεργασίες οι οποίες είναι υπεύθυνες για τον καταμερισμό της προσλαμβάνουσας ηλιακής ενέργειας και τη σύζευξη της αστικής επιφάνειας με την ατμόσφαιρα. Κάθε επιμέρους αστική επιφάνεια χαρακτηρίζεται από τη δική της ενεργειακή ισορροπία με τον υπερκείμενο αέρα· η γενικότερη πολυπλοκότητα όμως του αστικού συστήματος και η χωρική ομοιογένεια που μπορεί να επιτευχθεί άνω του επιπέδου της οροφής των κτηρίων, καθιστά χρήσιμο και εφικτό τον συνολικό προσδιορισμό του SEB για μια ευρύτερη αστική περιοχή (δηλ. στην τοπική κλίμακα). Μια αρκετά συχνά χρησιμοποιούμενη προσέγγιση είναι η θεώρηση ενός κυβικού σχήματος όγκου (αναφερόμενος ως «αστικός όγκος»), με την κάτω βάση του να βρίσκεται στο υπέδαφος (σε βάθος λίγων μέτρων) και την άνω βάση σε ορισμένο ύψος πάνω από το επίπεδο της οροφής των κτηρίων —εντός του ISL. Κατόπιν δύναται να πραγματοποιηθεί ο υπολογισμός των εισροών και εκροών ενέργειας δια μέσω των πλευρών του αστικού όγκου, καθώς και οι πηγές και καταβόθρες ενέργειας που εμπεριέχονται στο εσωτερικό του (Oke, 1988) (Σχήμα 2-4). Επομένως, βάσει της παραπάνω θεώρησης η εξίσωση του αστικού επιφανειακού ενεργειακού ισοζυγίου μπορεί να γραφεί ως εξής (Oke, 1988):

$$Q^* + Q_F = Q_H + Q_E + \Delta Q_S + \Delta Q_A \quad (2.2)$$

όπου Q^* η «καθαρή» (net) ροή ακτινοβολίας, Q_F η ανθρωπογενής ροή θερμότητας, Q_H η τυρβώδης ροή αισθητής θερμότητας, Q_E η τυρβώδης ροή λανθάνουσας θερμότητας, ΔQ_S η καθαρή μεταβολή του ρυθμού αποθήκευσης θερμότητας και ΔQ_A η ροή θερμότητας μέσω οριζόντιας μεταφοράς διαμέσου των πλευρών του αστικού όγκου. Όλοι οι παραπάνω όροι του ισοζυγίου κατά κανόνα δίνονται σε μονάδες μέτρησης $W m^{-2}$. Το ΔQ_A αρκετά συχνά θεωρείται αμελητέο στις διεργασίες τοπικής κλίμακας και επακόλουθα δεν εξετάζεται κατά τον πειραματικό προσδιορισμό του SEB (Pigeon et al., 2004). Για να ισχύει η παραπάνω θεώρηση θα πρέπει η πειραματική μέτρηση του ενεργειακού ισοζυγίου να πραγματοποιείται σε επαρκώς ομογενή περιοχή (Wieringa, 1993). Για τους υπόλοιπους όρους της Εξίσωσης 2.2 θα πραγματοποιηθεί μια συνοπτική περιγραφή στις υποενότητες που ακολουθούν.



Σχήμα 2-4 Το επιφανειακό ενεργειακό ισοζύγιο για έναν αστικό όγκο (βλ. κυρίως κείμενο για επεξήγηση των συμβόλων). Προσαρμογή από Oke (1988).

2.3.2 Ισοζύγιο ακτινοβολίας

Το ισοζύγιο ακτινοβολίας μιας επιφάνειας μπορεί να περιγραφεί από την ακόλουθη γενική εξίσωση:

$$Q^* = (K_{\downarrow} - K_{\uparrow}) + (L_{\downarrow} - L_{\uparrow}) \quad (2.3)$$

με τα K και L να αντιστοιχούν στην ακτινοβολία μικρού ($< 4 \mu\text{m}$) και μεγάλου μήκους κύματος ($> 4 \mu\text{m}$) αντίστοιχα, με κατεύθυνση «προς» (\downarrow) και «από» (\uparrow) την επιφάνεια. Για συγκεκριμένο μήκος κύματος ακτινοβολίας και γωνία πρόσπτωσης, η μονοχρωματική ανακλαστικότητα (ρ_{λ}), απορροφητικότητα (φ_{λ}) και διαπερατότητα (τ_{λ}) μιας επιφάνειας εξαρτώνται από τη χημική σύσταση των υλικών που την απαρτίζουν. Επιπλέον το φ_{λ} ισούται με τον μονοχρωματικό συντελεστή εκπομπής (ε_{λ}) του συγκεκριμένου μήκους κύματος και ως προς την ίδια κατεύθυνση (νόμος Kirchhoff).

Για την περίπτωση της μικρού μήκους ακτινοβολίας (δηλ. της προσπίπτουσας ροής ηλιακής ακτινοβολίας) είναι χρήσιμο να θεωρηθεί η μέση τιμή της ανακλαστικότητας της επιφάνειας για το σύνολο των αντίστοιχων μηκών κύματος και γωνιών πρόσπτωσης, η οποία αντιστοιχεί στη λευκαύγεια (α) της επιφάνειας. Η λευκαύγεια εξαρτάται από τη θέση του Ηλίου κατά τη στιγμή της πραγματοποιούμενης μέτρησης, καθώς και από τη γωνία παρατήρησης του οργάνου/αισθητήρα, αφού στην πράξη οι επιφάνειες σπάνια είναι απολύτως ισότροπες (λαμπερτιανές). Εν γένει, τα δομικά υλικά του αστικού ιστού (π.χ. ασφάλτινες επιφάνειες) έχουν μικρότερη λευκαύγεια από τις φυσικές επιφάνειες (π.χ. γρασίδι). Ωστόσο, η παραπάνω διαφοροποίηση εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τα τυπικά υλικά δόμησης ή το είδος βλάστησης που συναντώνται σε κάθε περιοχή· για παράδειγμα,

συνήθη ανθρωπογενή υλικά όπως το τσιμέντο ή οι βαφές ανοικτού χρώματος ανακλούν ισχυρότερα συγκριτικά με την πλειονότητα των φυσικών επιφανειών (Oke et al., 2017). Σε κάθε περίπτωση, η στοχευόμενη αντικατάσταση των τυπικών δομικών υλικών μιας πόλης με αντίστοιχα υψηλής ανακλαστικότητας είναι από τις πλέον αποδοτικές πρακτικές μετριασμού των θερμικών πιέσεων (Santamouris, 2014; Akbari et al., 2016) (βλ. Ενότητα 2.4.2). Επιπρόσθετα, η ολική τιμή της λευκαύγειας μιας αστικής χαράδρας είναι κατά κανόνα μικρότερη των επιμέρους τιμών των επιφανειών που την απαρτίζουν (Oke, 1982). Αυτό αποτελεί απόρροια της ισχυρότερης απορροφητικότητας μιας χαράδρας λόγω των πολλαπλών ανακλάσεων της ηλιακής ακτινοβολίας στα τοιχώματα των παράπλευρων κτηρίων. Αποτελέσματα πειραματικών μετρήσεων (Aida, 1982; Kanda et al., 2005) και υπολογιστικών προσομοιώσεων (Kondo et al., 2001; Sailor and Fan, 2002; Krayenhoff and Voogt, 2007) έχουν καταδείξει ότι το α ελαττώνεται αυξανόμενου του H/W . Με βάση τη διπλή επίδραση των αστικών περιοχών στη λευκαύγεια (ιδιότητες ακτινοβολίας των δομικών υλικών και γεωμετρία πόλης) έχει καταγραφεί οι πόλεις να παρουσιάζουν, ανάλογα με την περίπτωση, από κατά 0.09 μικρότερες έως και ελαφρώς μεγαλύτερες τιμές ως προς το α σε σχέση με τις γειτονικές περιοχές υπαίθρου (Oke, 1988).

Το ισοζύγιο ακτινοβολίας μιας αστικής περιοχής όσον αφορά τη μεγάλου μήκους κύματος ακτινοβολία είναι συνήθως αρνητικό, δηλαδή η ανερχόμενη ροή θερμικής ακτινοβολίας από τις αστικές επιφάνειες υπερκαλύπτει την κατερχόμενη προς αυτήν θερμική ακτινοβολία. Από τον νόμο Stefan-Boltzmann, το L_{\uparrow} μπορεί να προσδιοριστεί μέσω της επιφανειακής θερμοκρασίας (T_s) και του συντελεστή θερμικής εκπομπής (ε), συνυπολογίζοντας παράλληλα την ανακλώμενη θερμική ακτινοβολία:

$$L_{\uparrow} = \varepsilon \sigma T_s^4 + (1 - \varepsilon)L_{\downarrow} \quad (2.4)$$

Αντίστοιχη εξίσωση μπορεί να γραφεί και για το L_{\downarrow} , το οποίο αντιστοιχεί στην εκπεμπόμενη θερμική ακτινοβολία από τα υπερκείμενα στρώματα της ατμόσφαιρας προς την αστική επιφάνεια. Όπως και στην περίπτωση της λευκαύγειας, ο συντελεστής θερμικής εκπομπής μπορεί να λάβει ένα σημαντικό εύρος τιμών ανάλογα με τη σύσταση του κάθε υλικού. Τα φυσικά υλικά χαρακτηρίζονται στις περισσότερες περιπτώσεις από μεγαλύτερες τιμές του συντελεστή εκπομπής ($\varepsilon = 0.90-0.99$) σε σχέση με τα τυπικά ανθρωπογενή υλικά ($\varepsilon = 0.85-0.97$) (Oke et al., 2017).

Στο ισοζύγιο ακτινοβολίας παρουσιάζεται επίσης επίδραση από τις υψηλότερες συγκεντρώσεις των ρυπαντών και των αερολυμάτων που σημειώνονται συνήθως στις αστικές περιοχές. Ανάλογα με την εξεταζόμενη περιοχή και τη ζενίθια γωνία του Ηλίου, έχει καταγραφεί μείωση του K_{\downarrow} κατά ~3-30% (Arnfield, 2003). Η αύξηση στην τιμή του L_{\downarrow} συναρτάται με την αύξηση της ικανότητας θερμικής εκπομπής της ατμόσφαιρας λόγω των ρυπαντών και τις υψηλότερες θερμοκρασίες αέρα του οριακού στρώματος μιας αστικής περιοχής (Oke, 1982).

Εν γένει, και παρόλο των ποικίλων ειδικών χαρακτηριστικών και τροποποιήσεων του ισοζυγίου ακτινοβολίας για τις αστικές περιοχές, δεν προκύπτει σαφής και συστηματική

διαφοροποίηση όσον αφορά τις τελικές τιμές της καθαρής ροής ακτινοβολίας (Q^*) συγκριτικά με τις υπαίθριες περιοχές (Arnfield, 1982; Oke et al., 2017). Αυτό προκύπτει κατά κύριο λόγο από το γεγονός ότι οι υψηλές τιμές εξερχόμενης θερμικής ακτινοβολίας από την τυπικά θερμότερη αστική επιφάνεια, μετριάζουν ή και υπερκαλύπτουν τη συνήθως μικρότερη λευκαύγεια της πόλης (Parlow et al., 2014).

2.3.3 Ανθρωπογενής ροή θερμότητας

Εντός του αστικού ιστού προστίθεται μία επιπλέον πηγή ενέργειας στο ενεργειακό ισοζύγιο ως απόρροια της έκλυσης θερμότητας κατά τις ανθρώπινες δραστηριότητες —περιλαμβάνοντας την ανάγκη των κατοίκων μιας πόλης για θέρμανση/ψύξη των κτηριακών χώρων, την κατανάλωση καυσίμων στις καθημερινές μετακινήσεις και τις βιομηχανικής φύσης δραστηριότητες (Sailor, 2011). Λόγω των ποικίλων διαφορετικών προελεύσεων των ανθρωπογενών εκπομπών, το μέτρο και η διακύμανση του Q_F είναι συνάρτηση σημαντικού αριθμού παραμέτρων. Μεταξύ άλλων, το Q_F εξαρτάται από το γεωγραφικό πλάτος και το κλίμα της εξεταζόμενης περιοχής, την πληθυσμιακή πυκνότητα, το βιοτικό επίπεδο των κατοίκων και την ποιότητα κατασκευή του κτηριακού αποθέματος (Allen et al., 2011). Όσον αφορά την επίδραση της έκτασης της πόλης στις τιμές του Q_F , οι «διάχυτες» πόλεις τείνουν να εμφανίζουν υψηλότερες ανθρωπογενείς εκπομπές από τις «συμπαγείς πόλεις¹» (Oke et al., 2017), μολοντί για τις τελευταίες είναι πιθανό να απαιτείται υψηλότερο φορτίο ψύξης (και κατά συνέπεια υψηλό Q_F) τους θερινούς μήνες. Η ανθρωπογενής ροή θερμότητας μπορεί να θεωρηθεί ως το άθροισμα τριών επιμέρους συνιστωσών (Grimmond, 1992):

$$Q_F = Q_{FB} + Q_{FV} + Q_{FM} \quad (2.5)$$

με Q_{FB} την εκλυόμενη ανθρωπογενή θερμότητα από το σύνολο των πηγών του κτηριακού τομέα, Q_{FV} τις θερμικές εκπομπές από την κίνηση των οχημάτων και Q_{FM} τη θερμότητα που παράγεται από το ανθρώπινο σώμα λόγω μεταβολισμού. Συνήθως στις σχετικές μελέτες της βιβλιογραφίας, λαμβάνεται υπόψη μόνο η αισθητή ανθρωπογενής ροή θερμότητας, καθώς η ανθρωπογενής θερμότητας υπό λανθάνουσα μορφή (δηλ. η ανθρωπογενής εκπομπή υδρατμών) είναι για την πλειονότητα των περιπτώσεων αρκετά χαμηλότερη (Iamagino et al., 2012). Εξάιρεση αποτελούν οι πόλεις με ευρεία χρήση ειδικών συστημάτων κλιματισμού, π.χ. «πύργων ψύξης» (Sailor et al., 2007). Μια άμεση πειραματική μέτρηση του Q_F είναι αδύνατη καθώς αυτό υπεισέρχεται στους υπόλοιπους μετρούμενους όρους του ενεργειακού ισοζυγίου (Grimmond and Oke, 1999b). Επομένως, για τον προσδιορισμό των ανθρωπογενών θερμικών εκπομπών ακολουθείται συνήθως μία από τις τρεις ακόλουθες προσεγγίσεις (Sailor, 2011):

¹Ως «συμπαγής πόλη» ορίζεται εκείνη η μορφή αστικής ανάπτυξης που προκρίνει μια σχετικά υψηλή πυκνότητα δόμησης και την ανάμιξη των χρήσεων γης, με κύριους στόχους τον περιορισμό της αστικής διάχυσης και τον περιορισμό της κατανάλωσης ενέργειας στις μεταφορές (Dieleman and Wegener, 2004).

- i. Ως ο υπολειπόμενος όρος του SEB: Με την προϋπόθεση ότι έχουν προσδιοριστεί οι υπόλοιποι όροι του επιφανειακού ενεργειακού ισοζυγίου (Εξίσωση 2.2), τότε αυτό μπορεί να επιλυθεί ως προς το Q_F . Αν και η συγκεκριμένη προσέγγιση είναι θεωρητικά εφικτή και άμεσα εφαρμόσιμη, έχει το μειονέκτημα της μεταφοράς των σφαλμάτων κατά τον υπολογισμό των υπολοίπων συνιστωσών του SEB στο Q_F (Offerle et al., 2005; Foken, 2008). Για να μειωθεί η ισχυρή αβεβαιότητα ως προς το μέτρο της αποθηκευόμενης θερμότητας μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι μέσες τιμές του ισοζυγίου για εκτεταμένη χρονική περίοδο (από μία ημέρα έως μερικούς μήνες) έτσι ώστε να μπορεί να καταστεί εφικτή η υπόθεση ότι $\Delta Q_s \sim 0$ (Pigeon et al., 2007). Η οριζόντια ροή μεταφοράς (ΔQ_A) σε κάθε περίπτωση θεωρείται στη συγκεκριμένη περίπτωση επίσης αμελητέα. Ένας επιπλέον περιορισμός προκύπτει από το γεγονός ότι είναι αρκετά σύνηθες να μην ταυτίζονται οι περιοχές προέλευσης (source areas) των μετρήσεων του Q^* και των τυρβωδών ροών θερμότητας, ακόμα και εάν οι αντίστοιχοι αισθητήρες είναι τοποθετημένοι στο ίδιο σημείο (Offerle et al., 2005).
- ii. Μέσω της «top-down» προσέγγισης: Σε αυτήν την περίπτωση το Q_F εκτιμάται με βάση συγκεντρωτικά στατιστικά δεδομένα της ενεργειακής κατανάλωσης. Αυτά συχνά παρέχονται σε χαμηλή χρονική συχνότητα (π.χ. μέσες ετήσιες τιμές) και χαμηλή χωρική ανάλυση (π.χ. σε εθνικό επίπεδο). Επομένως, τα παραπάνω δεδομένα επιμερίζονται ακολούθως σε υποπεριοχές μικρότερης χωρικής διάστασης, τυπικά έπειτα από στάθμιση με τη χρήση τιμών της πληθυσμιακής πυκνότητας (Sailor, 2011). Παράλληλα, απαιτείται ο προσδιορισμός των κατάλληλων συντελεστών για τον προσδιορισμό της χρονικής διακύμανσης των ανθρωπογενών θερμικών εκπομπών, λόγω της ενδοετήσιας μεταβολής της θερμοκρασίας και των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών μιας πόλης ως προς την κατανάλωση ενέργειας. Η συχνή έλλειψη δεδομένων κατανάλωσης σε υψηλή ανάλυση έχει ως αποτέλεσμα η top-down προσέγγιση να βρίσκει συχνότερη εφαρμογή κατά τη συγκριτική μελέτη των ανθρωπογενών εκπομπών πόλεων διαφορετικών χωρών (Lindberg et al., 2013; Dong et al., 2017) ή/και χωρίς να λαμβάνονται υπόψη οι διαφοροποιήσεις στο εσωτερικό της εκάστοτε πόλης (Stewart and Kennedy, 2017).
- iii. Μέσω της «bottom-up» προσέγγισης: Σε αντιδιαστολή με την προηγούμενη προσέγγιση, το Q_F μπορεί επίσης να προσδιοριστεί έχοντας ως σημείο εκκίνησης τα επιμέρους αστικά στοιχεία (π.χ. κτήρια, οδικές αρτηρίες). Έτσι, η κατανάλωση ενέργειας —και κατά συνέπεια οι ανθρωπογενείς εκπομπές— μοντελοποιούνται αρχικά σε επίπεδο κτηρίου/δρόμου, υπολογίζοντας στη συνέχεια τη μέση τιμή του Q_F για μια περιοχή τοπικής ή μέσης κλίμακας. Συχνή σε αυτήν την προσέγγιση είναι η χρήση «Ενεργειακών Μοντέλων Κτηρίων» (Building Energy Model, BEM) για τον υπολογισμό των εκπομπών από τον κτηριακό τομέα (Kikegawa et al., 2003; Heiple and Sailor, 2008), καθώς και οι επιτόπιες μετρήσεις κυκλοφορίας οχημάτων για τον προσδιορισμό του Q_F που σχετίζεται

με την εκλυόμενη θερμότητας στους οδικούς άξονες (Pigeon et al., 2007; Smith et al., 2009). Η έλλειψη διαθέσιμων δεδομένων —κυρίως ως προς τα χαρακτηριστικά των επιμέρους κτηρίων— αποτελεί σημείο δυσκολίας κατά την εφαρμογή της «bottom-up» μεθοδολογίας.

Η ανθρωπογενής ροή θερμότητας μπορεί να λάβει πολύ υψηλές τιμές στα κέντρα των πόλεων ή σε κεντρικές οδικές αρτηρίες, ξεπερνώντας τοπικά τα 200 W m^{-2} (Iamarino et al., 2012). Κατά συγκεκριμένα διαστήματα αποτελεί τη σημαντικότερη πηγή θερμότητας στην αστική επιφάνεια —για παράδειγμα κατά τις νυκτερινές ώρες λόγω της χρήσης κλιματιστικών συστημάτων ή στην περίπτωση νεφοσκεπών χειμερινών ημερών (Oke et al., 2017). Παρ’ όλα αυτά, οι μέσες τιμές του Q_F σε επίπεδο αστικού συγκροτήματος τείνουν να είναι σχετικά μικρές· οι Stewart and Kennedy (2017) υπολόγισαν ότι οι μέσες ανθρωπογενείς εκπομπές για τις περισσότερες παγκόσμιες μητροπόλεις κυμαίνονται από 6 έως 43 W m^{-2} .

2.3.4 Τυρβώδεις ροές αισθητής και λανθάνουσας θερμότητας

Η τυρβώδης μεταφορά είναι υπεύθυνη για την πλειονότητα των ανταλλαγών θερμότητας, ορμής και μάζας εντός του UBL (Roth, 1991). Η ισχυρή τύρβη που αναπτύσσεται σε μια αστική περιοχή είναι αποτέλεσμα α) της παρουσίας ογκωδών στοιχείων τραχύτητας —παραγωγή μηχανικής τύρβης— και β) των υψηλών θερμοκρασιών της αστικής επιφάνειας —παραγωγή θερμικής τύρβης— (Oke, 1988). Η έντονη τραχύτητα της αστικής επιφάνειας (πρωτίστως λόγω των κτηρίων και των λοιπών κατασκευών, αλλά και συμπληρωματικά των δέντρων) επιφέρει ισχυρή διάτμηση της ταχύτητας του ανέμου στην κορυφή του UCL (Christen, 2005), μετασχηματίζοντας τη μέση κινητική ενέργεια της ροής σε τυρβώδη κινητική ενέργεια (Roth, 2000). Επίσης προκαλεί την ανάμιξη των ολκών της ροής (Thom et al., 1975) και την εμφάνιση —επιπρόσθετα της αντίστασης τριβής (skin drag)— αντίστασης μορφής (form drag) (Roth, 1993). Όσον αφορά τη θερμική παραγωγή τύρβης, οι διεργασίες του SEB προκαλούν έντονες, κατακόρυφες βαθμίδες θερμοκρασίας μεταξύ της αστικής επιφάνειας και του υπερκείμενου αέρα, με συνέπεια την επακόλουθη δημιουργία ανερχόμενων μαζών θερμού αέρα λόγω της διαφοράς πυκνότητας (Oke, 1982).

Οι τυρβώδεις κινήσεις —υπό τη μορφή στροβίλων αέρα ποικίλων μεγεθών— συμβάλλουν στην εξάλειψη των εμφανιζόμενων βαθμίδων θερμοκρασίας/υγρασίας/ανέμου και στην επαναφορά της ισορροπίας στο UBL. Οι τυρβώδεις ροές μπορούν να εκτιμηθούν μέσω της παραμέτρου της «αεροδυναμικής αντίστασης» (r) (s m^{-1}), η οποία αντιπροσωπεύει τον βαθμό κατά τον οποίο η τύρβη διευκολύνει τη μεταφορά ορμής, θερμότητας και υδρατμών από την αστική επιφάνεια στον υπερκείμενο αέρα. Η αεροδυναμική αντίσταση εξαρτάται από α) την επιφανειακή τραχύτητα, β) την ταχύτητα του ανέμου και γ) τη δυναμική αστάθεια (το πηλίκο της θερμικής προς τη μηχανική παραγωγή τύρβης). Η γενική εξίσωση που περιγράφει την πυκνότητα ροής της κατακόρυφης μεταφοράς ορμής (τ_0) (Pa) μπορεί να γραφεί ως:

$$\tau_0 = \rho \frac{\Delta u}{r_M} \quad (2.6)$$

με ρ την πυκνότητα του αέρα (kg m^{-3}), Δu την κατακόρυφη μεταβολή της ταχύτητας του ανέμου (m s^{-1}) και r_M την αεροδυναμική αντίσταση ως προς τη μεταφορά ορμής (s m^{-1}). Αντίστοιχα, για τις τυρβώδεις ροές αισθητής και λανθάνουσας θερμότητας ισχύουν οι παρακάτω εξισώσεις:

$$Q_H = -\rho c_p \frac{\Delta \theta}{r_H} \quad (2.7)$$

$$Q_E = -\rho L_v \frac{\Delta q}{r_V} \quad (2.8)$$

με c_p την ειδική θερμότητα του αέρα υπό σταθερή πίεση ($\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$), $\Delta \theta$ την κατακόρυφη μεταβολή της δυναμικής θερμοκρασίας (K), L_v τη λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης (J kg^{-1}), Δq την κατακόρυφη μεταβολή της ειδικής υγρασίας (kg kg^{-1}), r_H την αεροδυναμική αντίσταση για τη μεταφορά θερμότητας (s m^{-1}) και r_V η αεροδυναμική αντίσταση για τη μεταφορά υδρατμών (s m^{-1}). Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, κατά την ατμοσφαιρική ροή πάνω από μια αστική επιφάνεια εμφανίζεται αντίσταση μορφής, η οποία παρουσιάζει ενισχυτική επίδραση ως προς την τυρβώδη μεταφορά ορμής. Ανάλογος ενισχυτικός παράγοντας δεν σημειώνεται για την περίπτωση της τυρβώδους μεταφοράς θερμότητας· επομένως, η αεροδυναμική αντίσταση μπορεί να γραφεί σε αυτήν την περίπτωση συναρτήσει του r_M ως εξής:

$$r_H = r_M + r_b \quad (2.9)$$

όπου r_b (s m^{-1}) η «επιπρόσθετη αντίσταση» (excess resistance) κατά τη τυρβώδη μεταφορά αισθητής θερμότητας από την επιφάνεια στον αέρα· αντίστοιχη σχέση ισχύει και για το r_V .

Η θεωρία ομοιότητας Monin-Obukhov (Monin-Obukhov Similarity Theory, MOST) είχε αρχική εφαρμογή κατά την περιγραφή των τυρβωδών διεργασιών του οριακού στρώματος φυσικών περιοχών (Foken, 2006). Πειραματικές μελέτες που πραγματοποιήθηκαν τις τελευταίες δεκαετίες κατέδειξαν ότι η θεωρία MOST μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για την περιγραφή των τυρβωδών διεργασιών εντός του UBL και τον προσδιορισμό των αντίστοιχων τυρβωδών ροών ορμής και ενέργειας (Roth, 1993; Amfield, 2003). Ιδιαίτερα σημαντικές παράμετροι του θεωρητικού πλαισίου της θεωρίας ομοιότητας αποτελούν το επίπεδο μηδενικής μετατόπισης (z_d) (m) και το αεροδυναμικό μήκος τραχύτητας (z_0) (m) (Kanda et al., 2007) —το τελευταίο μπορεί να διακριθεί σε μήκος τραχύτητας για την ορμή (z_{0M}), τη θερμότητα (z_{0H}) και τους υδρατμούς (z_{0V}). Το z_0 αποτελεί το μέτρο της τραχύτητας της επιφάνειας στην υπερκείμενη ροή· ως z_{0M} ορίζεται το (θεωρητικό) ύψος πάνω από την επιφάνεια όπου η ταχύτητα του ανέμου λαμβάνει μηδενική τιμή ακολουθώντας το λογαριθμικό προφίλ του ανέμου. Τα z_{0H} και z_{0V} λαμβάνουν σημαντικά μικρότερες τιμές συγκριτικά με το z_{0M} , ως απόρροια της επιπρόσθετης αντίστασης r_b κατά την τυρβώδη μεταφορά των αντίστοιχων

παραμέτρων. Η παράμετρος z_d αντανακλά τη θεώρηση ότι η επιφάνεια του εδάφους μετατοπίζεται σε μεγαλύτερο ύψος εντός του UCL, λόγω του γεγονότος ότι η ορμή δεν καταναλώνεται ομοιόμορφα καθ' όλο το στρώμα (Oke et al., 2017). Το επίπεδο μηδενικής μετατόπισης και το μήκος τραχύτητας μπορούν να υπολογιστούν α) με τη διενέργεια πειραματικών μετρήσεων της ταχύτητας του ανέμου σε διάφορα ύψη εντός του UBL (ανεμομετρική μέθοδος) ή β) με την εφαρμογή εμπειρικών, παραμετρικών σχέσεων που συναρτούν τα z_d και z_0 με το ύψος και την απόσταση των κτηρίων (μορφομετρική μέθοδος) (Macdonald et al., 1998; Grimmond and Oke, 1999b; Kanda et al., 2013; Kent et al., 2017).

2.3.5 Καθαρή μεταβολή του ρυθμού αποθήκευσης θερμότητας

Ως καθαρή (net) μεταβολή του ρυθμού αποθήκευσης θερμότητας (ΔQ_s) μπορεί να οριστεί η καθαρή πρόσληψη ή έκλυση θερμότητας από τον αστικό ιστό (Oke, 1988). Χρησιμοποιώντας τη θεώρηση του αστικού όγκου, το ΔQ_s περιλαμβάνει τις πραγματοποιούμενες αλλαγές στη περιεχόμενη θερμότητα των κτηρίων, των δρόμων, της βλάστησης και του αέρα του UCL κατά της διάρκεια της ημέρας (Grimmond and Oke, 1999b). Η αποθηκευόμενη θερμότητα κατέχει ιδιαίτερη σημασία όσον αφορά την κατακόρυφη ανάπτυξη του UBL, την ένταση των άλλων ροών του ενεργειακού ισοζυγίου και την ενδοημερήσια διακύμανση των θερμοκρασιών. Οι τιμές του ΔQ_s δύναται κατά περίπτωση να υπερβούν ακόμα και το 50% της καθαρής ροής ακτινοβολίας ανάλογα με την υπό εξέταση πόλη (Oke et al., 1999; Loupa et al., 2016). Το ΔQ_s εξαρτάται από τη μορφολογία της αστικής δομής, τη σύζευξη ηλίου-επιφάνειας-ατμόσφαιρας και τις θερμικές ιδιότητες των υλικών των αστικών επιφανειών (Roberts et al., 2006). Όσον αφορά τις θερμικές ιδιότητες ενός υλικού, αυτές συμπεριλαμβάνουν τις ακόλουθες παραμέτρους:

- Θερμοχωρητικότητα (C) ($J m^{-3} K^{-1}$): το ποσό θερμότητας το οποίο λαμβάνεται ή απελευθερώνεται από τον μοναδιαίο όγκο ενός υλικού κατά τη μεταβολή της θερμοκρασίας του κατά έναν βαθμό.
- Θερμική αγωγιμότητα (k) ($W m^{-1} K^{-1}$): η ταχύτητα διάδοσης της θερμότητας μέσα στο υλικό.
- Θερμική διάχυση ($\kappa = k / C$) ($m^2 s^{-1}$): η ταχύτητα διάδοσης των θερμοκρασιακών διαταραχών μέσα στο υλικό.
- Θερμική αδράνεια ($\mu = C \times k^{1/2}$) ($J m^{-2} K^{-1} s^{1/2}$): η ικανότητα της επιφάνειας του υλικού να διοχετεύει τη θερμότητα προς το εσωτερικό του σώματος.

Ως συνδυαστική παράμετρος, η θερμική αδράνεια αποτελεί ένα άμεσο μέτρο εκτίμησης της ικανότητας ενός υλικού να αποθηκεύει θερμότητα: μια επιφάνεια με υψηλή θερμική αδράνεια χρησιμοποιεί μεγάλο μέρος της προσλαμβάνουσας ηλιακής ενέργειας για τη θέρμανση του υποστρώματος. Τα δομικά υλικά της πόλης έχουν τυπικά μεγαλύτερες τιμές θερμικής αδράνειας από τις φυσικές επιφάνειες, ωστόσο στην περίπτωση ύπαρξης σημαντικού ποσού υγρασίας επί των επιφανειών του χώματος ή της βλάστησης, οι διαφορές πόλης-υπαίθρου σε μεγάλο βαθμό

μετριάζονται ή και εξαλείφονται (Oke and Cleugh, 1987). Η ολική αποθηκευόμενη θερμότητα για το σύνολο ενός αστικού συστήματος τοπικής κλίμακας είναι εξαιρετικά δύσκολο να μετρηθεί λόγω του μεγάλου αριθμού των επιμέρους επιφανειών και των διαφορετικών τύπων υλικών που τις συνιστούν (Grimmond and Oke, 1999b). Για έναν θεωρούμενο αστικό όγκο (Σχήμα 2-4) το ΔQ_s εκτιμάται συνήθως μέσω μίας εκ των ακόλουθων μεθόδων:

- i. Ως υπολειπόμενος όρος του SEB: Έχοντας εκτιμήσει προηγουμένως το Q_F με κάποια εναλλακτική μεθοδολογία (ή υποθέτοντας ότι παρουσιάζει αμελητέα τιμή για την περιοχή ενδιαφέροντος), η Εξίσωση 2.2 μπορεί κατόπιν να επιλυθεί ως προς το ΔQ_s . Σε αυτήν την προσέγγιση ενυπάρχει το πρόβλημα της συσσώρευσης των σφαλμάτων μέτρησης ή προσδιορισμού των υπολοίπων όρων —ιδιαίτερα όσον αφορά το Q_F (Roberts et al., 2006). Επιπρόσθετα, γίνεται η θεώρηση ότι ο όρος της οριζόντιας μεταφοράς θερμότητας είναι μηδενικός για τις διεργασίες τοπικής κλίμακας.
- ii. Παραμετροποίηση μέσω του Q^* : Ήδη από τις πρώτες πειραματικές μετρήσεις του αστικού ενεργειακού ισοζυγίου, είχε παρατηρηθεί συσχέτιση του μέτρου του ΔQ_s και της καθαρής ακτινοβολίας (Oke et al., 1981; Doll et al., 1985). Μετέπειτα μελέτες κατέδειξαν επίσης την ύπαρξη μιας διαφοράς φάσης μεταξύ των δύο παραμέτρων (Oke and Cleugh, 1987), η οποία ενσωματώθηκε στο μοντέλο παραμετροποίησης της καθαρής μεταβολής του ρυθμού αποθήκευσης θερμότητας «Objective Hysteresis Model» (OHM) (Grimmond et al., 1991). Με βάση το μοντέλο OHM πραγματοποιείται προσδιορισμός του ΔQ_s διαφορετικών υλικών χρησιμοποιώντας τόσο την απόλυτη τιμή του Q^* όσο και την ωριαία διακύμανσή του. Η συγκεκριμένη παραμετροποίηση έχει βρεθεί σε μεγάλο αριθμό ερευνητικών μελετών ότι παρουσιάζει σχετικά υψηλή συμφωνία με πειραματικές μετρήσεις του ΔQ_s (Grimmond and Oke, 1999b; Oke et al., 1999; Loupa et al., 2016; Crawford, Krayenhoff, et al., 2018).
- iii. Μοντελοποίηση της διάδοσης θερμότητας: Η αποθηκευόμενη θερμότητα προς το εσωτερικό του κτηριακού κελύφους ή του υποστρώματος των δρόμων μπορεί να υπολογιστεί μέσω της χρήσης των βασικών εξισώσεων διάδοσης θερμότητας μεταξύ διαφορετικών υλικών (νόμος Fourier, εξίσωση διατήρησης ενέργειας). Για την εφαρμογή της μεθόδου απαιτούνται οι τιμές των διαστάσεων των αστικών επιφανειών (συμπεριλαμβανομένου του πάχους των τοίχων και του οδοστρώματος), των θερμικών τους ιδιοτήτων, καθώς και των τιμών των εξωτερικών και εσωτερικών θερμοκρασιών. Παραδείγματα εφαρμογής της συγκεκριμένης προσέγγισης για τον υπολογισμό του ΔQ_s , αποτελούν τα μοντέλα «Thermal mass scheme» (TMS) (Piekorz, 1987) και «Element surface temperature method» (ESTM) (Offerle et al., 2005; Chrysoulakis et al., 2018).

2.4 Αστική θερμική νησίδα

2.4.1 Γενική περιγραφή

Ως αποτέλεσμα της τροποποίησης του επιφανειακού ενεργειακού ισοζυγίου λόγω των ιδιοτήτων των υλικών της πόλης, της τρισδιάστατης δομής της και των ανθρώπινων δραστηριοτήτων, οι αστικές περιοχές τείνουν να παρουσιάζουν μεγαλύτερες θερμοκρασίες από τις γειτονικές υπαίθριες περιοχές. Αυτό το φαινόμενο έχει καθιερωθεί να αναφέρεται ως «αστική θερμική νησίδα» (Urban Heat Island, UHI) και είναι καταγεγραμμένο σε πλήθος ερευνητικών μελετών (Sundborg, 1951; Santamouris et al., 2001; Fortuniak et al., 2006; Yow and Carbone, 2006; Stathopoulou and Cartalis, 2009; Skarbit et al., 2017). Ανάλογα με τις χωρικές κλίμακες και τις διεργασίες οι οποίες είναι υπεύθυνες για τον σχηματισμό της, η αστική θερμική νησίδα μπορεί να διακριθεί στους ακόλουθους τύπους:

- Η θερμική νησίδα του κτηριακού στρώματος (UHI_{UCL}) αναφέρεται στις υψηλότερες θερμοκρασίες αέρα εντός του UCL σε σχέση με τη θερμοκρασία υπαίθριων περιοχών (μετρούμενη στο ίδιο ύψος άνω του εδάφους).
- Η επιφανειακή θερμική νησίδα (Surface Urban Heat Island, SUHI) αφορά τη προσδιοριζόμενη θερμοκρασία της επιφάνειας του εδάφους —ιδανικά χρησιμοποιώντας τη θεώρηση της ολικής αστικής επιφάνειας (βλ. Ενότητα 2.1)— των δύο εξεταζόμενων περιοχών.
- Η θερμική νησίδα οριακού στρώματος (UHI_{UBL}) αντιστοιχεί στις θερμοκρασίες αέρα άνω του επιπέδου οροφής των κτηρίων.
- Η θερμική νησίδα του υποστρώματος (UHI_{sub}) προκύπτει από τη σύγκριση των θερμοκρασιών του υπεδάφους πόλης-υπαίθρου.

Ως «ένταση της αστικής θερμικής νησίδας» (ΔT_{U-R}) ορίζεται η μέγιστη θερμοκρασιακή διαφορά η οποία παρατηρείται κατά τις ταυτόχρονες παρατηρήσεις της θερμοκρασίας αστικών και υπαίθριων μετεωρολογικών σταθμών. Τα αίτια σχηματισμού του UHI σχετίζονται με τον διαφορετικό τρόπο κατά τον οποίο η πόλη απορροφά και καταμερίζει την εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία σε σύγκριση με μια υπαίθρια περιοχή (Stewart, 2011b) —συμπεριλαμβανομένης της προσθήκης των ανθρωπογενών πηγών θερμότητας για την περίπτωση της αστικής περιοχής. Η περιγραφή της ανάπτυξης της θερμικής νησίδας που θα ακολουθήσει εστιάζει στο UHI_{UCL} , θεωρώντας εν προκειμένω ως «αστική περιοχή» μια αστική χαράδρα με περιορισμένο πράσινο και ως «υπαίθρια περιοχή» μια περιοχή εκτός πόλης με εκτενή βλάστηση και επαρκή ύδρευση. Οι συγκεκριμένοι μηχανισμοί βρίσκουν ωστόσο εφαρμογή σε μεγάλο βαθμό και για τους υπόλοιπους τύπους της θερμικής νησίδας.

Ένα από τα πρωταρχικά αίτια του σχηματισμού του UHI_{UCL} αποτελεί το μικρό ποσοστό κάλυψης του αστικού περιβάλλοντος από φυσικές επιφάνειες και ως εκ τούτου η απώλεια της δροσιστικής τους επίδρασης. Συγκεκριμένα, στις υπαίθριες περιοχές ένα μεγάλο μέρος της ηλιακής

ακτινοβολίας χρησιμοποιείται κατά τις διεργασίες της εξάτμισης και της εξατμισοδιαπνοής, οι οποίες οδηγούν στην ελάττωση της θερμοκρασίας της επιφάνειας και του υπερκείμενου αέρα (λανθάνουσα ροή θερμότητας). Αντίθετα, καθώς το αστικό πράσινο είναι περιορισμένο σε έκταση και η πόλη καλύπτεται πρωτίστως από αδιαπέρατα δομικά υλικά, η αστική επιφάνεια διοχετεύει τα ηλιακά κέρδη κυρίως ως αισθητή θερμότητα προς την ατμόσφαιρα (Oke, 1982). Επιπλέον, το νερό των βροχοπτώσεων διοχετεύεται ταχέως μέσω των αστικών δικτύων αποχέτευσης ομβρίων. Ένα άμεσο μέτρο εκτίμησης της ικανότητας δροσισμού μιας περιοχής μέσω της ροής λανθάνουσας θερμότητας συγκριτικά με την παρατηρούμενη ροή αισθητή θερμότητας, δίνεται με τη χρησιμοποίηση του λόγου των δύο παραπάνω τυρβωδών ροών. Αυτό το πηλίκο αναφέρεται ως «λόγος Bowen» (β):

$$\beta = \frac{Q_H}{Q_E} \quad (2.10)$$

Λόγω των ιδιοτήτων ακτινοβολίας των ανθρωπογενών υλικών (λευκαύγεια, συντελεστής εκπομπής) οι αστικές επιφάνειες έχουν εν γένει την τάση να απορροφούν ισχυρότερα την ακτινοβολία μικρού μήκους κύματος και να εκπέμπουν πιο δύσκολα θερμική ακτινοβολία (βλ. Ενότητα 2.3.2). Ιδιαίτερα σημαντική αποτελεί η επίδραση της γεωμετρικής διάταξης των αστικών επιφανειών της πόλης στις ροές ακτινοβολίας. Κατά τη διάρκεια της ημέρας η ηλιακή ακτινοβολία παγιδεύεται μέσω διαδοχικών ανακλάσεων στα πλευρικά τοιχώματα της αστικής χαράδρας, ενισχύοντας την απορρόφησή της από τα κτήρια. Ωστόσο, η σκίαση τμήματος της χαράδρας λόγω της παρουσίας των κτηρίων (ιδιαίτερα για την περίπτωση υψηλού H/W) περιορίζει σε ορισμένο βαθμό την εισερχόμενη ακτινοβολία εντός του UCL, σε συνάρτηση και με τον προσανατολισμό του δρόμου και το ύψος του ηλίου (Oke, 1982). Επιπρόσθετοι λόγοι που συντελούν στις υψηλότερες αστικές θερμοκρασίες κατά τη διάρκεια της ημέρας αποτελούν οι ανθρωπογενείς πηγές θερμότητας (βλ. Ενότητα 2.3.3) και οι μικρότερες ταχύτητες του ανέμου εντός του αστικού ιστού. Μεγάλο ημερήσιο ΔT_{U-R} αναμένεται για τις αστικές περιοχές με ιδιαίτερα υψηλό Q_F ή με σημαντικά χαμηλή λευκαύγεια.

Παρ' όλα αυτά η ένταση του UHI_{UCL} κατά τη διάρκεια της ημέρας τείνει γενικότερα να είναι μετριασμένη (Oke et al., 2017). Συμπεριλαμβανομένων άλλων αιτιών, όπως για παράδειγμα η σκίαση των χαμηλότερων σημείων της χαράδρας, η μικρή διαφορά στις μέγιστες θερμοκρασίες πόλης-υπαίθρου οφείλεται κυρίως στους διαφορετικούς ρυθμούς θέρμανσης των δύο περιοχών. Εξαιτίας των πολυάριθμων αστικών επιφανειών, των θερμικών ιδιοτήτων των δομικών υλικών και της παγίδευσης της ηλιακής ακτινοβολίας, ένα μεγάλο ποσοστό της προσλαμβάνουσας ενέργειας διοχετεύεται προς το εσωτερικό των κτηρίων και των δρόμων ως καθαρή μεταβολή του ρυθμού αποθήκευσης θερμότητας (Grimmond and Oke, 1999b). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τον μετριασμό της αστικής θέρμανσης κατά τη διάρκεια της ημέρας σε πυκνοδομημένες περιοχές. Αντίθετα, εξαιτίας της μικρότερης θερμικής αδράνειας, μια υπαίθρια περιοχή δύναται να θερμανθεί με πιο ταχύ ρυθμό.

Η παραπάνω επίδραση της αποθηκευόμενης θερμότητας (ΔQ_s), θα αντιστραφεί στη συνέχεια κατά τις απογευματινές και νυκτερινές ώρες: η θερμότητα που συσσωρεύτηκε κατά τη διάρκεια της

ημέρας στο εσωτερικό της πόλης, εκλύεται σταδιακά στο UCL επιβραδύνοντας έτσι την ψύξη του αστικού ιστού (Goward, 1981). Συγχρόνως, τις νυκτερινές ώρες είναι πιο άμεση η επίδραση της τρισδιάστατης αστικής μορφολογίας στο ισοζύγιο ροών ακτινοβολίας και ως εκ τούτου στην παρατηρούμενη ένταση του UHI. Ο μικρότερος συντελεστής θέασης ουρανού (ψ_{sky}) των αστικών περιοχών λόγω της παρουσίας πολλαπλών κάθετων επιφανειών σημαντικού ύψους, οδηγεί στην παγίδευση της θερμικής ακτινοβολίας εντός της αστικής χαράδρας, περιορίζοντας περαιτέρω την ψύξη της (Arnfield, 1990; Voogt and Oke, 1991). Ακόμη, μέρος της εκπεμπόμενης θερμικής ακτινοβολίας των τοίχων έχει κατεύθυνση προς τα κατώτερα τμήματα της χαράδρας (Johnson et al., 1991) διατηρώντας έτσι τις υψηλότερες θερμοκρασίες τους. Τις νυκτερινές ώρες σημειώνονται επίσης χαμηλότερες ταχύτητες ανέμου και επακόλουθα μικρότερη ανάμιξη του αέρα (ασθενής ένταση τύρβης). Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω, το UHI_{UCL} μπορεί να χαρακτηριστεί πρωτίστως νυκτερινό φαινόμενο (Oke, 1988; Johnson et al., 1991). Οι υψηλότερες θερμοκρασίες της πόλης διατηρούνται έως τις πρώτες πρωινές ώρες, όπου η ηλιακή ακτινοβολία επανεκκινεί τον ημερήσιο κύκλο της θερμικής νησίδας.

Η καταγραφόμενη θερμοκρασιακή διαφορά πόλης- επηρεάζεται επιπλέον από δευτερογενείς παραμέτρους οι οποίες διαφοροποιούνται από τα αίτια δημιουργίας της θερμικής νησίδας (Stewart, 2011a). Συγκεκριμένα, μεγάλη επίδραση προκύπτει από την επιλογή των συγκρινόμενων σταθμών (Santamouris et al., 2001). Ιδιαίτερης σημασίας πρέπει να δίνεται, έτσι ώστε αυτοί να αντιπροσωπευτικοί του ευρύτερου περιβάλλοντός τους. Αρκετά συχνό είναι το φαινόμενο ως «αστικοί σταθμοί» να χαρακτηρίζονται μετεωρολογικοί σταθμοί εγκατεστημένοι εντός ενός αστικού πάρκου ή αεροδρομίου, τα οποία αντιστοιχούν σε καθόλα διαφορετικές μικροκλιματικές συνθήκες σε σχέση με έναν σταθμό που βρίσκεται εντός του κυρίως αστικού ιστού (Stewart, 2011b). Επιπλέον, ένα πολεοδομικό συγκρότημα χαρακτηρίζεται από σημαντική ενδοαστική διαφοροποίηση των χρήσεων γης και των μορφολογικών παραμέτρων (π.χ. ποσοστό κάλυψης πρασίνου, ύψος κτηρίων και H/W). Ως αποτέλεσμα, το $\Delta T_{\text{U-R}}$ αναμένεται να διαφοροποιείται σε μεγάλο βαθμό ανάλογα με την επιλεγόμενη περιοχή μετρήσεων εντός του οικιστικού χώρου. Το σύστημα ταξινόμησης των «τοπικών κλιματικών ζωνών» (Local Climate Zones, LCZ) (Stewart and Oke, 2012) έχει σκοπό τη διάκριση των περιοχών της πόλης με διαφορετικά θερμικά χαρακτηριστικά με βάση τις παραμέτρους της αστικής μορφολογίας και της αστικής λειτουργίας (βλ. Κεφάλαιο 5). Η παραπάνω ταξινόμηση έχει μεταξύ άλλων στόχο την τυποποίηση της περιγραφής των χαρακτηριστικών των σταθμών μέτρησης της αστικής θερμικής νησίδας.

Η τιμή του $\Delta T_{\text{U-R}}$ υπαίθρου —τόσο όσον αφορά το UHI_{UCL} όσο και το SUHI— εξαρτάται επίσης σε σημαντικό βαθμό από την επιλογή της υπαίθριας περιοχής (Arnfield, 1990). Για παράδειγμα, μια πυκνοφυτεμένη περιοχή τείνει να παρουσιάζει μικρότερες θερμοκρασίες σε σχέση με μια καλλιεργήσιμη έκταση, και κατά συνέπεια η επιλογή της ως υπαίθριο σταθμό θα οδηγήσει σε ισχυρότερο UHI ανεξαρτήτως του αστικού περιβάλλοντος. Αυτή η διαφοροποίηση της θερμικής νησίδας ανάλογα με τη γειτονική περιοχή μιας πόλης, αποτυπώνεται πιο ξεκάθαρα στην περίπτωση

μελέτης του SUHI (Parlow et al., 2014). Η επιφανειακή θερμική νησίδα επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από τη θερμική αδράνεια της επιφανείας. Έτσι, στην περίπτωση όπου οι γειτονικές αδόμητες περιοχές μιας πόλης καλύπτονται σε μεγάλο βαθμό από ξηρό χώμα, τότε κατά τη διάρκεια της ημέρας παρατηρείται αντιστροφή του φαινομένου της θερμικής νησίδας με τις υπαίθριες περιοχές να έχουν υψηλότερο T_s (Stathopoulou et al., 2009; Keramitsoglou et al., 2011; Alavipanah et al., 2018). Λαμβάνοντας υπόψη όλα τα παραπάνω είναι σημαντικό οι μελέτες της θερμικής νησίδας να συνοδεύονται με σαφή περιγραφή των χαρακτηριστικών των σταθμών και του συγκεκριμένου τύπου του UHI που μελετάται (Stewart, 2011b).

Εκτός από την επιλογή των σταθμών μέτρησης θερμοκρασίας, η ένταση της θερμικής νησίδας διαφοροποιείται επίσης ανάλογα με τις μετεωρολογικές συνθήκες. Το ΔT_{U-R} κατά κανόνα καθίσταται μέγιστο για την περίπτωση ανέφελου ουρανού και ασθενών ανέμων (Sundborg, 1951). Η παρουσία νεφών επηρεάζει σημαντικά το ενεργειακό ισοζύγιο· μειώνει την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία, ενώ περιορίζει τη ικανότητα ψύξης μέσω θερμικής ακτινοβολίας, εξισορροπώντας ως εκ τούτου τους ρυθμούς ψύξης πόλης-υπαίθρου (μικρό ΔT_{U-R}) (Morris et al., 2001). Οι ισχυροί άνεμοι έχουν επίσης την τάση να εξομαλύνουν τις θερμοκρασιακές διαφορές μιας πόλης με τις γειτονικές της περιοχές (όπως και τις ενδοαστικές διαφοροποιήσεις) λόγω έντονης οριζόντιας ανάμιξης στο ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα (Yow, 2007). Τέλος, κατά τη μελέτη της θερμικής νησίδας έπειτα από βροχόπτωση, η επιφάνεια της πόλης θα χαρακτηρίζεται από αυξημένη ψύξη λόγω εξάτμισης και κατά συνέπεια η ένταση του UHI θα είναι μικρότερη σε σχέση με τις φυσιολογικές συνθήκες (Fortuniak et al., 2006).

2.4.2 Τεχνικές μετριάσμού

Το φαινόμενο της αστικής θερμικής νησίδας έχει άμεσες και δυσμενείς συνέπειες στην ποιότητα ζωής των κατοίκων των πόλεων. Οι αυξημένες αστικές θερμοκρασίες έχουν ως αποτέλεσμα την υψηλότερη μέση ενεργειακή κατανάλωση και ιδιαίτερα την αύξηση του ηλεκτρικού φορτίου αιχμής, λόγω επιπρόσθετων αναγκών ψύξης (Hassid et al., 2000; Hirano and Fujita, 2012; Santamouris et al., 2015). Η θερμική άνεση εξωτερικού και εσωτερικού αστικού χώρου ελαττώνεται (Pantavou et al., 2011; van Hove et al., 2015; Laskari et al., 2017), ενώ σημαντικές συσχετίσεις έχουν καταγραφεί μεταξύ της αστικής θέρμανσης και προβλημάτων υγείας των κατοίκων αστικών περιοχών (Jagai et al., 2017; Paravantis et al., 2017; Schuster et al., 2017; Pyrgou and Santamouris, 2018). Εξαιρετικά επικίνδυνα μπορεί να καταστεί η σύζευξη του UHI και των καυσωνικών επεισοδίων, με ήδη σημαντικές αυξήσεις των θανατηφόρων περιστατικών κατά τη διάρκειά τους (Whitman et al., 1997; Fouillet et al., 2006). Οι υψηλότερες θερμοκρασίες συνδέονται επίσης με υψηλότερες συγκεντρώσεις ρυπαντών στην ατμόσφαιρα (Stathopoulou et al., 2008; Pyrgou et al., 2018), εντείνοντας ασθένειες του αναπνευστικού συστήματος. Επιπλέον, οι δυσχερείς επιπτώσεις της αστικής θερμικής νησίδας αναμένονται να ενταθούν λόγω της κλιματικής αλλαγής (Milner et al.,

2017). Οι πιο ευάλωτοι πληθυσμοί στην προκύπτουσα κατάσταση θα είναι συχνά τα χαμηλότερα κοινωνικά στρώματα και οι λοιπές ευπαθείς ομάδες (Mitchell and Chakraborty, 2015).

Με βάση τη παραπάνω περιγραφή, είναι σαφής η ανάγκη τροποποίησης του υπάρχοντος αστικού περιβάλλοντος με σκοπό τη βελτίωση της θερμικής περιβαλλοντικής ποιότητας των πόλεων. Κατά συνέπεια, τις τελευταίες δεκαετίες έχει αναπτυχθεί ένα ευρύ φάσμα τεχνικών για τον μετριασμό των επιπτώσεων της αστικής θερμικής νησίδας (Santamouris, 2014; Akbari et al., 2016; Pisello et al., 2018). Το σύνολο των εφαρμοζόμενων αστικών παρεμβάσεων μπορεί να διακριθεί σε δύο κύριες κατηγορίες (Akbari and Kolokotsa, 2016): α) στην αύξηση της ανακλαστικότητας των αστικών επιφανειών στην ηλιακή ακτινοβολία και β) στην ενίσχυση του δροσισμού του αστικού περιβάλλοντος μέσω εξατμισοδιαπνοής.

Η ανάπτυξη και χρήση υλικών που χαρακτηρίζονται από υψηλή λευκαύγεια και υψηλό συντελεστή θερμικής εκπομπής είναι από τους πλέον αποδοτικούς τρόπους αντιμετώπισης των υψηλών θερμοκρασιών μιας πόλης (Pisello, 2017). Τα συγκεκριμένα υλικά επικάλυψης —συνήθως αναφερόμενα ως «ψυχρά υλικά»— δύναται να τοποθετηθούν σε διάφορα σημεία του κτηριακού περιβλήματος ή στην επιφάνεια του εδάφους αυξάνοντας το ποσοστό της ανακλώμενης ηλιακής ακτινοβολίας και κατά συνέπεια μειώνοντας σε μεγάλο βαθμό την αποθηκευόμενη ενέργεια. Ταυτόχρονα, τα ψυχρά υλικά καθώς χαρακτηρίζονται από υψηλό συντελεστή εκπομπής, ευνοούν την εκπομπή της θερμικής υπέρυθρης ακτινοβολίας. Η πιο συνήθης κατηγορία ψυχρών υλικών είναι τα λευκά επιχρίσματα υψηλής ανακλαστικότητας (Santamouris et al., 2011). Αντίστοιχες τιμές λευκαύγειας με τα παραπάνω υλικά και επιπρόσθετα βελτίωση του παραγόμενου οπτικού αποτελέσματος, μπορεί να επιτευχθεί με την ανάπτυξη έγχρωμων ψυχρών υλικών (Levinson et al., 2007; Synnefa et al., 2007; Ferrari et al., 2016). Οι συγκεκριμένες επιφάνειες επικάλυψης χαρακτηρίζονται από ισχυρή ανακλαστικότητα στο εγγύς υπέρυθρο (0.7–4 μm). Τα θερμοχρωμικά υλικά (Karlessi et al., 2009; Garshasbi and Santamouris, 2019) —υλικά τα οποία εμφανίζουν υψηλότερη ανακλαστικότητα για υψηλότερες θερμοκρασίες— έχουν το πλεονέκτημα να διατηρούν τα ηλιακά κέρδη κατά τους χειμερινούς μήνες. Τέλος, όσον αφορά τις προσόψεις κτηρίων ενδείκνυται η τοποθέτηση οπισθοανακλαστικών (retroreflective) υλικών (Rossi et al., 2016), τα οποία διαθέτουν το γνώρισμα να πραγματοποιούν την ανάκλαση της ηλιακής ακτινοβολίας κατά τη διεύθυνση πρόσπτωσης.

Η αύξηση των πράσινων χώρων εντός του αστικού συγκροτήματος είναι η συνηθέστερη τεχνική για την επίτευξη χαμηλότερων θερμοκρασιών μέσω του φαινομένου της εξάτμισης-εξατμισοδιαπνοής, βελτιώνοντας παράλληλα τη γενικότερη ποιότητα ζωής στην πόλη (Norton et al., 2015). Ο προσδιορισμός της θερμοκρασιακής διαφοράς πάρκου – γειτονικών περιοχών έχει υπάρξει αντικείμενο πολλών επιστημονικών μελετών (Akbari and Kolokotsa, 2016). Οι χώροι αστικού πρασίνου έχουν παρατηρηθεί να παρουσιάζουν χαμηλότερες θερμοκρασίες αέρα έως και 4 °C συγκριτικά με τις γειτονικές αστικές περιοχές (Shashua-Bar and Hoffman, 2000; Bowler et al., 2010; Skoulika et al., 2014; Saaroni et al., 2018). Η μεταφερόμενη δροσιστική επίδραση του πάρκου μέσω

της τυρβώδους ροής ή/και τοπικών κυκλοφοριών έχει εκτιμηθεί σε μερικές δεκάδες έως λίγες εκατοντάδες μέτρα (Oke, 1989; Yu and Hien, 2006; Skoulika et al., 2014). Η χρήση δέντρων εντός της αστικής χαράδρας εκτός από την ψύξη λόγω εξατμισοδιαπνοής προσφέρει επίσης ηλιοπροστασία στα κτήρια και τα χαμηλότερα στρώματα της χαράδρας (Rosenzweig et al., 2006). Παράλληλα στην προκειμένη τεχνική μετριασμού, συνίσταται η χρήση κενών μεταξύ των δέντρων έτσι ώστε εκείνα να μη συγκρατούν την ανερχόμενη θερμική ακτινοβολία από την επιφάνεια του εδάφους. Σημαντικά ευμενή επίδραση στο ενεργειακό φορτίο ενός κτηρίου και στο γενικότερο κλίμα της περιβάλλουσας περιοχής έχει επίσης η τοποθέτηση πράσινων δωματίων στις οροφές των κτηρίων (Kolokotsa et al., 2013), καθώς και πράσινων στοιχείων στις προσόψεις τους (Wong et al., 2009; Coma et al., 2017).

2.5 Θερμική δορυφορική τηλεπισκόπηση

Η επιφανειακή θερμοκρασία αποτελεί καθοριστικό παράγοντα του αστικού κλίματος, ρυθμίζοντας το ισοζύγιο ακτινοβολίας μεγάλου μήκους κύματος και τις τυρβώδεις ανταλλαγές ενέργειας μεταξύ επιφάνειας και ατμόσφαιρας. Εκτός από το αστικό περιβάλλον, η χωρική και χρονική κατανομή του T_s αποτελεί ιδιαίτερα σημαντική παράμετρο για πλήθος επιστημονικών εφαρμογών, όπως η μελέτη της κλιματικής αλλαγής, η περιεκτικότητα της επιφάνειας σε υγρασία, το ισοζύγιο νερού, η ανίχνευση πυρκαγιών, κ.ά. (Quattrochi and Luvall, 2004; Li, Tang, et al., 2013). Δεδομένου ότι η επιφανειακή θερμοκρασία εμφανίζει μεγάλη χωρική μεταβλητότητα, ο προσδιορισμός της μέσω επίγειων μετρήσεων δεν είναι εφικτός για εφαρμογές μεγάλης κλίμακας. Με την ανάπτυξη των τεχνικών της δορυφορικής τηλεπισκόπησης, κατέστη δυνατός ο προσδιορισμός της επιφανειακής θερμοκρασίας μέσω της καταγραφής της εκπεμπόμενης από το έδαφος ακτινοβολίας στο θερμικό υπέρυθρο (thermal infrared, TIR) τμήμα του φάσματος (Kuenzer and Dech, 2013). Η κατ' αυτόν τον τρόπο εκτιμώμενη επιφανειακή θερμοκρασία κατά κανόνα αναφέρεται με τον όρο «επιφανειακή θερμοκρασία του εδάφους» (Land Surface Temperature, LST). Το LST βρίσκει σημαντική εφαρμογή σε πλήθος ερευνητικών μελετών του αστικού θερμικού περιβάλλοντος (Weng, 2009) —μεταξύ άλλων στον προσδιορισμό του SUHI (Stathopoulou et al., 2009; Fabrizi et al., 2010), στην εκτίμηση των ροών του SEB (Kato and Yamaguchi, 2005; Chrysoulakis et al., 2018), στη μελέτη της επίδρασης της αστικής διάχυσης (Polydoros and Cartalis, 2015) και στη συσχέτιση των θερμοκρασιών επιφάνειας-αέρα (Bechtel et al., 2014; Agathangelidis et al., 2016). Οι κυριότερες πηγές αβεβαιότητας κατά τον προσδιορισμό του LST μέσω δορυφορικών παρατηρήσεων σε αστικές περιοχές είναι οι εξής (Krayenhoff and Voogt, 2016): α) η ατμόσφαιρα παρεμβάλλεται μεταξύ της επιφάνειας και του δέκτη, απορροφώντας, εκπέμποντας και ανακλώντας θερμική ακτινοβολία, β) απαιτείται προσδιορισμός του επιφανειακού συντελεστή θερμικής εκπομπής και γ) η καταγραφόμενη ακτινοβολία εξαρτάται από τη γωνία επόπτευσης του αισθητήρα —η αστική επιφάνεια χαρακτηρίζεται δηλαδή από σημαντική θερμική ανισοτροπία.

Η καταγραφόμενη τιμή της έντασης ακτινοβολίας (L_λ^{sen}) ($\text{W m}^{-2} \text{sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$) από έναν δορυφορικό αισθητήρα για ένα συγκεκριμένο μήκος κύματος λ και υπό συγκεκριμένη γωνία θ δύναται να γραφεί μέσω της εξίσωσης διάδοσης ακτινοβολίας (radiative transfer equation):

$$L_\lambda^{sen}(\theta) = [\varepsilon_\lambda B(\lambda, T_s) + (1 - \varepsilon)L_\lambda^{atm\downarrow}] \tau_\lambda(\theta) + L_\lambda^{atm\uparrow}(\theta) \quad (2.11)$$

όπου $B(\lambda, T_s)$ η συνάρτηση Planck, τ_λ η διαπερατότητα της ατμόσφαιρας για τη διαδρομή επιφάνειας-αισθητήρα, $L_\lambda^{atm\uparrow}$ η ακτινοβολία της ατμόσφαιρας κατά την ίδια διαδρομή και $L_\lambda^{atm\downarrow}$ η ημισφαιρικά κατερχόμενη ακτινοβολία στην επιφάνεια. Η συνάρτηση Planck αντίστοιχα δίνεται από:

$$B(\lambda, T_s) = \frac{c_1 \lambda^{-5}}{\exp\left(\frac{c_2}{\lambda T_s}\right) - 1} \quad (2.12)$$

με c_1, c_2 σταθερές. Μέσω της Εξίσωσης 2.11 και της αντίστροφης συνάρτησης Planck είναι δυνατόν να υπολογιστεί η επιφανειακή θερμοκρασία εφόσον είναι γνωστά το ε και οι σχετιζόμενες από την ατμοσφαιρική διάδοση μεταβλητές. Για την απλούστευση των υπολογισμών έχουν αναπτυχθεί αρκετοί αλγόριθμοι για τον υπολογισμό του LST χρησιμοποιώντας την καταγραφόμενη ακτινοβολία από έναν δορυφόρο σε μία ή περισσότερες φασματικές ζώνες (Li, Tang, et al., 2013). Για παράδειγμα η επιφανειακή θερμοκρασία T_s δίνεται μέσω του «αλγόριθμου ενός καναλιού» των Jiménez-Muñoz and Sobrino (2003) από τη σχέση:

$$T_s = \gamma \left[\frac{1}{\varepsilon} (\psi_1 L_\lambda^{sen} + \psi_2) + \psi_3 \right] + \delta \quad (2.13)$$

όπου ε ο συντελεστής θερμικής εκπομπής, $\gamma = \gamma(L_\lambda^{sen}, T_B^{sen})$, $\delta = \delta(L_\lambda^{sen}, T_B^{sen})$, $\psi_1 = \psi_1(\tau)$, $\psi_2 = \psi_2(\tau, L_\lambda^{atm\downarrow}, L_\lambda^{atm\uparrow})$ και $\psi_3 \equiv L_\lambda^{atm\downarrow}$. Οι παράμετροι ψ μπορούν να απλοποιηθούν περαιτέρω, θεωρώντας ότι είναι συνάρτηση μόνο της περιεκτικότητας της ατμόσφαιρας σε υδρατμούς.

Στην παραπάνω συζήτηση θεωρήθηκε ότι η τιμή του ε είναι εκ των προτέρων γνωστή. Στην πράξη, ο ακριβής υπολογισμός του ε σε επίπεδο εικονοστοιχείου της δορυφορικής εικόνας παρουσιάζει δυσκολίες, λόγω της εξάρτησής του από τις ιδιότητες των υλικών της επιφάνειας, το μήκος κύματος της ακτινοβολίας και τη γωνία θέασης του αισθητήρα. Ο συντελεστής εκπομπής έχει άμεση επίδραση στην προσδιοριζόμενη θερμοκρασία: μια αβεβαιότητα για το ε της τάξης του 1% οδηγεί σε σφάλμα 0.5 K στον τελικό υπολογισμό του LST (Sobrino et al., 2012). Για τον υπολογισμό του ε μέσω τεχνικών τηλεπισκόπησης έχουν προταθεί αρκετές διαφορετικές μεθοδολογίες (Li, Wu, et al., 2013), οι σημαντικότερες εκ των οποίων είναι οι ακόλουθες:

- Μέσω του προσδιορισμού της κάλυψης γης (Snyder et al., 1998; Mitraka et al., 2012): Αρχικά πραγματοποιείται ταξινόμηση της μελετώμενης περιοχής σε διαφορετικές κατηγορίες κάλυψης γης και έπειτα αποδίδεται διαφορετική τιμή για τον συντελεστή εκπομπής ανά τάξη, ανάλογα με το είδος του υλικού επιφάνειας. Η μέθοδος βασίζεται

στη θεώρηση ότι παρόμοια υλικά παρουσιάζουν μικρές διαφορές στις τιμές του ε . Για τις τιμές του συντελεστή εκπομπής ανά υλικό και ανά μήκος κύματος μπορούν να χρησιμοποιηθούν πειραματικές μετρήσεις ή να γίνει χρήση μιας βάσης φασματικών δεδομένων ανάκλασης/εκπομπής (φασματική βιβλιοθήκη).

- Μέσω της μεθόδου «NDVI threshold» (Sobrino and Raissouni, 2000): Η συγκεκριμένη τεχνική επιχειρεί τη συσχέτιση του ε με το ποσοστό βλάστησης της επιφάνειας του εδάφους, και πιο συγκεκριμένα με τον Κανονικοποιημένο Διαφορικό Δείκτη Βλάστησης (Normalized Differentiated Vegetated Index, NDVI). Το NDVI υπολογίζεται από τον κανονικοποιημένο λόγο της διαφοράς της ακτινοβολίας μιας επιφάνειας στο ερυθρό τμήμα του ορατού φάσματος και στην περιοχή του θερμικού υπέρυθρου. Υψηλές τιμές του NDVI αντιστοιχούν σε επιφάνεια καλυμμένη με υψηλό ποσοστό βλάστησης. Κατά τη μέθοδο NDVI threshold τα εικονοστοιχεία μιας δορυφορικής εικόνας διαχωρίζονται ανάλογα με την τιμή του NDVI και το ε προσδιορίζεται ακόλουθα με βάση τις παρακάτω υποθέσεις: α) η επιφάνεια αποτελείται μόνο από βλάστηση και γυμνό έδαφος (χώμα), β) το ε για το χώμα μπορεί να παραμετροποιηθεί μέσω γραμμικής σχέσης με τις τιμές ανακλαστικότητας στο ορατό φάσμα (κόκκινο), γ) ο συντελεστής εκπομπής για την περίπτωση της βλάστησης είναι σταθερός (συνήθως θεωρείται ίσος με 0.99) και δ) το ε μεταβάλλεται γραμμικά ανάλογα με το ποσοστό της βλάστησης του εικονοστοιχείου. Οι Stathoroulou et al. (2007) πρότειναν μια τροποποίηση της μεθόδου με στόχο την καλύτερη εφαρμογή της στο αστικό περιβάλλον, αντικαθιστώντας στην παραπάνω μεθοδολογία τις χωμάτινες επιφάνειες με ανθρωπογενή υλικά.

Η μέθοδος «Temperature emissivity separation» (TES) (Gillespie et al., 1998) είναι ένας αλγόριθμος για τον ταυτόχρονο υπολογισμό του ε και του LST· για την εφαρμογή του απαιτείται αισθητήρας με πολλαπλά θερμικά κανάλια (περισσότερα των τριών). Η μέθοδος TES εφαρμόζεται ακολουθώντας τα παρακάτω βήματα: Αρχικά ορίζεται μία μέγιστη τιμή του ε (ίδια για όλα τα κανάλια) και έπειτα χρησιμοποιώντας τις ατμοσφαιρικά διορθωμένες τιμές ακτινοβολίας πραγματοποιείται μέσω της συνάρτησης Planck μία πρώτη εκτίμηση του LST. Μέσω της μέγιστης τιμής του τελευταίου, υπολογίζεται το φάσμα των τιμών του ε για τα διαφορετικά TIR κανάλια. Στη συνέχεια υπολογίζεται το μέσο ε , τα αντίστοιχα πηλίκια ως προς αυτό για κάθε κανάλι (β_i) και τέλος η διαφορά μεταξύ του μέγιστου και του ελάχιστου πηλίκου. Η τελευταία τιμή συνδέεται με το ελάχιστο ε (ε_{min}) μέσω εμπειρικής παραμετρικής σχέσης. Με γνωστό πλέον το ε_{min} υπολογίζονται τα υπόλοιπα ε_i χρησιμοποιώντας τα β_i και τέλος το LST χρησιμοποιώντας τον μέγιστο συντελεστή ε .

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Περιοχή Μελέτης

3.1 Γενική περιγραφή

Η περιοχή μελέτης της παρούσας διδακτορικής διατριβής είναι το Πολεοδομικό Συγκρότημα της Πρωτεύουσας (ΠΣΠ), εντός του οποίου περιλαμβάνονται η Αθήνα, ο Πειραιάς και τα προάστια τους. Οι δήμοι οι οποίοι συνυπολογίζονται εντός των ορίων του ΠΣΠ έχουν διαχρονικά μεταβληθεί κατά τις διοικητικές διαιρέσεις της χώρας. Εδώ, υιοθετήθηκε η πιο πρόσφατη διάκριση της συνεχούς αστικής ενότητας του ΠΣΠ ως τα διοικητικά όρια των δήμων που συμπεριλαμβάνονται στις πέντε Περιφερειακές Ενότητες της Περιφέρειας Αττικής, και οι οποίες καλύπτουν την εν λόγω αστική περιοχή² (Πρόγραμμα Καλλικράτης - Ν. 3852/2010) (Σχήμα 3-1). Για λόγους απλούστευσης, οι όροι «Αθήνα» και «ΠΣΠ» θα χρησιμοποιούνται ισοδύναμα στη συνέχεια της εργασίας, εννοώντας και στις δύο περιπτώσεις τον συνεχή αστικό ιστό του πολεοδομικού συγκροτήματος. Στο ΠΣΠ σημειώνεται ένας συνολικός πληθυσμός 3,055,573 κατοίκων, σύμφωνα με την πιο πρόσφατη απογραφή της Ελληνικής Στατιστικής Αρχής (ΕΛΣΤΑΤ) (De facto πληθυσμός 2011, <http://www.statistics.gr/el/2011-census-pop-hous>). Η γεωμορφολογική οριοθέτηση του συγκροτήματος πραγματοποιείται από τα φυσικά χαρακτηριστικά του λεκανοπεδίου Αττικής: το ΠΣΠ περιβάλλεται από τα όρη Αιγάλεω (δυτικά), Ποικίλο (βορειοδυτικά), Πάρνηθα (βόρεια), Πεντέλη (βορειοανατολικά) και Υμηττό (ανατολικά), ενώ στα νότια η πόλη οριοθετείται από τον Σαρωνικό κόλπο (Σχήμα 3-2). Η περιοχή μελέτης καλύπτει μία συνολική έκταση των 412 km², ενώ εντός του ΠΣΠ το υψόμετρο κυμαίνεται από 0 έως 930 m (Σχήμα 3-3).

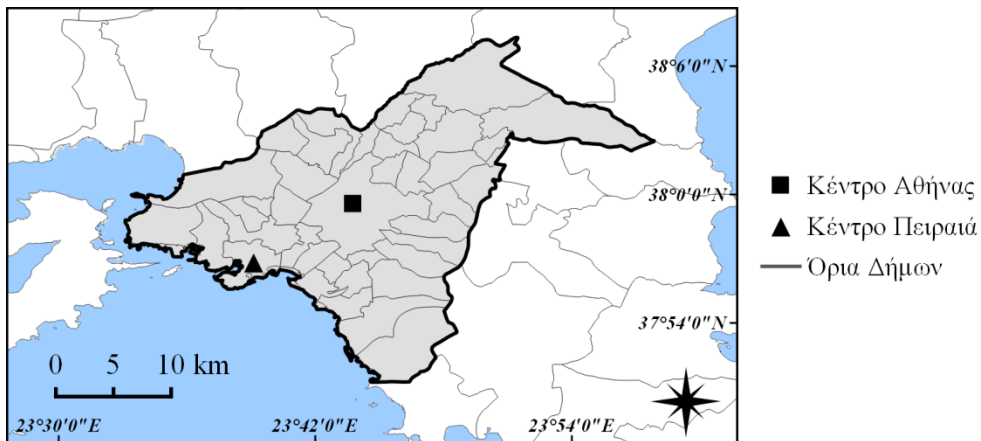
² (α) Κεντρικός Τομέας Αθηνών: Δ. Αθηναίων, Δ. Βύρωνος, Δ. Γαλατσίου, Δ. Δάφνης-Υμηττού, Δ. Ζωγράφου, Δ. Ηλιουπόλεως, Καισαριανής, Δ. Φιλαδέλφειας-Χαλκηδόνος

(β) Βόρειος Τομέας Αθηνών: Δ. Αγίας Παρασκευής, Δ. Αμαρουσίου, Δ. Βριλησίων, Δ. Ηρακλείου, Δ. Κηφισιάς, Δ. Λυκόβρυσης-Πεύκης, Δ. Μεταμορφώσεως, Δ. Νέας Ιωνίας, Δ. Παπάγου-Χολαργού, Δ. Πεντέλης, Δ. Φιλοθέης-Ψυχικού, Δ. Χαλανδρίου

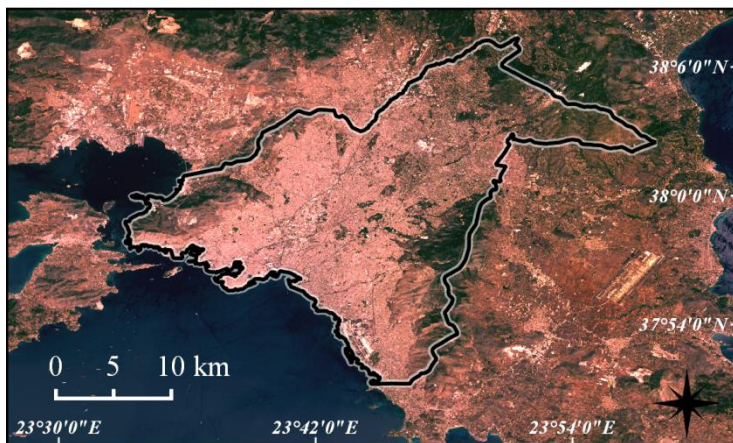
(γ) Δυτικός Τομέας Αθηνών: Δ. Αγίας Βαρβάρας, Δ. Αγίων Αναργύρων-Καματερού, Δ. Αιγάλεω, Δ. Ιλίου, Δ. Περιστερίου, Δ. Πετρούπολεως, Δ. Χαϊδαρίου

(δ) Νότιος Τομέας Αθηνών: Δ. Αγίου Δημητρίου, Δ. Αλίμου, Δ. Γλυφάδας, Δ. Ελληνικού-Αργυρούπολης, Δ. Καλλιθέας, Δ. Μοσχάτου-Ταύρου, Δ. Νέας Σμύρνης, Δ. Παλαιού Φαλήρου

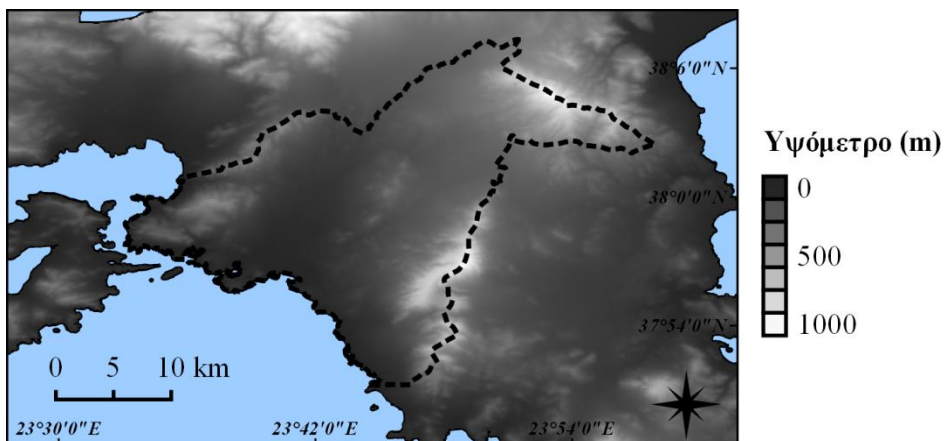
(ε) Τομέας Πειραιώς: Δ. Κερατσινίου-Δραπετσώνας, Δ. Κορυδαλλού, Δ. Νίκαιας - Αγίου Ιωάννη Ρέντη, Δ. Πειραιώς, Δ. Περάματος



Σχήμα 3-1 Διοικητική διαίρεση της περιοχής μελέτης. Πηγή δεδομένων: <http://www.statistics.gr/digital-cartographical-data>.



Σχήμα 3-2 Δορυφορική απεικόνιση της περιοχής μελέτης: εικόνα Landsat 8 (28 Ιουνίου 2017) σε χρωματική σύνθεση κόκκινο-πράσινο-μπλε (RGB).



Σχήμα 3-3 Κατανομή του υψόμετρου για την περιοχή μελέτης. Πηγή δεδομένων: ψηφιακό υψομετρικό μοντέλο εδάφους EU-DEM, Copernicus Land Monitoring Service, (<https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/copernicus-land-monitoring-service-eu-dem>).

Το κλίμα της Αθήνας χαρακτηρίζεται ως τυπικό μεσογειακό, με ήπιους χειμώνες και θερμά, ξηρά καλοκαίρια. Το μεγαλύτερο ποσοστό των βροχοπτώσεων παρατηρείται τους χειμερινούς μήνες, όταν και σημειώνεται η κύρια κυκλωνική δραστηριότητα· κατά τη διάρκεια του θέρους, ο καιρός καθορίζεται από την αντικυκλωνική κυκλοφορία. Συχνή είναι η εμφάνιση καυσωνικών επεισοδίων, με αυξανόμενη ένταση, συχνότητα και διάρκεια κατά τις τελευταίες δεκαετίες (Founda et al., 2004). Μετριασμό των θερινών θερμοκρασιών προκαλούν οι βορειοανατολικοί άνεμοι («ετησίες») και η μέσης κλίμακας θαλάσσια αύρα (παρουσιάζομενη ως νοτιοδυτικός άνεμος). Στον Πίνακα 3-1 δίνονται συγκεντρωτικά τα κλιματολογικά χαρακτηριστικά της περιοχής μελέτης, όπως καταγράφονται από τον μετεωρολογικό σταθμό της Εθνικής Μετεωρολογικής Υπηρεσίας (EMY) στην περιοχή της Νέας Φιλαδέλφειας.

Πίνακας 3-1 Κλιματικές παράμετροι για την Αθήνα – μετεωρολογικός σταθμός Νέας Φιλαδέλφειας. Πηγή δεδομένων: EMY (http://www.hnms.gr/emv/el/climatology/climatology_city?perifereia=Attiki&poli=Nea_Filadelfia).

	T (°C)	$T_{\text{ελαχ}}$ (°C)	$T_{\text{μεγ}}$ (°C)	RH (%)	Υετός (mm)	W (m s ⁻¹)	Διεύθυνση Ανέμου
Ιαν.	8.7	5.2	12.5	74.5	56.9	5.6	BA
Φεβ.	9.3	5.4	13.5	72.2	46.7	6.0	BA
Μάρ.	11.2	6.7	15.7	68.8	40.7	6.1	BA
Απρ.	15.3	9.6	20.2	61.7	30.8	5.3	NΔ
Μάι.	20.7	13.9	26.0	53.9	22.7	5.0	NΔ
Ιούν.	25.6	18.2	31.1	46.1	10.6	5.4	NΔ
Ιούλ.	28.0	20.8	33.5	43.1	5.8	6.7	BA
Αύγ.	27.4	20.7	33.2	45.3	6.0	6.6	BA
Σεπ.	23.3	17.3	29.2	53.7	13.9	5.8	BA
Οκτ.	18.1	13.4	23.3	66.1	52.6	5.6	BA
Νοέ.	13.7	9.8	18.1	74.3	58.3	4.6	BA
Δεκ.	10.3	6.8	14.1	76.1	69.1	4.8	BA

Εντός της Αθήνας περιλαμβάνονται ως επί το πλείστον αστικές χρήσεις γης —κατοικίας και εμπορικών χρήσεων. Οι ελεύθεροι χώροι – χώροι αστικού πρασίνου είναι λιγοστοί, ενώ περιορισμένες είναι και οι ζώνες ειδικών χρήσεων γης. Οι περιοχές των ορεινών όγκων αποτελούν σχεδόν καθ' ολοκληρία ενότητες καθαρά φυσικού περιβάλλοντος —πολεοδομικά προστατευόμενες μέσω Προεδρικών Διαταγμάτων. Το οδικό δίκτυο της Αθήνας είναι εκτεταμένο· σημαντικοί αυτοκινητόδρομοι και αστικές λεωφόροι τέμνουν τον αστικό ιστό καλύπτοντας υπερτοπικές λειτουργίες, συνεισφέροντας ωστόσο παράλληλα στην υποβάθμιση του αστικού περιβάλλοντος και τον κατακερματισμό της πόλης.

Η πολεοδομική ανάπτυξη της πόλης κατά τη σύγχρονη ιστορία της, έχει αφετηρία το 1833 όταν η Αθήνα κατέστη πρωτεύουσα του νεοσύστατου κράτους της Ελλάδας. Αρχικά, ο πληθυσμός

ήταν περιορισμένος εντός του λεκανοπεδίου Αθηνών· το 1875 οι αστικοί πυρήνες Αθήνας-Πειραιά και οι περιφερειακοί τους οικισμοί, κάλυπταν μία επιφάνεια της τάξης μόλις των 12 km² (Αβδελίδη, 2010). Ωστόσο με την πάροδο των ετών, η πολεοδομική ανάπτυξη της πόλης υπήρξε έντονη και συνεχής. Σημαντική επίδραση στη διαμορφούμενη οικιστική ανάπτυξη επέφερε η εγκατάσταση νέων βιομηχανιών κατά μήκος του Κηφισού —στον ελεύθερο χώρο ανάμεσα στους δύο κεντρικούς πόλους της Αθήνας και του Πειραιά. Η πρώτη ραγδαία αύξηση του πληθυσμού συνέβη κατά την άφιξη προσφύγων την περίοδο 1917-1931. Αυτοί εγκαταστάθηκαν σε μεγάλο βαθμό στην περιφέρεια του Πειραιά και στα δυτικά προάστια της Αθήνας λόγω της παρουσίας των προαναφερθέντων βιομηχανιών-βιοτεχνιών. Παράλληλα, μεγάλος αριθμός προσφύγων βρίσκει κατοικία στους όμορους (προς τις περισσότερες κατευθύνσεις) δήμους της πόλης της Αθήνας. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα για πρώτη φορά να δημιουργηθεί ένας συνεχής αστικός ιστός Αθήνας-Πειραιά, ο οποίος και καλύπτει ένα εκτεταμένο μέρος του λεκανοπεδίου. Επιπλέον, οι δυσκολίες στην κάλυψη των αναγκών στέγασης των προσφύγων από τους κρατικούς φορείς, συχνά αντιμετωπίζονται με αυτοσχέδια καταλύματα και αυθαίρετη δόμηση.

Η επόμενη πληθυσμιακή ανάπτυξη στο ΠΣΠ πραγματοποιήθηκε τα μεταπολεμικά χρόνια με το φαινόμενο της εσωτερική μετανάστευσης αγροτικών πληθυσμών προς τις αστικές περιοχές και ειδικότερα προς την Αθήνα. Η πληθυσμιακή μεγέθυνση όλων των δήμων είναι σημαντική, ενώ τα κύρια χαρακτηριστικά της οικιστική ανάπτυξης κατά τη δεκαετία του '50 είναι τα εξής: Οι κεντρικές περιοχές της Αθήνας είναι πυκνοκατοικημένες, εμφανίζουν υψηλό βαθμό κατάτμησης σε στενά οικοπέδα που αρχικά καλύπτονται κυρίως από μονοκατοικίες και κατοικούνται σε σημαντικό ποσοστό από μεσοαστικά ή και υψηλότερης τάξης στρώματα. Η αντικατάσταση των χαμηλότερων κτισμάτων με πολυκατοικίες θα συμβεί με το φαινόμενο της αντιπαροχής —δηλ. την παραχώρηση γης από τους ιδιοκτήτες των οικοπέδων σε κατασκευαστικές εταιρίες με αντάλλαγμα διαμερίσματα στις νεόκτιστες πολυκατοικίες. Η αντιπαροχή είχε την υποστήριξη, μέσω ευνοϊκών ρυθμίσεων, των κρατικών αρχών —ενώ εν γένει κατά την εφαρμογή της δεν τέθηκαν πολεοδομικοί περιορισμοί, π.χ. ως προς το ύψος δόμησης. Ως συνέπεια, ανεγέρθηκαν πολυώροφα κτήρια σε οικοδομικά τετράγωνα της Αθήνας που περιβάλλονται από στενούς σχετικά δρόμους. Εκτός από τις κεντρικές περιοχές της Αθήνας ο οικιστικός κορεσμός κατέστη γρήγορα έντονος και στον Πειραιά και τα περίχωρά του. Η κοινωνική σύνθεση του Πειραιά είχε παραμείνει σταθερή (κυρίως εργατικά στρώματα), εμφανίζοντας παρόμοια χαρακτηριστικά με τον πληθυσμό στα δυτικά προάστια του ΠΣΠ. Για τα τελευταία, η οικιστική ανάπτυξη μέσω αντιπαροχής περιορίστηκε σε μικρό βαθμό· η δόμηση πραγματοποιήθηκε μέσω άναρχης και συχνά παράνομης ανέγερσης ιδιόκτητων κατοικιών (Leontidou et al., 1990). Παράλληλα, εντός του αστικού ιστού έχουν τα μεταπολεμικά χρόνια εδραιωθεί χωρικές ενότητες χρήσεων γης αμιγούς κατοικίας —συχνά αναφερόμενες ως «κηπουπόλεις» (Αβδελίδη, 2010)— όπου κατά κανόνα διαμένουν ανώτερα κοινωνικά στρώματα (π.χ. Ψυχικό και Κηφισιά).

Η αναφερθείσα, έντονη οικιστική επιβάρυνση των κεντρικών περιοχών του ΠΣΠ, οδηγεί από τη δεκαετία του '70 και έπειτα τμήμα του πληθυσμού τους να μετακομίσει προς τα προάστια. Μέρος

της παραπάνω μετεγκατάστασης θα πραγματοποιηθεί σε κεντρικότερες περιοχές, π.χ. στους δήμους Περιστερίου και Ζωγράφου. Ωστόσο η σημαντικότερη οικιστική εξέλιξη είναι η μετακίνηση κατοίκων υψηλότερων εισοδημάτων προς τα βορειοανατολικά και νοτιοανατολικά προάστια, αποτέλεσμα της οποίας είναι η αύξηση της οικιστικής πυκνότητας των οικισμών υποδοχής αλλά και η επέκταση της πόλης προς τις παραπάνω κατευθύνσεις με τη δημιουργία νέων αστικών περιοχών. Ο σημαντικός αριθμός πληθυσμού που εγκαταλείπει το κέντρο της Αθήνας θα αναπληρωθεί σε μεγάλο βαθμό από την άφιξη μεταναστών, από το '90 και έπειτα (Panori et al., 2018). Η μεταπολεμική πληθυσμιακή εξέλιξη εντός του ΠΣΠ παρουσιάζεται συγκεντρωτικά ανά περιφερειακή ενότητα στον Πίνακα 3-2.

Πίνακας 3-2 Δημογραφική εξέλιξη του Πολεοδομικού Συγκροτήματος Πρωτεύουσας (1951 –2011). Πηγή δεδομένων: ΕΛΣΤΑΤ – Ψηφιακή Βιβλιοθήκη (<http://dlib.statistics.gr/portal/page/portal/ESYE>) και Απογραφή Πληθυσμού-Κατοικιών 2011 (<http://www.statistics.gr/el/2011-census-pop-hous>).

	Κεντρικός Τομέας Αθηνών	Δυτικός Τομέας Αθηνών	Νότιος Τομέας Αθηνών	Βόρειος Τομέας Αθηνών	Τομέας Πειραιώς
1951	683,026	98,722	131,660	116,631	341,411
1961	817,141	236,985	194,393	193,178	399,756
1971	1,143,182	375,228	303,279	272,370	439,138
1981	1,252,024	445,661	435,733	404,327	476,304
1991	1,141,194	456,747	480,799	498,869	456,865
2001	1,112,133	473,179	519,997	559,467	466,065
2011	1,022,853	480,851	522,798	585,183	443,888

3.2 Το θερμικό περιβάλλον της Αθήνας

Η πολεοδομική ανάπτυξη της Αθήνας, όπως περιγράφηκε στην προηγούμενη ενότητα έχει οδηγήσει σε μεγάλη οικιστική πυκνότητα, έλλειψη χώρων πρασίνου και έντονες ανθρωπογενείς πηγές θερμότητας. Κατά συνέπεια το θερμικό περιβάλλον της πόλης έχει υποστεί σημαντική επιβάρυνση. Το φαινόμενο της αστικής θερμικής νησίδας έχει διερευνηθεί σε πλήθος μελετών με επίκεντρο την Αθήνα και έχει περαιτέρω συσχετιστεί με τις τοπικές κυκλοφορίες, τις συνοπτικές συνθήκες και τη συγκέντρωση των ρυπαντών της περιοχής.

Η πρώτη διερεύνηση της επίδρασης του αστικού περιβάλλοντος στις θερμοκρασίες του αέρα για το ΠΣΠ, σημειώνεται ήδη από τη δεκαετία του '50 (Karariperis, 1954). Οι αντίστοιχες μελέτες θα ενταθούν τα μετέπειτα έτη (Katsoulis and Theoharatos, 1985; Repapis and Metaxas, 1985; Katsoulis, 1987) αναδεικνύοντας την αστική επίδραση του δομημένου περιβάλλοντος κυρίως ως προς τις ελάχιστες ημερήσιες θερμοκρασίες. Σε μεταγενέστερη έρευνα υπολογίστηκε κατά τη διάρκεια του 20^{ου} αιώνα μια αύξηση προσεγγιστικά 0.5 °C, όσον αφορά τη μέση ετήσια θερμοκρασία του σταθμού

του Θησείου (Founda et al., 2004). Επιπρόσθετα, η παραπάνω θερμική επιβάρυνση παρουσιάζεται περισσότερο έντονη κατά τους θερινούς μήνες. Οι αυξητικά καταγραφόμενες θερμοκρασίες του σταθμού του Θησείου εκτιμώνται ότι είναι συνδυασμός του UHI και της κλιματικής αλλαγής (Founda, 2011).

Περαιτέρω μελέτες, διερεύνησαν και επιβεβαίωσαν την ύπαρξη UHI (όσον αφορά τη θερμοκρασία αέρα) για την Αθήνα, χρησιμοποιώντας μεγαλύτερο αριθμό σταθμών εντός του πολεοδομικού συγκροτήματος (Santamouris et al., 2001; Livada et al., 2002; Giannopoulou et al., 2011; Georgakis and Santamouris, 2017) ή/και εστιάζοντας στο UHI_{UCL} εντός του πυκνού οικιστικού ιστού με μετρήσεις θερμοκρασίας αέρα σε αστικές χαράδρες (Santamouris, Papanikolaou, et al., 1999; Giannopoulou et al., 2010; Giannopoulou et al., 2011). Η χρήση εξελιγμένων υπολογιστικών αλγορίθμων (νευρωνικών δικτύων) παρείχε τη δυνατότητα της πρόβλεψης της έντασης του UHI με σημαντική ακρίβεια (Santamouris, Mihalakakou, et al., 1999; Mihalakakou et al., 2002; Mihalakakou et al., 2004). Η θερμική νησίδα της Αθήνας έχει επίσης μελετηθεί σε σχέση με τις μέσες και μεγάλης κλίμακας ατμοσφαιρικές κυκλοφορίες. Το ΔT_{U-R} βρέθηκε να είναι μεγαλύτερο όταν συνδυάζεται με κάποιο υψηλό βαρομετρικό σύστημα (Mihalakakou et al., 2002), ασθενείς, νότιους ανέμους και μικρή νεφοκάλυψη (Kassomenos and Katsoulis, 2006). Οι Georgakis and Santamouris (2006) πραγματοποίησαν μελέτη της κατανομής της θερμοκρασίας και του ανέμου σε αστική χαράδρα της Αθήνας και τη σύζευξη του UCL με την υπερκείμενη ατμόσφαιρα.

Η αστική θερμική νησίδα της Αθήνας έχει επίσης εκτενώς μελετηθεί με τη χρήση δορυφορικών παρατηρήσεων. Η επιφανειακή θερμοκρασία του κυρίως αστικού ιστού βρέθηκε να είναι έως το μέσον της ημέρας υψηλότερη των περιοχών υψηλού ποσοστού βλάστησης, αλλά μικρότερη των γειτονικών αγροτικών περιοχών (Stathopoulou et al., 2009; Keramitsoglou et al., 2011). Οι παραπάνω μελέτες κατέδειξαν ότι σε αντιπαράθεση τις νυκτερινές ώρες το η επιφανειακή αστική θερμική νησίδα (Surface Urban Heat Island, SUHI) είναι ιδιαίτερα έντονη. Οι Polydoros and Cartalis (2015) διερεύνησαν την αύξηση του LST σε συνάρτηση με την αστική επέκταση και την αλλαγή των χρήσεων γης, ενώ στους (Benas et al., 2017; Polydoros et al., 2018) μελετήθηκαν οι μακροχρόνιες τάσεις μεταβολής της επιφανειακής θερμοκρασίας του εδάφους.

Η πειραματική εκστρατεία THERMOPOLIS αποτέλεσε μία συνολική μελέτη των συνιστωσών του θερμικού περιβάλλοντος της Αθήνας και των ιδιοτήτων των δομικών της υλικών (Daglis et al., 2010). Η μελέτη του επιφανειακού ενεργειακού ισοζυγίου στο κέντρο της πόλης που πραγματοποιήθηκε στο πλαίσιο του παραπάνω προγράμματος, κατέδειξε σημαντικά υψηλότερες τιμές της αισθητής σε σχέση με τη λανθάνουσα ροή θερμότητας, ισχυρές ανθρωπογενείς εκπομπές θερμότητας και μεγάλες τιμές αποθηκευόμενης θερμότητας στο εσωτερικό των κτηρίων (Rapsomanikis et al., 2015; Loupa et al., 2016). Το σύνολο των εισροών και των εκροών ενέργειας-μάζας της πόλης («αστικός μεταβολισμός») μελετήθηκε στο πλαίσιο του προγράμματος BRIDGE (Chrysoulakis et al., 2013).

Τα επεισόδια καύσωνα έχουν παρατηρηθεί να ενισχύουν την ένταση της θερμικής νησίδας (Founda and Santamouris, 2017) και να δυσχεραίνουν σε υψηλό βαθμό την υφιστάμενη θερμική δυσφορία (Pantavou et al., 2011; Giannopoulou et al., 2014). Η υπέρβαση ενός θερμοκρασιακού ορίου έχει παρατηρηθεί να παρουσιάζει ισχυρή στατιστική συσχέτιση με τις μετρήσεις θνησιμότητας (Paravantis et al., 2017). Τους θερινούς μήνες, η χρήση ηλεκτρικής ενέργειας λόγω συστημάτων κλιματισμού αυξάνεται περαιτέρω λόγω του ισχυρού UHI (Hassid et al., 2000). Ειδικότερα, οι υψηλότερες θερμοκρασίες στο κέντρο της πόλης βρέθηκε ότι διπλασιάζουν το συνολικό φορτίο ψύξης, ενώ τριπλασιάζουν το φορτίο αιχμής (Santamouris et al., 2001).

Προσομοίωση του θερμικού περιβάλλοντος της πόλης της Αθήνας έχει επιπλέον πραγματοποιηθεί χρησιμοποιώντας αριθμητικά μοντέλα καιρού (Kotroni et al., 1999; Dandou et al., 2005; Kotroni et al., 2011; Papangelis et al., 2012; Giannaros et al., 2014; Giannaros et al., 2018). Επιπρόσθετα, με τη χρήση ανάλογων μοντέλων έχει περαιτέρω διερευνηθεί η αλληλεπίδραση της θαλάσσιας αύρας με το αστικό συγκρότημα της Αθήνας (Kallos et al., 1993; Dandou et al., 2009). Μεγάλος αριθμός βιοκλιματικών παρεμβάσεων έχουν εφαρμοστεί ή/και προσομοιωθεί μέσω μικροκλιματικών προσομοιώσεων για διάφορες ενότητες του ΠΣΠ (Gaitani et al., 2011; Synnefa et al., 2017; Kyriakodis and Santamouris, 2018; Lontorfos et al., 2018).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

Υποκλιμάκωση της Επιφανειακής Θερμοκρασίας

4.1 Εισαγωγή

Η χρήση των τεχνικών της δορυφορικής τηλεπισκόπησης παρουσιάζει σπουδαίες δυνατότητες ως προς τη μελέτη του αστικού περιβάλλοντος, προσφέροντας σημαντικές πληροφορίες για τις ιδιότητες και τα χαρακτηριστικά της επιφάνειας, συνεισφέροντας στην καταγραφή της αστικής μορφολογίας και υποστηρίζοντας μελέτες αστικού σχεδιασμού (Yang, 2011; Chrysoulakis et al., 2013; Καρτάλης και Φείδας, 2013). Η επιφανειακή θερμοκρασία του εδάφους (Land Surface Temperature, LST) —προσδιοριζόμενη μέσω δορυφορικών καταγραφών στην περιοχή του θερμικού υπέρυθρου (βλ. Ενότητα 2.5)— αποτελεί μία από τις πιο καθοριστικές παραμέτρους του αστικού κλίματος. Βρίσκει εφαρμογή κατά τον προσδιορισμό της επιφανειακής αστικής θερμικής νησίδας (Surface Urban Heat Island, SUHI) (Roth et al., 1989; Stathopoulou et al., 2009; Keramitsoglou et al., 2011), τον υπολογισμό των αστικών ροών ενέργειας (Frey and Parlow, 2012; Chrysoulakis et al., 2018; Crawford, Grimmond, et al., 2018) και τον εντοπισμό των περιοχών εντός της πόλης που υπόκεινται στις ισχυρότερες θερμικές πιέσεις («θερμά σημεία») (Goswami et al., 2013; Mavrakou et al., 2018).

Ωστόσο, με βάση τα υπάρχοντα τεχνικά χαρακτηριστικά των δορυφορικών συστημάτων τηλεπισκόπησης, δεν είναι επί του παρόντος δυνατή η καθημερινή λήψη θερμικών εικόνων με την αναγκαία σε πολλές εφαρμογές υψηλή χωρική ανάλυση. Αυτό αποτελεί επακόλουθο της αντίστροφης σχέσης που παρουσιάζεται μεταξύ της χρονικής και της χωρικής διακριτικής ικανότητας των δορυφορικών εικόνων. Συγκεκριμένα, οι δορυφόροι υψηλής χωρικής ευκρίνειας (μέγεθος εικονοστοιχείου με τάξη μεγέθους 100 m, π.χ. δορυφόροι Landsat) χαρακτηρίζονται από χαμηλή χρονική επαναληπτικότητα των λήψεων για μια συγκεκριμένη περιοχή (μίας ή δύο εβδομάδων), ως αποτέλεσμα των ιδιοτήτων της δορυφορικής τροχιάς τους και των τεχνικών δυνατοτήτων των αισθητήρων. Αντίθετα, οι δορυφόροι που παρέχουν εικόνες με συχνότητα της τάξης των δύο εικόνων ανά ημέρα, χαρακτηρίζονται από τη σημαντικά μικρότερη χωρική ανάλυση (≥ 1000 m) των παρατηρήσεών τους (π.χ. δορυφόροι Terra, Sentinel-3). Επομένως, για να καλυφθεί το υπάρχον κενό μεταξύ χωρικής και χρονικής ευκρίνειας απαιτείται η ανάπτυξη τεχνικών οι οποίες θα ενισχύουν τεχνητά τη χωρική διακριτική ικανότητα των ημερήσιων δορυφορικών εικόνων. Το σύνολο των τεχνικών με στόχο τη βελτίωση της χωρικής ανάλυσης των δορυφορικών (θερμικών) δεδομένων ορίζεται ως «υποκλιμάκωση» (downscaling) ή «ενίσχυση» (sharpening) των δορυφορικών εικόνων.

Η πιο διαδεδομένη τεχνική με στόχο την ενίσχυση της χωρικής διακριτικής ικανότητας των δορυφορικών εικόνων επιφανειακής θερμοκρασίας είναι η «στατιστική υποκλιμάκωση» (Zhan et al., 2013). Κατ' αυτή τη μέθοδο, αναπτύσσεται μία παραμετρική εξίσωση —συνήθως μέσω μεθόδων ανάλυσης παλινδρόμησης (regression analysis)— μεταξύ του LST και μίας ή περισσότερων επιφανειακών παραμέτρων (μεταβλητές πρόβλεψης). Η σχέση μεταξύ της επιφανειακής θερμοκρασίας και της επιλεγμένης μεταβλητής πρόβλεψης αναπτύσσεται αρχικά σε χαμηλή χωρική ανάλυση. Κατόπιν, με τη θεώρηση ότι η ίδια σχέση διατηρείται σε σημαντικό βαθμό και σε μικρότερη κλίμακα —όπου επίσης υπάρχουν διαθέσιμα δεδομένα για τη μεταβλητή πρόβλεψης— και την κατόπιν εφαρμογή της αναπτυσσόμενης εξίσωσης, παράγεται η χωρικά ενισχυμένη θερμική εικόνα.

Στη βιβλιογραφία εντοπίζονται αρκετές μελέτες στις οποίες η στατιστική υποκλιμάκωση θερμικών δορυφορικών εικόνων, έχει πραγματοποιηθεί αναπτύσσοντας μία παραμετρική εξίσωση μεταξύ της επιφανειακής θερμοκρασίας και φασματικών δεικτών που περιγράφουν τα χαρακτηριστικά της επιφανειακής βλάστησης. Σε μία από τις σημαντικότερες μελέτες της στατιστικής υποκλιμάκωσης, οι Kustas et al. (2003) χρησιμοποίησαν την παράμετρο του Κανονικοποιημένου Διαφορικού Δείκτη Βλάστησης (Normalized Differentiated Vegetated Index, NDVI) και ανέπτυξαν μία εξίσωση παλινδρόμησης μεταξύ του παραπάνω δείκτη και της επιφανειακής θερμοκρασίας. Η προτεινόμενη μέθοδός τους (Disaggregation Procedure for Radiometric Surface Temperature, DisTrad) εφαρμόστηκε με σημαντικό βαθμό επιτυχίας στις παρατηρήσεις διαφόρων δορυφορικών συστημάτων, με σκοπό την υποκλιμάκωση των θερμικών δεδομένων του εκάστοτε δέκτη στη χωρική κλίμακα των οπτικών καναλιών του. Σημαντικό στοιχείο της μεθόδου DisTrad είναι η χρησιμοποίηση της αρχικής (χαμηλής ανάλυσης) εικόνας για τη προσαρμογή των τελικών θερμοκρασιών υποκλιμάκωσης, έτσι ώστε να διατηρείται το ραδιομετρικό περιεχόμενο των εικόνων και να επιτελείται παράλληλα τοπική διόρθωση των εκτιμώμενων τιμών. Ο αλγόριθμος υποκλιμάκωσης των Agam et al. (2007) (Thermal imagery Sharpening, TsHARP) αποτέλεσε μία τροποποίηση του DisTrad και εφαρμόστηκε σε εικόνες του Landsat, του Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) και του Geostationary Operational Environmental Satellite (GOES). Στην παραπάνω ερευνητική μελέτη, διαφορετικές παραλλαγές του TsHARP συγκρίθηκαν μεταξύ τους, χρησιμοποιώντας δεδομένα του δείκτη NDVI και του ποσοστού της κάλυψης των εικονοστοιχείων από βλάστηση· τα τελικά σφάλματα για τη θερμοκρασία υποκλιμάκωσης κυμαίνονταν από 0.7 έως 2.4 °C.

Ένα μειονέκτημα των τεχνικών υποκλιμάκωσης που βασίζονται στις παραμέτρους βλάστησης υπόκειται στο ότι η επιτυχία της εφαρμοζόμενης χωρικής ενίσχυσης εξαρτάται από την ύπαρξη, για το σύνολο της εξεταζόμενης περιοχής, επαρκούς ομοιογένειας των περιβαλλοντικών συνθηκών και κυρίως των χαρακτηριστικών βλάστησης. Επιχειρώντας να αντιμετωπίσουν τους παραπάνω περιορισμούς, οι Merlin et al. (2010) πρότειναν μία διαφορετική προσέγγιση της μεθόδου DisTrad, διαχωρίζοντας κατά την υποκλιμάκωση τις φυσικές επιφάνειες ως προς τη φωτοσυνθετική

τους δραστηριότητα. Αντίστοιχα, οι Jeganathan et al. (2011) εξέτασαν τέσσερις περαιτέρω τροποποιήσεις του TsHARP για μη ομογενείς αγροτικές περιοχές στην Ινδία. Στη συγκεκριμένη μελέτη χρησιμοποιήθηκαν παρατηρήσεις των αισθητήρων Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) και MODIS και βρέθηκε ότι μοντέλα τοπικής παλινδρόμησης (local regression) εμφάνισαν μικρότερα σφάλματα, συγκριτικά με εκείνα που αναπτύχθηκαν χρησιμοποιώντας το σύνολο της δορυφορικής εικόνας. Ακόμα, η χρήση του Ενισχυμένου Δείκτη Βλάστησης (Enhanced Vegetation Index, EVI) αντί του NDVI, έχει βρεθεί να έχει καλύτερη εφαρμογή για την περίπτωση των πιο πυκνών περιοχών βλάστησης (Qiu et al., 2018).

Βελτιώσεις στη αναπτυσσόμενη παραμετρική εξίσωση θερμοκρασίας-βλάστησης έχουν εξεταστεί μέσω της χρήσης πιο προηγμένων στατιστικών αλγορίθμων και με τη χρησιμοποίηση περισσότερων μεταβλητών πρόβλεψης. Οι Bindhu et al. (2013) κάνοντας χρήση νευρωνικών δικτύων ενσωμάτωσαν στη διαδικασία υποκλιμάκωσης των εικονοστοιχείων χαμηλής ανάλυσης τα χαρακτηριστικά των γειτονικών τους. Οι Chen et al. (2014) χρησιμοποίησαν ένα συνδυασμό του TsHARP και της χωρικής παρεμβολής τύπου spline, οι Mukherjee et al. (2014, 2015) συνέκριναν διαφορετικές τεχνικές παλινδρόμησης (παλινδρόμηση τύπου stepwise, median και Kriging), ενώ οι Duan and Li (2016) κατέληξαν ότι σημαντική βελτίωση μπορεί να επιτευχθεί μέσω γεωγραφικά σταθμισμένης παλινδρόμησης. Η τεχνική παλινδρόμησης των «Τυχαίων Δασών» (Random Forests, RF) έχει βρει εφαρμογή στους Hutengs and Vohland (2016) και στους Yang et al. (2017), εισάγοντας επιπλέον στη μεθοδολογία υποκλιμάκωσης δεδομένα κάλυψης γης, τοπογραφικά δεδομένα και τιμές της ανακλώμενης ακτινοβολίας στην περιοχή του ορατού και του εγγύς υπέρυθρου. Οι Bisquert et al. (2016) εξέτασαν ένα μεγάλο εύρος μεθοδολογιών υποκλιμάκωσης κάνοντας παράλληλη χρήση δορυφορικών εικόνων των Landsat και MODIS· η περιοχή μελέτης τους αποτέλεσε μία ετερογενής περιοχή αραιής βλάστησης, ενώ οι μέθοδοι που διερευνήθηκαν περιλάμβαναν την απλή γραμμική παλινδρόμηση, τα νευρωνικά δίκτυα και τις τεχνικές «εξόρυξης δεδομένων» (data mining). Η εφαρμογή της στατιστικής υποκλιμάκωσης του LST έχει επίσης εφαρμοστεί με τη χρήση δεδομένων, προερχόμενα από υπερφασματικούς δορυφορικούς αισθητήρες (Ghosh and Joshi, 2014).

Κατά την προσαρμογή της μεθοδολογίας της στατιστικής υποκλιμάκωσης σε αστικές περιοχές, στόχος είναι να ενσωματωθούν στις αναπτυσσόμενες εξισώσεις τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της αστικής επιφάνειας μέσω της χρήσης επιπλέον/διαφορετικών μεταβλητών. Οι Dominguez et al. (2011) ενίσχυσαν θερμικές παρατηρήσεις υψηλής χωρικής ευκρίνειας (από τα 90 στα 10 m) μέσω του συνδυασμού της λευκαύγειας και του NDVI ως μεταβλητών πρόβλεψης. Στις ερευνητικές εργασίες των Essa et al. (2013, 2017) πραγματοποιήθηκε διερεύνηση ως προς τη βελτίωση της μεθόδου DisTrad χρησιμοποιώντας μία παραμετρική εξίσωση μεταξύ του LST και του ποσοστού κάλυψης του αδιαπέρατου (impervious) εδάφους στη θέση του δείκτη NDVI. Η στατιστική υποκλιμάκωση μέσω πολλαπλών μεταβλητών (συμπεριλαμβανομένων δεικτών δόμησης) και της χρησιμοποίησης της μεθόδου της «ανάλυσης στις κύριες συνιστώσες» (Principal Component Analysis, PCA) επέφερε σημαντική βελτίωση των αποτελεσμάτων του DisTrad σε ετερογενή αστική

περιοχή της Κίνας (Zhu et al., 2013). Ακόμα, στην ερευνητική μελέτη της Bonafoni (2016) πραγματοποιήθηκε διερεύνηση ενός μεγάλου εύρους μεταβλητών πρόβλεψης για την πόλη του Μιλάνου της Ιταλίας. Τα αποτελέσματα της παραπάνω μελέτης κατέδειξαν ότι ένας γραμμικός συνδυασμός δεικτών βλάστησης και δεικτών δόμησης οδηγεί σε καλύτερες εκτιμήσεις ως προς το χωρικά ενισχυμένο LST. Στις αστικές περιοχές έχει επίσης διερευνηθεί μία εναλλακτική προσέγγιση υποκλιμάκωσης —η τεχνική υποκλιμάκωσης pixel modulation (Nichol, 2009; Stathopoulou and Cartalis, 2009)— κατά την οποία κάθε εικονοστοιχείο χαμηλής ανάλυσης επιμερίζεται σε υπο-περιοχές με βάση τις υψηλής χωρικής κλίμακας τιμές του LST άλλου θερμικού δέκτη (συμπίπτουσας χρονικής περιόδου και μετεωρολογικών συνθηκών) ή/και του συντελεστή θερμικής εκπομπής.

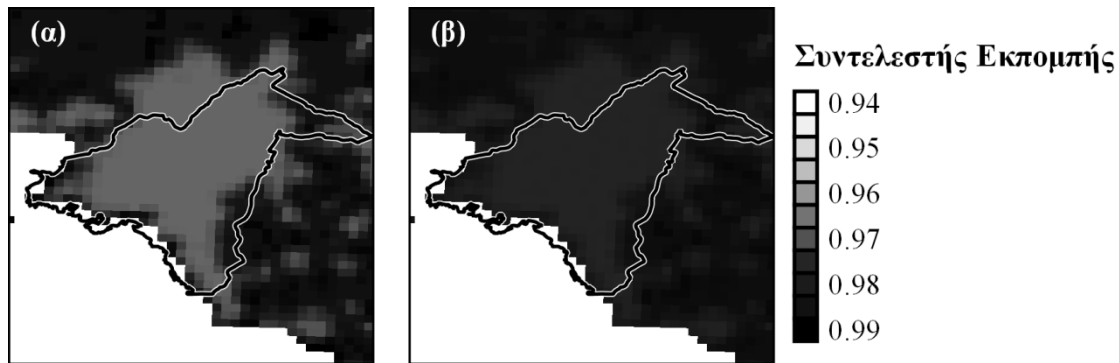
Μία επιπλέον εφαρμογή των τεχνικών υποκλιμάκωσης είναι η ενίσχυση των εικόνων που προέρχονται από γεωστάσιμους δορυφόρους υψηλής τροχιάς, από την αρχική τους χωρική ανάλυση της τάξης των ~4 km στη χωρική διακριτική ικανότητα του 1 km ή και μικρότερη. Στόχος της συγκεκριμένης εφαρμογής είναι η συνεχής (ανά 15 λεπτά) παρακολούθηση της αστικής επιφανειακής θερμοκρασίας σε βελτιωμένη χωρική ανάλυση, έτσι ώστε να καθίσταται παράλληλα δυνατή η εμφάνιση των επιμέρους διαφοροποιήσεων εντός ενός αστικού ιστού (Zakšek and Oštir, 2012). Οι Keramitsoglou et al. (2013) χρησιμοποίησαν δεδομένα του δορυφόρου Meteosat Second Generation-Spinning Enhanced Visible and InfraRed Imager (MSG-SEVIRI) και τεχνικές μηχανικής μάθησης (gradient boosting και support vector machines) για την υποκλιμάκωση των επιφανειακών θερμοκρασιών της Αθήνας μέσω πολλαπλών μεταβλητών πρόβλεψης. Για την υποκλιμάκωση των δεδομένων MSG-SEVIRI, έχει επιπλέον παρατηρηθεί από τους Bechtel et al. (2012) και Sismanidis et al. (2017) ότι η χρήση χωρικών δεδομένων που αποδίδουν τον ετήσιο κύκλο της επιφανειακής θερμοκρασίας (Annual Cycle Parameters, ACP) μπορεί να επιφέρει σημαντική βελτίωση των τελικών εκτιμήσεων.

Οι τεχνικές υποκλιμάκωσης μέσω της μεθοδολογίας «αποσύνθεσης εικονοστοιχείων» (pixel unmixing) αποτελούν μία διακριτή κατηγορία χωρικής ενίσχυσης της επιφανειακής θερμοκρασίας του εδάφους. Κατ' αυτή τη μέθοδο η θερμοκρασία των εικονοστοιχείων χαμηλής χωρικής ανάλυσης θεωρείται ότι αποτελεί μία μίξη συνιστωσών διαφορετικής θερμοκρασίας, οι οποίες αντανάκλουν τα διαφορετικά υλικά που ενυπάρχουν εντός αυτών. Γνωρίζοντας το ποσοστό κάλυψης των παραπάνω υλικών είναι δυνατόν να επιλυθεί το προκύπτον σύστημα εξισώσεων για την εύρεση των επιμέρους θερμοκρασιών («thermal unmixing»). Τα παραπάνω θεμελιώδη υλικά της επιφάνειας αναφέρονται συνήθως ως «ακροστοιχεία» (endmembers). Η μεθοδολογία της αποσύνθεσης εικονοστοιχείων χρησιμοποιήθηκε αρχικά για την υποκλιμάκωση δορυφορικών παρατηρήσεων της επιφανειακής ανακλαστικότητας (Zurita-Milla et al., 2008; Amoros-Lopez et al., 2011) και για την ταξινόμηση δορυφορικών εικόνων σε επίπεδο υπό-εικονοστοιχείου (Mitraka et al., 2012). Όσον αφορά τη χρήση της αποσύνθεσης του εικονοστοιχείου σε εφαρμογές υποκλιμάκωσης του LST, οι Mitraka et al. (2015) ενίσχυσαν τα θερμικά δεδομένα του ανιχνευτή MODIS, χρησιμοποιώντας τη μέθοδο της

φασματικής ανάμιξης και τις ποσοστιαίες τιμές των διαφορετικών τύπων κάλυψης γης. Η παραπάνω μέθοδος εφαρμόστηκε στην ευρύτερη αστική περιοχή του Ηρακλείου Κρήτης· οι θερμικά ενισχυμένες εικόνες εμφάνισαν υψηλή συμφωνία με τα υψηλής χωρικής διακριτικής ικανότητας δεδομένα LST του ASTER, ενώ η αξιοπιστία της μεθόδου έχει περαιτέρω αξιολογηθεί μέσω προσομοιώσεων Monte Carlo (Mitraka et al., 2016).

Μία ακόμα κατηγορία τεχνικών ως προς τη βελτίωση της χωρικής διακριτικής ικανότητας του LST αποτελούν οι αλγόριθμοι «συγχώνευσης δεδομένων» (data fusion). Οι Gao et al. (2006) ανέπτυξαν σε αυτό το πλαίσιο μια μέθοδο σύζευξης των καναλιών των Landsat και MODIS για την παραγωγή δεδομένων επιφανειακής ανακλαστικότητας υψηλής χωροχρονικής ευκρίνειας (Spatial and Temporal Adaptive Reflectance Fusion Model, STARFM). Οι Weng et al. (2014) τροποποίησαν την παραπάνω μεθοδολογία με σκοπό την εφαρμογή της σε δορυφορικά κανάλια του θερμικού υπέρυθρου των Landsat και MODIS, ενσωματώνοντας επιπρόσθετα στη μεθοδολογία δεδομένα του ετήσιου θερμοκρασιακού κύκλου. Συγχώνευση θερμοκρασιακών δεδομένων γεωστάσιμων και πολικών δορυφόρων επιτεύχθηκε στους Wu et al. (2015) —μοντέλο «Spatio-Temporal Integrated Temperature Fusion Model» (STITFM). Περαιτέρω βελτιστοποίηση του STITFM πραγματοποιήθηκε με την ανάπτυξη του αλγόριθμου υποκλιμάκωσης Blend Spatiotemporal Temperatures (BLEST) (Quan et al., 2018), όπου γίνεται χρήση γραμμικού μοντέλου ανάμιξης και χωρικής παρεμβολής τύπου thin plate.

Είναι φανερό από την παραπάνω βιβλιογραφική επισκόπηση, ότι η υποκλιμάκωση της επιφανειακής θερμοκρασίας και ιδιαίτερα οι τεχνικές στατιστικής υποκλιμάκωσης, έχουν προσελκύσει έντονο ενδιαφέρον από αρκετές ερευνητικές ομάδες. Ωστόσο, οι χρησιμοποιούμενες μεθοδολογίες υποκλιμάκωσης συνήθως περιορίζονται στην εξέταση ενός μικρού αριθμού μεταβλητών πρόβλεψης, ενώ σπάνια διαφορετικοί αλγόριθμοι συγκρίνονται μεταξύ τους ή έχει αξιολογηθεί η χρήση τους σε άλλη περιοχή. Ακόμα, διαπιστώνεται συχνά μία ασυμφωνία μεταξύ των διαφόρων μελετών ως προς το ποιες μεταβλητές πρόβλεψης είναι οι πιο κατάλληλες για χρήση στις τεχνικές υποκλιμάκωσης —με τις καταγραφόμενες διαφοροποιήσεις να προκύπτουν ανάλογα από την περιοχή μελέτης ή/και τις μετεωρολογικές συνθήκες κατά την περίοδο λήψης της δορυφορικής εικόνας. Για παράδειγμα, ενώ το NDVI βρίσκει εν γένει καλή εφαρμογή στη στατιστική υποκλιμάκωση, σε αρκετές μελέτες η χρήση του παραπάνω δείκτη οδήγησε σε χειρότερα αποτελέσματα συγκριτικά με την επιλογή άλλων παραμέτρων (Bechtel et al., 2012; Essa et al., 2013; Qiu et al., 2018). Επιπλέον, η πλειονότητα των προηγούμενων μελετών έχει εστιάσει σε περιοχές υπαίθρου· επιπρόσθετη διερεύνηση της στατιστικής υποκλιμάκωσης απαιτείται για την περίπτωση των αστικών επιφανειακών θερμοκρασιών, μιας και εξαιτίας της σημαντικής ετερογένειας του αστικού τοπίου έχουν συχνά καταγραφεί σχετικά υψηλά σφάλματα υποκλιμάκωσης (Stathoroulou and Cartalis, 2009; Bonafoni, 2016). Τέλος, η σημασία που κατέχει ο συντελεστής θερμικής εκπομπής για την ακρίβεια της εκτιμώμενης εικόνας LST υποκλιμάκωσης, έχει ληφθεί υπόψη σε λίγες μόνο μελέτες (Nichol, 2009; Mitraka, Chrysoulakis, et al., 2015). Ειδικότερα για την περίπτωση



Σχήμα 4-1 Χωρική αποτύπωση του συντελεστή εκπομπής μέσω του προϊόντος συντελεστή εκπομπής – MODIS για (α) το Κανάλι 31 (10.780 – 11.280 μm) και (β) το Κανάλι 32 (11.770 – 12.270 μm) του αισθητήρα MODIS.

των τεχνικών στατιστικής υποκλιμάκωσης, ο συντελεστής εκπομπής δεν έχει στο παρελθόν ενσωματωθεί στον αλγόριθμο υποκλιμάκωσης παρά μόνον ως μεταβλητή πρόβλεψης. Το κύριο προϊόν LST του αισθητήρα MODIS (MOD11A1), το οποίο χρησιμοποιείται με μεγάλη συχνότητα σε μελέτες υποκλιμάκωσης, παράγεται με τη χρήση τιμών για τον συντελεστή εκπομπής οι οποίες προέρχονται από μία χαρτογράφηση της κάλυψης γης σε παγκόσμια κλίμακα (Snyder et al., 1998; Friedl et al., 2010). Για παράδειγμα, στο Σχήμα 4-1 παρουσιάζεται η κατανομή του συντελεστή εκπομπής MODIS για την περιοχή του λεκανοπεδίου της Αθήνας. Επικαιροποιημένα, υψηλής χωρικής ευκρίνειας δεδομένα θερμικής εκπομπής για τη περιοχή ενδιαφέροντος, εκτιμώνται ως υψηλής σημασίας για την τελική ακρίβεια του μοντέλου της υποκλιμάκωσης —κατά τη σύγκριση του με τιμές LST από άλλο δέκτη ή/και με επιτόπιες μετρήσεις επιφανειακής θερμοκρασίας.

Με βάση τα παραπάνω, η παρούσα εργασία επιχειρεί να καλύψει τα υπάρχοντα ερευνητικά κενά μέσω της ανάπτυξης μίας νέας προσέγγισης της μεθοδολογίας στατιστικής υποκλιμάκωσης θερμικών δορυφορικών εικόνων από μέση/χαμηλή (1 km) σε υψηλή (100 m) χωρική ανάλυση, η οποία περιλαμβάνει τα εξής στοιχεία:

- Υπολογισμός 16 μεταβλητών πρόβλεψης οι οποίες παρουσιάζουν άμεση ή έμμεση συσχέτιση με την επιφανειακή θερμοκρασία εδάφους και οι οποίες καλύπτουν την πλειονότητα των παραμέτρων που έχουν εξεταστεί σε μελέτες υποκλιμάκωσης στο παρελθόν. Αυτές οι μεταβλητές περιλαμβάνουν την ανακλαστικότητα δορυφορικών καναλιών στο ορατό και το εγγύς/μέσο υπέρυθρο, τέσσερις δείκτες βλάστησης, πέντε δείκτες δόμησης και γυμνού εδάφους και τοπογραφικά δεδομένα (αναλυτική περιγραφή τους ακολουθεί στην Ενότητα 4.3.2.3).
- Διερεύνηση του βέλτιστου στατιστικού αλγορίθμου με στόχο τη χρησιμοποίηση του συνόλου των παραπάνω μεταβλητών σε τεχνικές παλινδρόμησης. Για το σκοπό αυτό εξετάζονται οι μέθοδοι α) απλής γραμμικής παλινδρόμησης ελαχίστων τετραγώνων (Ordinary Least Squares, OLS), β) παλινδρόμηση τύπου ridge (Ridge Regression, RR), γ) παλινδρόμηση τεχνητών νευρωνικών δικτύων (Artificial Neural Networks, ANN) και δ)

παλινδρόμηση RF. Η ταυτόχρονη χρησιμοποίηση όλων των μεταβλητών πρόβλεψης από τον τελικό αλγόριθμο αποσκοπεί στη αποσύνδεση της μεθοδολογίας από την αναζήτηση των πιο κατάλληλων μεταβλητών για μια επιμέρους περιοχή ενδιαφέροντος και κατά συνέπεια στην εξασφάλιση της ικανότητας αντικειμενικής γενίκευσης της.

- Η ανάπτυξη της παραμετρικής εξίσωσης πραγματοποιείται μεταξύ των μεταβλητών πρόβλεψης και των δορυφορικών καταγραφών της έντασης της εκπεμπόμενης θερμικής ακτινοβολίας (ή ισοδύναμα της θερμοκρασίας λαμπρότητας). Η επιφανειακή θερμοκρασία υπολογίζεται στη συνέχεια μέσω των τιμών του συντελεστή θερμικής εκπομπής υψηλής χωρικής διακριτικής ικανότητας. Ο συντελεστής εκπομπής προκύπτει έπειτα από την ταξινόμηση των εικονοστοιχείων της δορυφορικής εικόνας σε διαφορετικούς τύπους κάλυψης γης και την επακόλουθη χρήση τυπικών τιμών για τον συντελεστή προερχόμενες από φασματικές βιβλιοθήκες.
- Κατά τη διαδικασία της χαρτογράφησης της κάλυψης γης ακολουθείται ένα νέο, πολυκριτηριακό σύνολο βημάτων επιβλεπόμενης ταξινόμησης, ενσωματώνοντας δορυφορικά δεδομένα υψηλής χωρικής διακριτικής ικανότητας (δορυφόρος Sentinel-2), υπάρχοντα δεδομένα των χρήσεων και της κάλυψης γης για την περιοχή ενδιαφέροντος και ψηφιακά υψομετρικά μοντέλα. Για την επίτευξη υψηλής χωρικής ομοιογένειας στα εικονοστοιχεία της ταξινόμησης, χρησιμοποιούνται μόνο τα φασματικά κανάλια του Sentinel-2 τα οποία διαθέτουν χωρική ανάλυση 10 m.

Η παραπάνω μεθοδολογία εφαρμόζεται για την υποκλιμάκωση δορυφορικών θερμικών εικόνων του αισθητήρα MODIS από χαμηλή σε υψηλή χωρική ανάλυση. Η περιοχή μελέτης είναι η Αθήνα (πολεοδομικό συγκρότημα της Πρωτεύουσας, βλ. Κεφάλαιο 3 και Σχήμα 3-1) και η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της υποκλιμάκωσης θα πραγματοποιηθεί μέσω θερμοκρασιακών δεδομένων του αισθητήρα ASTER και διαθέσιμων επιτόπιων μετρήσεων.

4.2 Δεδομένα

Ο δορυφόρος Sentinel-2 αποτέλεσε την πηγή των δορυφορικών παρατηρήσεων των ακτινοβολιών μικρού μήκους κύματος, οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν κατά τη διαδικασία της ταξινόμησης της κάλυψης γης ως προς τους διαφορετικούς τύπους των υλικών επιφανείας. Όπως φαίνεται από τον Πίνακα 4-1, τρία φασματικά κανάλια του Sentinel-2 στο ορατό και ένα κανάλι στο εγγύς υπέρυθρο χαρακτηρίζονται από χωρική διακριτική ικανότητα 10 m. Αυτό δίνει τη δυνατότητα για λεπτομερή αναπαράσταση των αστικών επιφανειών, με μικρή φασματική ανάμιξη μεταξύ των διαφορετικών υλικών. Ειδικότερα, χρησιμοποιήθηκε το προϊόν του Sentinel-2 που αντιστοιχεί στις τιμές ανακλαστικότητας στην κορυφή της ατμόσφαιρας (Top Of Atmosphere, TOA) —δηλ. σε κάποιο ύψος όπου η ατμοσφαιρική επίδραση είναι πλέον αμελητέα— (Level-1C product), το οποίο διατίθεται μέσω του Copernicus Open Access Hub (<https://scihub.copernicus.eu/>). Η ημερομηνία

λήψης της δορυφορικής εικόνας Sentinel-2 η οποία χρησιμοποιήθηκε ήταν η 17^η Ιουνίου 2016. Όσον αφορά το διαθέσιμο προϊόν ανακλαστικότητας της επιφάνειας του Sentinel-2 —δηλ. ανακλαστικότητα έπειτα από ατμοσφαιρική διόρθωση— (Level-2A product), αυτό δεν χρησιμοποιήθηκε διότι διαπιστώθηκε ότι συστηματικά για αρκετά σημεία της περιοχής μελέτης διακρίνει λανθασμένα τις οροφές κτηρίων υψηλής ανακλαστικότητας ως νέφη. Για τον ίδιο λόγο, κατά το στάδιο της υποκλιμάκωσης προτιμήθηκε να γίνει χρήση του προϊόντος επιφανειακής ανακλαστικότητας μέσω των δορυφόρων Landsat, όπως θα περιγραφεί στη συνέχεια.

Πίνακας 4-1 Φασματικές περιοχές και χωρική διακριτική ικανότητα του δορυφόρου Sentinel-2.

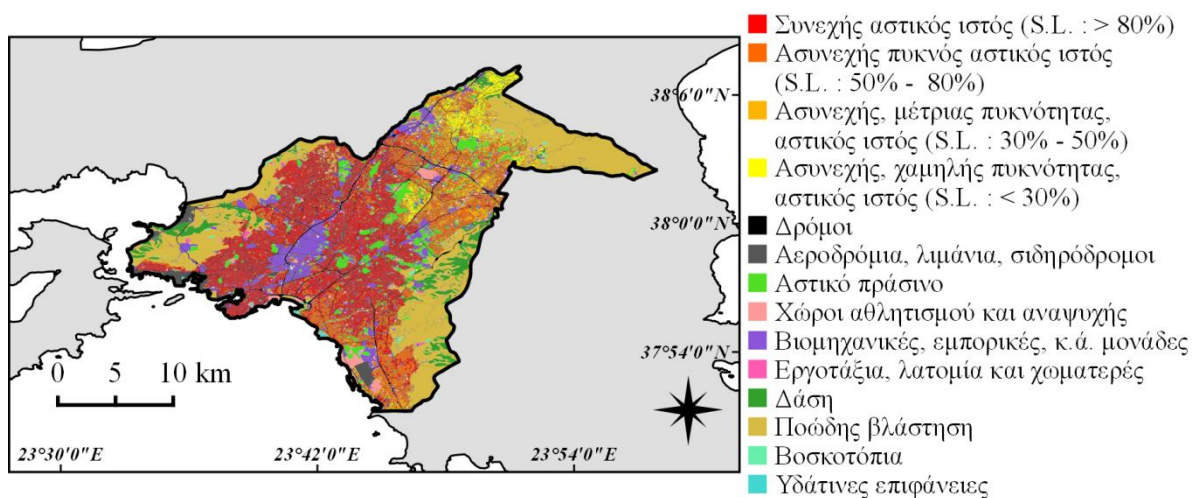
Κανάλια	Φασματική περιοχή	Μήκος κύματος (μm)	Χωρική ανάλυση (m)
1	αεροζόλ	0.421 – 0.457	60
2	μπλε	0.439 – 0.535	10
3	πράσινο	0.537 – 0.582	10
4	κόκκινο	0.646 – 0.685	10
5	εγγύς υπέρυθρο	0.694 – 0.714	20
6	εγγύς υπέρυθρο	0.731 – 0.749	20
7	εγγύς υπέρυθρο	0.768 – 0.796	20
8	εγγύς υπέρυθρο	0.767 – 0.908	10
8a	εγγύς υπέρυθρο	0.848 – 0.881	20
9	υδρατμοί	0.931 – 0.958	60
10	μέσο υπέρυθρο	1.338 – 1.414	60
11	μέσο υπέρυθρο	1.539 – 1.681	20
12	μέσο υπέρυθρο	2.072 – 2.312	20

Η διαδικασία της ταξινόμησης ενισχύθηκε περαιτέρω από:

- Το προϊόν Urban Atlas (Copernicus Land Monitoring Service). Το Urban Atlas αποτελεί μια χαρτογράφηση των χρήσεων και κάλυψης γης περίπου 700 ευρύτερων αστικών περιοχών της Ευρώπης. Παράγεται από υψηλής ανάλυσης δεδομένα τηλεπισκόπησης, τοπογραφικούς χάρτες και επιπλέον πηγές βοηθητικών δεδομένων, με τελική χωρική κλίμακα 1:10000. Στο Σχήμα 4-2 παρουσιάζονται οι χρήσεις και κάλυψη γης για την Αθήνα όπως προκύπτουν από το Urban Atlas.
- Χαρτογραφικά δεδομένα από τη βάση ανοικτών δεδομένων του OpenStreetMap (OpenStreetMap contributors, 2019). Τα δεδομένα του OpenStreetMap προέρχονται από τη δράση σε παγκόσμιο επίπεδο μίας ταχέως αναπτυσσόμενης κοινότητας εθελοντών/χρηστών. Η προκύπτουσα χαρτογραφική καταγραφή προσφέρει σημαντικές δυνατότητες για την περιγραφή μιας αστικής περιοχής, με αρκετά λεπτομερειακή

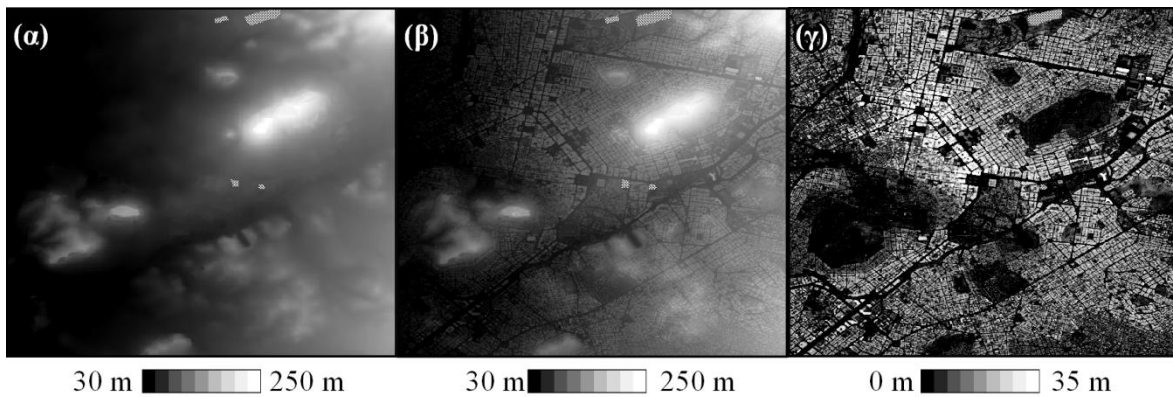
αποτύπωση (π.χ. τοποθεσία πλατειών, περιγράμματα κτηρίων), η οποία τυπικά δεν είναι δυνατή μέσω επίσημων/συμβατικών πηγών δεδομένων.

- Ψηφιακά υψομετρικά μοντέλα εδάφους προερχόμενα από το Ελληνικό Κτηματολόγιο. Το υψομετρικά μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν έχουν παραχθεί μέσω τεχνικών στερεοσκοπίας και περιλαμβάνουν: α) ένα Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους (Digital Elevation Model, DEM) και β) ένα Ψηφιακό Μοντέλο Επιφανείας (Digital Surface Model, DSM)³. Το μοντέλο DEM αντιστοιχεί στις τιμές της ανύψωσης του γυμνού εδάφους (διατίθεται σε εικόνα με μέγεθος εικονοστοιχείου 5 m), ενώ το DSM περιλαμβάνει επιπρόσθετα και τις ανυψώσεις που προκύπτουν από την παρουσία των διαφόρων αστικών στοιχείων της επιφάνειας (π.χ. κτήρια, δέντρα) επί του εδάφους (διατίθεται σε εικόνα με μέγεθος εικονοστοιχείου 0.8 m). Ο συνδυασμός των δύο υψομετρικών μοντέλων (δηλ. η αφαίρεση των τιμών του DEM από το DSM) παράγει το κανονικοποιημένο (καθαρό) ύψος των αντικειμένων της επιφανείας. Στο Σχήμα 4-3 παρουσιάζεται ένα παράδειγμα εικόνων του DEM, του DSM και του ύψους των αστικών στοιχείων για μία υποενότητα της περιοχής μελέτης (κέντρο Αθήνας).



Σχήμα 4-2 Χάρτης των χρήσεων και κάλυψης γης για την Αθήνα μέσω των δεδομένων του Urban Atlas.

³ Οι όροι DEM, DSM και Digital Terrain Model (DTM) συχνά χρησιμοποιούνται εναλλάξιμα στη βιβλιογραφία κατά την περιγραφή ψηφιακών υψομετρικών μοντέλων. Εδώ υιοθετήθηκε η σύμβαση που ακολουθήθηκε σε επίσημη παρουσίαση των δεδομένων του Ελληνικού Κτηματολογίου (Λολώνης και Παπουτσάκης, 2017).



Σχήμα 4-3 Χωρική αποτύπωση (α) του DEM, (β) του DSM και (γ) του κανονικοποιημένου ύψους για την περιοχή του κέντρου της Αθήνας.

Οι τιμές του συντελεστή εκπομπής των διαφόρων ανθρωπογενών και φυσικών στοιχείων του εδάφους —των οποίων η διάκριση γίνεται από τη διαδικασία της ταξινόμησης— εξάγονται από τις ακόλουθες βάσεις φασματικών δεδομένων: α) από τη φασματική βιβλιοθήκη ECOSTRESS Spectral Library (προηγουμένως γνωστή ως φασματική βιβλιοθήκη ASTER) (Baldrige et al., 2009), η οποία περιλαμβάνει μεταξύ άλλων τη φασματική απόκριση περισσότερων των 80 δομικών υλικών και β) από τη φασματική βιβλιοθήκη Spectral Library of impervious Urban Materials (SLUM) (Kotthaus et al., 2014), η οποία παρέχει φασματικά δεδομένα για 74 δείγματα ανθρωπογενών υλικών.

Για την εφαρμογή της μεθοδολογίας της στατιστικής υποκλιμάκωσης απαιτείται συνδυασμός δεδομένων τηλεπισκόπησης τα οποία προέρχονται από δορυφόρους διαφορετικής χωρικής διακριτικής ικανότητας, δηλ. παράλληλη χρήση εικόνων χαμηλής και υψηλής χωρικής ανάλυσης. Για τις εικόνες χαμηλής χωρικής διακριτικής ικανότητας στο θερμικό υπέρυθρο, των οποίων θα πραγματοποιηθεί η υποκλιμάκωση, επιλέχθηκε η χρήση παρατηρήσεων από το ραδιόμετρο MODIS, το οποίο φέρουν οι δορυφόροι Terra και Aqua (Πίνακας 4-2). Για τον συγκεκριμένο αισθητήρα, τα διαθέσιμα προϊόντα: α) των βαθμονομημένων καταγραφών της έντασης της ακτινοβολίας (MOD/MYD021KM), β) του LST και του επιφανειακού συντελεστή εκπομπής (MOD/MYD11A1, Collection 6) (Wan, 2014) και γ) του ατμοσφαιρικού υετίσιμου νερού (MOD/MYD05-L2), λήφθηκαν από τη βάση δεδομένων Level-1 and Atmosphere Archive and Distribution System (LAADS) Distributed Active Archive Center (DAAC) της NASA (<https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov>). Το προαναφερθέν προϊόν MODIS-LST έχει πρόσφατα εκτιμηθεί ότι χαρακτηρίζεται από μέση ακρίβεια υψηλότερη των 1 K —ωστόσο με την αβεβαιότητα στην εκτίμηση της τιμής του συντελεστή εκπομπή να μπορεί να αυξήσει σημαντικά το τελικό σφάλμα— (Duan et al., 2018). Οι δορυφορικές εικόνες MODIS με γωνία επίπτωσης (viewing zenith angle, VZA) του αισθητήρα μεγαλύτερη των 60° για την περιοχή της Αθήνας, δεν λήφθηκαν υπόψη στην παρούσα εργασία, καθώς αυτές αποτελούνται από εικονοστοιχεία στα όρια του εύρους σάρωσης (swath) του οργάνου που παρουσιάζουν χωρική ανάλυση μικρότερη του 1 km και επιπρόσθετες γεωμετρικές παραμορφώσεις. Ακόμα, για τις

συγκεκριμένες τιμές VZA η περιοχή μελέτη συχνά καλύπτεται από δύο δορυφορικές λήψεις διαφορετικών χρονικών στιγμών.

Πίνακας 4-2 Φασματικές περιοχές και χωρική διακριτική ικανότητα του αισθητήρα MODIS (δίνονται μόνο τα κανάλια που αντιστοιχούν στην περιοχή του θερμικού υπέρυθρου).

Κανάλια	Φασματική περιοχή	Μήκος κύματος (μm)	Χωρική ανάλυση (m)
29	θερμικό υπέρυθρο	8.400 – 8.700	1000
30	θερμικό υπέρυθρο	9.580 – 9.880	1000
31	θερμικό υπέρυθρο	10.780 – 11.280	1000
32	θερμικό υπέρυθρο	11.770 – 12.270	1000
33	θερμικό υπέρυθρο	13.185 – 13.485	1000
34	θερμικό υπέρυθρο	13.485 – 13.785	1000
35	θερμικό υπέρυθρο	13.785 – 14.085	1000
36	θερμικό υπέρυθρο	14.085 – 14.385	1000

Όσον αφορά τον υπολογισμό των τιμών των μεταβλητών πρόβλεψης που θα χρησιμοποιηθούν στο μοντέλο υποκλιμάκωσης, απαιτούνται δορυφορικές παρατηρήσεις στο ορατό και το εγγύς/μέσο υπέρυθρο τμήμα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Στην παρούσα εργασία, τα παραπάνω δεδομένα προέρχονται από το προϊόν επιφανειακής ανακλαστικότητας των δορυφόρων Landsat 5 και Landsat 8 (LEDAPS και LaSRC αντίστοιχα) (Πίνακες 4-3, 4-4) και του προϊόντος της καταγραφόμενης έντασης ακτινοβολίας (Collection 1 Level-1). Τα παραπάνω διατίθενται από τη διαδικτυακή πύλη Earth Explorer της αμερικάνικης Υπηρεσίας Γεωλογικών Μελετών (United States Geological Survey, USGS) (<https://earthexplorer.usgs.gov/>).

Πίνακας 4-3 Φασματικές περιοχές και χωρική διακριτική ικανότητα του δορυφόρου Landsat 5.

Κανάλια	Φασματική περιοχή	Μήκος κύματος (μm)	Χωρική ανάλυση (m)
1	μπλε	0.45 – 0.52	30
2	πράσινο	0.52 – 0.60	30
3	κόκκινο	0.63 – 0.69	30
4	εγγύς υπέρυθρο	0.76 – 0.90	30
5	μέσο υπέρυθρο	1.55 – 1.75	30
6	θερμικό υπέρυθρο	10.40 – 12.50	120
7	μέσο υπέρυθρο	2.08 – 2.35	30

Πίνακας 4-4 Φασματικές περιοχές και χωρική διακριτική ικανότητα του δορυφόρου Landsat 8.

Κανάλια	Φασματική περιοχή	Μήκος κύματος (μm)	Χωρική ανάλυση (m)
1	αεροζόλ	0.43 – 0.45	30
2	μπλε	0.45 – 0.51	30
3	πράσινο	0.53 – 0.59	30
4	κόκκινο	0.64 – 0.67	30
5	εγγύς υπέρυθρο	0.85 – 0.88	30
6	μέσο υπέρυθρο	1.57 – 1.65	30
7	μέσο υπέρυθρο	2.11 – 2.29	30
8	παγχρωματικό	0.50 – 0.68	15
9	μέσο υπέρυθρο	1.36 – 1.38	30
10	θερμικό υπέρυθρο	10.60 – 11.19	100
11	θερμικό υπέρυθρο	11.50 – 12.51	100

Επιπλέον, από τη διαδικτυακή πύλη Earthdata Search της NASA (<https://search.earthdata.nasa.gov/search>) έγινε λήψη εικόνων του προϊόντος επιφανειακής θερμοκρασίας του αισθητήρα ASTER του δορυφόρου Terra (ASTER Surface Kinetic Temperature product, AST-08). Οι εικόνες επιφανειακής θερμοκρασίας του ASTER —οι οποίες εξάγονται μέσω των πέντε θερμικών καναλιών του αισθητήρα (Πίνακας 4-5) και χαρακτηρίζονται από σημαντική ακρίβεια (Sobrino et al., 2007)— χρησιμοποιήθηκαν ως τα δεδομένα αναφοράς για τη σύγκριση των θερμοκρασιών που προκύπτουν από την υποκλιμάκωση των εικόνων του MODIS. Λόγω της αυτόνομης μεθοδολογίας για τον προσδιορισμό του συντελεστή θερμικής εκπομπής (μέθοδος Temperature Emissivity Separation, TES) που χαρακτηρίζει το προϊόν του ASTER–LST, αυτό προτιμήθηκε από τη χρήση θερμικών δεδομένων του Landsat, τα οποία απαιτούν επιπλέον διόρθωση ως προς τον συντελεστή εκπομπής.

Η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της υποκλιμάκωσης πραγματοποιήθηκε επίσης μέσω επιτόπιων μετρήσεων επιφανειακής θερμοκρασίας, προερχόμενων από την πειραματική εκστρατεία Thermopolis της Ευρωπαϊκής Υπηρεσίας Διαστήματος (European Space Agency, ESA), η οποία έλαβε χώρα στην Αθήνα κατά τη διάρκεια του Ιουλίου 2009 (Daglis et al., 2010). Τα εν λόγω πειραματικά δεδομένα, κατέστησαν διαθέσιμα για την παρούσα εργασία από την ESA και περιλαμβάνουν καταγραφές της επιφανειακής θερμοκρασίας από: α) έναν μετεωρολογικό πύργο στο κέντρο της Αθήνας με χρήση πυργόμετρου τύπου Precision Infrared Radiometer (PIR) 29435 (περίοδος μετρήσεων: 20–26 Ιουλίου 2009) και β) από μια τοποθεσία γυμνού εδάφους (χωμάτινης επιφάνειας) με χρήση πυρόμετρου τύπου Optiris CT-LT15-1 (περίοδος μετρήσεων: 14–20 και 22–24 Ιουλίου 2009). Για την περίπτωση των μετρήσεων στο κέντρο της Αθήνας, βάσει του ύψους του οργάνου καταγραφής άνω της επιφάνειας του εδάφους, προκύπτει ότι η προσλαμβάνουσα θερμική ακτινοβολία προερχόταν κατά 50% και 90% από κυκλικές ζώνες διαμέτρου 30 m και 130 m,

αντίστοιχα (Oke, 2004). Λαμβάνοντας υπόψη την τοποθεσία του σταθμού στο μέσο του ορίου δύο εικονοστοιχείων 100 m, κατά την εκτίμηση της αξιολόγησης της υποκλιμάκωσης χρησιμοποιήθηκε η μέση τιμή των δύο παραπάνω εικονοστοιχείων. Όσον αφορά τις καταγραφές τις θερμοκρασίας για τη χωμάτινη επιφάνεια, το μικρό ύψος του χρησιμοποιούμενου ιστού, καθώς και η εκτεταμένη ομοιογένεια του ευρύτερου χώρου εγκατάστασής του, οδήγησαν στη χρησιμοποίηση του συμπίπτοντος εικονοστοιχείου κατά τη διαδικασία της αξιολόγησης. Στον Πίνακα 4-6 παρουσιάζεται συγκεντρωτικά το σύνολο των δορυφορικών δεδομένων που αξιοποιήθηκαν στα διάφορα στάδια της διαδικασίας της υποκλιμάκωσης του LST.

Πίνακας 4-5 Φασματικές περιοχές και χωρική διακριτική ικανότητα του αισθητήρα ASTER.

Κανάλια	Φασματική περιοχή	Μήκος κύματος (μm)	Χωρική ανάλυση (m)
1	πράσινο	0.52 – 0.60	15
2	κόκκινο	0.63 – 0.69	15
3	εγγύς υπέρυθρο	0.76 – 0.86	15
4	μέσο υπέρυθρο	1.60 – 1.70	30
5	μέσο υπέρυθρο	2.145 – 2.185	30
6	μέσο υπέρυθρο	2.185 – 2.225	30
7	μέσο υπέρυθρο	2.235 – 2.285	30
8	μέσο υπέρυθρο	2.295 – 2.365	30
9	μέσο υπέρυθρο	2.360 – 2.430	30
10	θερμικό υπέρυθρο	8.125 – 8.475	90
11	θερμικό υπέρυθρο	8.475 – 8.825	90
12	θερμικό υπέρυθρο	8.925 – 9.275	90
13	θερμικό υπέρυθρο	10.25 – 10.95	90
14	θερμικό υπέρυθρο	10.95 – 11.65	90

Πίνακας 4-6 Το σύνολο των δορυφορικών δεδομένων τα οποία χρησιμοποιήθηκαν κατά τη διαδικασία της υποκλιμάκωσης.

	Ημερομηνία	Ώρα (UTC)	
MODIS	14/07/2009	20:37	
	15/07/2009	08:37, 12:01 19:43	
	16/07/2009	09:25, 11:07, 20:25	
	17/07/2009	11:49, 21:07	
	18/07/2009	09:11, 20:13	
	19/07/2009	09:55, 11:37, 20:55	
	20/07/2009	09:01, 20:01	
	21/07/2009	09:43, 11:25, 20:43	
	22/07/2009	08:43, 12:07, 19:49	
	23/07/2009	09:31, 11:13, 20:31	
	24/07/2009	11:55	
	25/07/2009	09:19, 11:01, 20:19	
	29/09/2013	09:25	
	09/04/2014	09:22	
	14/05/2015	09:25	
	17/07/2015	09:23	
	06/11/2015	20:25	
	14/10/2016	20:31	
	ASTER	29/09/2013	09:22
		09/04/2014	09:22
14/05/2015		09:23	
17/07/2015		09:23	
06/11/2015		20:26	
14/10/2016		20:33	
Landsat 5		22/07/2009	09:18
Landsat 8	07/10/2013	09:07	
	01/06/2014	09:05	
	06/05/2015	09:05	
	09/07/2015	09:05	
	14/11/2015	09:05	
	05/10/2016	09:05	

4.3 Μεθοδολογία

4.3.1 Προεπεξεργασία δορυφορικών εικόνων

Αρχικά, για το σύνολο των δορυφορικών εικόνων και των ψηφιακών υψομετρικών μοντέλων πραγματοποιήθηκε (όπου απαιτούνταν) γεωαναφορά στο σύστημα συντεταγμένων της «Παγκόσμιας Εγκάρσιας Μερκατορικής προβολής» (Universal Transverse Mercator, UTM) (Ζώνη 34N). Έπειτα, ακολουθήθηκε αναδειγματοληψία και ευθυγράμμιση μεταξύ των διαφορετικών εικόνων, έτσι ώστε κάθε χαμηλής ανάλυσης 1×1 km εικονοστοιχείο (MODIS) να εμπεριέχει επακριβώς εκατό 100×100 m (Landsat και ASTER) και δέκα χιλιάδες 10×10 m (Sentinel-2) εικονοστοιχεία αντίστοιχα. Η διαδικασία της αναδειγματοληψίας των υψηλής χωρικής διακριτικής ικανότητας εικόνων σε χαμηλότερη ανάλυση πραγματοποιήθηκε μέσω σταθμισμένου μέσου ως προς το εμβαδόν κάλυψης (area-weighted average). Για την αναδειγματοληψία εξετάστηκε επιπλέον η χρήση συνάρτησης βάρους που να προσομοιώνει τον τρόπο ανίχνευσης του σήματος στο στιγμιαίο πεδίο κατόπτρευσης του αισθητήρα MODIS (δηλ. χρήση μιας point spread function) (Bechtel et al., 2012). Ωστόσο καθώς η προκύπτουσα επίδραση στα αποτελέσματα ήταν αμελητέα επιλέχθηκε τελικώς να μη χρησιμοποιηθεί. Η εξέταση και ανίχνευση των νεφών πραγματοποιήθηκε μέσω των συμπληρωματικών καναλιών του εκάστοτε δορυφορικού προϊόντος που αντιστοιχούν στην αξιολόγηση της ποιότητας των παραγόμενων εικονοστοιχείων των εικόνων (quality assessment bands). Τα δεδομένα TOA ανακλαστικότητας του Sentinel-2 χρησιμοποιήθηκαν μόνο στο τμήμα της φασματικής ταξινόμησης, κατά την οποία τα δείγματα εκπαίδευσης δεν επιλέχθηκαν πρωτίστως με βάση φάσματα αναφοράς (βλ. Ενότητα 4.3.2.1). Έτσι, κρίθηκε επαρκής η χρήση μιας προσαρμοσμένης στη συγκεκριμένη δορυφορική εικόνα ατμοσφαιρικής διόρθωσης, μέσω της μεθόδου «αφαίρεσης σκοτεινών στόχων» (Dark Object Subtraction, DOS) (Chavez, 1996). Για τις δορυφορικές εικόνες Landsat έγινε απευθείας χρήση του ατμοσφαιρικά διορθωμένου προϊόντος επιφανειακής ανακλαστικότητας, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως στην Ενότητα 4.2. Επιπρόσθετα, πραγματοποιήθηκε περικοπή όλων των δορυφορικών δεδομένων κατά μήκος της ακτογραμμής και των ορίων της Αθήνας, μέσω χαρτογραφικών δεδομένων των διοικητικών ορίων της εν λόγω περιοχής (βλ. Σχήμα 3-1). Τέλος, πραγματοποιήθηκε μετασχηματισμός των χωρικών δεδομένων του Urban Atlas και του OpenStreetMap από την αρχική διανυσματική (vector) μορφή στην οποία παρέχονται, σε ψηφιδωτή (raster) μορφή, με αρχική χωρική ανάλυση 10 m.

4.3.2 Μεθοδολογία στατιστικής υποκλιμάκωσης

4.3.2.1 Ταξινόμηση της κάλυψης γης

Η διαδικασία της ταξινόμησης της δορυφορικής εικόνας Sentinel-2 πραγματοποιήθηκε με τη χρήση του αλγορίθμου μηχανικής μάθησης Random Forest (RF) (Breiman, 2001), ο οποίος έχει στο παρελθόν εφαρμοστεί με σημαντικό βαθμό επιτυχίας σε ανάλογες μελέτες ταξινόμησης (Ghosh et al.,

2014; Haas, 2016; Ruiz Hernandez and Shi, 2018). Ο ταξινομητής RF ανήκει στην κατηγορία των μη παραμετρικών ταξινομητών, δηλαδή δεν απαιτεί τα δεδομένα εισόδου να ικανοποιούν συγκεκριμένες στατιστικές ιδιότητες. Το παραπάνω είναι ιδιαίτερα σημαντικό για την περίπτωση των αστικών περιοχών, οι τάξεις των οποίων κατά κανόνα δεν ακολουθούν την κανονική κατανομή (Καρτάλης και Φεΐδας, 2013). Ένας μη παραμετρικός ταξινομητής αποδίδει ένα εικονοστοιχείο σε συγκεκριμένη τάξη, με βάση το αν αυτό βρίσκεται εντός των ορίων της αντίστοιχης φασματικής υπογραφής στον πολυδιάστατο φασματικό χώρο. Συγκεκριμένα, ο αλγόριθμος του RF αποτελείται από ένα σύνολο ανεξάρτητα εκπαιδευμένων «δέντρων απόφασης» (decision trees), των οποίων οι ταξινομήσεις συμψηφίζονται κατά το τελικό αποτέλεσμα του μοντέλου. Κάθε δέντρο απόφασης της συλλογής (ensemble) αναπτύσσεται μέσω της τυχαίας επιλογής δειγμάτων με αντικατάσταση (bootstrap sampling) από το συνολικό εκπαιδευτικό δείγμα. Η ανάπτυξη των δέντρων —δηλ. η δημιουργία των εσωτερικών τους κόμβων— προκύπτει με βάση τις τιμές των επιλεγμένων υπό εξέταση παραμέτρων και τη διερεύνηση εάν η επιλογή του διαχωρισμού θα επιφέρει μείωση της ετερογένειας (impurity) στη διακλάδωση. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι να προκύψουν οι τελικοί, μη διαχωρίσιμοι κόμβοι σε κάθε επιμέρους δέντρο απόφασης. Λαμβάνοντας υπόψη τα αποτελέσματα όλων των δέντρων, ο ταξινομητής RF παράγει την τελική εικόνα της ταξινόμησης.

Με βάση τα ανωτέρω χαρακτηριστικά του ταξινομητή RF, αναπτύχθηκε μια διαδικασία επιβλεπόμενης ταξινόμησης της κάλυψης γης, χρησιμοποιώντας ως κύρια πηγή δεδομένων τα δεδομένα ανακλαστικότητας μικρού μήκους κύματος του δορυφόρου Sentinel-2, σε συνδυασμό με το προϊόν χρήσεων και κάλυψης γης του Urban Atlas, τα χαρτογραφικά δεδομένα του OpenStreetMap και τα υψομετρικά μοντέλα DEM-DSM του Κτηματολογίου. Με στόχο την επίτευξη της μέγιστης δυνατής ομοιογένειας των εικονοστοιχείων της εικόνας ταξινόμησης χρησιμοποιήθηκαν μόνο τα φασματικά κανάλια χωρικής ανάλυσης 10 m του δορυφόρου Sentinel-2, δηλ. τα κανάλια 2–4 του ορατού και το κανάλι 8 του εγγύς υπέρυθρου (βλ. Πίνακα 4-1). Λαμβάνοντας υπόψη τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της περιοχής μελέτης, εντοπίστηκαν οι ακόλουθες εννέα τάξεις κάλυψης γης (τάξεις διαφορετικών υλικών επιφανείας) για την αρχική φάση της ταξινόμησης:

- i. «Σκουρόχρωμα δομικά υλικά» (π.χ. άσφαλτος)
- ii. «Γκρίζα δομικά υλικά» (π.χ. τσιμέντο)
- iii. «Ανοιχτόχρωμα δομικά υλικά» (π.χ. λευκή μπογιά)
- iv. «Κόκκινα δομικά υλικά» (π.χ. κεραμικές πλάκες)
- v. «Βλάστηση»
- vi. «Χώμα»
- vii. «Θαμνώδες έδαφος»
- viii. «Βραχώδες έδαφος»
- ix. «Υδάτινες επιφάνειες»

Για κάθε τύπο κάλυψης γης επιλέχθηκαν τουλάχιστον 50 εκπαιδευτικά δείγματα (μεμονωμένα εικονοστοιχεία), ομοιόμορφα κατανεμημένα σε όλο το εύρος της περιοχής μελέτης. Ο εντοπισμός

των δειγμάτων και η σύνδεσή τους με τα προαναφερθέντα υλικά έγινε μέσω της χρήσης των υψηλής ανάλυσης αεροφωτογραφιών οι οποίες είναι διαθέσιμες μέσω του Ελληνικού Κτηματολογίου και της εφαρμογής Google Earth — λαμβάνοντας παράλληλα υπόψη τις αντίστοιχες τιμές ανακλαστικότητας της εικόνας του Sentinel-2. Ως αποτέλεσμα του γεγονότος της χρήσης περιορισμένου τμήματος του φάσματος κατά τη διαδικασία της ταξινόμησης (0.439 – 0.908 μm), παρατηρήθηκε σημαντική αλληλοεπικάλυψη των φασματικών υπογραφών για ορισμένα υλικά (π.χ. μεταξύ των κατηγοριών «Γκρίζα δομικά υλικά» και «Βραχώδες έδαφος»). Για την αντιμετώπιση του παραπάνω προβλήματος και τη γενικότερη βελτιστοποίηση της παραγόμενης ταξινόμησης, επιβλήθηκαν συγκεκριμένοι περιορισμοί ως προς την τελική ταξινόμηση των υλικών με βάση συμπληρωματικά χαρακτηριστικά των υπό εξέταση εικονοστοιχείων. Συγκεκριμένα, οι κατηγορίες χρήσεων και κάλυψης γης του Urban Atlas (κατηγορίες land use / land cover, LULC) ανακατανεμήθηκαν αρχικά στην ευρύτερη ομαδοποίησή τους, όπως αυτή παρουσιάζεται στον οδηγό Urban Atlas Mapping (European Commission, 2012) (Πίνακας 4-7):

- Ομάδα 1 – Μικτές επιφάνειες: Περιλαμβάνει τους τύπους χρήσεων γης που σχετίζονται με τις ανθρώπινες δραστηριότητες (εξαιρουμένων των αγροτικών). Η συγκεκριμένη ομάδα LULC αντιστοιχεί σε περιοχές όπου τα ανθρωπογενή υλικά είναι αναμειγμένα σε μεγαλύτερο ή μικρότερο βαθμό με φυσικά στοιχεία του εδάφους (π.χ. περιοχές χρήσεων κατοικίας).
- Ομάδα 2 – Φυσικές επιφάνειες: Περιλαμβάνει αντίστοιχα τις κατηγορίες χρήσεων γης με μικρή ή καθόλου ανθρώπινη παρουσία, τις αγροτικές καλλιέργειες και τα δάση. Αντιστοιχεί σε περιοχές όπου κυριαρχούν τα φυσικά υλικά, με σχεδόν απόλυτη απουσία των ανθρωπογενών επιφανειών.
- Ομάδα 3 – Υδάτινες επιφάνειες.

Για τις ανάγκες της εργασίας, η κατηγορία LULC του Urban Atlas «Αστικό πράσινο» θεωρήθηκε ότι υπεισέρχεται στην Ομάδα 2. Παρ' όλα αυτά, τόσο για τη συγκεκριμένη κατηγορία LULC όσο και για τις υπόλοιπες της Ομάδας 2, συμπεριλαμβάνονται αρκετές περιοχές εντός του αστικού ιστού της Αθήνας όπου οι φυσικές επιφάνειες αναμειγνύονται με τα ανθρωπογενή υλικά σε μικρότερο ή μεγαλύτερο βαθμό. Η χρήση των χαρτογραφικών δεδομένων του OpenStreetMap επιτρέπει τον εντοπισμό και τη διαφορετική αντιμετώπιση των παραπάνω περιοχών. Ειδικότερα, για όσα εικονοστοιχεία της περιοχής μελέτης έχουν χαρτογραφηθεί μέσω του OpenStreetMap ως κτήρια, δρόμοι, πλατείες, πεζόδρομοι, πάρκινγκ, γήπεδα και εργοτάξια, μεταβλήθηκε ο κωδικός της ομάδας LULC από Ομάδα 2 σε Ομάδα 1. Έπειτα, θεωρήθηκε ότι εντός κάθε μίας από τις ομάδες LULC μπορούν να περιλαμβάνονται μόνο συγκεκριμένες τάξεις κάλυψης γης της ταξινόμησης.

Πίνακας 4-7 Οι κατηγορίες χρήσεων/κάλυψης γης (Land Use / Land Cover, LULC) των χαρτογραφικών δεδομένων του Urban Atlas.

Κατηγορία LULC	
Κωδικός	Περιγραφή
	11100 Συνεχής αστικός ιστός
	11210 Ασυνεχής πυκνός αστικός ιστός
	11220 Ασυνεχής, μέσης πυκνότητας, αστικός ιστός
	11230 Ασυνεχής, χαμηλής πυκνότητας, αστικός ιστός
	11240 Ασυνεχής, πολύ χαμηλής πυκνότητας, αστικός ιστός
	11300 Απομονωμένες κατασκευές
	14100 Αστικό πράσινο
	14200 Εγκαταστάσεις αθλητισμού και αναψυχής
Ομάδα 1	12100 Βιομηχανικές, Εμπορικές, Δημόσιες, Στρατιωτικές και Ιδιωτικές μονάδες
	12210 Δρόμοι ταχείας κυκλοφορίας και σχετικές εκτάσεις
	12220 Λοιποί δρόμοι και σχετικές εκτάσεις
	12230 Σιδηρόδρομοι και σχετικές εκτάσεις
	12400 Αεροδρόμια
	12300 Λιμάνια
	13100 Λατομία και χωματερές
	13300 Εργοτάξια
	21000 Καλλιεργήσιμη γη (ετήσιες καλλιέργειες)
	23000 Βοσκότοποι
Ομάδα 2	31000 Δάση
	32000 Συμπλέγματα ποώδους βλάστησης (φυσικά λιβάδια, χερσότοποι, ...)
	33000 Ανοιχτοί χώρου με λίγη ή καθόλου βλάστηση (ακτές, αμμουδιές, γυμνά βράχια, παγετώνες)
Ομάδα 3	40000 Υγρότοποι
	50000 Νερό

Το τελικό σύνολο των χρησιμοποιούμενων περιορισμών δίνεται στον Πίνακα 4-8. Για παράδειγμα, η τάξη «Θαμνώδες έδαφος» θεωρήθηκε ότι δεν μπορεί να αποδοθεί σε ένα εικονοστοιχείο το οποίο έχει επιπλέον προσδιοριστεί ως Ομάδα 1. Από την άλλη, εικονοστοιχεία βλάστησης μπορούν να βρεθούν τόσο εντός της Ομάδας 1 (π.χ. μεμονωμένα δέντρα εντός του αστικού ιστού) ή της Ομάδας 2 (π.χ. αστικά άλση). Αυτή η συσχέτιση μεταξύ των υλικών και των χρήσεων γης ενσωματώθηκε ως περιορισμός της τελικής επιλογής ταξινόμησης του αλγορίθμου ταξινόμησης. Η παραπάνω κατηγοριοποίηση με βάση της χρήσεις γης είναι σε ένα βαθμό σχεδιασμένη στα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της αστικής περιοχής των Αθηνών, παρ' όλα αυτά μπορεί εύκολα να προσαρμοστεί για την εφαρμογή της σε άλλες πόλεις.

Πίνακας 4-8 Σύνδεση μεταξύ των χρήσεων/κάλυψης γης (Land Use / Land Cover, LULC) και της δυνατότητας απόδοσης συγκεκριμένης τάξης κατά τη διαδικασία της φασματικής ταξινόμησης.

Ομάδες LULC	Τάξεις κάλυψης γης
Ομάδα 1	Σκουρόχρωμα δομικά υλικά
	Γκριζα δομικά υλικά
	Ανοιχτόχρωμα δομικά υλικά
	Κόκκινα δομικά υλικά
	Βλάστηση
Ομάδα 2	Χώμα
	Βλάστηση
	Χώμα
	Θαμνώδες έδαφος
	Βραχώδες έδαφος
Ομάδα 3	Υδάτινες επιφάνειες

Ακόμα, μέσω των υψομετρικών μοντέλων DEM-DSM υπολογίστηκε η μέση τιμή της (κανονικοποιημένης) ανύψωσης στη χωρική διακριτική ικανότητα του Sentinel-2 (10 m). Κατόπιν, προσδιορίστηκαν τα εικονοστοιχεία με ένα ελάχιστο ύψος 2 m για τα συγκεκριμένα σημεία, αποκλείστηκε η δυνατότητα απόδοσης της τάξης κάλυψης γης «Χώμα». Ως επακόλουθο, αποτράπηκε η λανθασμένη ταξινόμηση των κεραμικών στεγών ως χωμάτινη επιφάνεια, η οποία προκύπτει λόγω των παραπλήσιων φασματικών υπογραφών των δύο υλικών στο εξεταζόμενο κομμάτι του φάσματος. Τέλος, καθώς όπως αναφέρθηκε στην Ενότητα 4.3.1 η πλειονότητα των εικονοστοιχείων νερού έχουν ήδη αποκοπεί από τη δορυφορική εικόνα με βάση την ακτογραμμή της πόλης, τα εναπομείναντα εικονοστοιχεία νερού, στα όρια και το εσωτερικό του πολεοδομικού συγκροτήματος επιλέχθηκε να ταξινομηθούν αποκλειστικά μέσω των LULC κατηγοριών του Urban Atlas. Στην περίπτωση εφαρμογής της μεθοδολογίας για την περίπτωση μιας πόλης με εκτεταμένες και μεταβαλλόμενες υδάτινες επιφάνειες, ο αλγόριθμος υποκλιμάκωσης μπορεί άμεσα να τροποποιηθεί με την προσθήκη των αντίστοιχων εκπαιδευτικών δειγμάτων.

Τα φασματικά κανάλια 2–4 και 8 του Sentinel-2, οι κανονικοποιημένες διαφορές των καναλιών 2 και 4 και των καναλιών 3 και 4 και ο δείκτης βλάστησης NDVI—σε συνδυασμό με τους περιορισμούς χρήσεων γης που συζητήθηκαν προηγουμένως—αποτέλεσαν τα δεδομένα εισόδου στον ταξινομητή RF. Μετά την εφαρμογή του αλγορίθμου της ταξινόμησης όσα εικονοστοιχεία της τάξης «Γκριζα δομικά υλικά» συμπίπτουν με σημεία δρόμων (με βάση τα δεδομένα του Urban Atlas και του OpenStreetMap) διακρίθηκαν στη τάξη «Γκριζα δομικά υλικά - Δρόμοι»—με σκοπό τη διαφορετική αντιμετώπιση τους κατά τον υπολογισμό του συντελεστή εκπομπής—αυξάνοντας έτσι τον συνολικό αριθμό των εντοπιζόμενων τάξεων κάλυψης γης στις δέκα τάξεις.

4.3.2.2 Προσδιορισμός του συντελεστή εκπομπής

Αρκετές διαφορετικές προσεγγίσεις έχουν στο παρελθόν ακολουθηθεί για τον προσδιορισμό του επιφανειακού συντελεστή θερμικής εκπομπής μέσω τεχνικών δορυφορικής τηλεπισκόπησης (Li, Wu, et al., 2013) (βλ. Ενότητα 2.5). Μία ευρέως χρησιμοποιούμενη τεχνική αποτελεί η μέθοδος NDVI threshold, σύμφωνα με την οποία ο συντελεστής εκπομπής προσδιορίζεται με βάση την αρχική θεώρηση ότι τα εικονοστοιχεία αποτελούν μίξη χρώματος και βλάστησης και εφαρμόζοντας στη συνέχεια διαφορετικές εξισώσεις σε τρία εύρη τιμών του δείκτη βλάστησης NDVI (Sobrino et al., 2008). Η συγκεκριμένη μέθοδος, καθώς έχει αναπτυχθεί με στόχευση την εφαρμογή της σε περιοχές βλάστησης, έχει παρατηρηθεί να παρουσιάζει υψηλότερα σφάλματα κατά την εφαρμογή της σε αστικές περιοχές (Mitraka et al., 2012; Oltra-Carriό et al., 2012). Οι μέθοδοι υπολογισμού του συντελεστή εκπομπής με σημείο εκκίνησης τη φασματική ταξινόμηση δορυφορικών εικόνων (Snyder et al., 1998; Peres and DaCamara, 2005; Mitraka et al., 2012; Sobrino et al., 2012) απαιτούν ακριβή καταγραφή της κάλυψης γης, ομοιογένεια των εικονοστοιχείων και χρήση αντιπροσωπευτικών τιμών του συντελεστή από εξωγενείς πηγές (για παράδειγμα φασματικές βιβλιοθήκες). Μία εναλλακτική μέθοδος είναι η τεχνική Temperature Emissivity Separation (TES). Κατά τη μέθοδο TES το LST και ο συντελεστής θερμικής εκπομπής εξάγονται ταυτόχρονα μέσω μιας επαναληπτικής μεθόδου και της χρήσης μιας εμπειρικής σχέσης μεταξύ της ελάχιστης τιμής του συντελεστή και της φασματικής αντίθεσης της εικόνας (Gillespie et al., 1998).

Στην παρούσα εργασία η εικόνα ταξινόμησης της κάλυψης γης, η οποία παράγεται σύμφωνα με τη μεθοδολογία που περιγράφηκε στην Ενότητα 4.3.2.1, χρησιμοποιήθηκε επακόλουθα για τον προσδιορισμό του συντελεστή θερμικής εκπομπής για τα φασματικά κανάλια 31 (10.78–11.28 μm) και 32 (11.77–12.27 μm) του αισθητήρα MODIS. Για κάθε φασματικό κανάλι i ο συντελεστής εκπομπής ε_i υπολογίστηκε για το αντίστοιχο εύρος μηκών κύματος λ_1 to λ_2 σύμφωνα με την εξίσωση:

$$\varepsilon_i = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} f_i(\lambda) \varepsilon(\lambda) B_T(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} f_i(\lambda) B_T(\lambda) d\lambda} \quad (4.1)$$

όπου f_i είναι η συνάρτηση φασματικής απόκρισης του δέκτη για το κανάλι i , ε είναι ο φασματικός συντελεστής εκπομπής, ενώ το B_T αντιστοιχεί στην ακτινοβολία που εκπέμπεται από ένα μέλαν σώμα θερμοκρασίας T σύμφωνα με τον νόμο Planck.

Ο φασματικός συντελεστής ε για τις διαφορετικές τάξεις των υλικών της επιφάνειας καθορίστηκε από τις τιμές του συντελεστή για αντιπροσωπευτικά δείγματα προερχόμενα από τις φασματικές βιβλιοθήκες SLUM και ECOSTRESS. Χαμηλής ανακλαστικότητας δείγματα υλικών ασφάλτου-πίσσας επιλέχθηκαν για την τάξη «Σκουρόχρωμα δομικά υλικά», δείγματα μίγματος ασφάλτου με προσμίξεις (άσφαλτος και χαλίκι) για την τάξη «Γκρίζα δομικά υλικά – Δρόμοι» και η μέση τιμή των δειγμάτων για τσιμέντο και πλάκες οροφής, υψηλής ανακλαστικότητας τσιμέντο και λευκό επίχρισμα, και κεραμικά πλακάκια για τις κατηγορίες «Γκρίζα δομικά υλικά», «Ανοιχτόχρωμα

δομικά υλικά» και «Κόκκινα δομικά υλικά» αντίστοιχα. Τα ανθρωπογενή υλικά για τα εικονοστοιχεία που αντιστοιχούν στις βιομηχανικές ζώνες θεωρήθηκαν συνδυασμός τσιμέντου, σιδήρου και αλουμινίου, ενώ οι ανοιχτόχρωμες επιφάνειες εντός των αρχαιολογικών χώρων αντιστοιχήθηκαν σε επιφάνεια μάρμαρου (οι συγκεκριμένες χρήσεις γης εντοπίστηκαν μέσω του OpenStreetMap). Για την κατηγορία κάλυψης γης «Βραχώδες έδαφος» χρησιμοποιήθηκαν οι φασματικές υπογραφές δειγμάτων σχιστόλιθου και ασβεστόλιθου, καθώς αποτελούν τους βασικούς τύπους πετρωμάτων που συναντώνται στην ευρύτερη Αθήνα. Τα ακριβή δείγματα υλικών των δύο φασματικών βιβλιοθηκών, για τα οποία έγινε χρήση της φασματικής τους απόκρισης παρουσιάζονται στον Πίνακα 4-9. Για τις εναπομείνουσες τάξεις που αντιστοιχούν σε φυσικά στοιχεία της επιφάνειας, επιλέχθηκαν οι τυπικές τιμές του συντελεστή εκπομπής όπως δίνονται στο Wan (2008) (μικτά δάση, ανοικτές θαμνώδεις εκτάσεις και χόμα) προκειμένου να περιοριστεί η αβεβαιότητα από την επιλογή ενός μη αντιπροσωπευτικού δείγματος για την περιοχή μελέτης μέσω της φασματικής βιβλιοθήκης ECOSTRESS. Η αρχική εκτίμηση των τιμών του συντελεστή θερμικής εκπομπής πραγματοποιήθηκε στη χωρική διακριτική ικανότητα των 10×10 m² κατόπιν ακολουθήθηκε αναδειγματοληψία του στα εικονοστοιχεία χωρικής ανάλυσης 100×100 m και 1000×1000 m, προκειμένου να γίνει χρήση του στα επόμενα βήματα της μεθοδολογίας. Πρέπει να σημειωθεί ότι ο τρόπος υπολογισμού του συντελεστή εκπομπής στη μορφή που χρησιμοποιήθηκε δεν παρουσιάζει χρονική διαφοροποίηση, δηλ. δεν ενσωματώνει την εποχικότητα των διαφοροποιήσεων της κάλυψης γης. Αυτό κρίνεται ότι δεν επηρεάζει τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας, όπου πραγματοποιείται εστίαση της μελέτης στη θερινή περίοδο. Εναλλακτική προσέγγιση θα αποτελούσε η χρησιμοποίηση πολλαπλών εικόνων ταξινόμησης και ακολούθως η επανεκτίμηση του συντελεστή εκπομπής.

Πίνακας 4-9 Τα επιλεγόμενα δείγματα υλικών από τις χρησιμοποιούμενες φασματικές βιβλιοθήκες, κατά τον υπολογισμό του συντελεστή εκπομπής.

Υλικό	Δείγμα ¹
Άσφαλτος-Πίσσα	A008, A009, A010
Μίγμα ασφάλτου	A002, A003, A004, A005
Τσιμέντο	C001, C002, C003, C004, C005, C006, C008
Πλάκες οροφής	00490UUUASP, 5970UUUASP
Λευκή μπογιά	0795UUURBR
Κεραμικό πλακάκι	R001, R003, R004, R005, R008
Χάλυβας	0525UUUSTLA, 0526UUUSTLA
Αλουμίνιο	Z006
Μάρμαρο	0722UUUMBL

¹Τα δείγματα με κωδικούς τεσσάρων (4) χαρακτήρων προέρχονται από τη φασματική βιβλιοθήκη SLUM, ενώ τα υπόλοιπα δείγματα από τη φασματική βιβλιοθήκη ECOSTRESS.

4.3.2.3 Υποκλιμάκωση

Η μεθοδολογία της θερμικής ενίσχυσης που ακολουθήθηκε στην παρούσα εργασία στηρίζεται στις βασικές αρχές της στατιστικής υποκλιμάκωσης, όπως αυτή αναπτύχθηκε στο Kustas et al. (2003), η οποία στην αρχική της μορφή (DisTrad) αποτελείται από ένα μοντέλο απλής γραμμικής παλινδρόμησης με τη χρήση μίας παραμέτρου βλάστησης ως μεταβλητή πρόβλεψης. Εδώ, προτείνεται μια τροποποίηση της στατιστικής υποκλιμάκωσης για τη βελτιστοποίηση της εφαρμογής της σε θερμικά δεδομένα χαμηλής χωρικής ανάλυσης αστικών περιοχών, χρησιμοποιώντας υψηλής χωρικής διακριτικής ικανότητας τιμές του συντελεστή εκπομπής και έναν συνολικό αριθμό 16 μεταβλητών πρόβλεψης. Η συνολική διαδικασία αποτελείται από τα ακόλουθα βήματα:

Βήμα 1: Αρχικά, πραγματοποιείται η επιλογή και η προεπεξεργασία των μεταβλητών πρόβλεψης οι οποίες θα χρησιμοποιηθούν για την ανάπτυξη των παραμετρικών εξισώσεων παλινδρόμησης. Αυτές περιλαμβάνουν τιμές ανακλαστικότητας στο ορατό και εγγύς/μέσο υπέρυθρο, δείκτες δόμησης και βλάστησης, και τοπογραφικά δεδομένα. Η παράμετρος του LST εξαρτάται κατά κύριο λόγο από τις θερμικές ιδιότητες και τις ιδιότητες ακτινοβολίας των υλικών που απαρτίζουν την επιφάνεια. Με τη χρήση φασματικών δεικτών —οι οποίοι αναπτύσσονται μέσω του συνδυασμού των

τιμών διαφορετικών καναλιών ενός δορυφορικού δέκτη— μπορεί να επιτευχθεί σε σημαντικό βαθμό η περιγραφή των χαρακτηριστικών της επιφάνειας. Επιλέχθηκαν συγκεκριμένοι δείκτες, οι οποίοι αντιστοιχούν στα κύρια στοιχεία της αστικής επιφάνειας (υλικά δόμησης, βλάστηση και χώμα), έχουν εξεταστεί σε προηγούμενες μελέτες υποκλιμάκωσης —είτε μεμονωμένα (π.χ., Essa et al., 2012) είτε συνδυαστικά (π.χ., Keramitsoglou et al., 2013; Bonafoni, 2016)— και παρουσιάζουν συσχέτιση με τις τιμές του LST. Όπως διαπιστώθηκε κατά τη βιβλιογραφική επισκόπηση η επίδοση των επιμέρους δεικτών κατά την υποκλιμάκωση είναι συχνά εξαρτώμενη από τα ειδικά χαρακτηριστικά της περιοχής στην οποία γίνεται η εφαρμογή της. Εδώ, ο κύριος στόχος της μεθοδολογίας είναι η εξέταση της δυνατότητας ενσωμάτωσης στον αλγόριθμο υποκλιμάκωσης της μέγιστης δυνατής πληροφορίας, η οποία θα προέρχεται από τη ταυτόχρονη χρήση πολλαπλών μεταβλητών πρόβλεψης ενισχύοντας έτσι την αξιοπιστία και την ικανότητα γενίκευσης της μεθοδολογίας. Γενικότερα, κατά την ανάπτυξη μοντέλων παλινδρόμησης με χρήση μεγάλου αριθμού ανεξάρτητων μεταβλητών —οι οποίες εμφανίζουν επιπλέον συσχέτιση μεταξύ τους— εντοπίζεται το πρόβλημα της εμφάνισης «πολυσυγγραμμικότητας» (multicollinearity) στο μοντέλο (βλ. Ενότητα 4.2.3.4): όπως θα αναλυθεί παρακάτω, ο παραπάνω στατιστικός περιορισμός θα ληφθεί υπόψη κατά την ανάπτυξη και την τελική επιλογή των μοντέλων. Το σύνολο των 16 μεταβλητών πρόβλεψης που χρησιμοποιήθηκαν στην εργασία είναι οι εξής:

- Οι επιφανειακές ανακλαστικότητες των δορυφόρων Landsat 5 και Landsat 8 για τα φασματικά κανάλια του μπλε, του πράσινου, του κόκκινου, του εγγύς υπέρυθρου και των καναλιών του μέσου υπέρυθρου (δύο κανάλια, κανάλια 5 και 7, για τον Landsat 5 και τρία κανάλια, κανάλια 6, 7 και 9, για τον Landsat 8).
- Οι δείκτες βλάστησης: NDVI (Tucker, 1979), EVI (Liu and Huete, 1995) και Soil Adjusted Vegetation Index (SAVI) (Huete, 1988).
- Οι δείκτες δόμησης – γυμνού εδάφους: Normalized Difference Built-up Index (NDBI) (Zha et al., 2003), Enhanced Built-Up and Bareness Index (EBBI), (As-syakur et al., 2012), Bare Soil Index (BI) (Rikimaru, 1997) και Modified Normalized Difference Water Index, (MNDWI) (Xu, 2006).
- Τοπογραφικές μεταβλητές: το υψόμετρο (DEM) και η κλίση του εδάφους.
- Η προσπίπτουσα γωνία της ηλιακής ακτινοβολίας, υπολογιζόμενη μέσω του Allen et al. (2006) (έγινε χρήση της μόνο στις εικόνες με πρωινή ώρα λήψης).

Στον Πίνακα 4-10 δίνονται οι εξισώσεις για τον υπολογισμό των φασματικών δεικτών που περιλαμβάνονται στις παραπάνω μεταβλητές πρόβλεψης. Ο προσδιορισμός των μεταβλητών γίνεται αρχικά στην υψηλή χωρική ανάλυση των 100×100 m μέσω των δορυφορικών εικόνων του Landsat και στη συνέχεια πραγματοποιείται αναδειγματοληψία των εικόνων σε χαμηλή χωρική διακριτική ικανότητα (1000 m).

Πίνακας 4-10 Εξισώσεις υπολογισμού των φασματικών δεικτών των οποίων έγινε χρήση κατά τη διαδικασία της υποκλιμάκωσης.

Δείκτης	Εξίσωση ¹
NDVI	$\frac{CH4 - CH3}{CH4 + CH3}$
EVI	$2.5 \times \left(\frac{CH4 - CH3}{CH4 + 6 \times CH3 - 7.5 \times CH1 + 1} \right)$
SAVI	$\frac{CH4 - CH3}{CH4 + CH3 + 0.5}$
NDBI	$\frac{CH5 - CH4}{CH5 + CH4}$
EBBI	$\frac{CH5 - CH4}{10 \times \sqrt{CH5 + CH6}}$
BI	$\frac{(CH5 + CH3) - (CH4 - CH1)}{(CH5 + CH3) + (CH4 - CH1)}$
MNDWI	$\frac{CH2 - CH5}{CH2 + CH5}$

¹Τα φασματικά κανάλια στις εξισώσεις του πίνακα ακολουθούν την αρίθμηση των καναλιών του Landsat 5 (CH1 – CH7). Για την αντιστοίχιση με τον Landsat 8 ο αναγνώστης παραπέμπεται στους Πίνακες 4-3 και 4-4.

Βήμα 2: Πραγματοποιείται η ανάπτυξη των μοντέλων παλινδρόμησης μεταξύ των μεταβλητών πρόβλεψης και των καναλιών θερμικού υπέρυθρου του MODIS (Κανάλια 31 και 32) (ή του LST για την περίπτωση της μεθόδου αναφοράς DisTrad) σε χωρική ανάλυση 1000 m:

$$\hat{y}_{1000} = f_{1000}(x_{1000}) \quad (4.2)$$

όπου τα y και x συμβολίζουν την εξαρτημένη και τις ανεξάρτητες μεταβλητές αντίστοιχα, το f αντιστοιχεί στη συνάρτηση παλινδρόμησης, ο δείκτης « 1000 » αντιστοιχεί στη χωρική κλίμακα, ενώ ο τελεστής « ^ » υποδηλώνει ότι η μεταβλητή αντιστοιχεί σε εκτιμώμενη τιμή. Για τις παραμετρικές εξισώσεις εξετάστηκε η χρησιμοποίηση διαφόρων τεχνικών παλινδρόμησης: α) OLS, β) RR, γ) ANN και δ) RF. Μία σύντομη περιγραφή των παραπάνω στατιστικών αλγορίθμων θα δοθεί παρακάτω στην Ενότητα 4.3.2.4. Η εξίσωση παλινδρόμησης που προσδιορίστηκε στη χαμηλή ανάλυση εφαρμόζεται εκ νέου σε αυτή, με σκοπό τώρα τον υπολογισμό των υπολοίπων/σφαλμάτων (residuals) του μοντέλου μεταξύ της αρχικής εικόνας MODIS (για κάθε θερμικό κανάλι) και της εκτιμώμενης εικόνας στα 1000 × 1000 m:

$$\Delta\hat{y}_{1000} = y_{1000} - \hat{y}_{1000} \quad (4.3)$$

Ακόλουθα, η παραμετρική εξίσωση χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με τις μεταβλητές πρόβλεψης υψηλής χωρικής ανάλυσης στα 100 m, έτσι ώστε να προκύψουν τιμές ακτινοβολίας θερμικού υπέρυθρου σε υψηλή ευκρίνεια. Σε αυτό το σημείο, οι παραπάνω τιμές διορθώνονται με βάση τα

υπόλοιπα του μοντέλου που υπολογίστηκαν προηγουμένως. Χρησιμοποιείται μία κοινή τιμή διόρθωσης για όλα τα υψηλής ανάλυσης εικονοστοιχεία που εμπεριέχονται εντός κάθε ενός $1000 \text{ m} \times 1000 \text{ m}$ εικονοστοιχείου:

$$\hat{Y}_{100} = f_{1000}(x_{100}) + \Delta\hat{Y}_{1000} \quad (4.4)$$

Εφαρμόζοντας τη συγκεκριμένη «διόρθωση των υπολοίπων» (residual correction) εξασφαλίζεται η ραδιομετρική συνέχεια μεταξύ της αρχικής και της εκτιμώμενης θερμικής εικόνας, ενώ παράλληλα πραγματοποιείται τοπική διόρθωση των τιμών του μοντέλου. Παρ' όλα αυτά η χρησιμοποίηση μίας κοινής διόρθωσης σε ανάλυση 1000 m εισάγει έντονη ασυνέχεια μεταξύ γειτονικών περιοχών στην τελική εικόνα. Για τον περιορισμό του παραπάνω προβλήματος, οι υπολειπόμενοι όροι ομαλοποιούνται μέσω ενός φίλτρου Gauss (Anderson et al., 2004; Bisquert et al., 2016). Επιπρόσθετα, για τις πρωινές εικόνες η διόρθωση υπολοίπων δεν εφαρμόστηκε στα εικονοστοιχεία επί της ακτογραμμής, διότι για τα παραπάνω, η, έστω και μικρή, ποσοστιαία παρουσία υδάτινου στοιχείου στα εικονοστοιχεία του MODIS οδηγούσε σε χειρότερες εκτιμήσεις του LST.

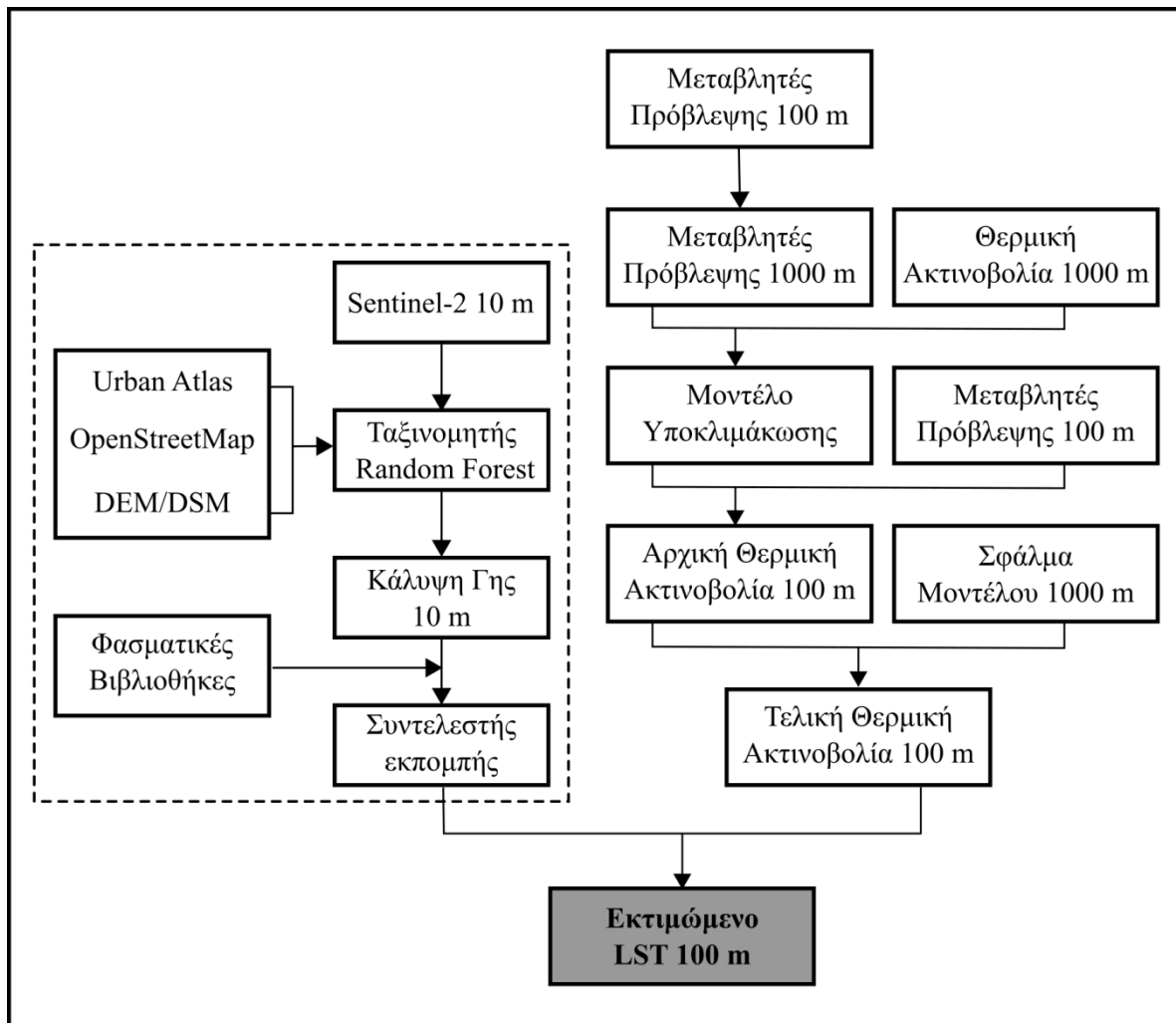
Βήμα 3: Για τον υπολογισμό του LST από τις προκύπτουσες τιμές έντασης ακτινοβολίας της υποκλιμάκωσης, οι τελευταίες αρχικά μετασχηματίζονται σε θερμοκρασίες λαμπρότητας μέσω της αντιστροφής της συνάρτησης Planck και στη συνέχεια το LST εξάγεται με την εφαρμογή του αλγορίθμου «διαχωρισμού των παραθύρων» (Split Window, SW) προσαρμοσμένου στα θερμικά κανάλια του MODIS (Jiménez-Muñoz and Sobrino, 2008). Στον αλγόριθμο SW γίνεται χρήση των τιμών του συντελεστή εκπομπής, όπως προσδιορίστηκε στην Ενότητα 4.3.2.2 και της περιεκτικότητας της ατμόσφαιρας σε υδρατμούς (W) η οποία προέρχεται από το προϊόν υετίσιμου νερού του MODIS (MOD/MYD05-L2):

$$\text{LST} = B_{T_{31}} + c_0 + c_1(B_{T_{31}} - B_{T_{32}}) + c_2(B_{T_{31}} - B_{T_{32}})^2 + (c_3 + c_4W)(1 - \varepsilon_m) + (c_5 + c_6W)\varepsilon_\Delta \quad (4.5)$$

με ε_m τον μέσο συντελεστή εκπομπής των καναλιών 31 και 32, ε_Δ τη διαφορά του συντελεστή εκπομπής του καναλιού 32 από το κανάλι 31 και c_0 έως c_6 σταθερές (Jiménez-Muñoz and Sobrino, 2008). Η βαθμονόμηση των παραπάνω σταθερών έχει πραγματοποιηθεί σε αρχική χωρική ανάλυση 1000 m . Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν εν τούτοις για τα 100 m , λόγω μη διαθέσιμων άλλων τιμών και εκτιμώντας ότι η προκύπτουσα αβεβαιότητα ενσωματώνεται στο συνολικό σφάλμα της χωρικής ενίσχυσης. Επίσης, διατηρήθηκε η χρήση δύο καναλιών και ο αλγόριθμος διαχωρισμού των παραθύρων, λόγω της καλύτερη ενσωμάτωσης της ατμοσφαιρικής επίδρασης καθ' αυτόν τον τρόπο συγκριτικά με αλγόριθμο ενός καναλιού.

Το σύνολο των βημάτων που ακολουθήθηκαν κατά την προτεινομένη μεθοδολογία υποκλιμάκωσης παρουσιάζονται στο διάγραμμα ροής του Σχήματος 4-4. Η ακρίβεια του εκτιμώμενου LST όπως προκύπτει από την υποκλιμάκωση, αξιολογείται μέσω ποσοτικών και ποιοτικών συγκρίσεων με τις εικόνες αναφοράς ASTER-LST και με επιτόπιες μετρήσεις της επιφανειακής θερμοκρασίας. Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκαν τα ακόλουθα στατιστικά μέτρα: η ρίζα του

μέσου τετραγωνικού σφάλματος (Root mean Square Error, RMSE), το μέσο απόλυτο σφάλμα (Mean Absolute Error, MAE) και το μέσο σφάλμα (Mean Error, ME).



Σχήμα 4-4 Διάγραμμα ροής για το σύνολο της μεθοδολογίας υποκλιμάκωσης του LST.

4.3.2.4 Περιγραφή μοντέλων παλινδρόμησης

α) Γραμμική παλινδρόμηση ελαχίστων τετραγώνων

Ένα μοντέλο γραμμικής παλινδρόμησης n παρατηρήσεων και k ανεξάρτητων μεταβλητών μπορεί να γραφτεί υπό τη μορφή πινάκων ως εξής:

$$Y = X\beta + e \quad (4.6)$$

όπου Y το $n \times 1$ διάνυσμα της εξαρτημένης μεταβλητής, X ο $n \times (k + 1)$ πίνακας των ανεξάρτητων μεταβλητών, β το $(k + 1) \times 1$ διάνυσμα των συντελεστών της παλινδρόμησης και e το $n \times 1$ διάνυσμα των υπολοίπων (residuals) του μοντέλου. Ο εκτιμητής των συντελεστών $\hat{\beta}$ υπολογίζεται με την προσαρμογή της βέλτιστης εξίσωσης παλινδρόμησης στα δεδομένα. Η μέθοδος των ελαχίστων τετραγώνων (OLS) αποτελεί την πιο ευρέως διαδεδομένη τεχνική για τον προσδιορισμό του εκτιμητή

$\hat{\beta}$, κατά την οποία αναζητείται η εξίσωση παλινδρόμησης για την οποία το άθροισμα των τετραγώνων των υπολοίπων (sum of squared residuals, SSR) λαμβάνει την ελάχιστη τιμή. Με βάση το παραπάνω πρόβλημα ελαχιστοποίησης ο προσδιορισμός του εκτιμητή $\hat{\beta}$ πραγματοποιείται τελικώς από την ακόλουθη εξίσωση:

$$\hat{\beta} = (X^T X)^{-1} X^T Y \quad (4.7)$$

όπου οι εκθέτες «^T» και «⁻¹» υποδηλώνουν τον ανάστροφο (transpose) και τον αντίστροφο (invert) πίνακα αντίστοιχα.

Οι λύσεις που προκύπτουν από τη μέθοδο OLS αποτελούν τις αμερόληπτες (unbiased) εκτιμήσεις των συντελεστών παλινδρόμησης με ταυτόχρονα τη μικρότερη διακύμανση των τιμών. Παρ' όλα αυτά η αξιοπιστία της εφαρμογής της παλινδρόμησης OLS είναι συναρτάται με την ικανοποίηση μία σειράς στατιστικών παραδοχών. Συγκεκριμένα θα πρέπει: α) οι παρατηρήσεις να είναι ανεξάρτητες μεταξύ τους και ομοιογενώς κατανομημένες, β) η αναμενόμενη (expected) τιμή των υπολοίπων όρων να ισούται με το μηδέν για το σύνολο των παρατηρήσεων, γ) οι ανεξάρτητες μεταβλητές θα πρέπει να είναι γραμμικά ανεξάρτητες, δ) η διακύμανση των σφαλμάτων (υπολοίπων) να είναι σταθερή και ε) τα σφάλματα να μην εμφανίζουν μεταξύ τους συσχέτιση και να ακολουθούν την κανονική κατανομή. Στην περίπτωση ισχυρής συσχέτισης μεταξύ ορισμένων από τις μεταβλητές πρόβλεψης (δηλ. τις ανεξάρτητες μεταβλητές), η παλινδρόμηση OLS είναι ασταθής (ill-conditioned) εξαιτίας του φαινομένου της πολυσυγγραμμικότητας (multicollinearity). Σε αυτήν την περίπτωση παρουσιάζεται μεγάλη αβεβαιότητα κατά την αντιστροφή του πίνακα $X^T X$ της Εξίσωσης 4.7, καθώς αυτός γίνεται προσεγγιστικά ιδιάζων (singular), δηλαδή η ορίζουσά του τείνει στο μηδέν. Ως αποτέλεσμα, οι συντελεστές παλινδρόμησης παρουσιάζουν μεγάλη διακύμανση, κάτι που περιορίζει την ικανότητα για την απόδοση φυσικής σημασίας στους συντελεστές του μοντέλου, ελαττώνει την ευστάθειά του —μικρή αλλαγή των ανεξαρτήτων μεταβλητών ή του δείγματος μπορεί να οδηγήσει σε μεγάλη διαφοροποίηση των συντελεστών ή/και του αποτελέσματος— και οδηγεί σε χειρότερη προγνωστική ικανότητα της παλινδρόμησης.

β) Γραμμική παλινδρόμηση τύπου ridge

Η παλινδρόμηση τύπου ridge (ridge regression, RR) (Hoerl and Kennard, 1970) (ή όπως επίσης αναφέρεται «κανονικοποίηση Tikhonov») στοχεύει να εξαλείψει τις επιπτώσεις της πολυσυγγραμμικότητας για τα μοντέλα γραμμικής παλινδρόμησης. Η RR χρησιμοποιεί έναν μεροληπτικό (biased) εκτιμητή $\hat{\beta}$, ο οποίος όμως καταλήγει σε μικρότερη διακύμανση συγκριτικά με τη μεθοδολογία των ελαχίστων τετραγώνων. Συγκεκριμένα, εισάγεται ένα ποσό μεροληψίας στο μοντέλο με την απαίτηση να ικανοποιείται η ελαχιστοποίηση του αθροίσματος των SSR με έναν επιπλέον όρο. Με αυτόν τον τρόπο ορίζεται μία ποινή (penalty) στις μεγάλες τιμές των συντελεστών της παλινδρόμησης οι οποίες σχετίζονται με υψηλή διακύμανση και σφάλμα. Η πολυπλοκότητα του

αναπτυσσόμενου μοντέλου μειώνεται, αυξάνοντας επακόλουθα την ευστάθειά του και την ικανότητά του για γενίκευση. Ο εκτιμητής των συντελεστών δίνεται πλέον από την εξίσωση:

$$\hat{\beta}_R = (X^T X + \lambda_R I)^{-1} X^T Y \quad (4.8)$$

όπου I είναι ο ταυτοτικός (identity) πίνακας και λ_R η ρυθμιστική παράμετρος ridge. Ο πίνακας του οποίου απαιτείται η αντιστροφή στην παραπάνω εξίσωση δεν είναι πλέον ιδιάζων, επομένως τα αποτελέσματα του μοντέλου καταλήγουν σε μικρότερη διακύμανση των συντελεστών, έχοντας απαλείψει το φαινόμενο της πολυσυγγραμμικότητας.

γ) Μη γραμμικά μοντέλα παλινδρόμησης νευρωνικών δικτύων και random forest

Το βασικό πλεονέκτημα της χρησιμοποίησης αλγορίθμων μηχανικής μάθησης σε εφαρμογές παλινδρόμησης είναι η ικανότητά τους να προσομοιώνουν πιθανές μη γραμμικές συσχετίσεις μεταξύ των μεταβλητών πρόβλεψης (ανεξάρτητων μεταβλητών) και της μεταβλητής στόχου (εξαρτημένης μεταβλητής). Η θεωρία των τεχνητών νευρωνικών δικτύων (ANN) αναπτύχθηκε ως το υπολογιστικό ανάλογο των βιολογικών νευρώνων και βρίσκει εφαρμογή σε ένα ευρύ φάσμα πεδίων (Prieto et al., 2016). Μία συνήθης δομή των ANN είναι ένα νευρωνικό δίκτυο πολλών στρωμάτων (Multilayer Perceptron, MLP) (Minsky and Papert, 2017): το συγκεκριμένο δίκτυο αποτελείται από ένα στρώμα εισόδου, ένα στρώμα εξόδου και ένα ή περισσότερα κρυφά στρώματα, τα οποία κατευθύνουν την πληροφορία από τους νευρώνες εισόδου σε αυτούς της εξόδου. Η μεταβλητή εξόδου y_j ενός τεχνητού νευρώνα j προκύπτει από τον μετασχηματισμό του γραμμικά σταθμισμένου αθροίσματος του διανύσματος εισόδου x_k των n νευρώνων του προηγούμενου στρώματος μέσω μίας συνάρτησης ενεργοποίησης g :

$$y_j = g \left(b_j + \sum_{k=1}^n w_{k,j} x_k \right) \quad (4.9)$$

με $w_{k,j}$ τα συναπτικά βάρη των νευρώνων μεταξύ των δύο στρωμάτων και b_j τη σταθερά πόλωσης. Οι συναρτήσεις ενεργοποίησης δύναται να είναι μη γραμμικές ή γραμμικές ανάλογα την εφαρμογή. Στην παρούσα μελέτη εξετάστηκαν οι κυριότεροι τύποι συναρτήσεων: βηματική, κατωφλίου, σιγμοειδής και υπερβολικής εφαπτομένης. Στις εφαρμογές παλινδρόμησης, με βάση τα δεδομένα εισόδου του δικτύου, αυτό εκπαιδεύεται στο να προβλέπει το επιθυμητό αποτέλεσμα της εξόδου με μία διαδικασία επιβλεπόμενης μάθησης. Εδώ επιλέχθηκε η μάθηση να προσαρμόζει τις τιμές των συναπτικών βαρών μεταξύ των νευρώνων χρησιμοποιώντας έναν αλγόριθμο ανάστροφης διάδοσης (backward propagation) (Hecht-Nielsen, 1992), ενώ η βελτιστοποίηση (optimization) του μοντέλου πραγματοποιήθηκε χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο Limited-memory BFGS (Nocedal, 1980). Αυτή η μέθοδος χαρακτηρίζεται από γρήγορη σύγκλιση, κάνοντας χρήση quasi-newton μεθόδων, προσδιορίζοντας τον ανάστροφο Εσσιανό πίνακα με σκοπό την ελαχιστοποίηση του σφάλματος.

Η επιλογή των υπερπαραμέτρων (hyperparameter tuning) του ANN μοντέλου (π.χ., πλήθος κρυφών στρωμάτων, μέγιστος αριθμός των επαναλήψεων κατά τη μάθηση, παράμετρος ποινής του

μοντέλου) ορίστηκε να είναι σταθερή για όλες τις δορυφορικές εικόνες που εξετάστηκαν, έτσι ώστε να εξασφαλιστεί καλύτερη γενίκευση της παλινδρόμησης και να αποφευχθεί η υπερ-προσαρμογή του (overfitting). Αξίζει να σημειωθεί ότι καθώς η αρχικοποίηση του μοντέλου πραγματοποιείται από μία γεννήτρια τυχαίων αριθμών τα αποτελέσματα είναι ελαφρώς διαφορετικά κάθε φορά που επαναλαμβάνεται η εκτέλεσή του. Με σκοπό την ελαχιστοποίηση της επίδρασης της παραπάνω τυχαίας διαδικασίας στην εκτίμηση των αποτελεσμάτων της υποκλιμάκωσης, υπολογίστηκε κάθε φορά η μέση τιμή δέκα διαδοχικών επαναλήψεων του μοντέλου.

Για την περίπτωση της παλινδρόμησης random forest (RF), ο αλγόριθμος που χρησιμοποιείται ακολουθεί την ίδια θεωρητική βάση με αυτή του ταξινομητή RF (βλ. Ενότητα 4.3.2.1), προσαρμοσμένος για την περίπτωση μεταβλητών συνεχών τιμών. Ανάλογη προσέγγιση με αυτή του μοντέλου των ANN, ακολουθήθηκε και για τη μέθοδο RF, σε ότι αφορά την επιλογή των υπερπαραμέτρων και τη χρησιμοποίηση πολλαπλών επαναλήψεων της διαδικασίας. Το σύνολο των στατιστικών μοντέλων που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία αναπτύχθηκαν κάνοντας χρήση της βιβλιοθήκης αλγορίθμων μηχανικής μάθησης Scikit-learn, σε γλώσσα προγραμματισμού Python (Pedregosa et al., 2011).

4.4 Αποτελέσματα

4.4.1 Κάλυψη γης – Συντελεστής θερμική εκπομπής

Οι δορυφορικές παρατηρήσεις του Sentinel-2, σε συνδυασμό με τα δεδομένα των Urban Atlas και OpenStreetMap χρησιμοποιήθηκαν με σκοπό τη χαρτογράφηση της κάλυψης γης σε υψηλή χωρική διακριτική ικανότητα (10 m) για την περιοχή της Αθήνας. Όσον αφορά την επιλογή των παραμέτρων του ταξινομητή μηχανικής μάθησης RF, ένας αριθμός 500 «εκτιμητών» (δηλ. μεμονωμένων δέντρων απόφασης) (βλ. Ενότητα 4.3.2.1) βρέθηκε να δίνει τα βέλτιστα παραγόμενα αποτελέσματα. Επιπλέον, διατηρήθηκε η συνήθης επιλογή σε μία ταξινόμηση RF, ότι δηλαδή η δημιουργία των κόμβων στα δέντρα απόφασης πραγματοποιείται με την εξέταση αριθμού μεταβλητών εισόδου, ίσο με την τετραγωνική ρίζα του συνολικού τους πλήθους. Κάθε δέντρο απόφασης αναπτύχθηκε έως ότου υπερβεί μία στατιστική τιμή κατωφλίου με βάση το τεστ ετερογένειας Gini ή έως ότου έχει απομείνει με λιγότερα από συνολικά πέντε δείγματα. Η αξιολόγηση της προκύπτουσας εικόνας ταξινόμησης πραγματοποιήθηκε με τη δημιουργία για κάθε εξεταζόμενη τάξη κάλυψης γης 50 τυχαίων εικονοστοιχείων αναφοράς, και με επακόλουθη σύγκριση τους με αεροφωτογραφίες υψηλής χωρικής ανάλυσης (προερχόμενες από τις υπηρεσίες θέασης αεροφωτογραφιών της εφαρμογής του Ελληνικού Κτηματολογίου και του Google Earth).

Το ποσοστό των εικονοστοιχείων τα οποία ταξινομήθηκαν ορθά για κάθε τάξη, παρουσιάζεται στον συγκεντρωτικό πίνακα ακρίβειας της ταξινόμησης (Πίνακας 4-11). Όπως παρατηρείται, επιτεύχθηκε ένα υψηλό επίπεδο συμφωνίας μεταξύ της παραγόμενης εικόνας και των

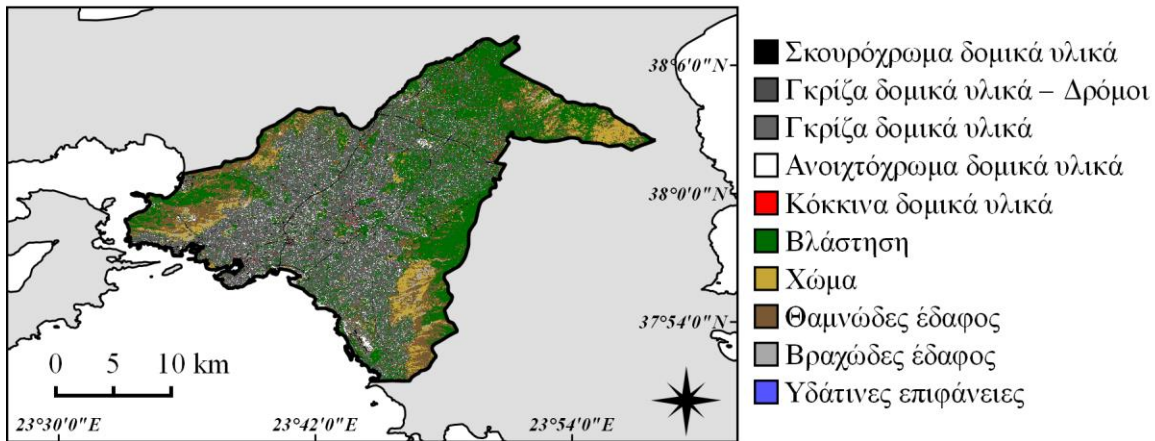
εικόνων αναφοράς, με μέση «ακρίβεια χρήστη» της τάξης του 90.1% και με «ακρίβεια παραγωγού» 92.1% (ολική ακρίβεια ταξινόμησης 90.7%). Όσον αφορά το στατιστικό μέτρο του συντελεστή ταξινόμησης k —το οποίο αντιπροσωπεύει τη διαφορά μεταξύ επιτυχίας του ταξινομητή και τυχαίας ορθής ταξινόμησης, λαμβάνοντας τιμές από -1 έως 1— βρέθηκε ότι είναι ίσο με 0.89, κάτι που υποδεικνύει την καλή απόδοση της ταξινόμησης. Η τάξη της κάλυψης γης που αντιστοιχεί στις υδάτινες επιφάνειες δεν συμπεριλήφθη στα αποτελέσματα της ταξινόμησης, καθώς προσδιορίστηκε εξ' ολοκλήρου μέσω των δεδομένων του Urban Atlas, χωρίς να υπεισέρχεται στον ταξινομητή RF.

Πίνακας 4-11 Πίνακας ακρίβειας της ταξινομημένης εικόνας κάλυψης γης, χωρικής διακριτικής ικανότητας 10 m.

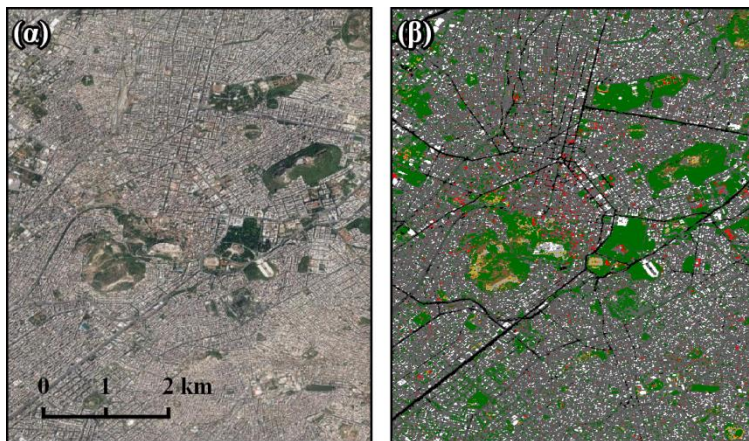
Τάξεις ¹	Εικονοστοιχεία αναφοράς								Ακρίβεια χρήστη (%)	
	1	2	3	4	5	6	7	8		
Ταξινομημένα εικονοστοιχεία	1	46	3	0	0	1	0	0	0	92
	2	0	47	0	0	1	2	0	0	94
	3	0	3	47	0	0	0	0	0	94
	4	0	1	0	44	2	3	0	0	88
	5	0	4	0	0	45	0	1	0	90
	6	0	2	0	2	0	46	0	0	92
	7	0	1	0	0	2	2	45	0	90
	8	0	5	0	0	0	2	0	43	86
Ακρίβεια παραγωγού (%)	100	71.2	100	95.6	88.2	83.6	97.8	100		

¹ (1) Σκουρόχρωμα δομικά υλικά, (2) Γκρίζα δομικά υλικά, (3) Ανοιχτόχρωμα δομικά υλικά, (4) Κόκκινα δομικά υλικά, (5) Βλάστηση, (6) Χώμα, (7) Θαμνώδες έδαφος, (8) Βραχώδες έδαφος.

Η τελική εικόνα της ταξινόμησης παρουσιάζεται στον χάρτη κάλυψης γης του Σχήματος 4-5 (συμπεριλαμβανομένης της τάξης «Γκρίζα δομικά υλικά – Δρόμοι» η οποία καθορίζεται μετά την ταξινόμηση). Επιπρόσθετα, μία υπο-ενότητα της ταξινομημένης εικόνας δίνεται στο Σχήμα 4-6 για την περιοχή του κέντρου της Αθήνας. Όπως προκύπτει από την ποιοτική αξιολόγηση των παραπάνω εικόνων η ταξινόμηση αποδεικνύεται ότι δίνει αρκετά ικανοποιητικά αποτελέσματα, αποτυπώνοντας τα χωρικά μοτίβα των κύριων ανθρωπογενών και φυσικών στοιχείων του αστικού περιβάλλοντος της Αθήνας (τσιμέντο, άσφαλτος και βλάστηση). Όπως παρατηρείται, η τάξη κάλυψης γης «Γκρίζα δομικά υλικά» αποτελεί τον επικρατέστερο τύπο εδαφικής επιφάνειας (καλύπτοντας ~35% του συνόλου της περιοχής μελέτης), ενώ αντίθετα το αστικό πράσινο είναι λιγιστό με εξαίρεση τα βορειοδυτικά και τα νοτιοανατολικά προάστια. Οι επιφάνειες επί των ορεινών όγκων που περιβάλλουν το αστικό συγκρότημα καλύπτονται από χώμα / θαμνώδη βλάστηση και δασικές εκτάσεις.



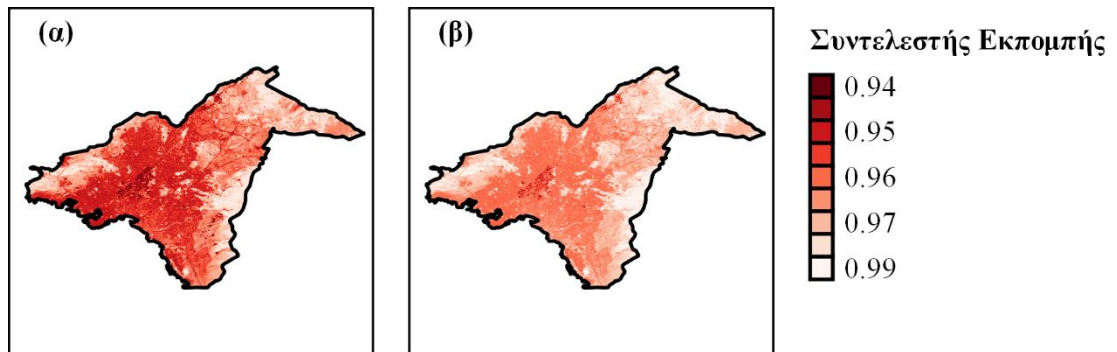
Σχήμα 4-5 Εικόνα ταξινόμησης των χρήσεων γης για την Αθήνα σε χωρική διακριτική ικανότητα 10 m.



Σχήμα 4-6 Όμοια με το Σχήμα 4-5, για την περιοχή του κέντρου της πόλης της Αθήνας. Αριστερό πάνελ: ©2019 Google.

Κάνοντας χρήση της παραπάνω εικόνας κάλυψης γης και ακολουθώντας τα βήματα της μεθοδολογίας όπως περιγράφηκε στην Ενότητα 4.3.2.2, υπολογίστηκε ο συντελεστής εκπομπής για τα θερμικά κανάλια 31 (10.78–11.28 μm) και 32 (11.77–12.27 μm) του αισθητήρα MODIS. Όπως διαπιστώνουμε από το Σχήμα 4-7α (κανάλι 31), οι τιμές του συντελεστή εκπομπής κυμαίνονται από περίπου 0.94 έως 0.985. Οι χαμηλότερες τιμές του συντελεστή παρατηρούνται στις βιομηχανικές περιοχές του Ελαιώνα και τμήματος των βορειοδυτικών προαστίων της πόλης (δηλ. για χρήσεις γης βιοτεχνικών και βιομηχανικών εγκαταστάσεων). Τα εικονοστοιχεία που αντιστοιχούν στους μεγάλους αυτοκινητόδρομους μπορούν επίσης εύκολα να διακριθούν, έχοντας τιμές του συντελεστή εκπομπής κοντά στο 0.95 για το κανάλι 31. Όπως αναμένεται οι περιοχές με μεγάλη κάλυψη βλάστησης αντιστοιχούν στις υψηλότερες τιμές του συντελεστή. Οι τιμές του συντελεστή εκπομπής για το κανάλι 32 (Σχήμα 4-7β) εμφανίζουν παρόμοια χωρική μεταβλητότητα, με ελαφρώς υψηλότερες τιμές για την πλειοψηφία των τάξεων κάλυψης γης. Η μεθοδολογία προσδιορισμού του συντελεστή εκπομπής αξιολογήθηκε επιπρόσθετα με το προϊόν αναφοράς συντελεστή εκπομπής ASTER GED (Global Emissivity Database) (Hulley et al., 2015). Το παραπάνω προϊόν προέρχεται από καταγραφές

του αισθητήρα ASTER την περίοδο 2000–2008. Βρέθηκε ότι η εκτίμηση του συντελεστή εκπομπής της παρούσας εργασίας παρουσιάζει σφάλματα $RMSE = 0.0085$, $MAE = 0.006$ και $ME = -0.004$, κατά τη σύγκριση του με το ASTER GED, για τα μήκη κύματος 10.95–11.65 μm (δηλ. για το κανάλι 14 του ASTER, το οποίο συμπίπτει με τμήμα του εύρους τιμών του καναλιού 31 του MODIS).



Σχήμα 4-7 Χωρική αποτύπωση του συντελεστή εκπομπής μέσω της χαρτογράφησης της κάλυψης γης για (α) το κανάλι 31 (10.780 – 11.280 μm) και (β) το κανάλι 32 (11.770 – 12.270 μm) του αισθητήρα MODIS.

4.4.2 Στατιστική υποκλιμάκωση

4.4.2.1 Διαφοροποίηση του LST στη χαμηλή χωρική κλίμακα

Η τελική ακρίβεια της διαδικασίας της υποκλιμάκωσης εξαρτάται όχι μόνο από τους στατιστικούς αλγορίθμους και τις μεταβλητές πρόβλεψης που χρησιμοποιούνται σε αυτήν, αλλά σε σημαντικό βαθμό και από την αρχική εικόνα χαμηλής χωρικής ανάλυσης. Το παραπάνω προκύπτει από το γεγονός ότι η αρχική εικόνα χρησιμοποιείται τόσο κατά την ανάπτυξη των παραμετρικών σχέσεων μεταξύ του LST και των μεταβλητών πρόβλεψης, όσο και στο βήμα της διόρθωσης των υπολοίπων (residuals) κατά τη στατιστική υποκλιμάκωση. Συνεπώς, πριν την εφαρμογή των μοντέλων υποκλιμάκωσης πραγματοποιήθηκε διερεύνηση ως προς τις διαφοροποιήσεις που σημειώνονται ανάμεσα στους δορυφορικούς αισθητήρες MODIS και ASTER σε χαμηλή χωρική ανάλυση και ως προς την επίδραση των διαφορετικών αλγορίθμων SW κατά τον υπολογισμό του LST. Για τον σκοπό αυτό, υπολογίστηκαν οι κατανομές των τιμών στη χωρική διακριτική ικανότητα των 1000 m, για τις ακόλουθες περιπτώσεις LST:

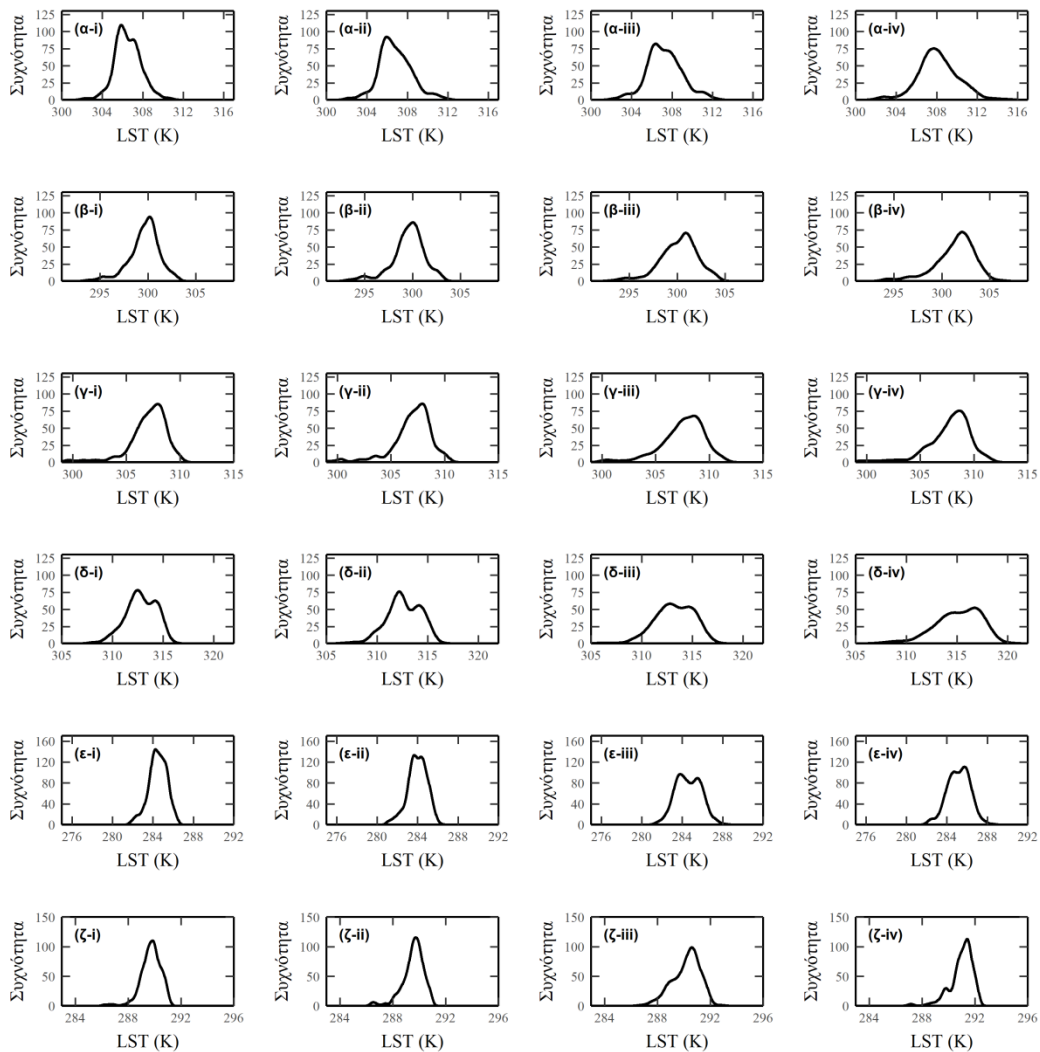
- το επίσημο προϊόν MODIS–LST (MOD11A1) (Wan, 2014) (στο εξής «MODIS_{1000-A}»).
- το LST όπως υπολογίζεται από τις εικόνες θερμικής ακτινοβολίας MODIS, τη χρήση του αλγορίθμου SW των Jiménez-Muñoz and Sobrino (2008) και το αρχικό προϊόν του συντελεστή εκπομπής MODIS (στο εξής «MODIS_{1000-B}»).
- το LST το οποίο υπολογίζεται ομοίως με το MODIS_{1000-B}, με την εξαίρεση ότι γίνεται χρήση του συντελεστή εκπομπής του οποίου ο υπολογισμός πραγματοποιήθηκε στην παρούσα εργασία (στο εξής «MODIS_{1000-C}»).

- το LST που προκύπτει από την αναδειγματοληψία του προϊόντος ASTER–LST στο 1 km (στο εξής «ASTER₁₀₀₀»).

Από το Σχήμα 4-8 και τον Πίνακα 4-12 προκύπτει ότι η κατανομή των τιμών του MODIS1000-C και οι κυριότερες στατιστικές παράμετροί του, εμφανίζουν βελτιωμένη συμφωνία με τις κατανομές του ASTER για την πλειονότητα των περιπτώσεων. Το παραπάνω μπορεί να αξιολογηθεί ως ένδειξη ότι ο εκτιμώμενος συντελεστής εκπομπής οδηγεί σε ακριβέστερη εκτίμηση του LST. Παράλληλα, σημειώνεται σημαντική συμφωνία μεταξύ των MODIS_{1000-A} και MODIS_{1000-B} καταδεικνύοντας ότι η επίδραση των διαφορετικών αλγορίθμων SW στο LST είναι μικρή. Για την εικόνα στις 17 Ιουλίου 2015 παρατηρείται η ισχυρότερη υποεκτίμηση για όλες τις περιπτώσεις MODIS συγκριτικά με το ASTER₁₀₀₀, με μία διαφορά της τάξης των 1.5 K ως προς τις προκύπτουσες μέσες τιμές. Για τη συγκεκριμένη ημερομηνία επιλέχθηκε επίσης η ατμοσφαιρική διόρθωση να πραγματοποιηθεί με διαφορετικό τρόπο σε σχέση με τις άλλες περιπτώσεις —δεδομένα εισόδου από το μοντέλο κλιματολογίας Naval Research Laboratory (NRL) αντί του προϊόντος Global Data Assimilation System (GDAS)—, καθώς το ακόμα μεγαλύτερο συστηματικό σφάλμα σε διαφορετική περίπτωση δεν επέτρεπε την εξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων ως προς την ικανότητα υποκλιμάκωσης των μοντέλων (Agathangelidis and Cartalis, 2019). Γενικότερα, οι επιφανειακές θερμοκρασίες που προέρχονται από τον αισθητήρα ASTER (έπειτα από την αναδειγματοληψία, ASTER₁₀₀₀) χαρακτηρίζονται από μεγαλύτερο εύρος τιμών συγκριτικά με τις εκτιμήσεις MODIS, ειδικά σε ότι αφορά τις μέγιστες τιμές· οι προκύπτουσες διαφοροποιήσεις μειώνονται σε σημαντικό βαθμό κατά τη σύγκριση του τρίτου τεταρτημρίου των τιμών τους.

Πίνακας 4-12 Στατιστικές παράμετροι κατά τον προσδιορισμό του LST σε χωρική διακριτική ικανότητα 1000 m.

	MODIS _{1000-A}			MODIS _{1000-B}			MODIS _{1000-C}			ASTER ₁₀₀₀		
	Μέση	Ελάχ.	Μέγ.	Μέση	Ελάχ.	Μέγ.	Μέση	Ελάχ.	Μέγ.	Μέση	Ελάχ.	Μέγ.
29 Σεπ. 2013	306.5	302.0	310.9	306.8	302.1	311.9	307.3	302.1	312.3	308.2	302.0	315.2
9 Απρ. 2014	299.7	293.6	303.2	299.6	293.1	303.2	300.2	293.1	304.3	301.4	293.8	306.4
14 Μαΐ. 2015	307.0	299.3	310.1	306.9	299.1	310.4	307.5	300	311.5	307.7	297.4	311.6
17 Ιουλ. 2015	312.8	307.8	316.0	312.6	304.9	316.4	313.2	305.9	317.5	315.1	307.2	320.4
6 Νοεμ. 2015	284.5	281.8	286.4	284.0	281.1	286.3	284.6	281.5	288.2	285.2	282.1	288.6
14 Οκτ. 2016	289.7	286.2	291.1	289.5	286.4	290.9	290.2	286.7	292.8	290.9	287.1	292.3



Σχήμα 4-8 Ιστογράμματα της κατανομής των τιμών LST για τις (α) 29/09/2013, (β) 09/04/2014, (γ) 14/05/2015, (δ) 17/07/2015, (ε) 06/11/2015 και (ζ) 14/10/2016, και για τα (i) MODIS_{1000-A}, (ii) MODIS_{1000-B}, (iii) MODIS_{1000-C} και (iv) ASTER₁₀₀₀.

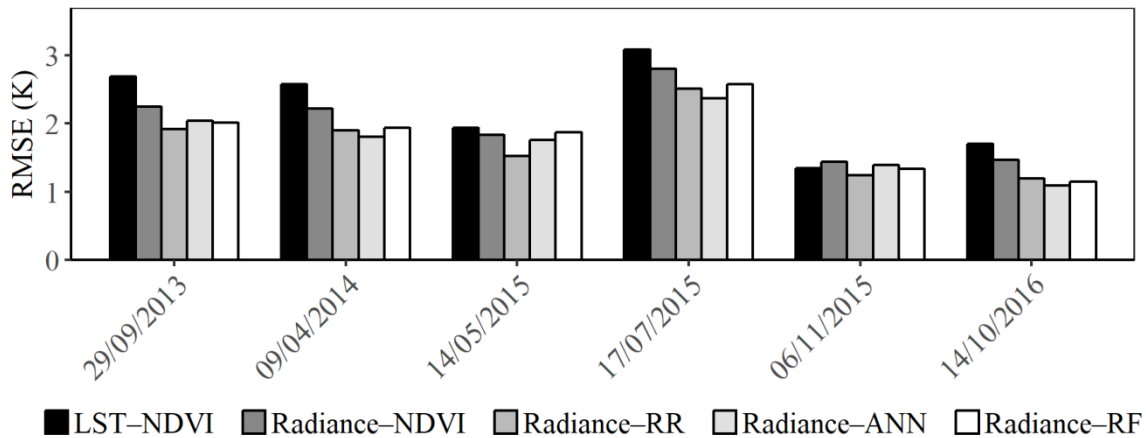
4.4.2.2 Μοντέλα υποκλιμάκωσης

Σε πρώτη φάση, η μεθοδολογία της στατιστικής υποκλιμάκωσης, η οποία περιγράφηκε στην Ενότητα 4.3.2.3, εφαρμόστηκε απ' ευθείας στο προϊόν MOD11A1-LST, αναπτύσσοντας μια γραμμική σχέση μεταξύ των τιμών του NDVI και του LST με παλινδρόμηση OLS (στο εξής μοντέλο «LST-NDVI»). Η παραπάνω εφαρμογή απλής γραμμικής παλινδρόμησης αντιστοιχεί στις παραδοσιακές μεθοδολογίες στατιστικής υποκλιμάκωσης (DisTrad) και θα χρησιμοποιηθεί ως μία πρώτη περίπτωση μεθοδολογίας αναφοράς για τα προτεινόμενα μοντέλα της εργασίας. Σχετικά υψηλά σφάλματα σημειώθηκαν για όλες τις εξεταζόμενες ημερομηνίες: το μέσο σφάλμα RMSE μεταξύ των εικόνων υποκλιμάκωσης LST-NDVI και του ASTER-LST ήταν της τάξης των 2.5 K και 1.5 K για τις πρωινές (~09:00 UTC) και τις νυχτερινές εικόνες (~20:00 UTC) αντίστοιχα. Το μέγιστο σφάλμα σημειώθηκε για την περίπτωση της 17 Ιουλίου 2015 (RMSE = 3.08 K) και αποδίδεται κατά κύριο λόγο στη διαφοροποίηση χαμηλής χωρικής κλίμακας που περιγράφηκε στην προηγούμενη

ενότητα μεταξύ των αισθητήρων MODIS και ASTER για τη συγκεκριμένη ημερομηνία. Αντίστοιχα, οι χαμηλότερες τιμές του σφάλματος RMSE, οι οποίες παρατηρούνται κατά τις νυχτερινές εικόνες προκύπτουν κυρίως λόγω της μικρότερης χωρικής μεταβλητότητας που σημειώνεται τις αντίστοιχες ώρες ως προς την επιφανειακή θερμοκρασία.

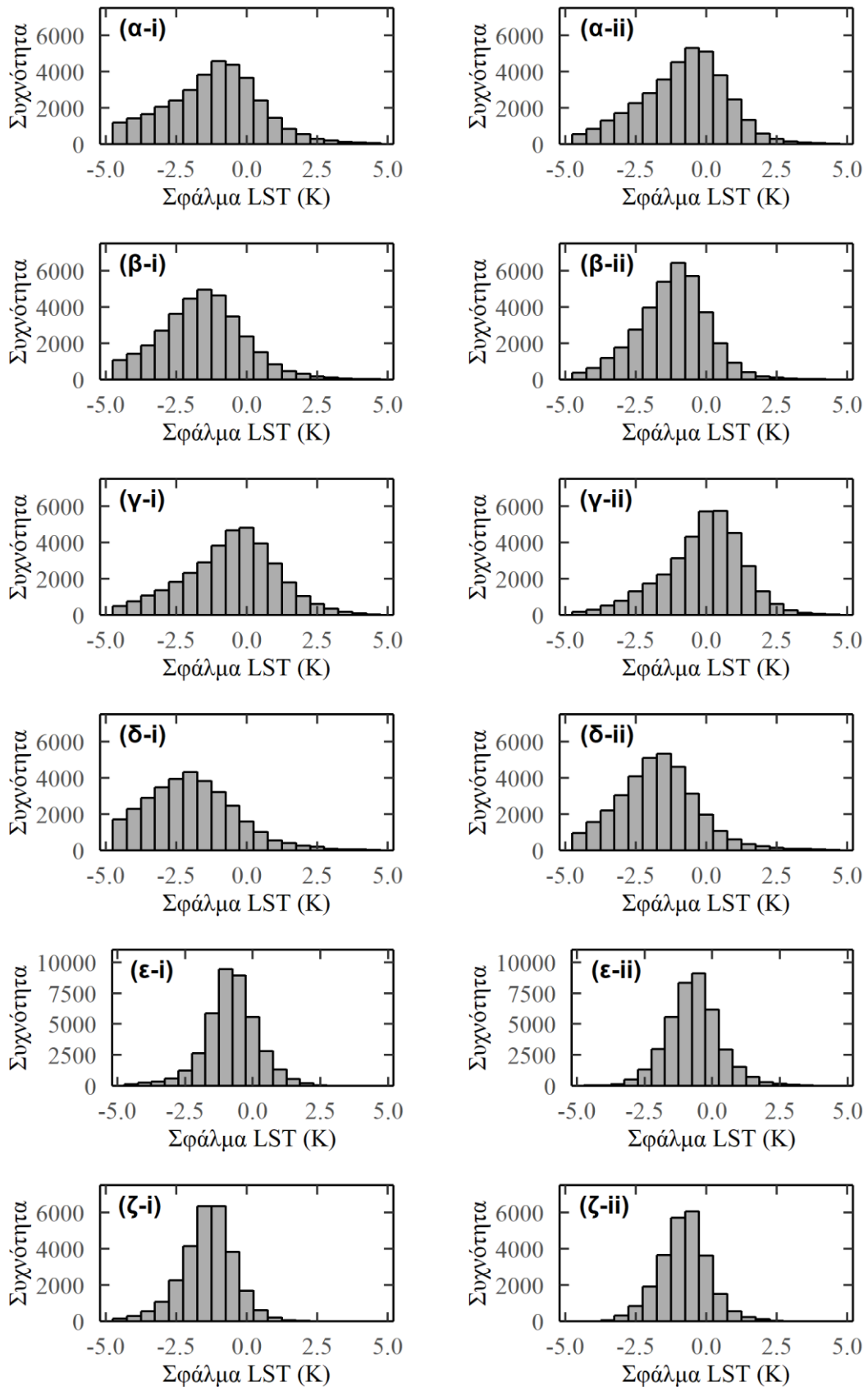
Επιπλέον, εξετάστηκε η επίδραση στην επίδοση του αρχικού μοντέλου υποκλιμάκωσης μιας μεταβλητής με την ενσωμάτωση του νέου συντελεστή εκπομπής ή με την αντικατάσταση του δείκτη NDVI με διαφορετική μεταβλητή πρόβλεψης. Έτσι εφαρμόζοντας εκ νέου το μοντέλο απλής γραμμικής παλινδρόμησης OLS προέκυψε ότι η υποκλιμάκωση των ακτινοβολιών MODIS μέσω του NDVI και η μετέπειτα χρήση του συντελεστή εκπομπής (στο εξής μοντέλο «Radiance–NDVI») παρουσιάζει βελτίωση για τέσσερις από τις έξι εξεταζόμενες ημέρες (συνολική μέση βελτίωση 0.2 K ως προς το σφάλμα RMSE). Αντίστοιχα αποδείχθηκε ότι οι δείκτες NDVI και NDBI δίνουν τα καλύτερα αποτελέσματα σε σχέση με τις υπόλοιπες παραμέτρους. Ωστόσο, μολονότι η συσχέτιση μεταξύ των παραπάνω δεικτών και του LST ήταν σημαντικά καλύτερη σε σχέση με τις άλλες μεταβλητές σε χαμηλή ανάλυση, η τελική διαφοροποίηση στην εικόνα υποκλιμάκωσης ήταν μικρή (< 0.5 K). Αυτό μπορεί να εξηγηθεί από τα ήδη ενσωματωμένα χαρακτηριστικά της επιφανείας χρησιμοποιώντας τον συντελεστή εκπομπής υψηλής ανάλυσης, αλλά κυρίως από τη διόρθωση των υπολοίπων που εφαρμόζεται στη στατιστική υποκλιμάκωση και προσαρμόζει τα σφάλματα των προβλέψεων του μοντέλου μέσω τοπικών διορθώσεων.

Σε δεύτερη φάση αναπτύχθηκαν οι εξισώσεις πολλαπλής παλινδρόμησης μεταξύ των τιμών ακτινοβολίας MODIS και των 16 μεταβλητών πρόβλεψης, με την επιφανειακή θερμοκρασία να υπολογίζεται ακολούθως μέσω του συντελεστή εκπομπής υψηλής χωρικής διακριτικής ικανότητας και της εξίσωσης SW. Η γραμμική παλινδρόμηση RR (ridge regression) η οποία αξιοποιεί το σύνολο των ανεξάρτητων μεταβλητών και τον συντελεστή εκπομπής (στο εξής μοντέλο «Radiance–RR») έδωσε καλύτερα αποτελέσματα τόσο σε σχέση με τα μοντέλα που εξετάστηκαν προηγουμένως, όσο και σε μικρότερο βαθμό συγκριτικά με τα μοντέλα μηχανικής μάθησης ANN και RF (Σχήμα 4-9). Συγκεκριμένα τα αποτελέσματα των RR και ANN ήταν συγκρίσιμα, ενώ η μέθοδος RF εμφάνισε σταθερά ελαφρώς μεγαλύτερα σφάλματα RMSE. Όπως μπορεί να παρατηρηθεί, τα αποτελέσματα της προτεινόμενης μεθόδου Radiance–RR είναι σημαντικά βελτιωμένα σε σύγκριση με τα μοντέλα αναφοράς μίας μεταβλητής (DisTrad), με μικρότερα σφάλματα RMSE για κάθε εξεταζόμενη ημερομηνία. Συγκεκριμένα, η υποκλιμάκωση Radiance–RR οδήγησε σε μικρότερα σφάλματα RMSE κατά 0.55 K για τις πρωινές και 0.31 K για τις νυχτερινές εικόνες σε σχέση τη μεθοδολογία αναφοράς, κάτι που αντιστοιχεί σε μία συνολική βελτίωση της τάξης του 29.4%. Συνολικά όσον αφορά το μοντέλο Radiance–RR, παρουσιάζεται ένα μέσο σφάλμα RMSE 1.96 K για τις πρωινές και 1.21 K για τις νυχτερινές εικόνες αντίστοιχα. Μία σχετικά μικρή υποεκτίμηση διαπιστώθηκε για 5 από τις έξι ημερομηνίες (κατά 0.55 K), ενώ ειδικά για τις 17 Ιουλίου 2015 το σφάλμα ME ήταν ίσο με 1.83 K.

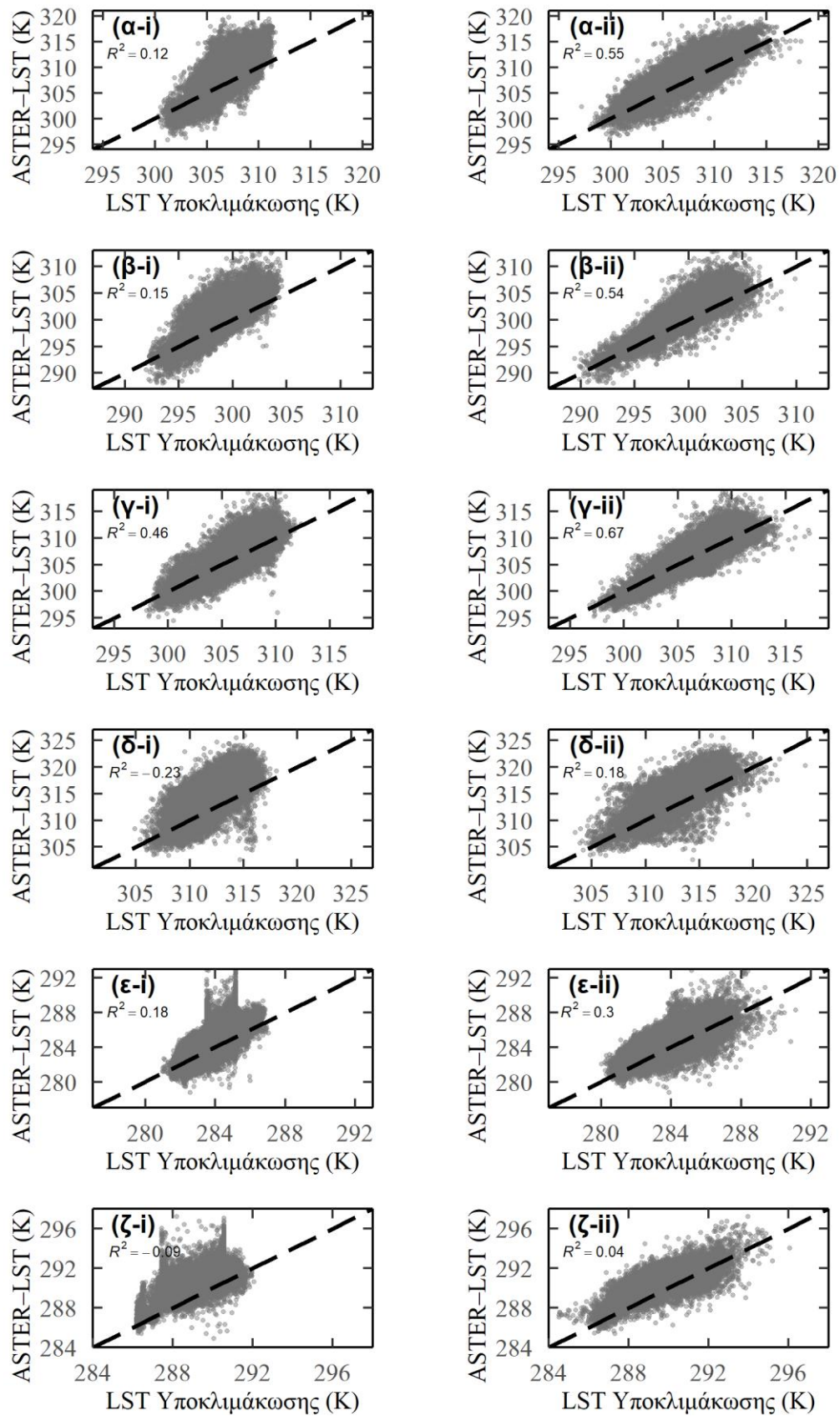


Σχήμα 4-9 Σφάλμα RMSE (K) κατά τη σύγκριση του LST της υποκλιμάκωσης MODIS με το ASTER-LST για τα μοντέλα LST-NDVI, Radiance-NDVI, Radiance-RR, Radiance-ANN και Radiance-RF.

Στο Σχήμα 4-10 παρουσιάζεται η κατανομή των διαφορών των επιφανειακών θερμοκρασιών του προϊόντος ASTER-LST και των τιμών LST της υποκλιμάκωσης για το σύνολο των εξεταζόμενων ημερομηνιών, για τις περιπτώσεις: α) του μοντέλου αναφοράς LST-NDVI και β) του μοντέλου Radiance-RR (αρνητικές τιμές αντιστοιχούν σε υποεκτίμηση). Σε συμφωνία με όσα αναφέρθηκαν παραπάνω το μοντέλο Radiance-RR εμφανίζει μικρότερο ποσοστό συστηματικού σφάλματος, με μια εν γένει κατανομή σφαλμάτων που τείνει στην κανονική κατανομή. Αντίθετα, το μοντέλο LST-NDVI παρουσιάζει υψηλότερη κύρτωση, με ένα μεγάλο ποσοστό των σφαλμάτων να υπερβαίνει συχνά τα 2 K. Για τα ίδια μοντέλα δίνονται στο Σχήμα 4-11 τα διαγράμματα διασποράς μεταξύ των τιμών του LST αναφοράς (προϊόν θερμοκρασίας ASTER) και των εκτιμήσεων της υποκλιμάκωσης για το σύνολο των ημερομηνιών. Οι εκτιμήσεις LST από το μοντέλο Radiance-RR χαρακτηρίζονται από μια αρκετά καλή συμφωνία με τις τιμές του ASTER (μέσο σφάλμα RMSE = 1.71 K): ωστόσο υποεκτίμηση παρατηρείται για τις υψηλότερες θερμοκρασίες. Σημειώνεται ότι στο Σχήμα 4-11 ο συντελεστής προσδιορισμού R^2 προκύπτει μέσω της σύγκρισης της προσαρμογής του μοντέλου σε σχέση με ένα μοντέλο μηδενικής τάξης (δηλ. μια σταθερά). Αυτός ο τρόπος εκτίμηση του R^2 χρησιμοποιείται αρκετά συχνά κατά τη σύγκριση αλγορίθμων μηχανικής μάθησης, καθώς το ενδιαφέρον εστιάζεται στο πως αποδίδει ο αλγόριθμος σε άγνωστα δεδομένα.



Σχήμα 4-10 Κατανομή μέσω σφαλμάτων κατά τη σύγκριση του LST της υποκλιμάκωσης MODIS με το ASTER-LST για τις (α) 29/09/2013, (β) 09/04/2014, (γ) 14/05/2015, (δ) 17/07/2015, (ε) 06/11/2015 και (ζ) 14/10/2016, και για τα (i) LST-NDVI και (ii) Radiance-RR.



Σχήμα 4-11 Διαγράμματα διασποράς μεταξύ του LST της υποκλιμάκωσης MODIS και του ASTER–LST για τις (α) 29/09/2013, (β) 09/04/2014, (γ) 14/05/2015, (δ) 17/07/2015, (ε) 06/11/2015 και (ζ) 14/10/2016, και για τα (i) LST–NDVI και (ii) Radiance–RR.

Συγκρινόμενη όμως η προτεινόμενη μεθοδολογία με το μοντέλο αναφοράς παρουσιάζει σημαντικά μικρότερη διακύμανση και μεγαλύτερο εύρος τιμών σχεδόν στο σύνολο των εξεταζόμενων ημερομηνιών, υποδεικνύοντας έτσι την υπεροχή της μεθόδου.

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, εκτός από τα μοντέλα γραμμικής παλινδρόμησης (OLS και RR) εξετάστηκαν επίσης οι αλγόριθμοι μηχανικής μάθησης ANN και RF με σκοπό τη διερεύνηση πιθανών μη γραμμικών σχέσεων μεταξύ της θερμικής ακτινοβολίας και των βοηθητικών μεταβλητών. Οι παραπάνω μέθοδοι εμφάνισαν ελαφρώς μεγαλύτερα σφάλματα σε σχέση με τη μέθοδο RR, με σταθερή συμπεριφορά για το σύνολο των περιπτώσεων (βλ. Σχήμα 4-9). Το μοντέλο RR παρουσίασε μέσο μικρότερο σφάλμα κατά ~ 0.1 K και ~ 0.3 K σε σχέση με τα βέλτιστα μοντέλα ANN και RF αντίστοιχα, καταδεικνύοντας ότι η ανάπτυξη σύνθετων σχέσεων σε χαμηλή χωρική ανάλυση δεν οδήγησε τελικά σε βελτίωση τα μέσα αποτελέσματα του μοντέλου, ενώ αύξησε παράλληλα σε σημαντικό βαθμό το υπολογιστικό κόστος του αλγορίθμου. Αυτό μπορεί να αποδοθεί στη μεγαλύτερη υπερ-προσαρμογή (overfitting) στα δεδομένα εκπαίδευσης που εμφανίζουν οι μέθοδοι μηχανικής μάθησης, το οποίο για την περίπτωση των ANN οδήγησε σε ορισμένες ημερομηνίες σε λιγότερο ακριβή αποτελέσματα και σε άλλες τα αποτελέσματά του ήταν σε μικρό βαθμό καλύτερο. Όσον αφορά την παλινδρόμηση RF, προστίθεται ο περιορισμός της στο να προβλέπει τιμές εκτός του εύρους τιμών της εκπαίδευσής της. Γενικά, απλούστερα μοντέλα βρέθηκαν να είναι τα βέλτιστα τόσο για την περίπτωση των ANN όσο και των RF, με ένα κρυφό επίπεδο 70 νευρώνων και ένα σύνολο 80 τυχαίων δέντρων αντίστοιχα. Για τα νευρωνικά δίκτυα η συνάρτηση ενεργοποίησης υπερβολικής εφαστομένης έδωσε συστηματικά τα μικρότερα σφάλματα μεταξύ των υπολοίπων εξεταζόμενων συναρτήσεων. Όσον αφορά την εφαρμογή των μοντέλων πολλαπλής παλινδρόμησης OLS, η πολυσυγγραμμικότητα του μοντέλου οδήγησε εν γένει σε μικρή τελική διαφοροποίηση των αποτελεσμάτων ως προς το σφάλμα RMSE (της τάξης των 0.2 K). Σε κάθε περίπτωση όμως, η παλινδρόμηση ridge (μοντέλο RR) είναι προτιμητέα σε αυτήν την περίπτωση της OLS, καθώς είναι ορθότερη από πλευράς μαθηματικής θεωρίας, ενώ παράλληλα παράγει πιο ευσταθή μοντέλα σε μεταβολές του μεγέθους του δείγματος εκπαίδευσης ή σε μεταβολές του αριθμού και του είδους των μεταβλητών. Η παραπάνω ιδιότητα είναι ιδιαίτερα σημαντική στη δυνατότητα γενίκευσης της προτεινόμενης μεθοδολογίας υποκλιμάκωσης. Τέλος, η παλινδρόμηση ridge προκρίνεται έναντι της μεθόδου των τεχνητών νευρωνικών δικτύων, με την οποία εμφάνισε μικρή διαφοροποίηση, λόγω της αρκετά μεγαλύτερης πολυπλοκότητας της δεύτερης ως προς την επιλογή της αρχιτεκτονικής του μοντέλου (επιλογή αριθμού νευρώνων, αριθμού κρυφών επιπέδων, συνάρτησης ενεργοποίησης και αλγορίθμου εκμάθησης).

Στο επόμενο στάδιο διερεύνησης της βέλτιστης τεχνικής υποκλιμάκωσης, πραγματοποιήθηκε σύγκριση μεταξύ του προηγούμενου προκρινόμενου μοντέλου Radiance-RR και εναλλακτικών τροποποιήσεων του DisTrad, οι οποίες έχουν στο παρελθόν προταθεί στη σχετική βιβλιογραφία στατιστικής υποκλιμάκωσης με έμφαση στις αστικές περιοχές. Συγκεκριμένα διερευνήθηκαν τα μοντέλα στατιστικής υποκλιμάκωσης τα οποία κάνουν χρήση των παρακάτω μεταβλητών πρόβλεψης:

α) του συνδυασμού του NDVI και της λευκαύγειας (albedo) (Dominguez et al., 2011), β) του συνδυασμού των $NDVI^2$ και NDBI (Bonafoni, 2016) και γ) της χρησιμοποίησης του ποσοστού του αδιαπέρατου (impervious) εδάφους (Essa et al., 2013). Η λευκαύγεια υπολογίστηκε από τις ανακλαστικότητες του μικρού κύματος ακτινοβολίας όπως και στη συγκρινόμενη περίπτωση αναφοράς (Dominguez et al., 2011), ενώ το ποσοστό αδιαπέρατου εδάφους προσδιορίστηκε μέσω της ταξινόμησης της κάλυψης γης όπως προέκυψε από τα αποτελέσματα της Ενότητας 4.4.1 (δηλ. μέσω της άθροισης της ποσοστιαίας κάλυψης των τάξεων που αντιστοιχούν σε δομικά υλικά). Τα τρία μοντέλα εξετάστηκαν τόσο κατά την υποκλιμάκωση της έντασης της ακτινοβολίας και ακολούθως τον υπολογισμό του LST (στο εξής μοντέλο «Radiance – NDVI, Albedo», κ.ο.κ.) αλλά και για την περίπτωση που η υποκλιμάκωση πραγματοποιείται άμεσα στο προϊόν MODIS–LST (στο εξής μοντέλο «LST – NDVI, Albedo», κ.ο.κ.).

Τα παραγόμενα σφάλματα RMSE για τα παραπάνω μοντέλα, καθώς επίσης για το προτεινόμενο μοντέλο της παρούσας εργασίας (μοντέλο Radiance–RR) παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στον Πίνακα 4-13. Στον ίδιο πίνακα δίνεται επίσης το πηλίκο του σφάλματος RMSE προς την τυπική απόκλιση των εικόνων ASTER, έτσι ώστε να εξεταστεί εάν τα σφάλματα που προκύπτουν είναι μικρότερα από τη χωρική μεταβλητότητα του LST (Bonafoni, 2016). Στα αποτελέσματα είναι φανερό ότι το προτεινόμενο μοντέλο Radiance–RR υπερτερεί των υπολοίπων μοντέλων αστικών περιοχών, ειδικά συγκριτικά με την περίπτωση όπου για τα τελευταία δεν χρησιμοποιείται ο υψηλής ανάλυσης συντελεστής εκπομπής. Συγκεκριμένα, σημειώθηκε μία μέση βελτίωση κατά 0.48 K όταν το μοντέλο Radiance–RR συγκρίνεται με το έτερο βέλτιστο μοντέλο υποκλιμάκωσης του LST κάθε ημερομηνίας. Όταν ο συντελεστής εκπομπής που αναπτύχθηκε στην παρούσα εργασία χρησιμοποιείται σε όλα τα μοντέλα, η αντίστοιχη τιμή είναι 0.26 K.

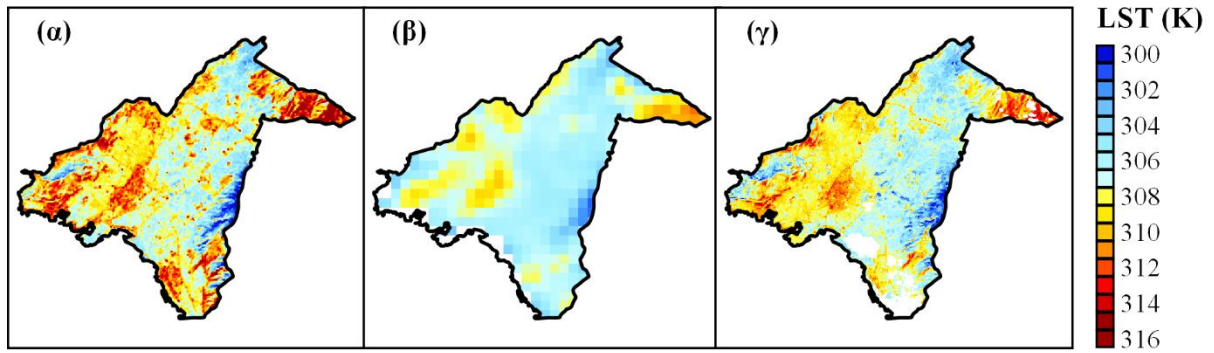
Για τα μοντέλα «Radiance/LST – NDVI, Albedo» τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στον Πίνακα 4-13, προκύπτουν έπειτα από την εφαρμογή παλινδρόμησης 1^{ης} τάξης μεταξύ των μεταβλητών πρόβλεψης και του LST, η οποία αποδείχθηκε πιο ακριβής (έως και 1 K) συγκριτικά με την πολυωνυμική 4^{ης} τάξης σχέση που προτείνεται στην αρχική εργασία των Dominguez et al. (2011). Ομοίως, περιλαμβάνοντας το σύνολο των εικονοστοιχείων κατά την ανάπτυξη του μοντέλου του «Radiance/LST – Impervious» αντί του 50% με τη μικρότερη διακύμανση (που προτείνεται στους Essa et al., 2013), οδήγησε σε μικρότερο σφάλμα RMSE.

Όπως επιπλέον διαπιστώνεται από τον Πίνακα 4-13, το μοντέλο Radiance–RR και το σφάλμα RMSE ήταν πάντα μικρότερο από τη χωρική μεταβλητότητα του LST σε αντίθεση με τα υπόλοιπα μοντέλα. Η υψηλή τιμή για όλα τα μοντέλα του πηλίκου του RMSE προς την τυπική απόκλιση του ASTER στις 17 Ιουλίου 2015, αποδίδεται, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, στη σημαντική διαφοροποίηση μεταξύ των καταγραφών των αισθητήρων σε χαμηλή ανάλυση. Επιπρόσθετα, οι υψηλές τιμές του ανωτέρω πηλίκου για τις νυχτερινές εικόνες υπογραμμίζουν τη σημασία του να λαμβάνεται υπόψη η επικρατούσα θερμική μεταβλητότητα σε συνδυασμό με την ώρα λήψης της δορυφορικής εικόνας κατά την αξιολόγηση της ικανότητας υποκλιμάκωσης ενός μοντέλου.

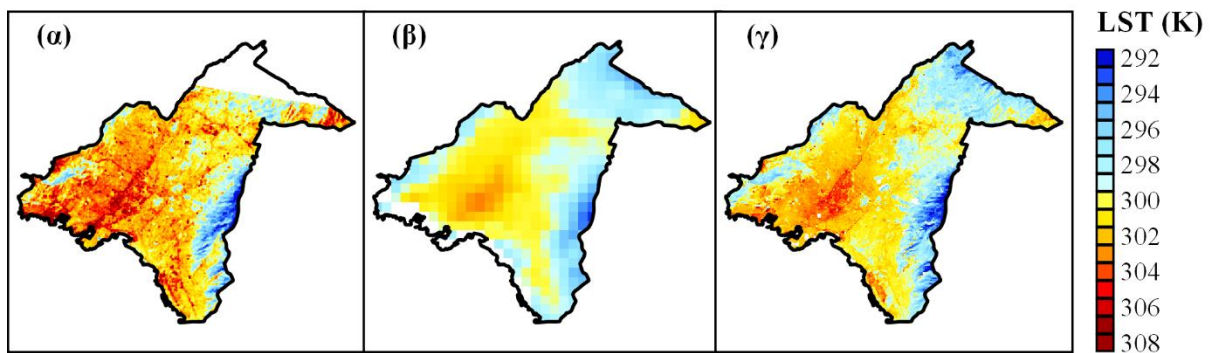
Πίνακας 4-13 Σφάλμα RMSE (K) μεταξύ του LST της υποκλιμάκωσης MODIS και του ASTER–LST για διαφορετικά μοντέλα υποκλιμάκωσης, σε χωρική διακριτική ικανότητα 100 m. Σε παρένθεση δίνεται το πηλίκο του σφάλματος RMSE προς την τυπική απόκλιση (STD) των εικόνων ASTER.

Μοντέλα υποκλιμάκωσης	RMSE (K) (RMSE/STD)					
	29/09/13	09/04/14	14/05/15	17/07/15	06/11/15	14/10/16
LST – NDVI ² , NDBI	2.58 (0.82)	2.60 (0.91)	1.94 (0.61)	3.08 (0.98)	1.35 (1.08)	1.68 (1.14)
LST– NDVI, Albedo	2.61 (0.83)	2.50 (0.88)	1.95 (0.61)	3.09 (0.97)	1.34 (1.07)	1.77 (1.20)
LST–Impervious	2.78 (0.89)	2.61 (0.91)	2.09 (0.66)	3.20 (1.06)	1.35 (1.08)	1.73 (1.18)
Radiance – NDVI ² , NDBI	2.14 (0.68)	2.25 (0.79)	1.80 (0.57)	2.80 (0.88)	1.41 (1.04)	1.42 (0.97)
Radiance – NDVI, Albedo	2.17 (0.69)	2.17 (0.76)	1.84 (0.58)	2.81 (0.88)	1.43 (1.14)	1.52 (1.03)
Radiance – Impervious	2.25 (0.72)	2.23 (0.78)	1.94 (0.61)	2.85 (0.90)	1.44 (1.15)	1.48 (1.00)
Radiance – RR	1.92 (0.61)	1.90 (0.66)	1.52 (0.48)	2.51 (0.79)	1.24 (0.99)	1.19 (0.81)

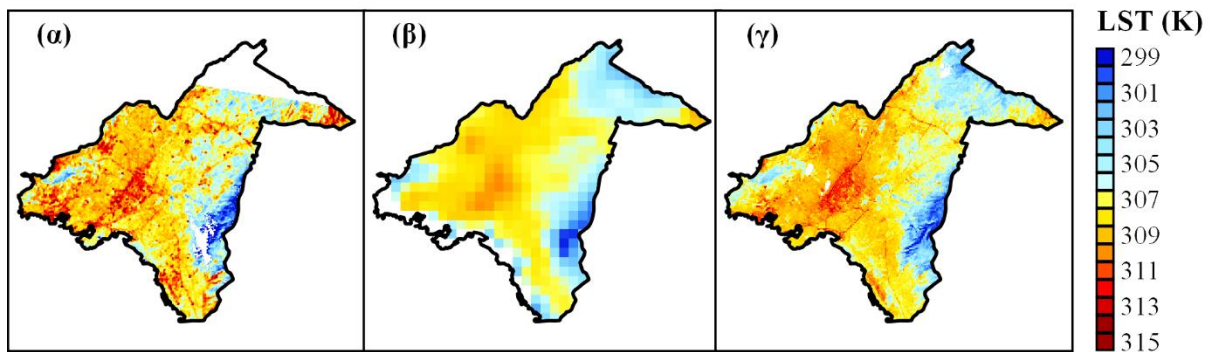
Για μια ποιοτική αξιολόγηση των θερμοκρασιών υποκλιμάκωσης του μοντέλου υποκλιμάκωσης, στα Σχήματα 4-12 έως 4-17 απεικονίζεται η κατανομή της επιφανειακής θερμοκρασίας α) του προϊόντος ASTER–LST, β) του προϊόντος MODIS–LST και γ) του MODIS μετά την υποκλιμάκωση με τη χρήση του προτεινόμενου μοντέλου Radiance–RR. Τα προσδιοριζόμενα θερμικά μοτίβα στην εικόνα υποκλιμάκωσης βρίσκονται σε σημαντική συμφωνία με εκείνα του ASTER, αν και το εύρος τιμών παρουσιάζει μια σχετική σύμπτυξη. Συγκεκριμένα, τα θερμότερα σημεία της πόλης, οι περιοχές πρασίνου και τα οδικά δίκτυα αποτυπώνονται σε σημαντικό βαθμό ορθά στα παραγόμενα δεδομένα υποκλιμάκωσης. Στο Σχήμα 4-18 δίνεται η μέση κατανομή σφάλματος του μοντέλου υποκλιμάκωσης (τιμές LST από υποκλιμάκωση μείον τις τιμές ASTER–LST). Ο συνδυασμός του παραπάνω σχήματος με το Σχήμα 4-5 αναδεικνύει ότι το γεγονός ότι η σημαντικότερη διαφοροποίηση των εικόνων υποκλιμάκωσης σε σχέση με τις εικόνες αναφοράς (ASTER) σημειώνεται για τις τάξεις κάλυψης γης «χώμα» και «χαμηλής βλάστηση» στην περιφέρεια του αστικού ιστού. Αυτό το χαρακτηριστικό καταδεικνύει πιθανόν χαμηλότερες τιμές του συντελεστή εκπομπής για τις παραπάνω επιφάνειες σε σχέση με τις τιμές αναφορές, εξαιτίας χαμηλής επιφανειακής υγρασίας. Το παραπάνω ενδεχομένως να επαυξάνεται από το πιθανόν σφάλμα της μεθόδου TES (η οποία χρησιμοποιείται στο ASTER–LST) σε περιοχές γυμνού εδάφους, κάτι το οποίο έχει καταγραφεί στο παρελθόν (Jiménez-Muñoz et al., 2006).



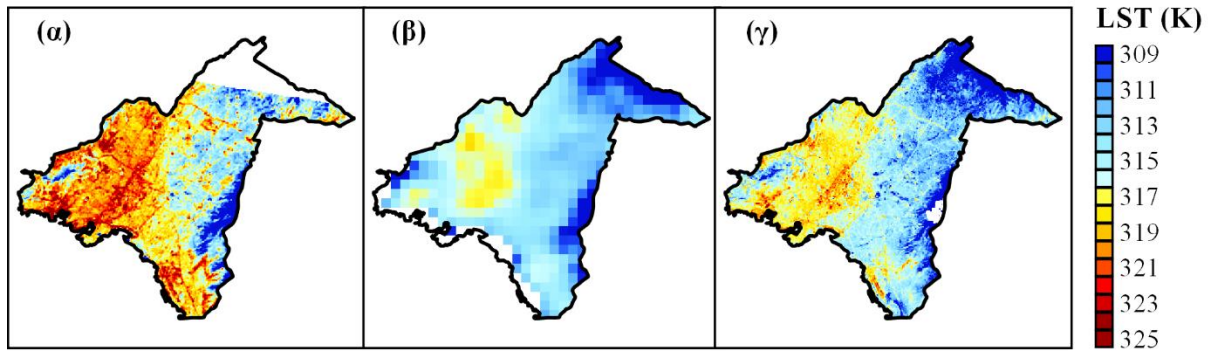
Σχήμα 4-12 Χωρική κατανομή του LST (K) για τις περιπτώσεις (α) του ASTER–LST (100 m), (β) του MODIS–LST (1000 m) και (γ) του LST της υποκλιμάκωσης (μοντέλο Radiance–RR) (100 m) για τις 29/09/2013.



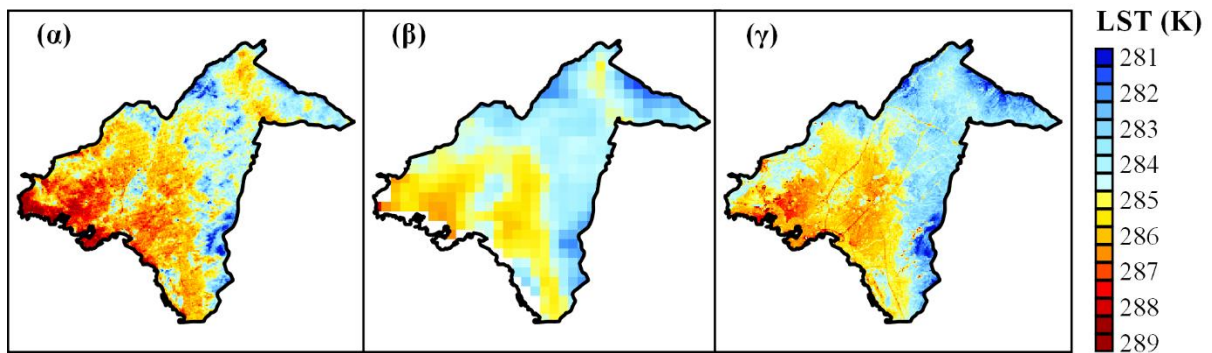
Σχήμα 4-13 Όμοια με το Σχήμα 4-12, για τις 09/04/2014.



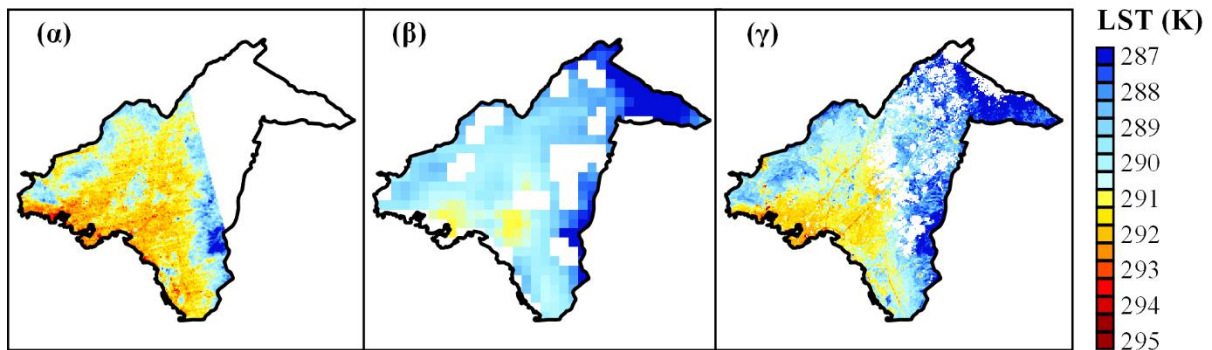
Σχήμα 4-14 Όμοια με το Σχήμα 4-12, για τις 14/05/2015.



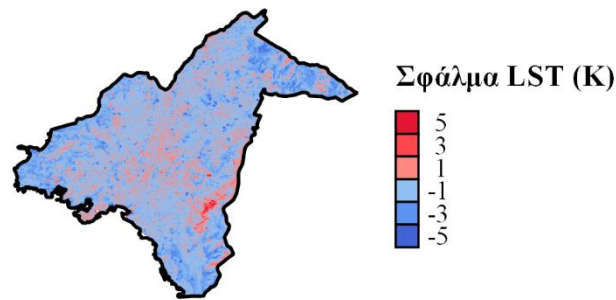
Σχήμα 4-15 Όμοια με το Σχήμα 4-12, για τις 17/07/2015.



Σχήμα 4-16 Όμοια με το Σχήμα 4-12, για τις 06/11/2015.

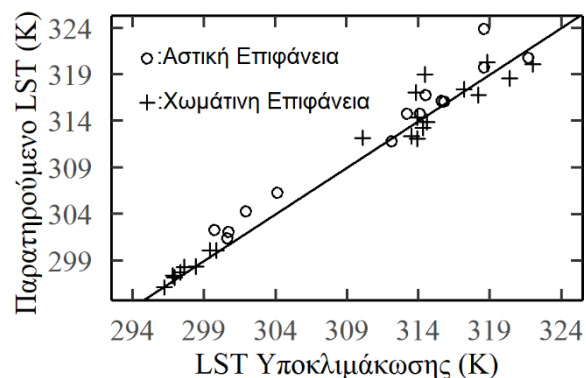


Σχήμα 4-17 Όμοια με το Σχήμα 4-12, για τις 14/10/2016.



Σχήμα 4-18 Χωρική κατανομή του αριθμητικού μέσου του μέσου σφάλματος κατά τη σύγκριση του LST της υποκλιμάκωσης MODIS (μοντέλο Radiance-RR) με το ASTER-LST για το σύνολο των εξεταζόμενων ημερομηνιών (αρνητικές τιμές αντιστοιχούν σε υποεκτίμηση).

Τέλος, οι επιφανειακές θερμοκρασίες υποκλιμάκωσης μέσω του μοντέλου Radiance-RR αξιολογήθηκαν επιπλέον βάσει επιτόπιων μετρήσεων επιφανειακής θερμοκρασίας για α) μία αστική περιοχή και β) μία χωμάτινη έκταση. Οι παραπάνω μετρήσεις διενεργήθηκαν κατά το πρόγραμμα Thermopolis και παραχωρήθηκαν στην παρούσα εργασία από την ESA (βλ. Ενότητα 4.2). Λόγω της σημαντικής χρονικής διαφοράς μεταξύ των επιτόπιων μετρήσεων (Ιούλιος 2009) και της ταξινόμησης του Σχήματος 4-5 (Ιούνιος 2016) εξετάστηκαν τυχόν αλλαγές κάλυψης γης για τις παραπάνω περιοχές. Η διερεύνηση αλλαγών ως προς την κάλυψη γης και κατά συνέπεια στον συντελεστή εκπομπής δεν ήταν απαραίτητη για το σύνολο της περιοχής μελέτης, καθώς το μοντέλο παλινδρόμησης ridge αναπτύχθηκε μέσω της έντασης ακτινοβολίας MODIS και των μεταβλητών πρόβλεψης από τις παρατηρήσεις του Landsat 5. Από το Σχήμα 4-19 προκύπτει ότι σημειώνεται αρκετά καλή συμφωνία μεταξύ του LST της υποκλιμάκωσης και των επιτόπιων θερμοκρασιών. Συγκεκριμένα, καταγράφηκε ένα μέσο σφάλμα RMSE της τάξης των 1.81 K, περαιτέρω ενισχύοντας την αξιοπιστία του μοντέλου στατιστικής υποκλιμάκωσης. Επιπλέον, δεν παρατηρήθηκε καθ' όλη την εξεταζόμενη περίοδο σημαντική συστηματική υποεκτίμηση ως προς τις προβλεπόμενες θερμοκρασίες (μέσο σφάλμα = -0.73 K).



Σχήμα 4-19 Διάγραμμα διασποράς μεταξύ του LST της υποκλιμάκωσης MODIS (μοντέλο Radiance-RR) και των παρατηρούμενων επιφανειακών θερμοκρασιών για τις διαθέσιμες ημερομηνίες του Ιουλίου 2009.

4.5 Σχολιασμός αποτελεσμάτων

Στο παρόν κεφάλαιο προτάθηκε μία νέα προσέγγιση ως προς τη στατιστική υποκλιμάκωση των επιφανειακών θερμοκρασιών από δορυφορικές καταγραφές. Ο προτεινόμενος αλγόριθμος χωρικής ενίσχυσης των θερμικών δεδομένων MODIS κατορθώνει την ταυτόχρονη ενσωμάτωση μεγάλου αριθμού βοηθητικών παραμέτρων —οι οποίες καλύπτουν την πλειονότητα της χωρικής ανομοιογένειας του LST—, ιδιότητα που προσδίδει στον αλγόριθμο ισχυρή ικανότητα γενίκευσης και δυνατότητα εφαρμογής του σε επιχειρησιακό επίπεδο.

Ένα χαρακτηριστικό γνώρισμα της προτεινόμενης μεθοδολογίας είναι η άμεση ενσωμάτωση του συντελεστή θερμικής εκπομπής στον αλγόριθμο υποκλιμάκωσης. Ο συντελεστής εκπομπής αποτελεί μία από τις κύριες πηγές αβεβαιότητας κατά την εκτίμηση της επιφανειακής θερμοκρασίας από δεδομένα δορυφορικής τηλεπισκόπησης, ειδικά για την περίπτωση μελέτης αστικών περιοχών (Sobrino et al., 2012; Chen et al., 2016). Παρά ταύτα, σπανίως λαμβάνεται υπόψη στις τεχνικές στατιστικής υποκλιμάκωσης, έχοντας ενσωματωθεί στο παρελθόν μόνο σε αλγορίθμους υποκλιμάκωσης με τη μέθοδο pixel modulation (Nichol, 2009; Stathopoulou and Cartalis, 2009) και τη μέθοδο αποσύνθεσης εικονοστοιχείου (Mitraka, Chrysoulakis, et al., 2015). Ο συντελεστής εκπομπής κατέχει ωστόσο ιδιαίτερα μεγάλη σημασία στη στατιστική υποκλιμάκωση, καθώς το LST χαμηλής χωρικής ανάλυσης έχει διπλή επίδραση στην τελική ακρίβεια του μοντέλου: α) κατά τη ανάπτυξη των παραμετρικών σχέσεων παλινδρόμησης μεταξύ του LST και των μεταβλητών πρόβλεψης και β) κατά τη διαδικασία της διόρθωσης των υπολοίπων, η οποία διατηρεί παράλληλα τη ραδιομετρική ποσότητα της αρχικής εικόνας. Ο υψηλής χωρικής διακριτικής ικανότητας συντελεστής εκπομπής που χρησιμοποιήθηκε στην εργασία συνέβαλε στο να ελαττωθούν οι διαφοροποιήσεις μεταξύ των MODIS και ASTER στα 1000 m, καθώς και στο να αυξηθεί η τελική ακρίβεια του μοντέλου υποκλιμάκωσης.

Σημαντικό σφάλμα κατά τον προσδιορισμό του συντελεστή εκπομπής μπορεί να προκύψει λόγω της ανομοιογένειας των εξεταζόμενων εικονοστοιχείων. Για τον παραπάνω λόγο σε ανάλογες εργασίες έχουν στο παρελθόν χρησιμοποιηθεί πολύ υψηλής ανάλυσης θερμικά δεδομένα μέσω καταγραφών αεροσκαφών (Sobrino et al., 2012) (< 10 m) ή τεχνικές αποσύνθεσης του εικονοστοιχείου (Mitraka et al., 2012). Εδώ, η μεθοδολογία που αναπτύχθηκε έκανε χρήση των καναλιών του ορατού και του εγγύς υπέρυθρου στα 10 m, του δορυφόρου Sentinel-2 με την προσθήκη βοηθητικών δεδομένων (χαρτογράφηση χρήσεων γης και υψομετρικά μοντέλα). Η προκύπτουσα ταξινόμηση μηχανικής μάθησης RF, οδήγησε στη διάκριση δέκα κατηγοριών κάλυψης γης του αστικού περιβάλλοντος, επιτυγχάνοντας σημαντική ακρίβεια ταξινόμησης (~90%). Η διάκριση πολλαπλών κατηγοριών ανθρωπογενών υλικών, σε συνδυασμό με μία εκ των προτέρων γνώση των τυπικών υλικών της περιοχής μελέτης, μπορεί βελτιώσει σημαντικά την αβεβαιότητα στην εκτίμηση του συντελεστή εκπομπής κατά την εξαγωγή του από μεθόδους ταξινόμησης (Chen et al., 2016). Η μεθοδολογία της ταξινόμησης χρησιμοποιήθηκε εδώ με σκοπό τον προσδιορισμό του

συντελεστή εκπομπής, ωστόσο μπορεί να βρει άμεση εφαρμογή σε μελέτες που σχετίζονται με τον αστικό σχεδιασμό ή για την παροχή δεδομένων εισόδου σε αριθμητικά μοντέλα. Επιπλέον, η χρησιμοποιούμενη μεθοδολογία είναι στην κατεύθυνση της συνδυαστικής χρήσης ποικίλων πηγών δεδομένων προερχόμενων είτε από επίσημες υπηρεσίες και οργανισμούς είτε από την εθελοντική συνέργεια των πολιτών (χαρτογράφηση OpenStreetMap) (Schultz et al., 2017).

Επιπρόσθετα, η μέση τιμή των συντελεστών εκπομπής των επιμέρους αστικών επιφανειών πιθανόν να διαφέρει από τον ολικό (bulk) συντελεστή σε μεγαλύτερη κλίμακα, λόγω ανισοτροπίας στις τιμές του (Nichol, 2009). Επομένως, στόχος μελλοντικής έρευνας αποτελεί η ενσωμάτωση της επιφανειακής γεωμετρίας στον προσδιορισμό του συντελεστή εκπομπής (Yang et al., 2015) και η διερεύνηση των πιθανών διαφοροποιήσεων ως προς τα αποτελέσματα της υποκλιμάκωσης. Επιπλέον, η τρισδιάστατη μορφολογία του αστικού περιβάλλοντος, σε συνδυασμό με το μεταβαλλόμενο ύψος του ηλίου κατά τη διάρκεια μιας ημέρας, οδηγεί στη παρουσία θερμικής ανισοτροπίας για τις εξαγόμενες επιφανειακές θερμοκρασίες μέσω τεχνικών τηλεπισκόπησης (θερμική ανισοτροπία) (Voogt and Oke, 2003). Αν και η επίδραση της ανισοτροπίας έχει πρόσφατα αξιολογηθεί βάσει αριθμητικών προσομοιώσεων και δορυφορικών καταγραφών (Hu et al., 2016; Krayenhoff and Voogt, 2016; Jiang et al., 2018), μία άμεση διόρθωση των δορυφορικών θερμικών παρατηρήσεων δεν είναι εφικτή. Ειδικότερα για την περίπτωση της υποκλιμάκωσης του LST, μία επιπλέον αβεβαιότητα υπεισέρχεται στο πρόβλημα όσον αφορά τη θερμική ανισοτροπία, καθώς θα πρέπει να αντιμετωπιστεί παράλληλα σε δύο διαφορετικές χωρικές κλίμακες και πιθανότατα μέσω συνδυασμού δορυφόρων διαφορετικής γωνίας κατόπτρευσης.

Συνολικά, για το προτεινόμενο μοντέλο στατιστικής υποκλιμάκωσης Radiance-RR, τόσο η χρήση του συντελεστή εκπομπής υψηλής ανάλυσης, όσο και η ενσωμάτωση πολλαπλών μεταβλητών οδήγησε σε βελτίωση των αποτελεσμάτων συγκριτικά με τα μοντέλα αναφοράς. Αξίζει να σημειωθεί ότι κατά τη σύγκριση μεταξύ των μεθοδολογιών το μοντέλο Radiance-RR παρουσίασε τη βέλτιστη απόδοση για κάθε μία περίπτωση ξεχωριστά. Η παλινδρόμηση τύπου ridge που χρησιμοποιήθηκε στο παραπάνω μοντέλο αξιολογείται ότι βρίσκει αρκετά καλή εφαρμογή στη μεθοδολογία της στατιστικής υποκλιμάκωσης αντιμετωπίζοντας ορισμένους γενικότερους μεθοδολογικούς περιορισμούς της. Συγκεκριμένα, η παλινδρόμηση ridge επιτρέπει καταρχάς τη συνδυασμένη χρήση πολλαπλών μεταβλητών πρόβλεψης —οι οποίες πιθανά εμφανίζουν συσχέτιση— χωρίς την αρνητική επίδραση της πολυσυγγραμμικότητας. Επιπλέον, καθώς αποτρέπονται οι μεγάλες τιμές των συντελεστών της παλινδρόμησης, το μοντέλο που προκύπτει είναι κατά κανόνα ικανό για γενίκευση, αποφεύγοντας την υπερ-προσαρμογή στα δεδομένα (Ng, 2013). Η ιδιότητα αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική για την περίπτωση της στατιστικής υποκλιμάκωσης, επειδή η συναρτησιακή σχέση μεταξύ των θερμικών δεδομένων και των μεταβλητών πρόβλεψης εξαρτάται σε κάποιο βαθμό από τη χωρική κλίμακα (Jeganathan et al., 2011) (δηλ. δεν ταυτίζεται για την περίπτωση των 100 m και του 1 km). Η επιτυχής ενσωμάτωση πολλαπλών μεταβλητών στο μοντέλο Radiance-RR καταδεικνύει τη δυνατότητά για την εφαρμογή του σε άλλες αστικές, ετερογενείς περιοχές. Ως εναλλακτική μέθοδος κατά τη χρήση

πολλαπλής παλινδρόμησης μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί η μέθοδος ανάλυσης σε κύριες συνιστώσες (Zakšek and Oštir, 2012). Αντίθετα, η χρησιμοποίηση της βηματικής (stepwise) παλινδρόμησης, μολονότι έχει χρησιμοποιηθεί στο παρελθόν σε εφαρμογές υποκλιμάκωσης, μπορεί να οδηγήσει σε λανθασμένη επιλογή των μεταβλητών πρόβλεψης (Hauser, 1974).

Παρά τη σημαντικά μεγαλύτερη πολυπλοκότητα του μοντέλου και την αύξηση των υπολογιστικών απαιτήσεών του, οι αλγόριθμοι μηχανικής μάθησης (ANN και RF) δεν οδήγησαν σε βελτίωση των εκτιμήσεων της επιφανειακής θερμοκρασίας. Αυτό βρίσκεται σε συμφωνία με πρόσφατες μελέτες υποκλιμάκωσης, κατά τις οποίες εκτιμήθηκε ότι η χρήση γραμμικών μεθόδων παλινδρόμησης είναι προτιμητέα κατά τη χωρική ενίσχυση θερμοκρασιών που έχουν προκύψει από δορυφορικά δεδομένα (Bisquert et al., 2016; Bonafoni, 2016).

4.6 Συμπεράσματα

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάστηκε μία νέα προσέγγιση της στατιστικής υποκλιμάκωσης δορυφορικών εικόνων στο θερμικό υπέρυθρο με έμφαση στο αστικό περιβάλλον. Για την εφαρμογή της μεθοδολογίας χρησιμοποιήθηκαν δορυφορικές παρατηρήσεις της έντασης ακτινοβολίας, ανάλυση παλινδρόμησης τύπου ridge, ένας συνολικός αριθμός 16 μεταβλητών πρόβλεψης και τιμές του συντελεστή εκπομπής υψηλής χωρικής ανάλυσης, με σκοπό την υποκλιμάκωση δεδομένων LST. Την περιοχή μελέτης αποτέλεσε το αστικό συγκρότημα της Αθήνας, ενώ η μεθοδολογία εφαρμόστηκε στα κανάλια θερμικού υπέρυθρου του αισθητήρα MODIS, στοχεύοντας στην ενίσχυση της χωρικής διακριτικής τους ικανότητας από το 1 km στα 100 m.

Ο συντελεστής εκπομπής προσδιορίστηκε μέσω της ταξινόμησης κάλυψης γης και της χρήσης φασματικών υπογραφών για δείγματα αντιπροσωπευτικών υλικών των επιφανειών της περιοχής ενδιαφέροντος από φασματικές βιβλιοθήκες. Αντίστοιχα, κατά τη διαδικασία της φασματικής ταξινόμησης εφαρμόστηκαν τεχνικές μηχανικής μάθησης (Random Forests) με παράλληλη χρήση δορυφορικών παρατηρήσεων του Sentinel-2, δεδομένων χρήσεων γης και ψηφιακών υψομετρικών μοντέλων. Η συνδυαστική εφαρμογή των παραπάνω δεδομένων οδήγησε στη χαρτογράφηση της κάλυψης γης σε χωρική ανάλυση 10 m, με αρκετά καλή ακρίβεια (βρέθηκε ακρίβεια ταξινόμησης προσεγγιστικά 90%). Η παραπάνω εικόνα φασματικής ταξινόμησης θα αποτελέσει μία βασική συνιστώσα κατά τη διαδικασία συνολικότερης καταγραφής της αστικής μορφολογίας στο Κεφάλαιο 5 που ακολουθεί, σε συνδυασμό με επιπρόσθετα πολεοδομικά και γεωχωρικά δεδομένα. Επίσης, τα εκτιμώμενα ποσοστά επιφανειακής κάλυψης θα χρησιμοποιηθούν ως δεδομένα εισόδου κατά την αριθμητική προσομοίωση με το μοντέλο WRF στο Κεφάλαιο 6, με σκοπό τη λεπτομερειακή ενσωμάτωση στο μοντέλο της υφιστάμενης κάλυψης γης του πολεοδομικού συγκροτήματος της Αθήνας.

Όσον αφορά τη διαδικασία της στατιστικής υποκλιμάκωσης αναπτύχθηκαν παραμετρικές σχέσεις μεταξύ των μεταβλητών πρόβλεψης και της ακτινοβολίας με τη χρήση γραμμικής και μη

γραμμικής παλινδρόμησης, και μετέπειτα υπολογισμό του LST μέσω του συντελεστή εκπομπής υψηλής χωρικής ανάλυσης. Τα αποτελέσματα της υποκλιμάκωσης καταδεικνύουν ότι η παλινδρόμηση τύπου ridge υπερτερεί των άλλων μεθόδων στατιστικών υποκλιμάκωσης, με ένα μέσο σφάλμα RMSE της τάξης των 1.96 K και 1.21 K για τις πρωινές και τις νυχτερινές εκτιμώμενες επιφανειακές θερμοκρασίες αντίστοιχα. Κατά τη σύγκριση του προτεινόμενου μοντέλου στατιστικής υποκλιμάκωσης (Radiance-RR) με τη μεθοδολογία αναφοράς (DisTrad), παρατηρήθηκε μία σαφής βελτίωση της τάξης του 29% για το RMSE (0.51 K).

Το παραπάνω μοντέλο σημείωσε επίσης καλύτερη απόδοση κατά τη σύγκρισή του με άλλα μοντέλα τα οποία έχουν προταθεί στο παρελθόν για χρήση στο αστικό περιβάλλον (βελτίωση κατά 0.45 K ως προς την τιμή του RMSE). Επιπρόσθετα, υπολογίστηκε ένα σφάλμα RMSE ίσο με 1.81 K κατά τη σύγκριση του εκτιμώμενου LST της μεθοδολογίας με επιτόπιες μετρήσεις επιφανειακής θερμοκρασίας. Το παραπάνω ενισχύει την αξιολόγηση του προτεινόμενου μοντέλου υποκλιμάκωσης ως μία αξιόπιστη πηγή επιφανειακών θερμοκρασιών υψηλή χωροχρονικής ανάλυσης, οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε ένα μεγάλο εύρος αστικών εφαρμογών. Στη παρούσα διατριβή, η μεθοδολογία υποκλιμάκωσης του LST αποτελεί απαραίτητη προϋπόθεση για τον υπολογισμό στο επόμενο κεφάλαιο των τυρβωδών ροών θερμότητας, καθώς και της καθαρής μεταβολής του ρυθμού αποθήκευσης θερμότητας, σε υψηλή χρονική και χωρική διακριτική ικανότητα (100 m). Αν και η παρούσα μελέτη εστίασε στη στατιστική υποκλιμάκωση των θερμικών καναλιών του αισθητήρα MODIS, το προτεινόμενο μοντέλο Radiance-RR, καθώς και τα συμπεράσματα της εργασίας σχετικά με την επίδραση του συντελεστή εκπομπής, των διαφορετικών μεταβλητών πρόβλεψης και των στατιστικών αλγορίθμων, μπορούν να βρουν άμεση εφαρμογή σε δορυφορικούς αισθητήρες παρόμοιων χαρακτηριστικών, όπως για παράδειγμα ο δορυφόρος Sentinel-3. Στην παρούσα εργασία ο Sentinel-3 δεν χρησιμοποιήθηκε λόγω της μη ύπαρξης καταγραφών του πριν το 2016, κάτι ήταν απαραίτητο σε διάφορα σημεία της μελέτης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

Αστικές Ροές Ενέργειας και Δείκτης Αστικής Θερμικής Έκθεσης

5.1 Εισαγωγή

Η θερμική επίδραση μιας πόλης στις ατμοσφαιρικές παραμέτρους του υπερκείμενου αέρα σχετίζεται κατά κύριο λόγο με (Oke et al., 2017): α) την αστική μορφολογία —δηλ. τις ιδιότητες των υλικών της επιφάνειας, την ποσοστιαία κατανομή των διαφορετικών τύπων κάλυψης γης και την τρισδιάστατη αστική δομή— και β) την αστική λειτουργία —δηλ. τις εκπομπές θερμότητας με προέλευση τις καθημερινές δραστηριότητες των κατοίκων μιας πόλης. Τις τελευταίες δεκαετίες, πλήθος μελετών έχουν διενεργηθεί με σκοπό τη μέτρηση της θερμικής νησίδας του κτηριακού στρώματος (UHI_{UCL}) (Fortuniak et al., 2006; van Hove et al., 2015; Skarbit et al., 2017) και τον προσδιορισμό της επιφανειακής θερμικής νησίδας (Surface Urban Heat Island, SUHI) μέσω τεχνικών τηλεπισκόπησης (Keramitsoglou et al., 2011; Parlow et al., 2014; Bonafoni et al., 2015). Η αστική υπερθέρμανση έχει βρεθεί να εμφανίζει ισχυρή συσχέτιση με την αύξηση των ενεργειακών καταναλώσεων για ψύξη (Magli et al., 2015; Santamouris et al., 2015) και υψηλότερα ποσοστά ασθενειών και θνησιμότητας (Nastos and Matzarakis, 2012; Heaviside et al., 2016; Paravantis et al., 2017; Pyrgou and Santamouris, 2018). Κατά τη διάρκεια καυσωνικών επεισοδίων, η πλεονάζουσα αστική θερμότητα έχει αποδειχθεί ότι μπορεί να καταστεί εξαιρετικά επικίνδυνη για την υγεία των κατοίκων πόλεων ακόμα και μεγαλύτερων γεωγραφικών πλατών (Fouillet et al., 2006; Kosatsky et al., 2012).

Το φαινόμενο της κλιματικής αλλαγής ενισχύει περαιτέρω τις αρνητικές συνέπειες του UHI, καθώς οδηγεί στη συνολική θέρμανση του κλιματικού συστήματος και αναμένεται να προκαλέσει συχνότερα και πιο έντονα επεισόδια καύσωνα (Stocker, 2014). Τα μέτρα ως προς τον μετριασμό της αστικής θερμικής νησίδας συνδέονται πλέον άμεσα με τις αναπτυσσόμενες πολιτικές περιορισμού των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής (Rosenzweig et al., 2011), με τις πόλεις να αποκτούν κεντρικό ρόλο στις διεθνείς διασκέψεις, όπως για παράδειγμα στην πρόσφατη Συμφωνία των Παρισίων στη Σύμβαση-Πλαίσιο των Ηνωμένων Εθνών για την κλιματική αλλαγή.

Οι επιδράσεις της κλιματικής αλλαγής (Shonkoff et al., 2011; Grineski et al., 2012) και των εν γένει αυξημένων αστικών θερμικών πιέσεων (Mitchell and Chakraborty, 2015; Voelkel et al., 2018), δεν πλήττουν στον ίδιο βαθμό το σύνολο των κατοίκων μιας πόλης. Εκτός από τα ιδιαίτερα γνωρίσματα που προσδιορίζουν τις πιο ευπαθείς ομάδες ενός πληθυσμού (π.χ. ηλικιωμένοι, χρόνια ασθενείς), η παραπάνω ανισοκατανομή των αρνητικών επιδράσεων οφείλεται στη μεγάλη ενδοαστική

διακύμανση των επιφανειακών μικροκλιμάτων μιας πόλης. Οι κυβερνητικοί φορείς και οι τοπικές αρχές χρειάζονται αξιόπιστα κλιματικά εργαλεία ως προς τον εντοπισμό των πιο θερμικά ευάλωτων περιοχών μιας πόλης, πριν τον σχεδιασμό και την υλοποίηση πολιτικών για τον μετριασμό της θερμικής νησίδας και την προσαρμογή στην κλιματική αλλαγή (Ren et al., 2013).

Το σύστημα ταξινόμησης των «τοπικών κλιματικών ζωνών» (Local Climate Zones, LCZ) (Stewart and Oke, 2012) κατηγοριοποιεί τις αστικές περιοχές με βάση την αστική μορφολογία και λειτουργία σε διακριτές τοπικής κλίμακας ζώνες οι οποίες παρουσιάζουν ομοιόμορφα θερμικά κλίματα. Στον Πίνακα 5-1 παρουσιάζονται οι διαφορετικές κατηγορίες LCZ, σε συνδυασμό με τις τιμές των σημαντικότερων παραμέτρων τους. Με τη χαρτογράφηση μιας αστικής περιοχής σε LCZ, μπορούν να αναδειχθούν πολύτιμες πληροφορίες ως προς τη χωρική κατανομή των θερμικών χαρακτηριστικών στο εσωτερικό της πόλης (Alexander and Mills, 2014; Kaloustian and Bechtel, 2016; Arnds et al., 2017). Ωστόσο, η ανάπτυξη της ταξινόμησης σε LCZ κατά τους Stewart and Oke (2012), πραγματοποιήθηκε πρωτίστως για τη διάκριση των βασικών μορφολογιών του αστικού περιβάλλοντος με σκοπό την καλύτερη επιλογή και την τυποποιημένη περιγραφή των περιοχών κατά την πειραματική μελέτη του UHI. Επομένως εκ κατασκευής, οι τάξεις των LCZ είναι σε έναν βαθμό γενικευμένες· ως αποτέλεσμα έχει παρατηρηθεί διαφοροποίηση των θερμικών χαρακτηριστικών μίας συγκεκριμένης LCZ τάξης για διαφορετικές περιοχές μέσα σε μια πόλη (Skarbit et al., 2017; Fenner et al., 2017; Quanz et al., 2018). Η παραπάνω εσωτερική διακύμανση των LCZ, μπορεί σε σημαντικό βαθμό να αποδοθεί στο μη αμελητέο εύρος των τιμών των παραμέτρων για κάθε επιμέρους τάξη των LCZ. Περαιτέρω αβεβαιότητα στην περιγραφή μιας πόλης μέσω των LCZ εμφανίζεται στην περίπτωση κατά την οποία η ταξινόμηση πραγματοποιείται με έμμεσο τρόπο, πραγματοποιώντας χρήση δορυφορικών εικόνων (πρόγραμμα World Urban Database and Access Portal Tools, WUDAPT) (Bechtel, Alexander, et al., 2019).

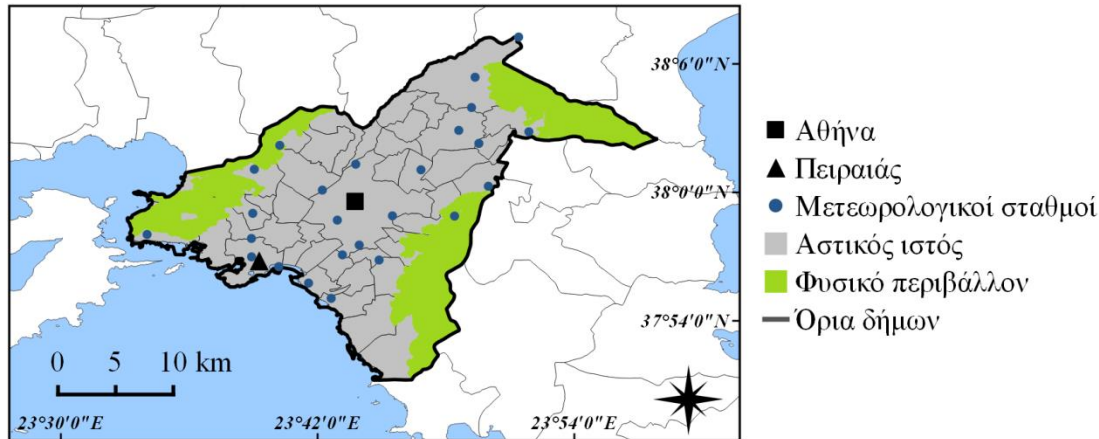
Ένας συνδυαστικός δείκτης ο οποίος θα ενσωματώνει τα κυρίαρχα αίτια δημιουργίας του UHI, έχει τη δυνατότητα να αποτελέσει έναν εναλλακτικό τρόπο για την περιγραφή των χαρακτηριστικών του θερμικού περιβάλλοντος μιας πόλης. Αρκετές μελέτες έχουν χρησιμοποιήσει θερμικούς περιβαλλοντικούς δείκτες στο παρελθόν, είτε ως επιμέρους συνιστώσα στο πλαίσιο των Αστικών Κλιματικών Χαρτών (Urban Climatic Map, UCM) (Ng et al., 2008; Ren et al., 2013; Smith et al., 2015), είτε ως αυτόνομο δείκτη (Mitchell and Chakraborty, 2015; Alavipanah et al., 2018; Hu and Xu, 2018). Ωστόσο, στην πλειονότητα των περιπτώσεων των θερμικών δεικτών, καθοριστικά χαρακτηριστικά της αστικής μορφολογίας και λειτουργίας δεν λαμβάνονται υπόψη. Η τρισδιάστατη πολυπλοκότητα των πόλεων συχνά παραλείπεται στις σχετικές μελέτες (Alavipanah et al., 2017), ενώ δυναμικές αστικές διαδικασίες —όπως για παράδειγμα οι τυρβώδεις ανταλλαγές ενέργειας και οι ανθρωπογενείς εκπομπές θερμότητας— δεν εισάγονται με άμεσο τρόπο στον θερμικό δείκτη.

Πίνακας 5-1 Το σύστημα των Τοπικών Κλιματικών Ζωνών (Local Climate Zones, LCZ). Πηγή: Stewart and Oke (2012).

LCZ	ψ_{sky}	H/W	λ_b	λ_i	λ_v	H	Q_F
LCZ 1 Compact highrise	0.2–0.4	> 2	40–60	40–60	< 10	> 25	50–300
LCZ 2 Compact midrise	0.3–0.6	0.75–2	40–70	30–50	< 20	10–25	< 75
LCZ 3 Compact lowrise	0.2–0.6	0.75–1.5	40–70	20–50	< 30	3–10	< 75
LCZ 4 Open highrise	0.5–0.7	0.75–1.25	20–40	30–40	30–40	> 25	< 50
LCZ 5 Open midrise	0.5–0.8	0.3–0.75	20–40	30–50	20–40	10–25	< 25
LCZ 6 Open lowrise	0.6–0.9	0.3–0.75	20–40	20–50	30–60	3–10	< 25
LCZ 7 Lightweight lowrise	0.2–0.5	1–2	60–90	< 20	< 30	2–4	< 35
LCZ 8 Large lowrise	> 0.7	0.1–0.3	30–50	40–50	< 20	3–10	< 50
LCZ 9 Sparsely built	> 0.8	0.1–0.25	10–20	< 20	60–80	3–10	< 10
LCZ 10 Heavy industry	0.6–0.9	0.2–0.5	20–30	20–40	40–50	5–15	> 300
LCZ A Dense Trees	< 0.4	> 1	< 10	< 10	> 90	3–30	–
LCZ B Scattered Trees	0.5–0.8	0.25–0.75	< 10	< 10	> 90	3–15	–
LCZ C Bush, shrub	0.7–0.9	0.25–1.0	< 10	< 10	> 90	< 2	–
LCZ D Low plants	> 0.9	< 0.1	< 10	< 10	> 90	< 1	–
LCZ E Bare rock or paved	> 0.9	< 0.1	< 10	> 90	< 10	< 0.25	–
LCZ F Bare soil or sand	> 0.9	< 0.1	< 10	< 10	> 90	< 0.25	–
LCZ G Water	> 0.9	< 0.1	< 10	< 10	> 90	–	–

Στην παρούσα εργασία αναπτύσσεται και προτείνεται ένας νέος θερμικός δείκτης, ο δείκτης «Αστικής Θερμικής Έκθεσης» (Urban Heat Exposure, UHeatEx), ο οποίος και διαμορφώνεται ειδικότερα για το Πολεοδομικό Συγκρότημα της Πρωτεύουσας (ΠΣΠ) (Σχήμα 5-1) σε υψηλή χωρική διακριτική ικανότητα (100 m). Ο UHeatEx ενσωματώνει τις κυριότερες φυσικές διαδικασίες που επηρεάζουν και εντέλει διαμορφώνουν τα τοπικά επιφανειακά μικροκλίματα μιας πόλης, τροποποιούν το επιφανειακό ενεργειακό ισοζύγιο και επιφέρουν την εμφάνιση του UHI. Οι παραπάνω διαδικασίες μπορούν να συνοψιστούν στα ακόλουθα (Oke, 1982; Stewart and Oke, 2012):

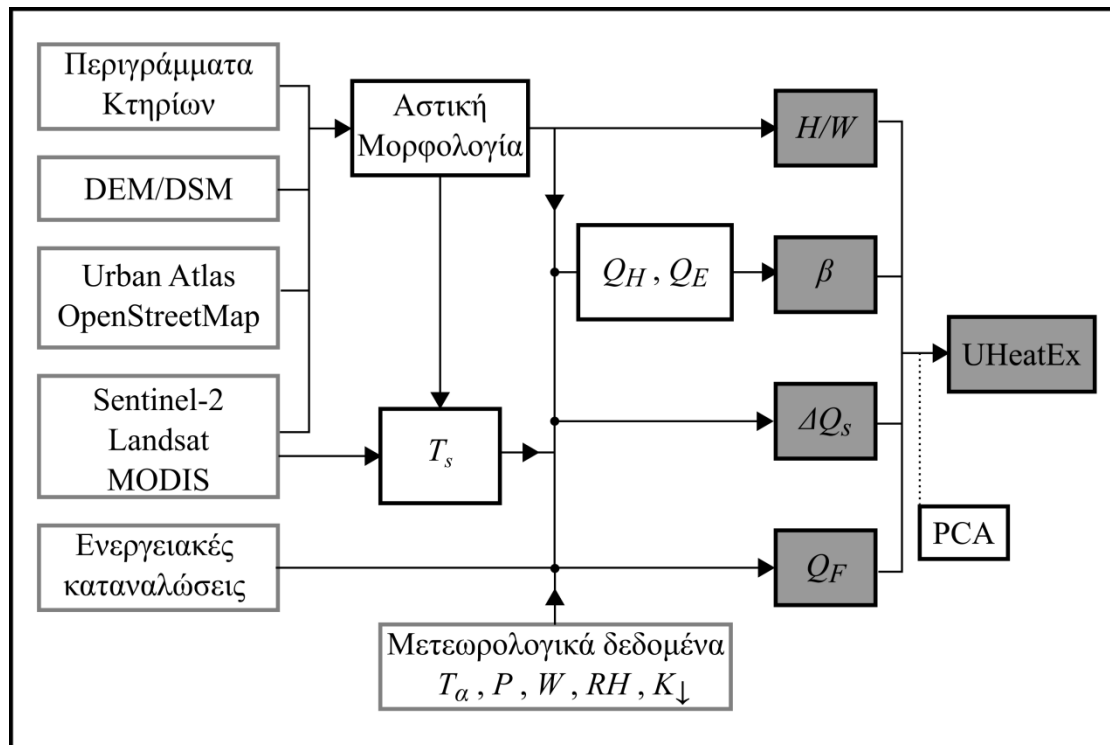
- Οι υψηλές τιμές του πηλίκου του ύψους των κτηρίων (H) προς το πλάτος των δρόμων (W) —αναλογία διαστάσεων αστικής χαράδρας (H/W)— προκαλούν α) την παγίδευση της ακτινοβολίας στη χαράδρα, δηλ. την αύξηση της απορρόφησης της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας λόγω πολλαπλών ανακλάσεων στους τοίχους των κτηρίων (Aida, 1982; Krayenhoff and Voogt, 2007), και β) την ελάττωση των θερμικών απωλειών μέσω της παρεμπόδισης της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας μεγάλου μήκους κύματος (Arnfield, 1990; Voogt and Oke, 1991).
- Οι αδιαπέρατες αστικές επιφάνειες χαρακτηρίζονται από μερική έως πλήρη έλλειψη επιφανειακής υγρασίας. Έτσι, ευνοούν τον επιμερισμό της ηλιακής ακτινοβολίας στη μορφή της αισθητής ροής θερμότητας (Q_H) αντί της λανθάνουσας ροής (Q_E), δηλ. ο λόγος Bowen ($\beta = Q_H/Q_E$) λαμβάνει υψηλότερες τιμές συγκριτικά με τις φυσικές επιφάνειες. Συνεπώς, ελαττώνεται ο δροσισμός του αστικού περιβάλλοντος λόγω περιορισμού της λανθάνουσας ψύξης εξάτμισης (Oke, 1988; Ward and Grimmond, 2017).
- Η υψηλή θερμική αδράνεια των δομικών υλικών και συνολικότερα του αστικού περιβάλλοντος λόγω της διάταξης των στοιχείων του, προκαλεί σημαντικό ποσοστό θερμότητας από την απορροφούμενη ηλιακή ακτινοβολία να αποθηκεύεται κατά τη διάρκεια της ημέρας στο εσωτερικό του αστικού ιστού και να εκλύεται κατά τις νυχτερινές ώρες, συντηρώντας με αυτόν τον τρόπο την αστική θέρμανση (Grimmond and Oke, 1999b). Δηλαδή, στις αστικές περιοχές καταγράφεται μεγάλη καθαρή μεταβολή του ρυθμού αποθήκευσης θερμότητας (ΔQ_s).
- Η πυκνότητα ροής της ανθρωπογενούς θερμότητας (Q_F) (π.χ. η εκλύομενη θερμότητα λόγω της κίνησης των οχημάτων ή κατά τη χρήση κλιματιστικών συστημάτων) αποτελεί μία επιπρόσθετη πηγή ενέργειας στο επιφανειακό ενεργειακό ισοζύγιο (Sailor, 2011).



Σχήμα 5-1 Περιοχή ανάπτυξης και εφαρμογής του δείκτη αστικής θερμικής έκθεσης, χρήσεις γης, και τοποθεσία των μετεωρολογικών σταθμών. Πηγές δεδομένων: χρήσεις γης: Urban Atlas, θέσεις σταθμών: Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών.

Οι ανωτέρω τέσσερις, καθοριστικής σημασίας για το αστικό κλίμα, παράμετροι (H/W , β , ΔQ_s και Q_F) υπολογίζονται στην παρούσα εργασία μέσω μετεωρολογικών και δορυφορικών παρατηρήσεων, των μεθοδολογιών υποκλιμάκωσης του LST και φασματικής ταξινόμησης από το Κεφάλαιο 4, καθώς και τεχνικών Γεωγραφικού Συστήματος Πληροφοριών (Geographical Information System, GIS). Οι διαφορετικές μεταβλητές ενσωματώνονται επακόλουθα στον δείκτη UHeatEx μέσω της μεθόδου «ανάλυσης στις κύριες συνιστώσες» (Principal Components Analysis, PCA). Στο Σχήμα 5-2 δίνεται το διάγραμμα ροής το οποίο αποτυπώνει τη συνολική μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για τον προσδιορισμό των H/W , β , ΔQ_s , Q_F και του δείκτη UHeatEx, και η οποία θα παρουσιαστεί αναλυτικά στην Ενότητα 5.2 που ακολουθεί.

Παράλληλα στο παρόν κεφάλαιο, θα πραγματοποιηθεί η χαρτογράφηση της αστικής περιοχής της Αθήνας σε LCZ και θα αναλυθούν οι διαφορές και οι ομοιότητες της παραπάνω ταξινόμησης με τα αποτελέσματα του UHeatEx. Και οι δύο ταξινομήσεις συσχετίζονται με καταγραφές της θερμοκρασίας αέρα από ένα δίκτυο αυτόματων μετεωρολογικών σταθμών της περιοχής ενδιαφέροντος για μία περίοδο έξι ετών (για τους μήνες του έτους που αντιστοιχούν στη θερμή περίοδο). Μέσω ποιοτικής και ποσοτικής ανάλυσης θα εξεταστεί η ύπαρξη άνισης κατανομής των χαρακτηριστικών του θερμικού περιβάλλοντος της Αθήνας και θα διερευνηθεί η συσχέτισή της με τα κοινωνικο-οικονομικά χαρακτηριστικά του πληθυσμού. Η όλο και αυξανόμενη σημασία των θερμικών δεικτών σε εφαρμογές βιώσιμου αστικού σχεδιασμού, λόγω της κλιματικής αλλαγής, αναδεικνύεται με την παρουσίαση των μελλοντικών συνθηκών της πόλης μέσω κλιματικών προσομοιώσεων. Συγκεκριμένα, παρουσιάζονται υψηλής χωρικής ανάλυσης κλιματικές προβολές μέσω αποτελεσμάτων «περιοχικών κλιματικών μοντέλων» (Regional Climate Models, RCM).



Σχήμα 5-2 Διάγραμμα ροής της μεθοδολογίας για τον υπολογισμό του δείκτη αστικής θερμικής έκθεσης (UHeatEx). Το σύνολο των συμβόλων δίνεται στο κείμενο.

5.2 Δεδομένα και μεθοδολογία

5.2.1 Αστική μορφολογία

Μια λεπτομερής χαρτογράφηση της αστικής μορφολογίας (τύπος υλικών, κατανομή κάλυψης γης και γεωμετρική δομή) είναι αναγκαία για τον υπολογισμό της παραμέτρου της αναλογίας διαστάσεων της αστικής χαράδρας (H/W) και για τον προσδιορισμό των απαραίτητων βοηθητικών δεδομένων κατά τον προσδιορισμό των αστικών ροών ενέργειας. Η ταξινόμηση της κάλυψης γης ως προς δέκα ανθρωπογενή και φυσικά στοιχεία σε υψηλή χωρική ανάλυση (10×10 m) προήλθε από τα αποτελέσματα του Κεφαλαίου 4 (Ενότητα 4.3.1). Όπως παρουσιάστηκε αναλυτικά εκεί, η φασματική ταξινόμηση πραγματοποιήθηκε μέσω της χρήσης δορυφορικών παρατηρήσεων Sentinel-2, σε συνδυασμό με δεδομένα χρήσεων γης και ψηφιακών υψομετρικών μοντέλων. Διανυσματικά δεδομένα των κτηριακών περιγραμμάτων (building footprints) της Αθήνας ήταν διαθέσιμα μέσω της Ελληνικής Στατιστικής Αρχής (<http://www.statistics.gr/el/digital-cartographical-data>) και των χαρτογραφικών δεδομένων OpenStreetMap (OpenStreetMap contributors, 2019). Για τις περιοχές όπου δεν υπήρχε κάλυψη των παραπάνω δεδομένων ακολουθήθηκε ψηφιοποίηση τους μέσω υψηλής χωρικής ανάλυσης αεροφωτογραφιών του Ελληνικού Κτηματολογίου.

Το ύψος (H) των αστικών στοιχείων (π.χ. κτήρια και δέντρα) υπολογίστηκε μέσω της χρήσης των υψομετρικών μοντέλων DEM και DSM (βλ. Ενότητα 4.3.2.1). Μέσω του συνδυασμού του συνόλου των ανωτέρω δεδομένων υπολογίστηκε επακόλουθα η ποσοστιαία επιφανειακή κάλυψη (ως

προς την ολική επιφάνεια εικονοστοιχείου χωρικής κλίμακας 100×100 m): των κτηρίων (λ_b), β) του εμβαδού των ορόφων των κτηρίων (λ_{floor}), του αδιαπέρατου εδάφους (λ_i), της ελεύθερης επιφάνειας των τοίχων (λ_w), της βλάστησης (λ_v), του χώματος (λ_{soil}) και της θαμνώδους βλάστησης (λ_{shr}). Η μετωπική αναλογία διαστάσεων (λ_f) υπολογίστηκε μέσω της κάθετης προβολής των ελεύθερων προσήνεμων επιφανειών των κτηρίων και των δέντρων στη διεύθυνση του διανύσματος του ανέμου (εξετάζοντας διαφορετικές γωνίες του ανέμου, ανά 15°).

Η αυτοματοποιημένη εξαγωγή της παραμέτρου H/W για το σύνολο μιας αστικής περιοχής εμφανίζει σημαντική δυσκολία, λόγω της έντονης πολυπλοκότητας που χαρακτηρίζει το αστικό περιβάλλον. Στο παρελθόν για τον υπολογισμό του H/W έχει εξεταστεί η χρησιμοποίηση των σημείων τομής μεταξύ των περιγραμμάτων των κτηρίων και ευθύγραμμων διαδρομών ανά διαφορετικές διευθύνσεις (Burian et al., 2002; Jhaldiyal et al., 2018). Για την περίπτωση αστικών περιοχών με σχετικά ακανόνιστη διάταξη των οικοδομικών τετραγώνων (όπως η πλειοψηφία των Ευρωπαϊκών πόλεων) η συγκεκριμένη μέθοδος αδυνατεί να εφαρμοστεί με ακρίβεια παρά μόνον με τη θεώρηση ενός πολύ μεγάλου αριθμού διαφορετικών διευθύνσεων. Μία εναλλακτική προσέγγιση ως προς τον προσδιορισμό του H/W αποτελεί ο υπολογισμός της απόστασης μεταξύ τοπικών μεγίστων (local distance maxima) του μέσου ύψους των κτηρίων (Lindberg et al., 2015). Για την εφαρμογή της παραπάνω μεθόδου απαιτείται η χρήση αρχείων ψηφιδωτής (raster) μορφής σε πολύ υψηλή χωρική ανάλυση (< 1 m), αυξάνοντας σε μεγάλο βαθμό το υπολογιστικό κόστος κατά την εφαρμογή της σε όλη την έκταση μιας πόλης.

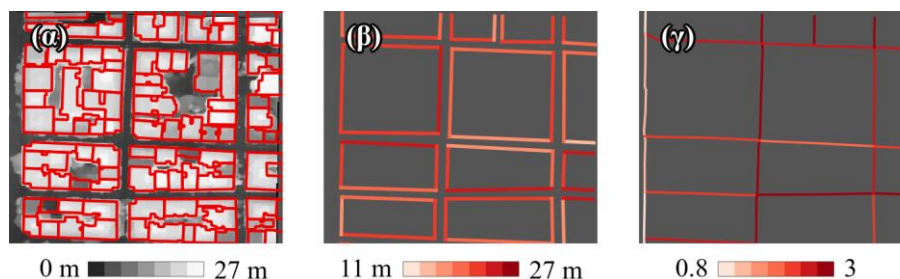
Εδώ, προτείνεται μία νέα προσέγγιση του υπολογισμού της αναλογίας διαστάσεων H/W , εφαρμόζοντας μια συνδυαστική χρήση αλγορίθμων GIS και βασιζόμενοι στο διαχωρισμό μιας πόλης σε ορισμένες βασικές αστικές μονάδες: α) τα οικοδομικά τετράγωνα, β) τα κτήρια και γ) τους δρόμους. Τα βήματα της χρησιμοποιούμενης μεθοδολογίας για τον προσδιορισμό του H/W μπορούν να συνοψιστούν ως εξής:

- i. Τα κτήρια αρχικά ομαδοποιούνται με βάση τα οικοδομικά τετράγωνα εντός των οποίων περιλαμβάνονται. Για κάθε ομαδοποιημένο σύνολο κτηρίων κατασκευάζεται το κυρτό πολύγωνο με την ελάχιστη περίμετρο το οποίο περικλείει στο εσωτερικό του το σύνολο των πολυγώνων των κτηρίων. Το παραπάνω κυρτό πολύγωνο που ικανοποιεί τις παραπάνω ιδιότητες αναφέρεται ως «κυρτό κέλυφος» (convex hull). Η χρήση του αντί των οικοδομικών τετραγώνων επιτρέπει τη διάκριση της επιφάνειας των δρόμων-πεζοδρομίων από την επιφάνεια που καταλαμβάνουν τα κτήρια. Δεν γίνεται απ' ευθείας χρήση των περιγραμμάτων των κτηρίων, καθώς καθ' αυτόν τον τρόπο θα παραλείπονταν οι κενές επιφάνειες μεταξύ τους.
- ii. Στη συνέχεια, πραγματοποιείται μια ανακατανομή των κτηρίων ως προς τις εγγύτερες, επιμέρους πλευρές των κυρτών κελυφών (δηλ. ανά τις διαφορετικές οδούς στις οποίες αντιστοιχεί η πρόσοψή τους). Για κάθε πλευρά υπολογίζεται το μέσο ύψος H —τα κτήρια

που βρίσκονται στις γωνίες των κελυφών/δρόμων συνυπολογίζονται και στις δύο αντίστοιχες πλευρές.

- iii. Οι αστικοί δρόμοι κατασκευάζονται ως οι «κεντρικές γραμμές» (centerlines) μεταξύ των αντικρινών πλευρών των κυρτών κελυφών. Οι κεντρικές γραμμές αποτελούν το σύνολο των γεωμετρικών σημείων τα οποία ισαπέχουν από τις παραπάνω πλευρές. Μια άμεση χρησιμοποίηση διανυσματικών δεδομένων του οδικού δικτύου δεν είναι εφικτή, καθώς αυτά κατά κανόνα δεν είναι ευθυγραμμισμένα στους άξονες που τέμνουν τον κενό χώρο μεταξύ των οικοδομικών τετραγώνων.
- iv. Υπολογίζεται επακόλουθα η κάθετη (ελάχιστη) απόσταση μεταξύ των πλευρών των κυρτών κελυφών και της κοντινότερης τους κεντρικής γραμμής. Το διπλάσιο αυτής της απόστασης αντιστοιχεί στο πλάτος του οδοστρώματος συν το πλάτος των πεζοδρομίων (δηλ. στο πλάτος δρόμου W).
- v. Η αναλογία διαστάσεων κάθε αστικής χαράδρας υπολογίζεται τελικώς ως η μέση τιμή του ύψους H επί των δύο πλευρικών κυρτών κελυφών (δηλ. των παρακείμενων κτηρίων μιας οδού) προς το προηγουμένως υπολογιζόμενο πλάτος των δρόμων W .

Μία οπτική αποτύπωση της παραπάνω μεθοδολογίας δίνεται στο Σχήμα 5-3. Για τις περιοχές ελεύθερων αστικών χώρων ή/και ακανόνιστων διατάξεων των κτηρίων, όπου η αστική χαράδρα δεν μπορεί να οριστεί, η παράμετρος H/W υπολογίζεται χρησιμοποιώντας τις μέσες αποστάσεις μεταξύ των κτηρίων (spacing) αντί για το πλάτος των δρόμων (Oke et al., 2017).



Σχήμα 5-3 Βήματα προσδιορισμού της αναλογίας διαστάσεων αστικής χαράδρας (H/W): (α) ύψος αστικών στοιχείων (m) (με κόκκινη γραμμή δίνονται τα περιγράμματα των κτηρίων), (β) το μέσο ύψος (m) της πλευράς κάθε οδού και (γ) το H/W για κάθε οδό.

Το σύνολο των παραμέτρων της αστικής μορφολογίας υπολογίστηκε σε τελική χωρική διακριτική ικανότητα 100 m. Για την περίπτωση των παραμέτρων για τις οποίες ο υπολογισμός του γίνεται αρχικά σε υψηλότερη χωρική ανάλυση (π.χ. για το H/W), πραγματοποιείται στη συνέχεια αναδειγματοληψία στην παραπάνω χωρική κλίμακα. Για τις επί των ορεινών όγκων περιοχές καθαρού φυσικού περιβάλλοντος στα περίχωρα της πόλης (βλ. Σχήμα 5-1), δεν υπάρχουν διαθέσιμα δεδομένα του υψομετρικού μοντέλου DSM, ενώ επιπρόσθετα βρίσκονται εκτός της περιοχής ενδιαφέροντος για την εφαρμογή του αστικού θερμικού περιβαλλοντικού δείκτη. Κατά συνέπεια, για τις συγκεκριμένες

περιοχές δεν πραγματοποιήθηκε ο υπολογισμός των παραμέτρων τόσο της παρούσας ενότητας όσο και των επόμενων ενότητων.

5.2.2 Τοπικές κλιματικές ζώνες (LCZ)

Ο προσδιορισμός των LCZ συνήθως πραγματοποιείται μέσω μίας εκ των δύο ακόλουθων προσεγγίσεων: α) μέσω της επιβλεπόμενης ταξινόμησης δορυφορικών εικόνων στο πλαίσιο του προγράμματος WUDAPT (Mills et al., 2015; Cai et al., 2016; Danylo et al., 2016; Ching et al., 2018; C Wang et al., 2018) και β) μέσω της απευθείας χρήσης δεδομένων της αστικής μορφολογίας (Mitraka, Del Frate, et al., 2015; Geletič and Lehnert, 2016; R Wang et al., 2018; Zheng et al., 2018). Η μέθοδος WUDAPT βρίσκει ευρεία εφαρμογή σε μελέτες LCZ, λόγω της δυνατότητας άμεσης εφαρμογής της, χωρίς την απαίτηση ειδικών δεδομένων αστικής μορφολογίας. Παρόλα αυτά, μέσω του WUDAPT προκύπτει εν γένει μικρότερη ακρίβεια ως προς τον εντοπισμό των διαφορετικών LCZ συγκριτικά με την περίπτωση όπου χρησιμοποιούνται συγκεκριμένες τιμές των τρισεπίστων αστικών παραμέτρων σε υψηλή χωρική ανάλυση (R Wang et al., 2018). Στην παρούσα εργασία, οι κατηγορίες των LCZ για την περιοχή του αστικού ιστού της Αθήνας θα αποδοθούν μέσω της αστικής μορφολογίας της, η οποία προσδιορίζεται μέσω της μεθοδολογίας η οποία περιγράφηκε στην προηγούμενη ενότητα. Η επιλογή της τελικής χωρικής ανάλυσης της εικόνας ταξινόμησης των LCZ δεν είναι σταθερή κατά τις διάφορες σχετικές ερευνητικές μελέτες (Zheng et al., 2018). Εδώ, επιλέχθηκε οι LCZ να προσδιοριστούν σε δύο χωρικές αναλύσεις: α) στα 100 m, η οποία είναι η ανάλυση στην οποία θα πραγματοποιηθεί επίσης ο υπολογισμός του δείκτη UHeatEx και β) στα 400 m, η οποία αντιστοιχεί στην ελάχιστη διάμετρο των LCZ όπως καθορίστηκε στη αρχική εργασία των Stewart and Oke (2012).

Χρησιμοποιώντας τα αποτελέσματα της χαρτογράφησης της αστικής μορφολογίας (Ενότητα 5.2.1) και τα εύρη των τιμών των παραμέτρων κάθε τάξης LCZ (βλ. Πίνακα 5-1) ακολουθούνται τα παρακάτω βήματα για την ταξινόμηση της περιοχής μελέτης σε LCZ:

- i. Αρχικά, τα εικονοστοιχεία διακρίνονται με βάση το κριτήριο εάν η αστική χαράδρα αποτελεί το κύριο μορφολογικό γνώρισμά της περιοχής που συμπεριλαμβάνουν. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε ένα ελάχιστο όριο της αναλογίας διαστάσεων ύψους-πλάτους (αστική χαράδρα για: $H/W > 0.3$) (Stewart and Oke, 2012), σε συνδυασμό με πληροφορία των χρήσεων γης από το Urban Atlas (διαχωρισμός των κατηγοριών του κυρίως αστικού ιστού ως προς τις υπόλοιπες κατηγορίες χρήσεων).
- ii. Για τις περιπτώσεις όπου ισχύει η παραπάνω προϋπόθεση (δηλ. μπορεί να οριστεί η αστική χαράδρα) οι LCZ χαρτογραφούνται με βάση τα όρια των επιμέρους παραμέτρων του Πίνακα 5-1 που δεν εμφανίζουν αλληλοεπικάλυψη. Συγκεκριμένα τα σημεία της εικόνας αρχικά διαχωρίζονται ως προς το ύψος των αστικών στοιχείων (δηλ. γίνεται η διάκριση των «high-rise», «mid-rise» και «low-rise») και επακόλουθα με βάση την

πυκνότητα δόμησης (δηλ. γίνεται η περαιτέρω διάκριση στις υποκατηγορίες «compact» και «open»).

- iii. Αντίστοιχα, στην περίπτωση όπου τα εικονοστοιχεία αντιστοιχούν σε περιοχές με ακανόνιστη διάταξη κτηρίων ή περιοχές καλυμμένες με βλάστηση, οι παράμετροι H , λ_b , λ_i , λ_v , λ_s και λ_{shr} χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό των υπόλοιπων κατηγοριών LCZ.

5.2.3 Τυρβώδεις ροές ενέργειας – Λόγος Bowen

Για τον υπολογισμό των τυρβωδών ροών ενέργειας σε φυσικό (Bastiaanssen et al., 1998; Liu et al., 2007; Andreu et al., 2018) ή ανθρωπογενές περιβάλλον (Kato and Yamaguchi, 2005; Chrysoulakis et al., 2018; Crawford, Grimmond, et al., 2018) χρησιμοποιούνται συχνά τεχνικές τηλεπισκόπησης. Κατά τη συγκεκριμένη προσέγγιση, η ροή αισθητής θερμότητας (Q_H) μπορεί να περιγραφεί μέσω μιας «bulk» εξίσωσης μεταφοράς για την τοπική κλίμακα (Kanda et al., 2007):

$$Q_H = \rho c_p \frac{T_0 - T_a}{r_H} \quad (5.1)$$

όπου ρ η πυκνότητα του αέρα (kg m^{-3}), c_p η ειδική θερμότητα του αέρα υπό σταθερή πίεση ($\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$), T_a η θερμοκρασία του αέρα (K), T_0 η αεροδυναμική επιφανειακή θερμοκρασία (K) και r_H η αεροδυναμική αντίσταση ως προς τη μεταφορά θερμότητας (s m^{-1}).

Το T_0 θεωρήθηκε ότι είναι ίσο με την επιφανειακή θερμοκρασία εδάφους (T_s), όπως προσδιορίζεται μέσω δορυφορικών καταγραφών στο θερμικό υπέρυθρο (Crawford, Grimmond, et al., 2018). Η εφαρμογή της μεθοδολογίας υποκλιμάκωσης του αισθητήρα MODIS που αναπτύχθηκε στο Κεφάλαιο 4, μας δίνει τη δυνατότητα για τη χρησιμοποίηση υψηλής χωρικής και χρονικής ανάλυσης δεδομένα επιφανειακής θερμοκρασίας. Όσον αφορά το T_a , καθώς και για τα υπόλοιπα μετεωρολογικά δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν στο παρόν κεφάλαιο —ατμοσφαιρική πίεση (P), ταχύτητα ανέμου (W), σχετική υγρασία (RH) και προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία ($K\downarrow$)—, οι τιμές τους προήλθαν από τις μετρήσεις (σε επίπεδο άνω της οροφής των κτηρίων) του εκτεταμένου δικτύου αστικών, αυτόματων μετεωρολογικών σταθμών του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών (Lagouvardos et al., 2017) (βλ. Σχήμα 5-1). Τα παραπάνω δεδομένα είναι προσβάσιμα μέσω διαδικτυακής εφαρμογής (<http://stratus.meteo.noa.gr/front>). Για τα παραπάνω μετεωρολογικά δεδομένα ακολουθήθηκε στη συνέχεια χωρική παρεμβολή στην περιοχή μελέτης, εφαρμόζοντας τη γεωστατική τεχνική regression kriging και χρησιμοποιώντας το υψόμετρο ως βοηθητική μεταβλητή (Hudson and Wackernagel, 1994) (το $K\downarrow$ θεωρήθηκε σταθερό για όλη την εξεταζόμενη περιοχή).

Το r_H προκύπτει μέσω της αεροδυναμικής αντίστασης ως προς τη μεταφορά ορμής (r_M) συν μια «επιπρόσθετη αντίσταση» (excess resistance) r_b (βλ. Ενότητα 2.3.4):

$$r_H = r_M + r_b$$

$$= \frac{1}{\kappa u_*} \left[\ln \left(\frac{z - z_d}{z_{0M}} \right) - \Psi_H \left(\frac{z - z_d}{L} \right) + \Psi_H \left(\frac{z_{0H}}{L} \right) \right] + \frac{1}{\kappa u_*} \left[\ln \left(\frac{z_{0M}}{z_{0H}} \right) \right] \quad (5.2)$$

όπου κ η σταθερά Von Κάρμάν, u_* η ταχύτητα τριβής (m s^{-1}), z το ύψος μέτρησης (m), z_d το επίπεδο μηδενικής μετατόπισης (m), Ψ_H η συνάρτηση ευστάθειας για τη μεταφορά θερμότητας, L το μήκος Obukhov (m), z_{0M} το μήκος τραχύτητας για την ορμή (m) και z_{0H} το μήκος τραχύτητας για τη θερμότητα (m). Η ταχύτητα τριβής δίνεται αντίστοιχα από την ακόλουθη εξίσωση:

$$u_* = U \kappa \left[\ln \left(\frac{z - z_d}{z_{0M}} \right) - \Psi_M \left(\frac{z - z_d}{L} \right) + \Psi_M \left(\frac{z_{0M}}{L} \right) \right]^{-1} \quad (5.3)$$

όπου U η ταχύτητα του ανέμου (m s^{-1}) και Ψ_M η συνάρτηση ευστάθειας για τη μεταφορά ορμής.

Ο λόγος μεταξύ του μήκους τραχύτητας της ορμής και της θερμότητας εκφράζεται μέσω της εξής παραμέτρου:

$$\kappa B^{-1} = \ln \left(\frac{z_{0M}}{z_{0H}} \right) \quad (5.4)$$

Η θεωρητική σχέση σύμφωνα με την οποία η παραπάνω ποσότητα εκφράζεται μέσω μετεωρολογικών παραμέτρων είναι η ακόλουθη (Brutsaert, 1982):

$$\kappa B^{-1} = \alpha Re^{*0.25} - 2 \quad (5.5)$$

$$Re^* = \frac{u_* z_{0M}}{\nu} \quad (5.6)$$

όπου Re^* ο αριθμός τραχύτητας Reynolds, α σταθερά και ν το κινηματικό ιξώδες του αέρα ($\nu = 1.46 \times 10^{-5} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$). Η πειραματική διερεύνηση με χρήση μοντέλων υπό κλίμακα των Kanda et al. (2007), οδήγησε στον προσδιορισμό της παραπάνω σταθεράς α , με τιμή $\alpha = 1.29$. Η παραπάνω σχέση θεωρείται εν γένει η πιο αξιόπιστη που συναντάται στη βιβλιογραφία κατά την εφαρμογή της Εξίσωσης 5.5 σε αστικό περιβάλλον, ωστόσο παρουσιάζει το μειονέκτημα ότι δεν συμπεριλαμβάνει την επίδραση της βλάστησης στο μήκος τραχύτητας. Έτσι, η παραμετροποίηση των Kanda et al. (2007) θα χρησιμοποιηθεί στην παρούσα μελέτη για τα εικονοστοιχεία με ελάχιστη παρουσία φυσικών επιφανειών —δηλ. για ποσοστό συνολικής αδιαπέρατης επιφάνειας ($\lambda_b + \lambda_i$) μεγαλύτερο του 95%. Για την υπόλοιπη εικόνα θα γίνει χρήση μιας περαιτέρω τροποποίησης της Εξίσωσης 5.5 η οποία ενσωματώνει την ποσοστιαία κάλυψη γης από βλάστηση (λ_v) (Kawai et al., 2009):

$$\kappa B^{-1} = (1.2 - 0.9\lambda_v^{0.29}) Re^{*0.25} - 2 \quad (5.7)$$

Για τον προσδιορισμό των αεροδυναμικών παραμέτρων του αστικού περιβάλλοντος (z_0 και z_d) χρησιμοποιούνται συχνά «μορφομετρικές μέθοδοι», οι οποίες προσδιορίζουν τις παραπάνω παραμέτρους μέσω των βασικών διαστάσεων των αστικών στοιχείων: του ύψους (H), της ποσοστιαίας επιφανειακής κάλυψης (λ_b) και της μετωπικής αναλογίας διαστάσεων (λ_f). Εδώ,

χρησιμοποιήθηκε η βελτιστοποίηση των μορφομετρικών σχέσεων των Macdonald et al. (1998) από τους Kent et al. (2017). Η τελευταία λαμβάνει υπόψη την επίδραση που προκύπτει στην αεροδυναμική τραχύτητα από την παρουσία δέντρων. Συγκεκριμένα στους Macdonald et al. (1998) είχαν αναπτυχθεί οι ακόλουθες σχέσεις για τον υπολογισμό των z_d και z_0 :

$$z_d = [1 + a^{-\lambda_p}(\lambda_p - 1)]H \quad (5.8)$$

$$z_0 = \left(\left(1 - \frac{z_d}{H}\right) \exp \left[- \left\{ 0.5\beta \frac{C_{Db}}{\kappa^2} \left(1 - \frac{z_d}{H}\right) \lambda_f \right\}^{-0.5} \right] H \right) \quad (5.9)$$

όπου a και β σταθερές ($a = 4.43$, $\beta = 1.0$ για εναλλασσόμενη (staggered) διάταξη κτηρίων, και $a = 3.59$, $\beta = 0.55$ για ομοιόμορφη διάταξη κτηρίων) και C_{Db} ο συντελεστής οπισθέλκουσας (drag) για τα κτήρια ($C_{Db} = 1.2$). Με βάση την τροποποίηση των Kent et al. (2017) ισχύει:

$$\lambda_p = \frac{A_b + (1 - P_{3D})A_v}{A_T} \quad (5.10)$$

$$\lambda_f = \frac{A_{fb} + P_v A_{fv}}{A_T} \quad (5.11)$$

$$P_{3D} = \frac{C_{Dv}}{C_{Db}} = \frac{-1.251P_{3D}^2 + 0.489P_{3D} + 0.803}{C_{Db}} \quad (5.12)$$

όπου P_{3D} ο συντελεστής πορώδους (τυπική τιμή $P_{3D} = 0.2$ για δέντρα που καλύπτονται με φύλλωμα), A_{fb} και A_{fv} η μετωπική επιφάνεια των κτηρίων και της βλάστησης αντίστοιχα, και C_{Dv} ο συντελεστής οπισθέλκουσας για τη βλάστηση.

Σε αναλογία με την Εξίσωση 5.1, μπορεί να γραφτεί η ακόλουθη σχέση για τον υπολογισμό της πυκνότητας ροής της λανθάνουσας θερμότητας Q_E :

$$Q_E = \rho L_v \frac{q_s - q}{r_v} \quad (5.13)$$

όπου L_v η λανθάνουσα θερμότητα της εξάτμισης ($J \text{ kg}^{-1}$), q_s η ειδική υγρασία κορεσμού σε θερμοκρασία T_0 ($kg \text{ kg}^{-1}$), q η ειδική υγρασία του αέρα ($kg \text{ kg}^{-1}$) και r_v η αεροδυναμική αντίσταση ως προς τη μεταφορά υδρατμών ($s \text{ m}^{-1}$). Για την τελευταία παράμετρο ισχύει:

$$r_v = r_H + r_s \quad (5.14)$$

με r_s να συμβολίζει την αντίσταση των στοματίων (stomatal resistance) των φυτών. Σύμφωνα με τους Nishida et al. (2003) το r_s μπορεί να προσδιοριστεί μέσω της εξίσωσης:

$$\frac{1}{r_s} = \frac{f_1(T_a)f_2(PAR)f_3(VPD)f_4(\psi)f_5(CO_2)}{r_{smin}} + \frac{1}{r_{cuticle}} \quad (5.15)$$

όπου r_{smin} η ελάχιστη αντίσταση των στοματίων (προσδιοριζόμενη σύμφωνα με τους Kato et al., 2008), $r_{cuticle}$ η αντίσταση κόμης των φυτών (White et al., 2000), συναρτώμενη από την εξωτερική επιφάνεια των φύλλων τους (cuticle) και f παράμετροι οι οποίοι εξαρτώνται α) από το T_a , β) τη

φωτοσυνθετικά ενεργό συνιστώσα της ηλιακής ακτινοβολίας (photosynthetically active radiation, PAR) (προσδιοριζόμενη για την περιοχή της Αθήνας σύμφωνα με τους Jacovides et al., 2007), γ το έλλειμμα τάσης ατμών (vapor pressure deficit, VPD), δ το υδατικό δυναμικό των φύλλων ψ (leaf water potential), και ε τη συγκέντρωση CO_2 . Οι τρεις τελευταίοι όροι παρουσιάζουν σημαντική δυσκολία στον προσδιορισμό τους και σχετικά μικρή επίδραση στο τελικό αποτέλεσμα, συνεπώς κατά κανόνα απαλείφονται από την Εξίσωση 5.15 (Nishida et al., 2003). Τα f_1 και f_2 υπολογίζονται από (Jarvis, 1976):

$$f_1(T_a) = \left(\frac{T_a - T_n}{T_{opt} - T_n} \right) \left(\frac{T_x - T_a}{T_x - T_{opt}} \right)^{[(T_x - T_{opt}) / (T_{opt} - T_n)]} \quad (5.16)$$

$$f_2(\text{PAR}) = \frac{\text{PAR}}{\text{PAR} + c} \quad (5.17)$$

όπου T_n , T_{opt} και T_x η ελάχιστη, βέλτιστη και μέγιστη θερμοκρασία ως προς τη δραστηριότητα των στοματίων των φυτών και c σταθερά η οποία σχετίζεται με την ικανότητα απορρόφησης του φωτός από τα φυτά.

Στις Εξισώσεις 5.2 και 5.3, το μήκος Obukhov (L) προσδιορίζεται μέσω μίας επαναληπτικής μεθόδου, χρησιμοποιώντας τον «αριθμό Richardson bulk» (Arya, 2001; De Ridder et al., 2015). Επιπρόσθετα, στις συναρτήσεις ευστάθειας (Ψ_M , Ψ_H) προστέθηκε η επίδραση του υποστρώματος τραχύτητας (roughness sub-layer, RSL) (De Ridder, 2010).

Ο προσδιορισμός του τιμών λόγου Bowen ($\beta = Q_H/Q_E$) πραγματοποιήθηκε μέσω των δορυφορικών καταγραφών MODIS-Terra για το σύνολο του Ιουλίου 2017. Τα παραπάνω δορυφορικά δεδομένα αντιστοιχούν σε ώρες κατά το μέσο της ημέρας (~12:00 τοπική ώρα): οι τιμές του β που αντιστοιχούν στη συγκεκριμένη χρονική στιγμή θα αναφέρονται στο εξής ως β_m . Μία ελάχιστη τιμή της τάξης των 5 W m^{-2} θεωρήθηκε για το Q_E , προκειμένου να συμπεριληφθούν τυχόν μη ταξινομημένα, μικρής κλίμακας σημεία πρασίνου και να αποφευχθεί η πιθανότητα ο λόγος β_m να απειρίζεται κατά την περίπτωση έλλειψης βλάστησης σε ένα $100 \times 100 \text{ m}$ εικονοστοιχείο.

Η μέθοδος της «τυρβώδους συνδιακύμανσης» (eddy covariance, EC) αποτελεί μια μικρομετεωρολογική τεχνική η οποία επιτρέπει την άμεση μέτρηση των κατακόρυφων ροών της τύρβης, χρησιμοποιώντας δεδομένα υψηλής χρονικής συχνότητας της κατακόρυφης συνιστώσας της ταχύτητας και του προς μελέτη βαθμωτού μεγέθους. Εφαρμόζοντας την παραπάνω μέθοδο, πραγματοποιήθηκε αξιολόγηση της ακρίβειας των Q_H και Q_E , χρησιμοποιώντας τις διαθέσιμες καταγραφές μικρομετεωρολογικού πύργου, προερχόμενες από την πειραματική εκστρατεία Thermopolis, η οποία έλαβε χώρα στο κέντρο της Αθήνας τον Ιούλιο του 2009 (Daglis et al., 2010; Rapsomanikis et al., 2015). Το εν λόγω ερευνητικό πρόγραμμα πραγματοποιήθηκε υπό την αιγίδα της Ευρωπαϊκής Υπηρεσίας Διαστήματος (European Space Agency, ESA), από την οποία και κατέστησαν διαθέσιμα τα δεδομένα στην παρούσα εργασία. Οι μετρήσεις του ανέμου, της θερμοκρασίας και της υγρασίας πραγματοποιήθηκαν κατά το διάστημα 18–27 Ιουλίου 2009 από το

Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης και έτυχαν επεξεργασίας στην παρούσα εργασία, χρησιμοποιώντας τις τυπικές διορθώσεις EC (Rapsomanikis et al., 2015). Τελικώς, οι τυρβώδεις ροές θερμότητας υπολογίστηκαν από:

$$Q_H = \rho_\alpha c_a \overline{w'\theta'} \quad (5.18)$$

$$Q_E = \rho_\alpha L_V \overline{w'q'} \quad (5.19)$$

όπου τα w' (m s^{-1}), θ' (K) και q' (kg kg^{-1}) αντιστοιχούν στις στιγμιαίες διακυμάνσεις της κάθετης συνιστώσας του ανέμου, της δυναμικής θερμοκρασίας και τις ειδικής υγρασίας αντίστοιχα. Για τις παραπάνω ποσότητες χρησιμοποιήθηκαν οι μέσες τιμές για τα αντίστοιχα διαστήματα μισής ώρας πριν και έπειτα τη διέλευση του δορυφόρου από την περιοχή μελέτης, με σκοπό τον μετριάσμο των μεγάλων εγγενών, διακυμάνσεων της τύρβης (Feigenwinter et al., 2018). Το εκάστοτε αποτύπωμα (footprint) της περιοχής μετρήσεων του μικρομετεωρολογικού πύργου υπολογίστηκε μέσω του θεωρητικού μοντέλου των Kormann και Meixner (Kormann and Meixner, 2001), χρησιμοποιώντας το πρόγραμμα λογισμικού Urban Multi-scale Environmental Predictor (UMEP) (Lindberg et al., 2018). Τέλος, υπολογίστηκε η ποσοστιαία συνεισφορά των διαφορετικών κατηγοριών κάλυψης γης και των μορφολογικών παραμέτρων ανά τα εκτιμώμενα αποτυπώματα του μικρομετεωρολογικού πύργου.

5.2.4 Καθαρή μεταβολή του ρυθμού αποθήκευσης θερμότητας

Η αποθήκευση και έκλυση θερμότητας εντός του αστικού συστήματος (καθαρή μεταβολή του ρυθμού αποθήκευσης θερμότητας, ΔQ_S) προσδιορίζεται κατά κανόνα με μία από τις ακόλουθες τεχνικές (βλ. Ενότητα 2.3.5): α) τη χρήση του μοντέλου Objective Hysteresis Model (OHM) (Grimmond et al., 1991; Grimmond and Oke, 1999b), β) τον υπολογισμό της διάδοσης θερμότητας διαμέσου των αστικών επιφανειών (Offerle et al., 2005; Chrysoulakis et al., 2018) και γ) το «κλείσιμο» (closure) του επιφανειακού ενεργειακού ισοζυγίου (Loupa et al., 2016; Crawford, Krayenhoff, et al., 2018). Η μεθοδολογία OHM αποτελεί μία εύχρηστη τεχνική υπολογισμού του ΔQ_S , η οποία παρέχει εκτιμήσεις ικανοποιητικής ακρίβειας κατά τη σύγκρισή της με παρατηρησιακά δεδομένα (Grimmond and Oke, 1999b), ειδικά όταν το κύριο ερευνητικό ενδιαφέρον εντοπίζεται στην αποτύπωση της μέσης κατάστασης της αποθηκευόμενης θερμότητας και όχι των βραχυπρόθεσμων διακυμάνσεων της (Roberts et al., 2006). Λαμβάνοντας υπόψη τις επιμέρους συνεισφορές των διαφορετικών τύπων επιφανειών (k), η μεθοδολογία OHM μπορεί να εφαρμοστεί ως εξής:

$$\Delta Q_S = \sum_{k=1}^n f_k \left(a_{1k} Q^* + a_{2k} \frac{\partial Q^*}{\partial t} + a_{3k} \right) \quad (5.20)$$

όπου Q^* η καθαρή ροή ακτινοβολίας (W m^{-2}), f_k η ποσοστιαία κάλυψη των διαφορετικών επιφανειών εντός της συνολικής επιφάνειας του εικονοστοιχείου (υπολογιζόμενη με χρήση των δεδομένων της Ενότητας 5.2.1) και a_1 , a_2 και a_3 οι συντελεστές του μοντέλου OHM, ανάλογα με την επιφάνεια

(Πίνακας 5-2). Η λεπτομερής χαρτογράφηση των επιμέρους επιφανειών του πολεοδομικού συγκροτήματος καθίσταται δυνατή από τη χρησιμοποίηση της προηγούμενης ταξινόμησης του Sentinel-2 σε χωρική ανάλυση 10 m (Κεφάλαιο 4). Το Q^* υπολογίζεται όπως στους Wicki et al. (2018), τις Εξισώσεις 2.3 και 2.4 του Κεφαλαίου 2 και χρησιμοποιώντας τις παραμέτρους επιφάνειας, τα δορυφορικά δεδομένα και τις ατμοσφαιρικές παραμέτρους όπως παρουσιάστηκαν στις Ενότητες 5.2.1 και 5.2.2. Όσον αφορά τη λευκαύγεια, αυτή θεωρήθηκε ότι κατά τη συγκεκριμένη εφαρμογή μπορεί να προσεγγισθεί με τη χρήση μιας γραμμικής αθροιστικής σχέσης των τιμών ανακλαστικότητας στο ορατό και το εγγύς υπέρυθρο του Landsat 8 (Liang, 2001). Η μέση ημερήσια πορεία του Q^* για τις ανέφελες ημέρες του Ιουλίου —όπως καταγράφηκε από την ερευνητική ομάδα World Radiation Centre (WRC) κατά τη διάρκεια του προγράμματος Thermopolis 2009 (Daglis et al., 2010) και περιλαμβάνεται στο σύνολο παρεχόμενων δεδομένων της ESA (βλ. Ενότητα 5.2.3)— χρησιμοποιήθηκε για την εξαγωγή του δεύτερου όρου στην Εξίσωση 5.20. Ο προσδιορισμός του τιμών ΔQ_s πραγματοποιήθηκε μέσω των δορυφορικών καταγραφών MODIS-Terra για το σύνολο του Ιουλίου 2017 (~12:00 τοπική ώρα): οι τιμές του ΔQ_s που αντιστοιχούν στη συγκεκριμένη χρονική στιγμή της ημέρας θα αναφέρονται στο εξής ως ΔQ_{sm} .

Πίνακας 5-2 Οι συντελεστές του μοντέλου Objective Hysteresis Model (OHM) για τις επιμέρους ανθρωπογενείς και φυσικές επιφάνειες.

Τύπος επιφάνειας	a_1	a_2 (h)	a_3 (W m ⁻²)	Πηγή
Οροφές κτηρίων	0.41	0.50	-27.7	(Yoshida et al., 1990) (Meyn and Oke, 2009)
Επιφάνεια δρόμου	0.64	0.32	-43.6	(Asaeda and Ca, 1993)
Αστική χαράδρα	0.51	0.02	-33.7	(Yoshida et al., 1990) (Nunez, 1974)
Βλάστηση	0.32	0.54	-27.4	(Doll et al., 1985)
Γυμνό έδαφος	0.35	0.43	-36.5	(Fuchs and Hadas, 1972)

5.2.5 Ανθρωπογενής ροή θερμότητας

Οι κυριότερες τεχνικές που χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό της ανθρωπογενούς ροής θερμότητας (Q_F) (Sailor, 2011) μπορούν να συνοψιστούν στις ακόλουθες τρεις περιπτώσεις (βλ. επίσης Ενότητα 2.3.3): α) ως ο υπολειπόμενος όρος του επιφανειακού ενεργειακού ισοζυγίου (Offerle et al., 2005; Pigeon et al., 2007; Chrysoulakis et al., 2018), β) μέσω «top-down» προσέγγισης, με βάση την υποκλιμάκωση στατιστικών ενεργειακής κατανάλωσης μεγάλης κλίμακας (Allen et al., 2011; Lindberg et al., 2013; Dong et al., 2017) και γ) μέσω «bottom-up» προσέγγισης, μοντελοποιώντας την ενεργειακή κατανάλωση σε μικρή κλίμακα (Kikegawa et al., 2003; Hamilton et

al., 2009; Smith et al., 2009). Ένας συνδυασμός των δύο τελευταίων μεθοδολογιών (Iamarino et al., 2012; Zheng and Weng, 2018) μπορεί να επιφέρει την επιθυμητή ισορροπία μεταξύ της διαθεσιμότητας των δεδομένων και της απαιτούμενης ακρίβειας ως προς τις τιμές του Q_F (Gabey et al., 2019). Η παραπάνω συνδυαστική προσέγγιση θα ακολουθηθεί και στην παρούσα εργασία, με τις επιμέρους συνιστώσες του Q_F να υπολογίζονται σύμφωνα με την περιγραφή που ακολουθεί στις επόμενες υποενότητες. Ως χρονική περίοδος μελέτης επιλέχθηκε το έτος 2012, καθώς στο συγκεκριμένο έτος επιτυγχάνεται η ταυτόχρονη διαθεσιμότητα όλων των πηγών των χρησιμοποιούμενων δεδομένων.

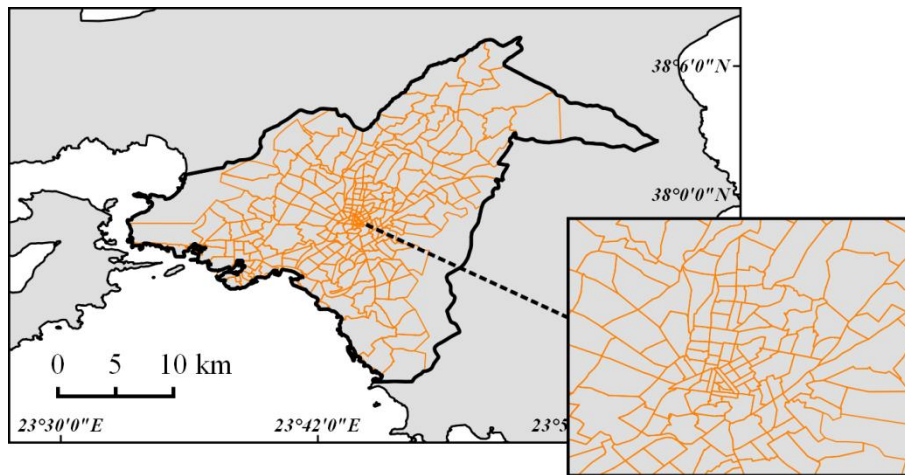
5.2.5.1 Εκπομπές θερμότητας από τον κτηριακό τομέα (Q_{FB})

Τα δεδομένα ετήσιας ηλεκτρικής κατανάλωσης της περιοχής μελέτης για το έτος 2012 διατέθηκαν από τον Διαχειριστή Ελληνικού Δικτύου Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΔΕΔΔΗΕ) ανά τομέα κατανάλωσης και ανά ταχυδρομικό κωδικό. Εντός του Πολεοδομικού Συγκροτήματος της Πρωτεύουσας συμπεριλαμβάνονται συνολικά 234 διαφορετικοί ταχυδρομικοί κώδικες (Σχήμα 5-4). Για τον οικιακό και τον εμπορικό τομέα, οι τιμές της ηλεκτρικής κατανάλωσης ανακατανεμήθηκαν αρχικά από την επιφάνεια που αντιστοιχεί στον κάθε ταχυδρομικό κώδικα σε ένα χωρικό πλέγμα χωρικής διακριτικής ικανότητας 100 m, χρησιμοποιώντας την ποσοστιαία επιφανειακή κάλυψη του εμβαδού των ορόφων των κτηρίων (λ_{floor}) ως παράγοντα στάθμισης βάρους. Η ανθρωπογενής ροή θερμότητας υπολογίστηκε ακόλουθα ως εξής:

$$Q_{FB} = \left(\frac{E}{A}\right) \times F_{E1} \times F_{E2} \times F_{E3} \quad (5.21)$$

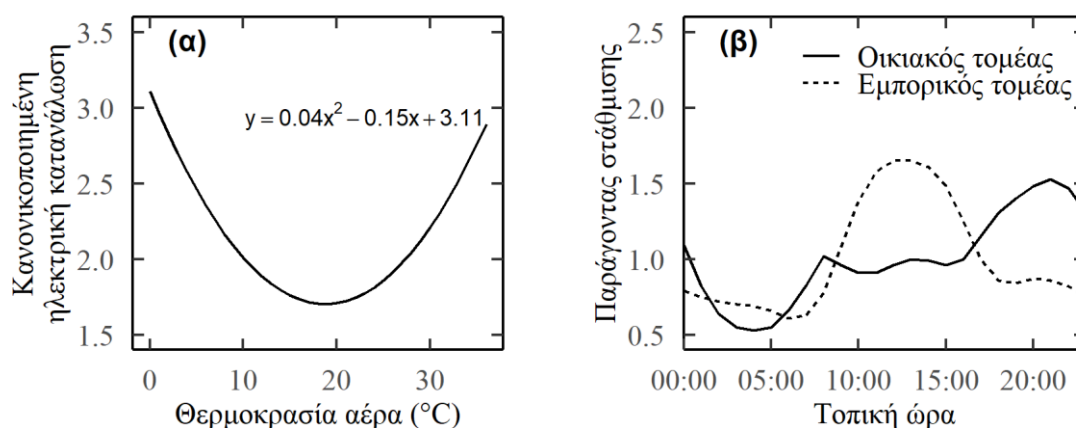
όπου E η συνολική ετήσια ισχύς κατανάλωσης (W) για κάθε κελί του πλέγματος, A το εμβαδόν της επιφάνειας του πλέγματος (m^2) ($A = 10000 m^2$), ενώ τα F_{E1} , F_{E2} και F_{E3} αντιπροσωπεύουν συντελεστές στάθμισης ως προς τις θερμοκρασιακές διακυμάνσεις, τον εβδομαδιαίο κύκλο και τον ημερήσιο κύκλο αντίστοιχα.

Για τον υπολογισμό του F_{E1} χρησιμοποιήθηκε α) μία συνάρτηση συσχέτισης της θερμοκρασίας με την ηλεκτρική κατανάλωση —η οποία έχει αναπτυχθεί από ηλεκτρικά δεδομένα κατανάλωσης για την περιοχή της Αθήνας (διαΝΕΟσις, 2017)— (Σχήμα 5-5α) και β) οι μέσες ημερήσιες θερμοκρασίες αστικών μετεωρολογικών σταθμών εντός της περιοχής μελέτης (βλ. περιγραφή μετεωρολογικών δεδομένων στην Ενότητα 5.2.3).



Σχήμα 5-4 Χωρική κατανομή των ταχυδρομικών κωδικών εντός της περιοχής μελέτης.

Η εβδομαδιαία και η ημερήσια χρονική διακύμανση του Q_F (δηλ. οι συντελεστές F_{E2} και F_{E3}) ενσωματώθηκε στο μοντέλο αξιοποιώντας προηγούμενες ερευνητικές μελέτες ως προς τη διακύμανση της ηλεκτρικής κατανάλωσης εντός του αστικού συγκροτήματος της Αθήνας (Psiloglou et al., 2009; PEPESSEC). Οι ημερήσιοι κύκλοι που προκύπτουν ανά τομέα κατανάλωσης παρουσιάζονται στο Σχήμα 5-5β. Βασιζόμενοι στους Psiloglou et al. (2009) τα παραγόμενα χρονικά προφίλ της κατανάλωσης παρουσιάζουν διαφοροποίηση μεταξύ της χειμερινής και της θερινής περιόδου. Παραδείγματος χάριν, κατά τους θερινούς μήνες το τοπικό μέγιστο ηλεκτρικής κατανάλωσης των πρώτων βραδινών ωρών είναι χαμηλότερο, ως απόρροια του γεγονότος ότι μεγαλύτερος αριθμός του πληθυσμού βρίσκεται σε εξωτερικούς χώρους. Από την άλλη, η εκτεταμένη χρήση συστημάτων κλιματισμού κατά τη διάρκεια τους έτους οδηγεί στη διατήρηση σχετικά υψηλής κατανάλωσης καθ' όλη τη διάρκεια της νύχτας.



Σχήμα 5-5 (α) Συνάρτηση σύνδεσης της ηλεκτρικής κατανάλωσης με τη μέση ημερήσια θερμοκρασίας και (β) ημερήσια διακύμανση των συντελεστών στάθμισης της ηλεκτρικής κατανάλωσης (μέσες ετήσιες τιμές). Πηγές δεδομένων: (Psiloglou et al., 2009; διαNEOσις, 2017; PEPESSEC)

Η ηλεκτρική κατανάλωση με προέλευση τον τομέα των βιομηχανιών/βιοτεχνιών κατανεμήθηκε ομοιόμορφα από την επιφάνεια του εκάστοτε ταχυδρομικό κώδικα στις αντίστοιχες χρήσεις γης εντός αυτού. Για την παραπάνω περίπτωση κατανάλωσης, χρησιμοποιήθηκε επιπλέον ένα μέσο προφίλ κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας υψηλής τάσης, το οποίο προήλθε από τα διαθέσιμα στοιχεία του Ανεξάρτητου Διαχειριστή Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΑΔΜΗΕ). Όσον αφορά τις καταναλώσεις πετρελαίου θέρμανσης και φυσικού αερίου, μόνο συγκεντρωτικά στοιχεία για την περιοχή ενδιαφέροντος ήταν διαθέσιμα από την Ελληνική Στατιστική Αρχή (ΕΛΣΤΑΤ) και τον Διαχειριστή Εθνικού Συστήματος Φυσικού Αερίου (ΔΕΣΦΑ) αντίστοιχα. Επομένως, για αυτές τις πηγές υπολογίστηκαν μόνο οι συγκεντρωτικές τιμές του Q_{FB} σε επίπεδο πόλης. Οι ημερήσιες διακυμάνσεις της κατανάλωσης φυσικού αερίου (διαθέσιμες από τον ΔΕΣΦΑ) θεωρήθηκαν αντιπροσωπευτικές και για την περίπτωση της ενδοετήσιας διακύμανσης κατά τη χρήση του πετρελαίου θέρμανσης —αφού πρώτα συνυπολογίστηκε η επίδραση από τη μέση χρήση του φυσικού αερίου για περαιτέρω σκοπούς, π.χ. κατανάλωση ενέργειας κατά το μαγείρεμα.

5.2.5.2 Εκπομπές θερμότητας από τον τομέα των μεταφορών (Q_{FV})

Η bottom-up προσέγγιση χρησιμοποιήθηκε για τη μοντελοποίηση των εκπομπών θερμότητας από την κίνηση των οχημάτων. Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκαν: Τιμές της Ετήσιας Μέσης Ημερήσιας Κυκλοφορίας (ΕΜΗΚ) (Annual Average Daily Traffic, AADT) για 410 σημεία της περιοχής ενδιαφέροντος το έτος 2012, τα οποία διατέθηκαν από το Κέντρο Διαχείρισης Κυκλοφορίας (ΚΔΚ) της Περιφέρειας Αττικής. Οι παραπάνω μετρήσεις καλύπτουν κατά κύριο λόγο του βασικούς οδικούς άξονες του Πολεοδομικού Συγκροτήματος της Πρωτεύουσας. Για τους υπόλοιπους οδικούς άξονες πραγματοποιήθηκε αρχικά ταξινόμησή τους ως προς τον τύπο τους με βάση στοιχεία των Γενικών Πολεοδομικών Σχεδίων, προσβάσιμα μέσω του Υπουργείου Περιβάλλοντος & Ενέργειας και δεδομένα του ψηφιακού χάρτη OpenStreetMap. Στη συνέχεια αποδόθηκαν μέσες τιμές ΕΜΗΚ ανά τύπο οδικού άξονα (Πίνακας 5-3) με βάση τα στοιχεία μεγάλου αριθμού κυκλοφοριακών μελετών οι οποίες έχουν διενεργηθεί κατά την τελευταία δεκαετία στην ευρύτερη περιοχή της Αθήνας. Το σύνολο των μελετών που εξετάστηκαν και από τις οποίες αντλήθηκαν τα απαιτούμενα στοιχεία παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στον Πίνακα 5-4.

Η ανθρωπογενής ροή θερμότητας που εκλύεται από την κατανάλωση καυσίμων κατά τη χρήση οχημάτων υπολογίστηκε ακόλουθα ως εξής (Pigeon et al., 2007):

$$Q_{FV} = \left(\frac{1}{A}\right) \times \sum_i N_i \times L_i \times V \times F_{V1} \times F_{V2} \times F_{V3} \quad (5.22)$$

όπου ο δείκτης i αντιστοιχεί στα διαφορετικά οδικά τμήματα εντός του εκάστοτε κελιού του πλέγματος, N είναι ο αριθμός των οχημάτων, L είναι το μήκος των οδικών τμημάτων (m), το V αποτελεί έναν συντελεστή εκπομπής θερμότητας από την καύση καυσίμων ($J m^{-1}$), ενώ τα F_{V1} , F_{V2} , και F_{V3} αντιστοιχούν στους συντελεστές στάθμισης ως προς τη μηνιαία, την εβδομαδιαία και την ημερήσια κίνηση των οχημάτων αντίστοιχα.

Η παράμετρος V προσδιορίστηκε από τις τιμές του υπολογιστικού μοντέλου εκτίμησης εκπομπών ρύπων και θερμότητας οδικής κυκλοφορίας «COPERT», όπως αυτές δίνονται στο συμπληρωματικό υλικό της έκθεσης «Air Pollutant Emission Inventory Guidebook–2016» του Ευρωπαϊκού Προγράμματος Παρακολούθησης και Αξιολόγησης (European Monitoring and Evaluation Programme – EMEP) και του Ευρωπαϊκού Οργανισμού Περιβάλλοντος (European Environment Agency, EEA) (EMEP/EEA., 2016). Κατά τον παραπάνω υπολογισμό, χρησιμοποιήθηκαν ειδικές τιμές για την περίπτωση της Αθήνας (ή της Αττικής): α) της σύνθεσης του στόλου των οχημάτων μέσω στατιστικών στοιχείων της ΕΛΣΤΑΤ, β) των τύπων των χρησιμοποιούμενων καυσίμων από στοιχεία του Ευρωπαϊκού Συνδέσμου Κατασκευαστών Αυτοκινήτων (European Automobile Manufacturers Association, ACEA, 2017) και γ) τα χαρακτηριστικά των οχημάτων σε κυκλοφορία (ηλικία, κυβικά και αντIRRυπαντική τεχνολογία) από τις καταγραφές του Συνδέσμου Εισαγωγέων Αντιπροσώπων Αυτοκινήτων (ΣΕΑΑ). Τέλος, τα στοιχεία για τη χρονική διακύμανση της κίνησης οχημάτων στην Αθήνα (παράμετροι F_{V1} , F_{V2} και F_{V3}) προέρχονται από το συμπληρωματικό υλικό των Fameli and Assimakopoulos (2016).

5.2.5.3 Εκπομπές θερμότητας από τον μεταβολισμό του πληθυσμού (Q_{FM})

Η ανθρωπογενής ροή θερμότητα που σχετίζεται με τον ανθρώπινο μεταβολισμό θεωρείται γενικά μια ελάσσονος σημασίας συνιστώσα του Q_F , αντιστοιχώντας σε λιγότερο από 5% της συνολικής έκλυσης θερμότητας ανθρωπογενούς προέλευσης (Sailor et al., 2015). Ωστόσο, έχει προσδιοριστεί ότι το Q_{FM} μπορεί να λάβει αρκετά υψηλότερες τιμές (έως και 45% του Q_F) για υψηλής πληθυσμιακής πυκνότητας αστικές περιοχές μικρότερων γεωγραφικών πλατών (Stewart and Kennedy, 2017). Για τον προσδιορισμό του Q_{FM} χρησιμοποιήθηκε η παραμετροποίηση των Dong et al. (2017) χρησιμοποιώντας τα πληθυσμιακά δεδομένα σε πλέγμα 1×1 km (GEOSTAT 2011) της Ευρωπαϊκής Στατιστικής Υπηρεσίας (EUROSTAT) και περαιτέρω υποκλιμάκωση χρησιμοποιώντας την παράμετρο λ_{floor} .

Πίνακας 5-3 Ετήσια μέση ημερήσια κυκλοφορία (ΕΜΗΚ) (αριθμός οχημάτων ανά ώρα) ανά κατηγορία αστικής οδού.

Κατηγορίες αστικών οδών ¹	Τυπικό ΕΜΗΚ
Κύρια αρτηρία	15000 ²
Δευτερεύουσα αρτηρία	8000
Κύρια συλλεκτήρια οδός	4000
Δευτερεύουσα συλλεκτήρια οδός	2500
Τοπική οδός	800

¹ Δεν συμπεριλαμβάνεται η κατηγορία των ελεύθερων λεωφόρων, καθώς σε όλες τις περιπτώσεις τους αποδόθηκε ειδική τιμή του κυκλοφοριακού φόρτου.

² Για όλες τις κύριες αρτηρίες με υψηλότερο ΕΜΗΚ αποδόθηκε συγκεκριμένη τιμή ανά περίπτωση.

Πίνακας 5-4 Συγκεντρωτική παρουσίαση των κυκλοφοριακών και άλλων συναφών μελετών οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν για την εξαγωγή των τιμών του Πίνακα 5-3.

Φορέας/Συγγραφέας	Μελέτη	Έτος
Δήμος Νέας Σμύρνης	Μελέτη παρεμβάσεων και εφαρμογή μέτρων και πολιτικών για την περιβαλλοντική αναβάθμιση της Νέας Σμύρνης	2009
Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών	Χωροταξική μελέτη της Πανεπιστημιούπολης Αθηνών	2009
Θοδωρής Μαυρογεώργης	Μελέτη κυκλοφοριακών ρυθμίσεων στην περιοχή του δήμου Κηφισιάς περίξ των οδών Βενιζέλου-Τρικούπη-Κοκκιναρά-Ηροδότου-Πόντου-Παπαφλέσσα	2011
Αττική Οδός	Απολογισμός	2012
Δήμος Κορυδαλλού	Επιχειρησιακό πρόγραμμα δήμου Κορυδαλλού 2013-2014	2012
Περιφέρεια Αττικής	Κέντρο αθλητισμού, μνήμης και πολιτισμού στη Νέα Φιλαδέλφεια – Μελέτη κυκλοφοριακών επιπτώσεων	2014
Δήμος Χαλανδρίου	Μελέτη οδικής ασφάλειας στην οδό Ηράκλειτου από την οδό Μπακογιάννη έως την οδό Ζαΐμη (έως και τεύχη δημοπράτησης)	2015
Δήμος Ελληνικού-Αργυρούπολης	Μελέτη κυκλοφοριακών ρυθμίσεων σε διάφορα σημεία της πόλης	2015
Δήμος Αθηναίων	Επιχειρησιακό πρόγραμμα δήμου Αθηναίων 2015 – 2019	2015
Δήμος Χαλανδρίου	Ο κορεσμός των καταστημάτων υγειονομικού ενδιαφέροντος στο κέντρο του Χαλανδρίου	2015
IBM	Έκθεση Smarter Cities Challenge	2016
Δήμος Παπάγου-Χολαργού	Παροχή υπηρεσιών τεχνικού συμβούλου για την προώθηση της βιώσιμης αστικής κινητικότητας στο δήμο Παπάγου-Χολαργού	2016
Δήμος Κηφισιάς	Μελέτη κυκλοφοριακών ρυθμίσεων σε περιοχές της δημοτικής ενότητας Κηφισιάς	2016
Σέργιος Λαμπρόπουλος	Σήραγγα Ηλιούπολης	2016
Ίδρυμα Σταύρος Νιάρχος	Μελέτη κυκλοφοριακών παρεμβάσεων στην περιοχή περίξ του ΚΠΙΣΝ	2017
Δήμος Βάρης-Βούλας-Βουλιαγμένης	Κυκλοφοριακή μελέτη του δήμου Βάρης-Βούλας-Βουλιαγμένης	2017
Δήμος Βριλησίων	Μελέτη σχεδιασμού και διαχείρισης βιώσιμης αστικής κινητικότητας στον δήμο Βριλησίων	2017

5.2.6 Δείκτης Αστικής Θερμικής Έκθεσης (Urban Heat Exposure – UHeatEx)

Η επιλογή της κατάλληλης μεθοδολογίας ως προς την απόδοση των συντελεστών στάθμισης (βαρών) της συνεισφοράς των επιμέρους συνιστωσών/μεταβλητών αποτελεί έναν καθοριστικό παράγοντα κατά την ανάπτυξη συνδυαστικών δεικτών (Greco et al., 2019). Η μέθοδος της «ανάλυσης στις κύριες συνιστώσες» (Principal Components Analysis – PCA) είναι μια πολυπαραγοντική στατιστική μεθοδολογία η οποία χρησιμοποιείται με σκοπό τη μείωση των διαστάσεων ενός αρχικού συνόλου μεταβλητών, εκτιμώντας τα βάρη των μεταβλητών κατά τέτοιο τρόπο, έτσι ώστε να περιγράφεται η μέγιστη δυνατή πληροφορία (Jolliffe and Cadima, 2016). Η μέθοδος PCA έχει συχνά χρησιμοποιηθεί στο παρελθόν κατά την ανάπτυξη πολυκριτηριακών κοινωνικο-οικονομικών και περιβαλλοντικών δεικτών (Bandura, 2008; Krefis et al., 2010; Hu and Xu, 2018).

Στην παρούσα μελέτη, η ανάλυση στις κύριες συνιστώσες εφαρμόζεται στις αστικές θερμικές παραμέτρους οι οποίες περιγράφηκαν στις προηγούμενες ενότητες (H/W , β , ΔQ_s και Q_F), με σκοπό την παραγωγή του συνδυαστικού δείκτη «Αστικής Θερμικής Έκθεσης» (Urban Heat Exposure, UHeatEx). Οι τέσσερις παραπάνω παράμετροι —όλες θετικά συσχετιζόμενες με μεγαλύτερη πιθανότητα αστικής θερμικής επιβάρυνσης— αντιστοιχούν σε ένα αρχικό σύνολο μεταβλητών $X = [X_1, \dots, X_p]^T$ (εδώ, $p = 4$), για το οποίο θα αναζητηθεί η βέλτιστη διαδικασία στάθμισης των επιμέρους συνεισφορών τους. Καθώς οι χρησιμοποιούμενες παράμετροι χαρακτηρίζονται από διαφορετικές μονάδες μέτρησης ή/και εύρος τιμών, απαιτείται κανονικοποίηση ως προς τις τιμές τους. Έτσι ως πρώτο βήμα, υπολογίστηκε ο κανονικοποιημένος πίνακας $Z = [Z_1, \dots, Z_p]^T$, αφαιρώντας από κάθε μεταβλητή τον αριθμητικό μέσο (μ) και διαιρώντας ακολούθως με την τυπική απόκλιση:

$$Z = (D^{1/2})^{-1}(X - \mu) \quad (5.23)$$

όπου D ο διαγώνιος πίνακας της τυπικής απόκλισης. Έπειτα, ο πίνακας συνδιακύμανσης R των μετασχηματισμένων κανονικοποιημένων μεταβλητών υπολογίζεται ως:

$$R = Cov(Z) = (D^{-1/2})^{-1}K(D^{1/2})^{-1} \quad (5.24)$$

όπου K ο πίνακας συνδιακύμανσης των αρχικών μεταβλητών X . Η μέθοδος PCA εφαρμόζεται στη συνέχεια μέσω της ιδιοαποσύνθεσης (eigendecomposition) του πίνακα R :

$$R = P\Lambda P^T \quad (5.25)$$

όπου P είναι ένας $p \times p$ πίνακας των ιδιοδιανυσμάτων e —επίσης αναφερόμενα ως συντελεστές (coefficients) ή βαθμοί (scores) των συνιστωσών— και Λ ένας διαγώνιος $p \times p$ πίνακας των ιδιοτιμών λ (με $\lambda \geq 0$). Η νιοστή κύρια συνιστώσα Y_n του συνόλου των μεταβλητών Z δίνεται τελικώς από:

$$Y_n = e_n^T Z = e_{1n}Z_1 + \dots + e_{pn}Z_p \quad (5.26)$$

Η πρώτη κύρια συνιστώσα αντιστοιχεί σε εκείνους τους συντελεστές (δηλ. στον συνδυασμό γραμμικών βαρών) που δύνανται να περιγράψουν τη μέγιστη δυνατή μεταβλητότητα των αρχικών δεδομένων. Οι επακόλουθες κύριες συνιστώσες —γραμμικά ασυσχέτιστες με την πρώτη και αναμεταξύ τους— επεξηγούν την υπολειπόμενη διακύμανση της εικόνας. Έτσι, μέσω της διαδικασίας της PCA είναι δυνατόν να εξαχθεί αυτός ο γραμμικός συνδυασμός των αρχικών μεταβλητών H/W , β , ΔQ_S και Q_F ο οποίος επιτυγχάνει τη βέλτιστη αποτύπωση της χωρικής διακύμανσης των θερμικών υπογραφών της περιοχής ενδιαφέροντος. Όπως θα αναλυθεί παρακάτω, κατά την παρουσίαση των αποτελεσμάτων (Ενότητα 5.3), και λαμβάνοντας υπόψη τη φυσική σημασία των χρησιμοποιούμενων παραμέτρων, τα αποτελέσματα του PCA και τον τελικό στόχο της μεθοδολογίας, επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί μόνο η πρώτη κύρια συνιστώσα.

5.2.7 Κλιματικές προβολές

Η προσομοίωση των μελλοντικών τιμών των κλιματικών παραμέτρων από τα υπάρχοντα «Παγκόσμια Κλιματικά Μοντέλα» (Global Climate Models – GCM) πραγματοποιείται σε μια οριζόντια κλίμακα μεγαλύτερη των 100 km· επομένως είναι τα εν λόγω αποτελέσματα δεν ενδείκνυνται εν γένει για μελέτη κλιματικών προβολών σε επίπεδο πόλης. Κατά τη διαδικασία της δυναμικής υποκλιμάκωσης τα GCM χρησιμοποιούνται ως δεδομένα εισόδου για τα «Περιοχικά Κλιματικά Μοντέλα» (Regional Climate Models – RCM), τα οποία λειτουργούν σε υψηλότερη χωρική διακριτική ικανότητα. Συνεπώς, τα τελευταία μπορούν να παρέχουν πιο λεπτομερή πληροφορία για το κλίμα μέση/τοπικής κλίμακας.

Στην παρούσα μελέτη, χρησιμοποιήθηκαν οι κλιματικές προβολές από 14 υψηλής χωρικής κλίμακας προσομοιώσεις μοντέλων RCM για την περιοχή της Ευρώπης (EURO-CORDEX), οι οποίες αποτελούν τμήμα του παγκόσμιου προγράμματος Coordinated Regional Downscaling Experiment (CORDEX). Το σύνολο των μοντέλων RCM που χρησιμοποιήθηκαν παρατίθενται στον Πίνακα 5-5. Υπολογίστηκε η μέση τιμή της προβαλλόμενης θερμοκρασίας αέρα για μια περίοδο 50 ετών (2021–2070) σε χωρική διακριτική ικανότητα 0.11° (~ 12.5 km) (προσομοίωση EUR-11)· η τελική τιμή προέκυψε από τον μέσο όρο των δύο κελιών του πλέγματος που καλύπτουν την περιοχή ενδιαφέροντος. Επιλέχθηκε το σενάριο Representative Concentration Pathway (RCP) 4.5, καθώς αποτελεί το πλέον πιθανότερο ως προς τις μελλοντικές συγκεντρώσεις θερμοκηπιακών αερίων, με βάση της μέχρι πρότινος ενδείξεις. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων EURO-CORDEX ήταν διαθέσιμα μέσω της διαδικτυακής πύλης Climate4Impact (<http://climate4impact.eu>).

Πίνακας 5-5 Παρουσίαση των προσομοιώσεων του προγράμματος EURO-CORDEX που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία.

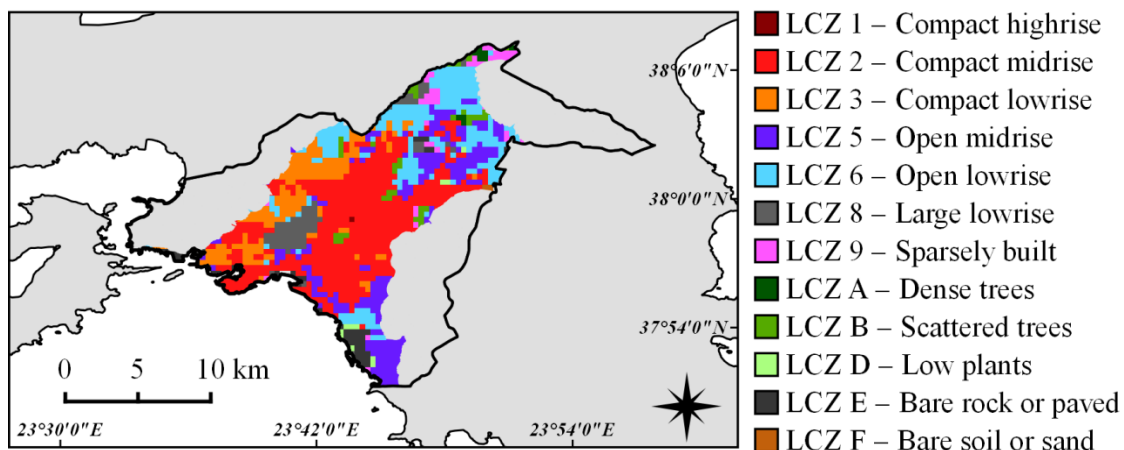
	Προσομοίωση	RCM	GCM-οδηγός
1	CLMcom.ICHEC-EC-EARTH	CLM	EC-EARTH
2	CLMcom.MOHC-HadGEM2-ES	CLM	HadGEM2-ES
3	CLMcom.MPI-M-MPI-ESM-LR	CLM	MPI-ESM-LR
4	CLMcom.CNRM-CERFACS-CNRM-CM5	CLM	CNRM-CM5
5	DMI.ICHEC-EC-EARTH	HIRHAM5	EC-EARTH
6	DMI.NCC-NorESM1-M	HIRHAM5	NorESM1-M
7	KNMI.ICHEC-EC-EARTH	RACMO22E	EC-EARTH
8	KNMI.MOHC-HadGEM2-ES	RACMO22E	HadGEM2-ES
9	SMHI.CNRM-CERFACS-CNRM-CM5	RCA4	CNRM-CM5
10	SMHI.ICHEC-EC-EARTH	RCA4	EC-EARTH
11	SMHI.IPSL-IPSL-CM5A-MR	RCA4	CM5A-MR
12	SMHI.MOHC-HadGEM2-ES	RCA4	HadGEM2-ES
13	SMHI.MPI-M-MPI-ESM-LR	RCA4	MPI-ESM-LR
14	MPI-CSC.MPI-M-MPI-ESM-LR	REMO	MPI-ESM-LR

5.3 Αποτελέσματα

5.3.1 Τοπικές κλιματικές ζώνες

Στο Σχήμα 5-6 παρουσιάζεται η χαρτογράφηση του Πολεοδομικού Συγκροτήματος της Πρωτεύουσας (ΠΣΠ) σε Τοπικές Κλιματικές Ζώνες (LCZ) σε χωρική διακριτική ικανότητα 400 m. Όπως παρατηρείται, η κατηγορία της πυκνής δόμησης με κτήρια μέσου ύψους (LCZ 2) αποτελεί τον πιο συχνά εμφανιζόμενο μορφολογικό τύπο της περιοχής μελέτης. Συγκεκριμένα, ο τύπος LCZ 2 καλύπτει σχεδόν εξολοκλήρου τον Δήμο Αθηναίων, διαχεόμενος επιπλέον σε αρκετές περιοχές της περιφέρειάς του. Το κέντρο του Πειραιά επίσης αντιστοιχεί στην περίπτωση της τάξης LCZ 2· το ίδιο ισχύει και για ορισμένες περιοχές των προαστίων των οποίων η δομημένη επιφάνεια έχει προσφάτως αυξηθεί σημαντικά (π.χ. Μαρούσι). Το εν γένει χαμηλότερο ύψος του συμπαγούς οικιστικού περιβάλλοντος των δυτικών προαστίων του ΠΣΠ (συμπεριλαμβανομένων της πλειονότητας των δήμων του Πειραιά) οδηγεί στην ταξινόμησή τους στη ζώνη LCZ 3. Αντίθετα, στις αραιοδομημένες οικιστικές ζώνες —δηλ. στα βορειοανατολικά και τα νοτιοδυτικά προάστια— επικρατούν οι ζώνες της ανοικτής δόμησης μέσου ύψους (LCZ 5) και της ανοικτής δόμησης χαμηλού ύψους (LCZ 6). Η περιοχή του Ελαιώνα μεταξύ των κέντρων της Αθήνας και του Πειραιά αντιστοιχεί στην Τοπική Κλιματική Ζώνη της ανοικτής δομημένης ενότητας με κτήρια τα οποία χαρακτηρίζονται από σχετικά μικρό ύψος και συγχρόνως καλύπτουν εκτεταμένη επιφάνεια (π.χ. χώροι βιοτεχνιών, αποθηκευτικοί χώροι, κ.λπ.) (LCZ 8).

Όπως προκύπτει από τα ανωτέρω, η ταξινόμηση των LCZ παρέχει σημαντική πληροφορία ως προς τη μορφολογία δόμησης του πολεοδομικού περιβάλλοντος του αστικού συγκροτήματος της Αθήνας, η οποία μπορεί να αντιστοιχηθεί και σε διαφορετική μικροκλιματική συμπεριφορά. Παρά ταύτα, όσον αφορά την περιγραφή των κεντρικών περιοχών του ΠΣΠ, οι Τοπικές Κλιματικές Ζώνες δεν δύνανται να αποτυπώσουν τη χωρική μεταβλητότητα της αστικής μορφολογίας και λειτουργίας των επιμέρους περιοχών. Αυτό προκύπτει σε μεγάλο βαθμό από το γεγονός ότι το σχήμα ταξινόμησης LCZ παρουσιάζει σημαντικό εύρος τιμών ανά τάξη και από τα ειδικά χαρακτηριστικά της περιοχής μελέτης —όπως θα περιγραφεί εκτενώς παρακάτω. Χάριν παραδείγματος, στο Σχήμα 5-6 δεν δύναται η διάκριση του εμπορικού κέντρου της πόλης της Αθήνας. Αυτό προκύπτει κυρίως λόγω της κατά κανόνα έλλειψης κτηρίων με πολύ μεγάλο ύψος ($H > 25$ m) στο κέντρο της πόλης, αποτέλεσμα της διαχρονικά επικρατούσας νομοθεσίας δόμησης. Συνεπώς, η τάξη πυκνής δόμησης με κτήρια μεγάλου ύψους κατά την ταξινόμηση των Τοπικών Κλιματικών Ζωνών (LCZ 1) —και η οποία αντιστοιχεί στην περιγραφή των κεντρικών πυρήνων των πόλεων— δεν αποτυπώνεται στην προκύπτουσα ταξινόμηση για το ΠΣΠ, παρά μόνον για την περίπτωση ενός μεμονωμένου εικονοστοιχείου. Επιπλέον στο Σχήμα 5-6, δεν απεικονίζονται περιοχές ειδικών χρήσεων γης που συνοδεύονται από τη σχετική θερμική επιβάρυνση (π.χ. μεγάλες οδικές αρτηρίες).



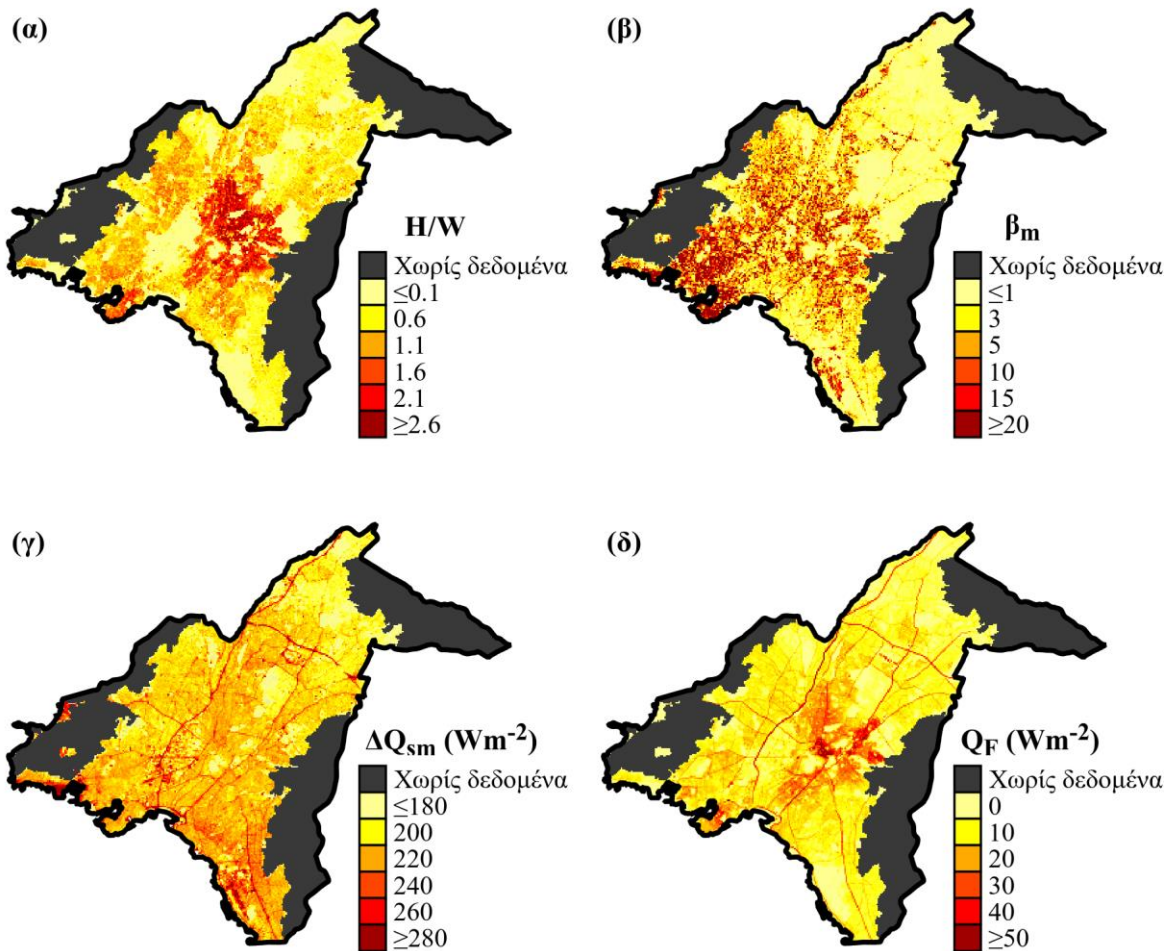
Σχήμα 5-6 Χαρτογράφηση της αστικής περιοχής της Αθήνας σε Τοπικές Κλιματικές Ζώνες (LCZ), σε χωρική διακριτική ικανότητα 400 m.

5.3.2 Παράμετροι H/W , β_m , ΔQ_{sm} και Q_F

Η κατανομή της παραμέτρου της αναλογίας διαστάσεων αστικής χαράδρας (H/W), όπως δίνεται στο Σχήμα 5-7α, αναδεικνύει επιπλέον λεπτομέρειες της χωρικής διαφοροποίησης της αστικής μορφολογίας της Αθήνας. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, τα υψηλά κτήρια ($H > 25$ m) σε όλη την έκταση του αστικού συγκροτήματος είναι σπάνια. Ωστόσο σε αρκετές περιπτώσεις, η πολύ υψηλή πυκνότητα δόμησης του αστικού χώρου έχει οδηγήσει στη διαμόρφωση δυσανάλογα στενών δρόμων, ειδικά στις κεντρικές περιοχές. Αυτό συνεπάγεται ότι ένα μεγάλο ποσοστό των αστικών χαραδρών του κεντρικού πυρήνα του ΠΣΠ, χαρακτηρίζεται από τιμές H/W άνω του 2, ενώ παράλληλα το μέσο

ύψος των εν λόγω περιοχών είναι κάτω των 25 m. Ο συγκεκριμένος συνδυασμός τιμών για τις παραπάνω παραμέτρους του αστικού συνόλου δεν καλύπτεται από τις προσχεδιασμένες τάξεις των LCZ, όπως παρατηρήθηκε στο Σχήμα 5-6. Όσον αφορά τις περιοχές της αστικής περιφέρειας, τα χωρικά μοτίβα του Σχήματος 5-7α εν γένει συμφωνούν με την ταξινόμηση των LCZ, καθώς το H/W αποτελεί κύρια παράμετρο κατά την απόδοση των Τοπικών Κλιματικών Ζωνών. Γενικότερα, οι χαμηλότερες τιμές της αναλογίας διαστάσεων αστικής χαράδρας συναντώνται στις αραιοδομημένες περιαστικές περιοχές (LCZ 6 και 9), καθώς και στη βιομηχανική περιοχή του Ελαιώνα (LCZ 8).

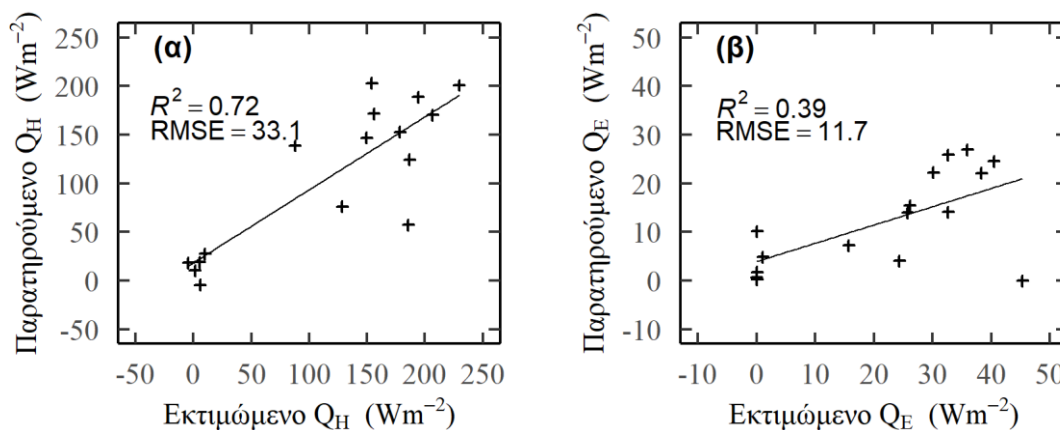
Το Σχήμα 5-7β παρουσιάζει τη μέση τιμή του λόγου Bowen β_m (~12:00 τοπική ώρα) για τον Ιούλιο του 2017, όπως υπολογίστηκε από τις ημερήσιες παρατηρήσεις στο θερμικό υπέρυθρο του MODIS–Terra —εφαρμόζοντας τη διαδικασία της στατικής υποκλιμάκωσης— και από τις μετεωρολογικές μετρήσεις. Όπως παρατηρείται, οι νοτιοδυτικές συνοικίες του ΠΣΠ τείνουν να έχουν τις υψηλότερες τιμές του β_m , δηλ. να διοχετεύουν την πλεονάζουσα θερμότητα υπό αισθητή μορφή (Q_H) έναντι λανθάνουσας μορφής (Q_E). Το παραπάνω συνδέεται στενά από την έλλειψη πρασίνου που συναντάται στις εν λόγω περιοχές (βλ. επίσης Σχήμα 4-5), σε συνδυασμό και με υψηλές τιμές επιφανειακής θερμοκρασίας (T_s). Τόσο για τους παραπάνω δήμους της ευρύτερης περιοχής του Πειραιά, όσο και για πιο μεμονωμένες περιπτώσεις στο σύνολο της περιοχής καταγράφονται πολύ υψηλές τιμές του β_m (άνω του 20). Αυτά αντιστοιχούν στα εικονοστοιχεία (χωρικής διακριτικής ικανότητας 100 m) τα οποία καλύπτονται σχεδόν αποκλειστικά από αδιαπέρατες ανθρωπογενείς επιφάνειες (π.χ. οροφές κτηρίων, επιφάνεια δρόμων). Συνεπώς, άμεσα συνεπάγεται ότι και οι περιοχές ανοικτής δόμησης (ζώνες LCZ 8 και LCZ E) παρουσιάζουν επίσης υψηλές τιμές β_m . Σε αντιπαράθεση, οι χαμηλότερες τιμές του λόγου Bowen υπολογίστηκαν για τα υψηλής βλάστησης βόρεια προάστια του συγκροτήματος. Λαμβάνοντας υπόψη τη χρονική στιγμή της ημέρας που γίνεται η εκτίμηση, σημειώνεται ότι ιδιαίτερα χαμηλές τιμές του β_m , έως και 0.6, προσδιορίστηκαν για τις παραπάνω περιοχές. Οι κεντρικές περιοχές της Αθήνας, κατά πλειοψηφία τείνουν να έχουν υψηλές τιμές του β_m (αν και χαμηλότερες σε μέτρο από τις αντίστοιχες τις νοτιοδυτικής περιφέρειας του ΠΣΠ) με την εξαίρεση των χώρου αστικού πρασίνου, οι οποίες διακρίνονται καθαρά στο Σχήμα 5-7β. Συμπερασματικά, η κατανομή του β_m ακολουθεί σε σημαντικό βαθμό τα χωρικά μοτίβα του ποσοστού βλάστησης (λ_v): ωστόσο το αποτέλεσμα διαμορφώνεται επίσης από τις τιμές των μετεωρολογικών παραμέτρων (ταχύτητα του ανέμου, σχετική υγρασία) και από τις αεροδυναμικές ιδιότητες του αστικού χώρου. Επομένως, οι υψηλότερες τιμές του β_m στους δήμους του Πειραιά εκτιμάται ότι αποτελούν αποτέλεσμα: α) του μικρότερου ποσοστού πρασίνου συγκριτικά με την υπόλοιπη περιοχή μελέτης, β) της υψηλής θερμοκρασίας επιφανείας και γ) της συγκριτικά χαμηλότερης θερμοκρασίας αέρα, σε σχέση με άλλες πυκνοδομημένες ζώνες, λόγω θαλάσσιας αύρας. Οι δύο τελευταίοι παράγοντες διαμορφώνουν μεγάλες τιμές όσον αφορά τον όρο « $T_s - T_a$ » και επακόλουθα την αισθητή ροή θερμότητας. Ο υπολογισμός του β_m πραγματοποιήθηκε μέσω των εκτιμήσεων των τυρβωδών ροών Q_H και Q_E , χρησιμοποιώντας τεχνικές τηλεπισκόπησης.



Σχήμα 5-7 Αποτύπωση σε χωρική διακριτική ικανότητα 100 m των: (α) αναλογία διαστάσεων αστικής χαράδρας (H/W), (β) μέσος λόγος Bowen (β_m) για τον Ιούλιο του 2017 (~12:00), (γ) μέση καθαρή μεταβολή του ρυθμού αποθήκευσης θερμότητας (ΔQ_{sm}) για τον Ιούλιο του 2017 (~12:00) και (δ) μέση ανθρωπογενής ροή θερμότητας (Q_F) για τον Ιούλιο του 2012 (τιμή 24ώρου).

Η αξιολόγηση της εκτίμησης των παραπάνω ροών έγινε μέσω των διαθέσιμων καταγραφών του μικρομετεωρολογικού πύργου του προγράμματος Thermopolis, τον Ιούλιο του 2009. Εφαρμόζοντας τη μέθοδο της τυρβώδους συνδιακύμανσης (EC) προσδιορίστηκαν οι παρατηρούμενες τιμές αναφοράς των Q_H και Q_E . Ως προς το Q_H οι παρατηρούμενες τιμές υπολογίστηκε ότι κυμαίνονται από ελαφρά θετικές νυχτερινές τιμές έως ένα ημερήσιο μεσημεριανό μέγιστο των $\sim 150 W m^{-2}$ (σε συμφωνία με τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν στους Rapsomanikis et al., 2015). Αντίστοιχα, η μέθοδος του EC οδήγησε σε σχετικά χαμηλές καταγραφόμενες τιμές για το Q_E , με ένα μέσο ημερήσιο μέγιστο της τάξης των $30 W m^{-2}$ για την περιοχή μελέτης (ευρύτερη περιοχή επί της οδού Πατησίων). Για μια πλήρη και αναλυτική περιγραφή των αποτελεσμάτων των τυρβωδών ροών ορμής και θερμότητας του προγράμματος Thermopolis, ο αναγνώστης παραπέμπεται στις αντίστοιχες επιστημονικές εργασίες των συντελεστών του (Rapsomanikis et al., 2015; Loupa et al., 2016).

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, οι καταγραφόμενες τιμές των Q_H και Q_E μέσω της τυρβώδους συνδιακύμανσης θα συγκριθούν με τη μέθοδο της αεροδυναμικής αντίστασης με χρήση δορυφορικών παρατηρήσεων, προκειμένου να γίνει αξιολόγηση της ακρίβειας της τελευταίας. Για τη διεύρυνση της διαθεσιμότητας ταυτόχρονων επιτόπιων μετρήσεων των ροών και δορυφορικών εικόνων, παράλληλα με τις ημερήσιες εικόνες MODIS–Terra στις ~12:00 (τοπική ώρα) χρησιμοποιήθηκαν επίσης εικόνες MODIS–Aqua στις ~15:00 και MODIS–Terra στις ~23:00. Η προεπεξεργασία και ο υπολογισμός της T_s υποκλιμάκωσης πραγματοποιήθηκαν σύμφωνα με το Κεφάλαιο 4. Στο Σχήμα 5-8 δίνεται το διάγραμμα διασποράς μεταξύ των παρατηρούμενων (μέθοδος EC) και των προσδιοριζόμενων τιμών των τυρβωδών ροών Q_H και Q_E (μέθοδος αεροδυναμικής αντίστασης – δορυφορική τηλεπισκόπηση). Τα αποτελέσματα υποδεικνύουν ότι ένα μέτριο επίπεδο συμφωνίας επιτυγχάνεται μεταξύ των παρατηρούμενων και των εκτιμώμενων τιμών. Συγκεκριμένα ένα μέσο σφάλμα RMSE 33.1 W m^{-2} βρέθηκε για το Q_H και 10.2 W m^{-2} για το Q_E : λαμβάνοντας υπόψη μόνο τις παρατηρήσεις κατά τη διάρκεια της ημέρας, το σφάλμα RMSE ήταν 41.5 W m^{-2} και 15.5 W m^{-2} για τα Q_H και Q_E αντίστοιχα.



Σχήμα 5-8 Διαγράμματα διασποράς μεταξύ των παρατηρούμενων και των εκτιμώμενων τυρβωδών ροών ενέργειας: (α) για το Q_H και (β) για το Q_E , για τις διαθέσιμες ημερομηνίες του Ιουλίου του 2009.

Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε ανάλυση ευαισθησίας της μεθοδολογίας της αεροδυναμικής αντίστασης, με σκοπό τη διερεύνηση της απόκρισης/ευαισθησίας των εκτιμώμενων τυρβωδών ροών σε αλλαγές των τιμών των μεταβλητών εισόδου. Η ευαισθησία του μοντέλου εξετάστηκε για κάθε διαφορετικό όρο ξεχωριστά, δηλ. για κάθε εξεταζόμενη μεταβλητή οι τιμές εισόδου των υπολοίπων διατηρήθηκαν σταθερές. Όπως φαίνεται από τα αποτελέσματα του Πίνακα 5-6, το υπολογιζόμενο Q_H χαρακτηρίζεται από ισχυρή ευαισθησία στις τιμές του όρου « $T_s - T_a$ » της Εξίσωσης 5.1. Μία διαταραχή της τάξης των 2 K για τον παραπάνω όρο καταλήγει σε μία διαφοροποίηση κατά ~20% για το προσδιοριζόμενο Q_H , το οποίο αντιστοιχεί σε μία αβεβαιότητα των $\sim 30 \text{ W m}^{-2}$ για την περίπτωση ροής αισθητής θερμότητας της τάξης των 150 W m^{-2} . Το παραπάνω υπογραμμίζει την υψηλή σημασία που κατέχει η δορυφορικά εκτιμώμενη T_s κατά την προσομοίωση των αλληλεπιδράσεων επιφάνειας – ατμόσφαιρας. Το T_s έπεται από τη μεθοδολογία της υποκλιμάκωσης προσδιορίστηκε ότι χαρακτηρίζεται από σφάλμα RMSE της τάξης των 2 K και σφάλμα MAE 1.5 K

(βλ. Κεφάλαιο 4), επομένως εκτιμάται ότι έχει σχετικά μεγάλη επίδραση στο σφάλμα υπολογισμού του Q_H . Μία ακόμη σημαντική αβεβαιότητα στον παραπάνω υπολογισμό αποτελεί ο προσδιορισμός της ταχύτητας τριβής (u^*).

Υπολογίστηκε ότι επιτυγχάνεται μικρότερο σφάλμα RMSE (κατά περίπου 10 W m^{-2}) για το Q_H κατά τη διάρκεια της ημέρας, εάν χρησιμοποιηθούν οι άμεσα παρατηρούμενες τιμές του u^* από τον μικρομετεωρολογικό πύργο στη θέση των προσδιοριζόμενων τιμών του u^* μέσω μετρήσεων της ταχύτητας του ανέμου. Η αντίστοιχη μεταβολή στον λόγο Bowen σε κάποιο βαθμό μετριάζεται, καθώς οι τιμές και των δύο τυρβωδών όρων μεταβάλλονται προς την ίδια κατεύθυνση. Στα αποτελέσματα είναι φανερό ότι τα Q_H και Q_E επηρεάζονται σε μικρό βαθμό από μεταβολές των αεροδυναμικών παραμέτρων και κυρίως του μήκους Obukhov (L) (ευαισθησία < 2%). Μία επιπρόσθετη πηγή αβεβαιότητας για την περίπτωση του Q_E αποτελούν ο όρος « $q_s - q$ » και η παράμετρος r_{smin} . Η επίδραση των τελευταίων σε απόλυτες τιμές είναι μικρή για την περίπτωση του πυκνού αστικού ιστού, καθώς το Q_E λαμβάνει μικρές τιμές (κάτω των 30 W m^{-2}): ωστόσο η ευαισθησία των εκτιμώμενων τιμών αναμένεται να είναι μεγαλύτερη στις περιοχές με πλούσια βλάστηση. Τα παραπάνω ευρήματα της ανάλυσης ευαισθησίας είναι σε συμφωνία με τα αποτελέσματα των Crawford, Grimmond, et al. (2018) και Feigenwinter et al. (2018) (σε ότι αφορά τις ποσοστιαίες τιμές), όπου το T_s επίσης εκτιμήθηκε ως η σημαντικότερη παράμετρος κατά την ανάλυση ευαισθησίας των ροών θερμότητας. Επιπλέον αβεβαιότητα στη σύγκριση της μεθόδου της αεροδυναμικής αντίστασης και της τυρβώδους συνδιακύμανσης προκύπτει από το γεγονός ότι οι καταγραφές του μικρομετεωρολογικού πύργου εμπεριέχουν σε σημαντικό βαθμό τις υπάρχουσες ανθρωπογενείς ροές θερμότητας της περιοχής.

Πίνακας 5-6 Ανάλυση ευαισθησίας ως προς τις εκτιμώμενες ροές ενέργειας και τον λόγο Bowen (κατ' απόλυτη τιμή) χρησιμοποιώντας τη μέθοδο της αεροδυναμικής αντίστασης για τον Ιούλιο του 2009. Βλέπε κείμενο για την επεξήγηση των συμβόλων.

	$ \Delta Q_H $	$ \Delta Q_E $	$ \Delta \beta $
$(T_s - T_a) \pm 2 \text{ K}$	~18.5%	–	~18.5%
$u^* \pm 10\%$	~7.5%	~2%	~5.5%
$z_0 \pm 10\%$	~1%	~0.5%	~1%
$z_d \pm 10\%$	~2.5%	~1%	~2%
$(q_s - q) \pm 10\%$	–	~10%	~10%
$r_{smin} \pm 10\%$	–	~7%	~7%
$L \pm 10\%$	~1%	~0.5%	~1%

Μια πιο ομοιόμορφη χωρική κατανομή συγκριτικά με τα H/W και β_m βρέθηκε για την εκτιμώμενη καθαρή μεταβολή του ρυθμού αποθήκευσης θερμότητας ΔQ_{sm} (Σχήμα 5-7γ). Γενικότερα, οι κυριότεροι αυτοκινητόδρομοι και αντίστοιχες περιοχές ανοικτής δόμησης τείνουν να είναι αυτές με τις υψηλότερες τιμές του ΔQ_{sm} . Αυτό προκύπτει ως συνέπεια της χαμηλότερης ανακλαστικότητας και

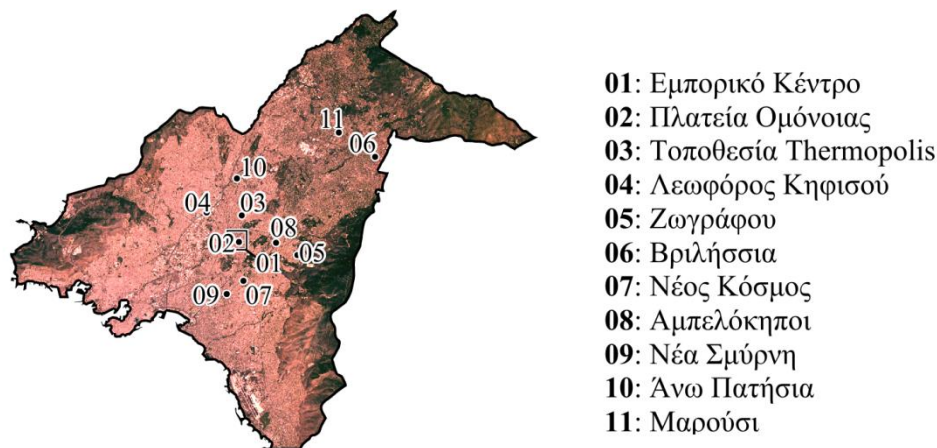
των μεγάλων συντελεστών στο μοντέλο OHM των παραπάνω περιπτώσεων (δηλ. για εικονοστοιχεία με εκτεταμένη κάλυψη από επιφάνεια ασφάλτου). Μεγάλες τιμές του ΔQ_{sm} επίσης προσδιορίστηκαν για τις κεντρικές περιοχές, λόγω της υψηλότερης πυκνότητας δόμησης και του χαμηλότερου ποσοστού βλάστησης. Τα βορειότερα προάστια, καλυπτόμενα σε μεγάλο βαθμό από φυσικές επιφάνειες, τείνουν να απορροφούν και να αποθηκεύουν μικρότερα ποσά θερμότητας. Για την περίπτωση της τοποθεσίας του μικρομετεωρολογικού πύργου του προγράμματος Thermopolis εκτιμήθηκε στην παρούσα εργασία ένα μέσο $\Delta Q_{sm} \sim 220 \text{ W m}^{-2}$. Η παραπάνω τιμή είναι σε καλή συμφωνία με την αντίστοιχη μέση τιμή των περίπου 250 W m^{-2} , η οποία υπολογίστηκε ως υπολειπόμενος όρος του ενεργειακού ισοζυγίου στα αποτελέσματα του Thermopolis (Loupa et al., 2016).

Η μέση τιμή της ανθρωπογενούς ροής θερμότητας (Q_F) —συμπεριλαμβανομένου του συνόλου του 24ώρου— για το ΠΣΠ, τον Ιούλιο του 2012 παρουσιάζεται στο Σχήμα 5-7δ. Όπως παρατηρείται, αναπτύσσεται μια ακτινωτή μορφή των εκπομπών θερμότητας γύρω από το κέντρο της πόλης της Αθήνας. Γενικότερα, οι υψηλότερες τιμές του Q_F συνδέονται στενά με υψηλότερες καταναλώσεις ενέργειας εμπορικών χρήσεων. Το Q_F στον οικιστικό χώρο βρέθηκε σχετικά χαμηλό, παρόλο την ανά περιπτώσεις υψηλή πληθυσμιακή πυκνότητα και μια συνεχή ανάγκη ψύξης κατά την υπό συζήτηση περίοδο. Για το εμπορικό κέντρο της πόλης υπολογίστηκαν μέσες τιμές Q_F έως και 108 W m^{-2} . Οι αντίστοιχες τιμές 24ώρου για τις περιοχές χρήσεων γης κατοικίας δεν υπερβαίνουν τα 60 W m^{-2} , συμπεριλαμβανομένων και των πιο πυκνοδομημένων συνοικιών. Υψηλές μέσες τιμές ανθρωπογενών εκπομπών θερμότητας τείνουν επίσης να εμφανίζονται στους κύριους αυτοκινητόδρομους (έως και 80 W m^{-2}). Μέτριας έντασης τιμές του Q_{FT} υπολογίστηκαν για το δευτερεύον οδικό δίκτυο, ως αποτέλεσμα των γνωρισμάτων της Αθήνας, από τη μία ως συμπαγής πόλη με εκτεταμένο δίκτυο μέσων μαζικής μεταφοράς και από την άλλη πολύ υψηλά ποσοστά ιδιοκτησίας οχημάτων.

Το Q_F της παραπάνω συζήτησης και του Σχήματος 5-7δ, αντιστοιχεί στις τιμές κατά τη διάρκεια της ημέρας και της νύχτας. Προκειμένου να αναδειχθεί η ημερήσια διακύμανση του Q_F και να αποτυπωθούν καλύτερα οι έντονες χωρικές διακυμάνσεις του, υπολογίστηκε το μέσο ημερήσιο χρονικά προφίλ του Q_F (κατά τον Ιούλιο 2012) για το «Εμπορικό Τρίγωνο Αθήνας» (επιφάνεια κάλυψης: $\sim 530000 \text{ m}^2$) (Τοποθεσία 01 στο Σχήμα 5-9) και πέντε αντιπροσωπευτικά εικονοστοιχεία (επιφάνεια κάλυψης: 10000 m^2) τα οποία αντιστοιχούν: α) σε ένα σημείο αιχμής των ανθρωπογενών περιοχών εντός του Εμπορικού Τριγώνου (οδός Σταδίου προς πλατεία Ομονοίας), β) στη τοποθεσία του μικρομετεωρολογικού πύργου του Thermopolis (οδός Πατησίων), γ) ένα σημείο αιχμής επί τη Λεωφόρο Κηφισού, δ) ένα πυκνοκατοικημένο οικοδομικό τετράγωνο στην περιοχή του Ζωγράφου και ε) ένα αραιοκατοικημένο οικοδομικό τετράγωνο στα Βριλήσσια (Τοποθεσίες 02–06 στο Σχήμα 5-9).

Για το κέντρο της πόλης (Εμπορικό Τρίγωνο) (Σχήμα 5-10α) παρατηρείται ότι το Q_F ακολουθεί μία κωνοειδή κατανομή με υψηλότερες τιμές μεταξύ του διαστήματος 9:00 και 17:00, οι

οποίες αντιστοιχούν στη συνδυασμένη επίδραση εκπομπών θερμότητας από τη χρήση συστημάτων κλιματισμού, την κίνηση των οχημάτων και τις διάφορες ανάγκες των γραφείων/μαγαζιών του κέντρου της πόλης. Μία σχετικά ασθενής αιχμή κατά τις πρώτες βραδινές ώρες αντανακλά το Q_F από τους χώρους ψυχαγωγίας της υπό εξέταση περιοχής. Οι μέσες ημερήσιες εκπομπές για το Εμπορικό Τρίγωνο είναι περίπου 75 W m^{-2} , με ένα μέγιστο άνω των 100 W m^{-2} . Το σημείο αιχμής εμπορικών χρήσεων του Σχήματος 5-10β ακολουθεί έναν παρόμοιο ημερήσιο κύκλο· ωστόσο χαρακτηρίζεται από πολύ υψηλότερες ανθρωπογενείς πηγές θερμότητας με μία μέση ημερήσια τιμή των 125 W m^{-2} και ένα μέγιστο των 170 W m^{-2} . Επιπρόσθετα το ημερήσιο σημείο αιχμής ξεπέρασε τα 185 W m^{-2} κατά τη θερμότερη μέρα του μήνα.



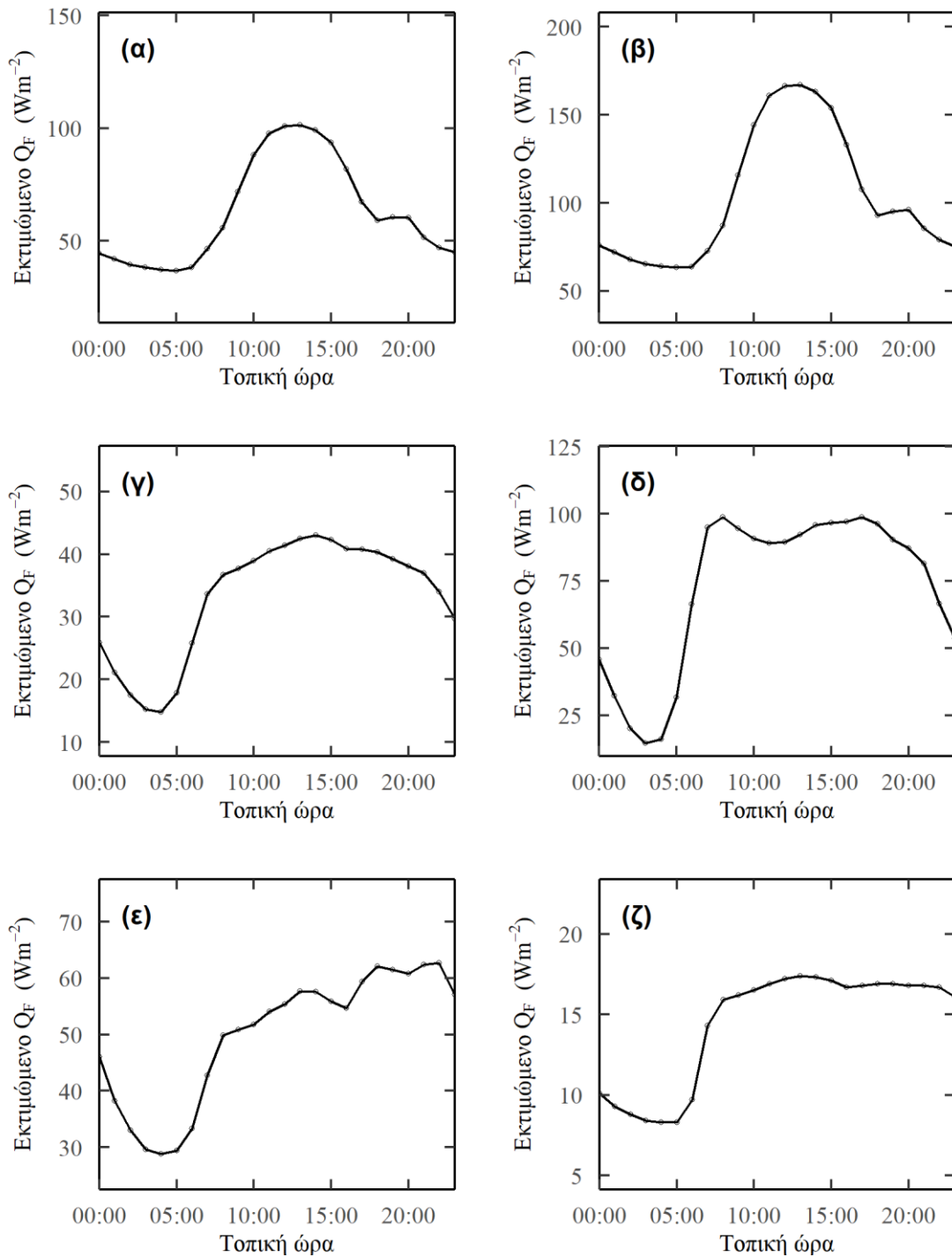
Σχήμα 5-9 Χωροθέτηση συγκεκριμένων εξεταζόμενων περιοχών εντός της αστικής περιοχής της Αθήνας. Υπόβαθρο: εικόνα Landsat 8 (28 Ιουνίου 2017) σε χρωματική σύνθεση κόκκινο-πράσινο-μπλε (RGB).

Όσο απομακρυνόμαστε από τον κεντρικό πυρήνα της πόλης ελαττώνεται η ένταση των ανθρωπογενών εκπομπών, όπως παρατηρείται για παράδειγμα στο Σχήμα 5-10γ (Πατησίων). Για την ίδια περιοχή, συμπίπτουσα περίοδο και παρόμοιες μετεωρολογικές συνθήκες οι Rapsomanikis et al. (2015) προσδιόρισαν την τιμή του Q_F στα 50 W m^{-2} . Η παραπάνω εκτίμηση προήλθε από την υπόθεση ότι οι ανθρωπογενείς εκπομπές συμπεριλαμβάνονται στο άθροισμα των τυρβωδών ροών και στην ανερχόμενη θερμική ακτινοβολία και αξιοποιώντας κατόπιν μια παρατηρούμενη χρονική υστέρηση μεταξύ των εργάσιμων ημερών και της Κυριακής. Παρά τη διαφορά μεταξύ αυτής της προσέγγισης με τη μεθοδολογία της παρούσας εργασίας, επιτυγχάνεται μία ικανοποιητική συμφωνία, με το εκτιμώμενο ημερήσιο Q_F να υπολογίζεται εδώ στα $\sim 40 \text{ W m}^{-2}$ (Σχήμα 5-10γ). Επιπλέον το χρονικό προφίλ του παραπάνω σχήματος διαφέρει από εκείνο του Σχήματος 5-10α, λόγω της ισχυρότερης συνεισφοράς εκπομπών από οχήματα και οικείες στην περιοχή συγκριτικά με τη συνιστώσα του εμπορικού τομέα.

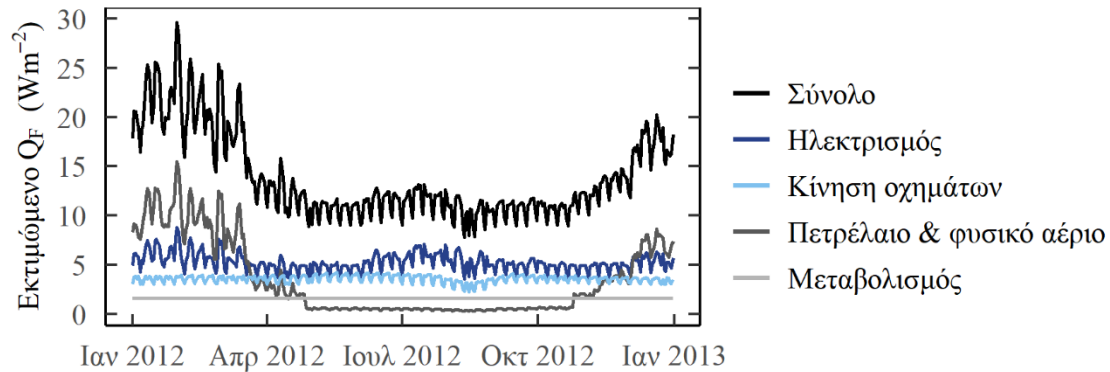
Η ημερήσια εξέλιξη του Q_F είναι σημαντικά διαφορετική για την περίπτωση της Λεωφόρου Κηφισού (Σχήμα 5-10δ). Τα δύο μέγιστα που παρατηρούνται στην παραπάνω εικόνα αντιστοιχούν στην αυξημένη κίνηση οχημάτων τις ώρες αιχμής των πρωινών και απογευματινών ωρών. Κατά τις

συγκεκριμένες χρονικές στιγμές το Q_F λαμβάνει τιμές έως και 100 W m^{-2} , ενώ αντίστοιχα οι εκπομπές θερμότητας κατά τις βραδινές ώρες πλησιάζουν το μηδέν. Αντίθετα, η πυκνοδομημένη τοποθεσία κατοικίας του Σχήματος 5-10ε παρουσιάζει υψηλότερο Q_F κατά τις απογευματινές-βραδινές ώρες —αντανακλώντας το γεγονός ότι τις συγκεκριμένες ώρες η πλειοψηφία του πληθυσμού βρίσκεται στους χώρους κατοικίας σε αντίθεση με τις πρωινές ώρες. Η μέση ημερήσια ροή ανθρωπογενούς θερμότητα στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι 56 W m^{-2} , με το απόλυτο μέγιστο για τον Ιούλιο 2012 να σημειώνεται λίγο πάνω από τα 75 W m^{-2} . Κατά τις νυχτερινές ώρες παρατηρείται μία διατήρηση των σχετικά υψηλών τιμών του Q_F , ως απόρροια της χρήσης ηλεκτρικής ενέργειας για τη ψύξη των κτηρίων. Τέλος, για την αραιοδομημένη τοποθεσία του Σχήματος 5-10ζ (Βριλήσσια), οι ανθρωπογενείς εκπομπές είναι σημαντικά χαμηλότερες και οι ενδοημερήσιες διακυμάνσεις διακρίνονται δυσκολότερα.

Στο Σχήμα 5-11 παρουσιάζεται η ετήσια διακύμανση του συγκεντρωτικού Q_F για το σύνολο του ΠΣΠ, δίνοντας συγχρόνως και τις επιμέρους συνιστώσες των ανθρωπογενών εκπομπών. Ο μέσος όρος του Q_F για την περιοχή μελέτης κυμαίνεται από 7.8 W m^{-2} έως 29.6 W m^{-2} , με μία μέση τιμή των 13.9 W m^{-2} —συμπεριλαμβάνοντας στον παραπάνω υπολογισμό και τις αδόμητες περιοχές του αστικού ιστού καθώς και τις νυχτερινές ώρες. Οι εποχιακοί κύκλοι των εκπομπών για τον κτηριακό τομέα (Q_{FB}) (ηλεκτρική ενέργεια, πετρέλαιο θέρμανσης και φυσικό αέριο) αναπαράγονται αρκετά καλά ακολουθώντας τις μεταβαλλόμενες ανάγκες θέρμανσης και ψύξης. Αξίζει να παρατηρηθεί ότι το Q_{FB} είναι σαφώς υψηλότερο για τους χειμερινούς μήνες σε σύγκριση με τους καλοκαιρινούς. Το παραπάνω χαρακτηριστικό είναι σε συμφωνία με την πρόσφατα έρευνα ενεργειακής κατανάλωσης στα νοικοκυριά της ΕΛΣΤΑΤ (ΕΛΣΤΑΤ, 2013) όπου οι καταναλώσεις για ψύξη είναι σημαντικά μικρότερες αυτών για θέρμανση. Οι κυριότερες υποθέσεις για το παραπάνω εύρημα μπορούν να συνοψιστούν στις εξής: α) στη χαμηλή ποιότητα κατασκευής του κτηριακού αποθέματος, με μεγάλο ποσοστό των κτηρίων να μη διαθέτουν μόνωση, β) σε μία πιθανή κλιματολογική προσαρμογή του πληθυσμού σε υψηλότερες θερμοκρασίες και γ) στο γεγονός ότι ο συνολικός αριθμός των κατοίκων εντός του ΠΣΠ είναι χαμηλότερος τους μήνες Ιούλιο και Αύγουστο λόγω των θερινών διακοπών.



Σχήμα 5-10 Χρονική κατανομή του μέσου ωριαίου Q_F για τον Ιούλιο του 2012, σε έξι επιλεγμένα σημεία της περιοχής μελέτης: (α) το Εμπορικό Τρίγωνο Αθήνας, (β) ένα σημείο αιχμής ανθρωπογενών εκπομπών (ευρύτερη περιοχή Ομόνοιας), (γ) η περιοχή του προγράμματος Thermopolis (οδός Πατησίων), (δ) ένα σημείο υψηλής κίνησης οχημάτων (Λεωφόρος Κηφισού), (ε) μία τυπική πυκνοκατοικημένη συνοικία (Ζωγράφου) και (ζ) μία τυπική αραιοκατοικημένη συνοικία (Βριλήσσια).



Σχήμα 5-11 Ετήσια διακύμανση του συνολικού Q_F και των επιμέρους συνιστωσών του Q_F για το σύνολο του Πολεοδομικού Συγκροτήματος της Πρωτεύουσας, για το έτος 2012.

5.3.3 Δείκτης UHeatEx

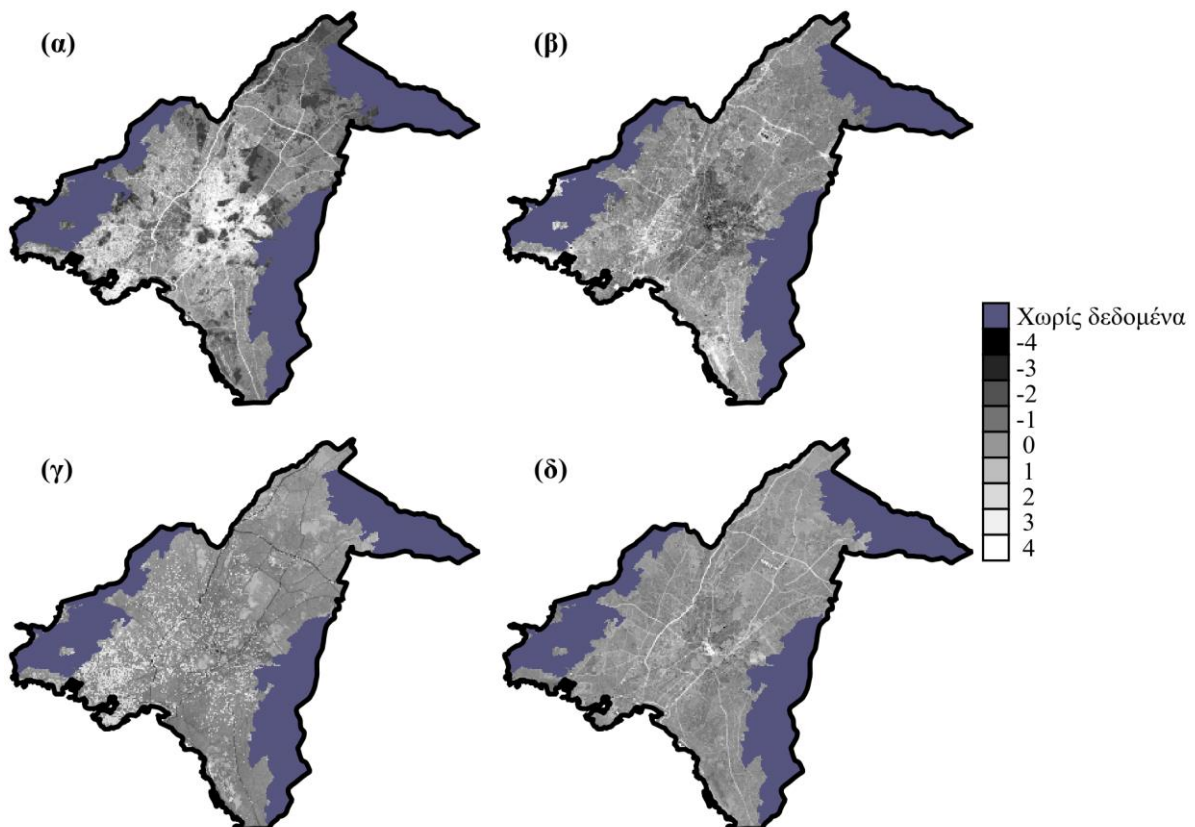
Στη συνέχεια, εφαρμόστηκε η μεθοδολογία της ανάλυσης στις κύριες συνιστώσες (PCA) στις προηγούμενες εκτιμώμενες εικόνες που αντιστοιχούν στις τέσσερις θερμικές παραμέτρους —δηλ. στα H/W , β_m , ΔQ_{sm} και Q_F — με τελικό στόχο την κατασκευή του δείκτη αστικής θερμικής έκθεσης (UHeatEx). Τα παραγόμενα αποτελέσματα της μεθόδου PCA παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στον Πίνακα 5-7 και το Σχήμα 5-12. Όπως παρατηρείται η πρώτη κύρια συνιστώσα (PC1) ενσωματώνει ένα μεγάλο ποσοστό της χωρικής μεταβλητότητας (50.6%) που χαρακτηρίζει τις αρχικές επιμέρους μεταβλητές. Ιδιαίτερα σημαντικό είναι το γεγονός ότι η συνιστώσα PC1 χαρακτηρίζεται από θετικούς συντελεστές (βαθμούς συνιστωσών) για όλες τις θερμικές παραμέτρους. Συνεπώς, μπορεί να θεωρηθεί ως η προκύπτουσα σύνθετη (composite) εικόνα της οποίας οι τιμές των εικονοστοιχείων αντιστοιχούν στη συναθροισμένη επίδραση των θερμικών παραμέτρων, ερμηνεύοντας συγχρόνως τη μέγιστη δυνατή μεταβλητότητα του αρχικού συνόλου των δεδομένων. Το ποσό της διακύμανσης το οποίο δεν περιγράφεται από την PC1, είναι σε έναν βαθμό αναμενόμενο, καθώς το αστικό κλίμα μπορεί να προσεγγισθεί ως το μίγμα των διαφορετικών θερμικών επιδράσεων, οι οποίες έχουν συχνά αντικρουόμενα αποτελέσματα. Παραδείγματος χάριν, υψηλές τιμές της παραμέτρου H/W —που εν γένει συνδέονται με ισχυρότερη θερμική επιβάρυνση— είναι πιθανόν να οδηγήσουν σε χαμηλότερο πρωινό T_s , εξαιτίας της σκίασης των κτηρίων και κυρίως της επιφάνειας της αστικής χαράδρας (επιφάνεια ασφάλτου).

Η δεύτερη κύρια συνιστώσα (PC2) εξηγεί ένα σημαντικό ποσό της υπόλοιπης μεταβλητότητας (23.7%): ωστόσο συνδέεται στενά με ειδικές μεμονωμένες περιπτώσεις περιοχών με διακριτή μικροκλιματική συμπεριφορά. Συγκεκριμένα, η συνιστώσα PC2 σχετίζεται κυρίως με αστικές ενότητες οι οποίες χαρακτηρίζονται από τον συνδυασμό πολύ υψηλών εκτιμήσεων ως προς το ΔQ_{sm} και χαμηλές τιμές της αναλογίας διαστάσεων H/W . Το παραπάνω μπορεί διαπιστωθεί από τις υψηλές τιμές και τα αντίθετα πρόσημα των συντελεστών των συνιστωσών στον Πίνακα 5-7 και από

Πίνακας 5-7 Οι προκύπτουσες τιμές των συντελεστών της ανάλυσης σε κύριες συνιστώσες.

Κύριες συνιστώσες ¹	H/W	β_m	ΔQ_{sm}	Q_F
PC1	0.524	0.476	0.381	0.594
PC2	-0.559	0.275	0.753	-0.210
PC3	-0.082	0.834	-0.451	-0.305
PC4	-0.637	0.042	-0.289	0.713

¹ Ποσοστό της ολικής μεταβλητότητας: PC1 = 50.6%, PC2 = 23.7%, PC3 = 16.8%, PC4 = 8.7%



Σχήμα 5-12 Αποτελέσματα της ανάλυσης στις κύριες συνιστώσες: (α) PC1, (β) PC2, (γ) PC3 και (δ) PC4.

τα χωρικά μοτίβα του Σχήματος 5-12β σε συνδυασμό με τα Σχήματα 5-7α και 5-7γ. Η συγκεκριμένη συνθήκη συμπίπτει με περιοχές τη πόλης με υψηλές τιμές του ποσοστού κάλυψης δομημένου εδάφους (λ_i) —κυρίως στην περιοχή του Ελαιώνα, στο πρώην αεροδρόμιο του Ελληνικού και σε λιμενικές εγκαταστάσεις— οι οποίες τείνουν να έχουν χαμηλότερη λευκαύγεια και υψηλούς συντελεστές στο μοντέλο OHM (βλ. Πίνακα 5-2). Μάλιστα, η συνιστώσα PC2 εκτιμάται ότι σε ένα βαθμό επηρεάζεται από μια αδυναμία του μοντέλου OHM στο ότι τείνει να υπερεκτιμάει το ΔQ_s για τις επιφάνειες ασφάλτου συγκριτικά με τις πολυώροφες κατασκευές (HC Ward et al., 2016). Τέλος, τα σημεία αιχμής όσον αφορά την αποθηκευόμενη θερμότητα της PC2, αναμένεται να επηρεάσουν σε μικρό βαθμό την ένταση του UHI, καθώς οι χαμηλές τιμές με τις οποίες συνοδεύονται θα οδηγούν σε

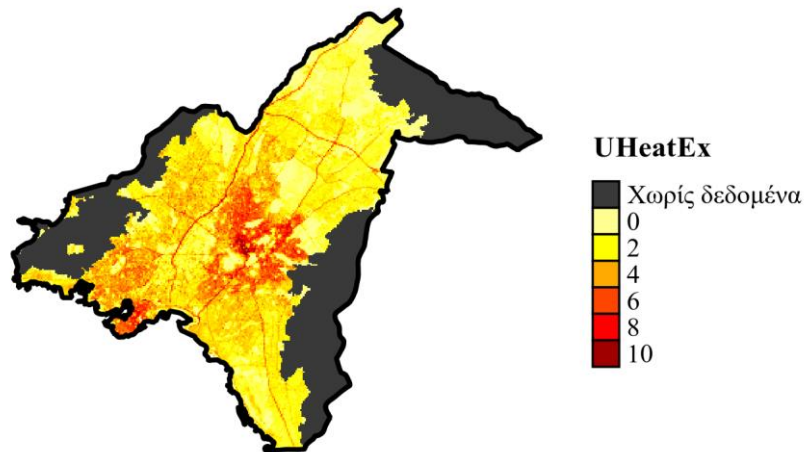
υψηλότερους ρυθμούς ψύξης. Κατ' αναλογία, όπως παρατηρείται από τον Πίνακα 5-7 και τα Σχήματα 5-12γ και 5-12δ, οι κύριες Συνιστώσες PC3 and PC4 αντιστοιχούν σε συγκεκριμένες περιπτώσεις εντός του αστικού ιστού με υψηλές εκτιμήσεις για τα β_m και Q_F . Ωστόσο, το ποσό της διακύμανσης που εξηγούν οι παραπάνω δύο συνιστώσες είναι σημαντικά χαμηλότερο, και επιπροσθέτως οι παράμετροι β_m και Q_F είναι ήδη ενσωματωμένες στη συνιστώσα PC1.

Λαμβάνοντας υπόψη όλα τα παραπάνω, καθορίστηκε ο δείκτης UHeatEx να συνδεθεί μόνον με την πρώτη κύρια Συνιστώσα (PC1). Αυτή η επιλογή δικαιολογείται περαιτέρω, λαμβάνοντας υπόψη ότι εξ ορισμού η μέθοδος της ανάλυσης σε κύριες συνιστώσες δίνει εκείνον τον γραμμικό συνδυασμό των συντελεστών στάθμισης ο οποίος ερμηνεύει τη μέγιστη μεταβλητότητα των αρχικών δεδομένων. Επομένως, η εφαρμογή ενός διαφορετικού συστήματος στάθμισης των παραμέτρων — π.χ. ίσα βάρη στάθμισης ή αυθαίρετη επιλογή τους— θα οδηγήσει σε ακόμα μικρότερη συμπεριλαμβανόμενη διακύμανση στην τελική εικόνα. Παρά ταύτα, στην περίπτωση όπου θα υπήρχε διαφοροποίηση ως προς το πρόσημο των επιμέρους συντελεστών για τη συνιστώσα PC1 (σε αντίθεση με την παρούσα περίπτωση των ομόσημων όρων του Πίνακα 5-7) τότε είτε θα έπρεπε να συμπεριληφθούν και οι δύο πρώτες συνιστώσες είτε να ακολουθηθεί μία διαφορετικά διαδικασία στάθμισης. Επιπλέον, καθώς ο UHeatEx αποτελεί έναν δείκτη με φυσική βάση, προτείνεται ότι οι επιμέρους τέσσερις συνιστώσες του (δηλ. τα H/W , β_m , ΔQ_{sm} και Q_F) θα πρέπει να παρουσιάζονται παράλληλα με τον δείκτη. Κατ' αυτόν τον τρόπο διακριτά γνωρίσματα της αστικής μορφολογίας και λειτουργία μπορούν να εντοπιστούν για διαφορετικές περιοχές, και κατά συνέπεια δύναται να προκριθούν ειδικά σχεδιασμένες τεχνικές κλιματικής προσαρμογής.

Τα τελικά αποτελέσματα για τον δείκτη —έπειτα από κανονικοποίηση των τιμών του σε κλίμακα 0–10— απεικονίζονται στο Σχήμα 5-13. Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, όλες οι εξεταζόμενες θερμικές παράμετροι εμφανίζουν θετικούς συντελεστές για τη συνιστώσα PC1 (και κατά συνέπεια τον UHeatEx), συνεπώς η κλίμακα του Σχήματος 5-13 μπορεί να ερμηνευτεί ως τις ακόλουθες τάξεις:

- 0–2: Πολύ χαμηλή θερμική έκθεση
- 2–4: Χαμηλή θερμική έκθεση
- 4–6: Μέτρια θερμική έκθεση
- 6–8: Υψηλή θερμική έκθεση
- 8–10: Πολύ υψηλή θερμική έκθεση

Η χωρική κατανομή του UHeatEx αναδεικνύει την ποικιλομορφία των επιμέρους μικροκλιματικών χαρακτηριστικών του ΠΣΠ. Οι υψηλότερες τιμές του UHeatEx εντοπίζονται στο κέντρο της Αθήνας όπου όλες οι κινητήριες δυνάμεις της πλεονάζουσας αστικής θέρμανσης έχουν υψηλές τιμές — ιδιαίτερα τα H/W και Q_F . Χαμηλή θερμική περιβαλλοντική ποιότητα εκτιμάται επίσης για τον δεύτερο πόλο υψηλής συγκέντρωσης εμπορικών χρήσεων γης στο βορειοανατολικό τμήμα του δήμου



Σχήμα 5-13 Δείκτης αστικής θερμικής έκθεσης (UHeatEx) σε χωρική διακριτική ικανότητα 100 m. Η κλίμακα κυμαίνεται από χαμηλή (0) σε υψηλή (10) θερμική περιβαλλοντική ποιότητα.

Αθηναίων (περιοχή Αμπελοκήπων), τις συνοικίες υψηλής οικιστικής πυκνότητας, το κέντρο και τους όμορους δήμους του Πειραιά. Οι σημαντικότερες οδικές αρτηρίες επίσης αποτυπώνονται εμφανώς, δεδομένου ότι χαρακτηρίζονται από σημαντικές ανθρωπογενείς εκπομπές θερμότητας και διακριτές ιδιότητες ως προς το υλικό κατασκευής τους. Τα βορειοανατολικά και τα ανατολικά προάστια τείνουν να εμφανίζουν τις χαμηλότερες τιμές του UHeatEx, ως απόρροια ενός πιο αραιοδομημένου αστικού περιβάλλοντος με ισχυρή παρουσία πρασίνου και χαμηλές ανθρωπογενείς εκπομπές θερμότητας. Οι χαμηλές τιμές της αναλογίας διαστάσεων αστικής χαράδρας για την περιοχή του Ελαιώνα οδηγεί η συγκεκριμένη χωρική ενότητα να χαρακτηρίζεται από σχετικά χαμηλές τιμές του δείκτη, αντανακλώντας την εν δυνάμει ισχυρότερη ψύξη της περιοχής μέσω ανεμπόδιστης εκπομπής θερμικής ακτινοβολίας.

Ακολούθως υπολογίστηκε η μέση ελάχιστη θερμοκρασία αέρα (T_{amin}) για τη θερμή περίοδο (Μάιος – Σεπτέμβριος) των ετών 2013 – 2018, για πέντε κεντρικούς μετεωρολογικούς σταθμούς της Αθήνας: α) Νέος Κόσμος, β) Αμπελόκηποι, γ) Νέα Σμύρνη, δ) Άνω Πατήσια και ε) Μαρούσι (Τοποθεσίες 07–11 στο Σχήμα 5-9). Όλοι οι παραπάνω σταθμοί είναι εγκατεστημένοι σε περιοχές οι οποίες αποδίδονται στην τοπική κλιματική ζώνη LCZ 2 (τόσο στη χωρική κλίμακα των 100 m και των 400 m), ωστόσο εμφανίζουν διαφοροποίηση ως προς τις τιμές του δείκτη UHeatEx. Επιλέχθηκε η ελάχιστη θερμοκρασία, καθώς το UHI είναι πρωτίστως νυχτερινό φαινόμενο (Oke, 1988; Johnson et al., 1991), λόγω του βραδύτερου ρυθμού ψύξης των αστικών περιοχών. Λόγω του ότι δεν ήταν διαθέσιμες μακροχρόνιες μετρήσεις της θερμοκρασίας αέρα εντός αστικών χαραδρών, χρησιμοποιήθηκαν μετρήσεις εντός του RSL (βλ. Ενότητα 5.2.3), οι οποίες μπορούν να θεωρηθούν ένα μίγμα των επιδράσεων των διεργασιών μικρής και τοπικής κλίμακας (Wicki et al., 2018). Τα αποτελέσματα που παρουσιάζουν στον Πίνακα 5-8 υποδεικνύουν ότι οι τιμές του UHeatEx ακολουθούν ικανοποιητικά τις μετρήσεις του T_{amin} , αντανακλώντας τόσο την αποθηκευόμενη θερμότητα κατά τη διάρκεια της ημέρας όσο τη σταδιακή έκλυσή της κατά τη διάρκεια της νύχτας.

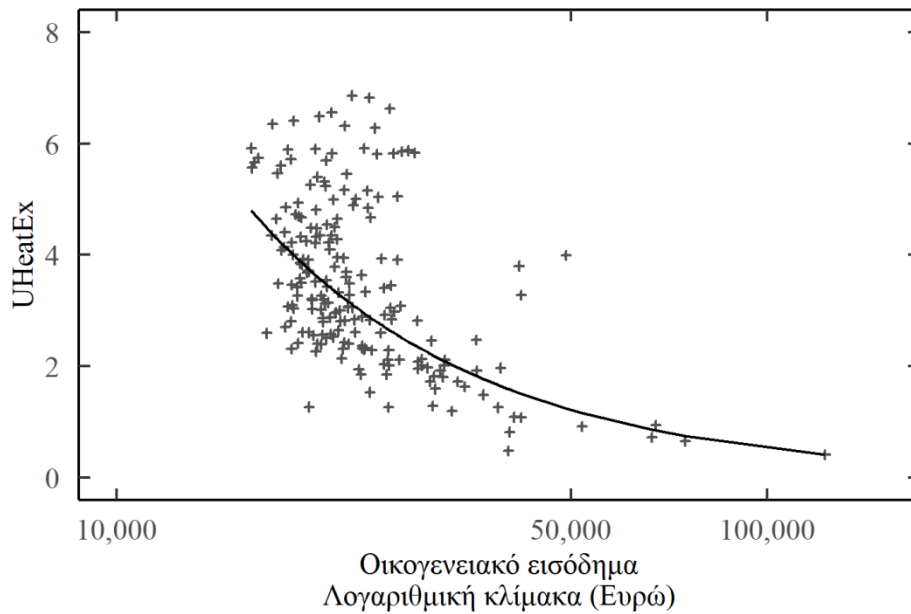
Ειδικά για το σταθμό στο Μαρούσι (Τοποθεσία 11) το υψηλό ποσοστό πρασίνου και η σχετιζόμενη δροσιστική επίδρασή του οδήγησαν σε σημαντικά χαμηλότερες θερμοκρασίες, παρόλο που ανήκει στην ίδια LCZ με τους υπόλοιπους σταθμούς.

Πίνακας 5-8 Σύγκριση της μέσης ελάχιστης θερμοκρασίας (T_{amin}) σε πέντε τοποθεσίες τάξης LCZ 2, για την περίοδο 2013-2018 (Μάιος – Σεπτέμβριος). Οι κωδικοί των σταθμών αναφέρονται στην αρίθμηση του Σχήματος 5-9.

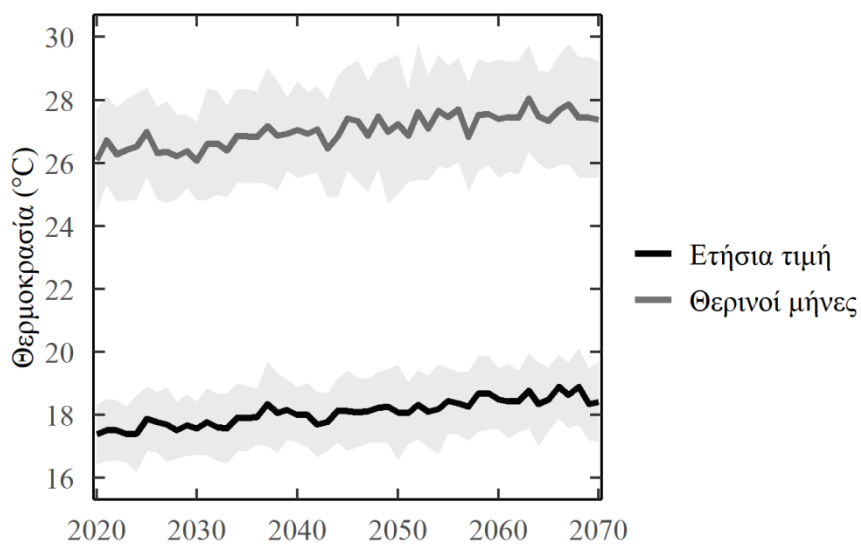
Όνομα	Κωδικός	Συντεταγμένες (E, N)	Υψόμετρο (m)	UHeatEx	T_{amin} (°C)
Νέος Κόσμος	07	23°43'57", 37°57'32"	85	6.3	23.2
Αμπελόκηποι	08	23°45'30", 37°58'54"	136	5.5	22.5
Νέα Σμύρνη	09	23°43'10", 37°57'5"	51	4.0	23.0
Άνω Πατήσια	10	23°43'47", 38°1'19"	90	3.4	22.3
Μαρούσι	11	23°48'36", 38°2'54"	235	2.6	20.9

Ο προτεινόμενος δείκτης θερμικής έκθεσης UHeatEx καταδεικνύει ότι τα αστικό θερμικό περιβάλλον της Αθήνας χαρακτηρίζεται από έντονη χωρική ανομοιογένεια τόσο μεταξύ των διαφορετικών συνοικιών του αστικού συγκροτήματος, αλλά συχνά και μεταξύ κοντινών οικοδομικών τετραγώνων. Εκ πρώτης όψεως, η παραπάνω θερμική ανισοκατανομή φαίνεται να συνδέεται με την κοινωνικοοικονομική κατάσταση του πληθυσμού. Χαμηλές τιμές του δείκτη (δηλ. ευνοϊκές μικροκλιματικές συνθήκες) εντοπίζονται στις εύπορες βόρειο- και νοτιοανατολικές περιοχές, ενώ υψηλές τιμές του UHeatEx καταγράφονται για τις κεντρικές και δυτικές συνοικίες όπου κατοικούν χαμηλά/μέσα εισοδηματικά στρώματα. Μια πιο σαφής εικόνα μπορεί να αποκτηθεί, εξετάζοντας τη σχέση μεταξύ του μέσου οικογενειακού εισοδήματος ανά ταχυδρομικό κώδικα για το έτος 2011 (Υπουργείο Οικονομικών, http://www.gsis.gr/gsis/info/gsis_site/PublicIssue/) και τις αντίστοιχες μέσες τιμές του UHeatEx (αστικές ενότητες μη κατοικίας δεν λήφθηκαν υπόψη). Όπως αποτυπώνεται στο Σχήμα 5-14, μπορεί να αξιολογηθεί ότι υπάρχει μια μέτριας έντασης συσχέτιση μεταξύ του εισοδήματος και του UHeatEx. Οι μέσες τιμές του δείκτη ανά ταχυδρομικό κωδικό κυμαίνονται μεταξύ τιμών μικρότερων του 1 για τα βόρεια περίχωρα του ΠΣΠ έως προσεγγιστικά την τιμή 7 για τις κεντρικές περιοχές· ένα σημαντικό εύρος τιμών εμφανίζεται για τα μέσα εισοδήματα. Η καμπύλη του Σχήματος 5-14 παρουσιάζει συντελεστή προσδιορισμού $R^2 = 0.45$.

Η κλιματική αλλαγή αναμένεται να ενισχύσει τις αρνητικές συνέπειες της παρούσας αστικής θερμικής επιβάρυνσης. Αυτό επιβεβαιώνεται από τις κλιματικές προβολές των υψηλής χωρικής διακριτικής ικανότητας Περιοχικών Μοντέλων (RCM) του προγράμματος EUROCORDEX. Στο Σχήμα 5-15 δίνεται η μέση τιμή του συνόλου των 15 εξεταζόμενων RCM σε συνδυασμό με την τυπική απόκλιση των διαφορετικών εκτιμήσεων για το σενάριο εκπομπών RCP 4.5. Παρατηρείται ότι προσομοιώνεται μια θετική τάση της τάξης των $0.24\text{ }^{\circ}\text{C}$ ανά δεκαετία για τη μέση ετήσια θερμοκρασία και της τάξης των $0.28\text{ }^{\circ}\text{C}$ ανά δεκαετία για τη μέση θερμοκρασία των θερινών μηνών.



Σχήμα 5-14 Συσχέτιση μεταξύ του οικογενειακού εισοδήματος και του δείκτη UHeatEx ανά ταχυδρομικό κωδικό της περιοχής μελέτης.



Σχήμα 5-15 Μελλοντική προβολή της θερμοκρασίας αέρα για την πόλη της Αθήνας, χρησιμοποιώντας το σύνολο των μοντέλων EURO-CORDEX για το χρονικό διάστημα 2020–2070. Το σκιασμένο τμήμα στο σχήμα αντιπροσωπεύει \pm μία τυπική απόκλιση.

5.4 Σχολιασμός αποτελεσμάτων

Η ανάγκη να ληφθεί υπόψη η αστική θερμική ευπάθεια τοπικής κλίμακας από τις κεντρικές διοικήσεις και τις δημοτικές αρχές κατά την εκπόνηση δράσεων προσαρμογής στην κλιματική αλλαγή είναι ιδιαίτερος επιτακτική. Ο δείκτης UHeatEx παρέχει ένα εύχρηστο εργαλείο για τον εντοπισμό των πιο κλιματικά ευαίσθητων αστικών ενοτήτων μέσα σε μια πόλη. Επιπλέον, το φυσικό

υπόβαθρο του δείκτη —ο οποίος ενσωματώνει την αστική μορφολογία, λειτουργία και ροές ενέργειας — δύναται να συμβάλει στην επιλογή κατάλληλων, ειδικά προσαρμοσμένων ανά περιοχή δράσεων οι οποίες μπορούν να βελτιώσουν το αστικό θερμικό περιβάλλον.

Γενικά, τα αποτελέσματα του UHeatEx (Σχήμα 5-13) δείχνουν ότι ο εν λόγω δείκτης αποτυπώνει καλύτερα την ετερογένεια του αστικού χώρου της Αθήνας σε σύγκριση με τη χαρτογράφηση της περιοχής σε τοπικές κλιματικές ζώνες (LCZ) (Σχήμα 5-6). Ο δείκτης αναδεικνύει τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της αστικής μορφολογίας της πόλης και επιτρέπει τη φυσική ερμηνεία και διασύνδεση των τιμών του. Το παραπάνω καταδεικνύεται επιπλέον από την εξέταση των τιμών του T_{amin} για πέντε μετεωρολογικούς σταθμούς της τάξης LCZ 2 (Πίνακας 5-8): ο UHeatEx κατόρθωσε σε μεγάλο βαθμό να ακολουθήσει τη θερμική διακύμανση των συγκεκριμένων περιπτώσεων. Περαιτέρω αξιολόγηση του δείκτη σχεδιάζεται σε μελλοντική έρευνα, στοχεύοντας στην αξιολόγηση μετρήσεων του T_a εντός του κτηριακού στρώματος (UCL).

Στη βιβλιογραφία, σε αρκετές μελέτες έχει επιτευχθεί ο προσδιορισμός των αστικών ροών ενέργειας, χρησιμοποιώντας τεχνικές δορυφορικής τηλεπισκόπησης (Kato and Yamaguchi, 2005; Xu et al., 2008; Hu et al., 2012; Zhou et al., 2012; Zhang et al., 2013; Q. Weng et al., 2014; Wong et al., 2015; Liu et al., 2016; Chrysoulakis et al., 2018; Crawford, Grimmond, et al., 2018; Feigenwinter et al., 2018). Ωστόσο, μόνο σε λίγες από αυτές πραγματοποιήθηκε αξιολόγηση των εκτιμώμενων τυρβωδών ροών μέσω επιτόπιων μετρήσεων από μικρομετεωρολογικό πύργο καταγραφής των ροών. Παρόλο τον σχετικά μικρό αριθμό των διαθέσιμων δεδομένων για την αξιολόγηση των ροών της παρούσας εργασία, η εκτιμώμενη ακρίβεια των υπολογισμών βρέθηκε να είναι στην ίδια τάξη μεγέθους με πρόσφατες εκτενείς αξιολογήσεις του προσδιορισμού των τυρβωδών ροών από δορυφορικές παρατηρήσεις (Chrysoulakis et al., 2018; Crawford, Grimmond, et al., 2018; Feigenwinter et al., 2018). Επιπλέον, η παρούσα εργασία διευρύνει τη γνώση ως προς τις δυνατότητες εφαρμογής της επιφανειακής θερμοκρασίας έπειτα από υποκλιμάκωση κατά τον υπολογισμό του Q_H , θέμα το οποίο έχει αξιολογηθεί μόνο στην περίπτωση των Chrysoulakis et al. (2018). Υπενθυμίζεται ότι η χρήση θερμικών δεδομένων υποκλιμάκωσης έχει ιδιαίτερη σημασία κατά τον προσδιορισμό υψηλής χωρο-χρονικής ανάλυσης ροών, λόγω της αντίστροφης σχέσης που υπάρχει μεταξύ της χρονικής και της χωρικής διακριτικής ικανότητας των δορυφορικών παρατηρήσεων (Zhan et al., 2013) (βλ. Κεφάλαιο 4).

Υψηλές ανθρωπογενείς εκπομπές θερμότητας υπολογίστηκαν για το κέντρο της Αθήνας ($Q_F = \sim 100 \text{ W m}^{-2}$ στο μέσο των θερινών ημερών, με τοπικά μέγιστα έως και 185 W m^{-2}) και τους κυριότερους αυτοκινητόδρομους. Αντίθετα, οι συγκεντρωτικές τιμές του Q_F για το σύνολο του ΠΣΠ ήταν σημαντικά μικρότερες (μέση συνολική τιμή κάτω από τα 30 W m^{-2} για όλες τις εξεταζόμενες ημερομηνίες), κυρίως λόγω των μειωμένων εκπομπών όσο απομακρυνόμαστε από το κέντρο της πόλης. Τα παραπάνω ευρήματα επιβεβαιώνουν τη σημασία της χρησιμοποιούμενης χωρικής κλίμακας κατά την αξιολόγηση των ανθρωπογενών ροών θερμότητας (Allen et al., 2011; Lindberg et al., 2013) και ακολουθούν τη γενική θεώρηση των Sailor and Lu (2004) ότι οι τιμές του Q_F στον κεντρικό

πυρήνα της πόλης μπορεί να είναι έως και 5–10 φορές υψηλότερες από τις συγκεντρωτικές τιμές για την ευρύτερη αστική περιοχή. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα της επίδρασης στο Q_F από την εξεταζόμενη χωρική και χρονική κλίμακα αποτελεί το Τόκυο, Ιαπωνία: για την πόλη αυτή, είχε υπολογιστεί στους Ichinose et al. (1999) μια πολύ υψηλή ημερήσια τιμή ανθρωπογενών εκπομπών — έως και άνω των 400 W m^{-2} — για χωρικές ενότητες επιφάνειας $25 \text{ m} \times 25 \text{ m}$ των κεντρικών, εμπορικών περιοχών της πόλης. Παρ' όλα αυτά, σε μεταγενέστερες μελέτες εκτιμήθηκε ότι η συγκεντρωτική ανθρωπογενής ροή για την πόλη του Τόκυο κυμαίνεται μεταξύ 20 και 40 W m^{-2} (Moriwaki et al., 2008; Dong et al., 2017). Συμπερασματικά, το σχετικά χαμηλό μέσο Q_F της παρούσας εργασίας για το ΠΣΠ (ετήσια μέση τιμή 14 W m^{-2}) συμφωνεί με τις συγκεντρωτικές μέσες εκτιμήσεις των ανθρωπογενών εκπομπών για αρκετές μεγαλουπόλεις παγκοσμίως: για παράδειγμα 13.2 W m^{-2} για την Κωνσταντινούπολη (Stewart and Kennedy, 2017), 10.9 W m^{-2} για το Λονδίνο (Iamarino et al., 2012), 6.2 W m^{-2} για το Μάντσεστερ (Smith et al., 2009) και 16.8 W m^{-2} για την Πόλη του Μεξικού (Stewart and Kennedy, 2017).

Όπως παρουσιάστηκε στο Σχήμα 5-13, ο δείκτης UHeatEx εμφάνισε μία σαφή συσχέτιση μεταξύ χαμηλής θερμικής επιβάρυνσης για τις περιοχές κατοικίας των πιο εύπορων κοινωνικών ομάδων και υψηλότερης επιβάρυνσης για τα χαμηλά εισοδήματα. Ωστόσο μπορεί να παρατηρηθεί ότι για τις υψηλότερες τιμές του δείκτη εμφανίζεται μια μετατόπιση προς ελαφρώς υψηλότερα οικογενειακά εισοδήματα. Η παραπάνω κατανομή μπορεί να ερμηνευτεί, λαμβάνοντας υπόψη τα σημαντικότερα στοιχεία της μεταπολεμικής πολεοδομικής εξέλιξης και του κοινωνικού διαχωρισμού στην Αθήνα (βλ. επίσης Ενότητα 3.1).

Κατά τις δεκαετίες του '50 έως '70, το εκείνη την περίοδο εύπορο κέντρο της πόλης, υπέστη ιδιαίτερα έντονη οικιστική πυκνώση μέσω του συστήματος της αντιπαροχής (Antonopoulou, 1991). Αυτό οδήγησε στην αντικατάσταση των υπαρχόντων μονοκατοικιών από πολυώροφα διαμερίσματα (Alexandri, 2018) σε δυσανάλογα στενούς δρόμους με υπερπλήρωση των κενών —δηλ. στη δημιουργία αστικών χαραδρών με πολύ υψηλή αναλογία διαστάσεων H/W . Αντίθετα, τα εργατικά στρώματα κατοικούσαν σε χαμηλότερα κτήρια, συχνά προϊόν άναρχης οικιστικής ανάπτυξης στη δυτική περιφέρεια του αστικού συγκροτήματος (Leontidou et al., 1990; Mantouvalou et al., 1995). Ως αποτέλεσμα, τα δυτικά προάστια ήδη από τότε διαμορφώνονται ως περιοχές περισσότερο ανοικτής δόμησης, με μικρότερη κτηριακή πυκνότητα, H/W και ανθρωπογενείς εκπομπές θερμότητας (Q_F). Η επιδείνωση των συνθηκών διαβίωσης στον κεντρικό πυρήνα του ΠΣΠ —συμπεριλαμβανομένης της θερμικής επιβάρυνσης όπως κατέδειξε ο δείκτης UHeatEx— οδήγησε τμήμα των μεσαίων και ανώτερων κοινωνικών τάξεων να μετακινηθούν εν μέρει προς τους όμορους δήμους (στους οποίους σύντομα επήλθε επίσης οικοδομικός κορεσμός) και σε σημαντικό βαθμό στα βόρειο και νοτιοανατολικά προάστια (Maloutas, 2000). Εξάιρεση στο παραπάνω αποτέλεσαν κάποιες ιστορικά σημαντικές συνοικίες του κέντρου της πόλης (για παράδειγμα η περιοχή του Κολωνακίου). Τη δεκαετία του '90, ένα σημαντικός αριθμός μεταναστών εγκαθίσταται στις περιοχές του κέντρου όπου

και αναμιγνύεται με τους παραμείναντες κατοίκους χαμηλών και μεσαίων κοινωνικών τάξεων (Maloutas, 2015).

Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω, ο καταγεγραμμένος κοινωνικός διαχωρισμός κατά τον άξονα ανατολή – δύση για το αστικό συγκρότημα της Αθήνας (Kalogirou, 2011; Panori, 2017) είναι λιγότερα έντονος όσον αφορά την εκτίμηση θερμικής επιβάρυνσης όπως αποτυπώνεται στα Σχήματα 5-13 και 5-14. Ειδικότερα, η δυτική περιφέρεια όπου παραδοσιακά κατοικούν χαμηλότερα κοινωνικά στρώματα χαρακτηρίζονται από ελαφρώς ευνοϊκότερες μικροκλιματικές συνθήκες — κυρίως λόγω μικρότερης οικιστικής πυκνωσης και χαμηλότερων υψών των κτηρίων— σε σύγκριση με τον δήμο Αθηναίων και τους έτερους γειτονικούς δήμους. Ωστόσο, μία διαστρωμάτωση της θερμικής περιβαλλοντικής ποιότητας και του εισοδήματος είναι σαφώς παρούσα στο πολεοδομικό συγκρότημα. Επιπλέον, η συνέργεια της αστικής θερμικής νησίδας και της παγκόσμιας υπερθέρμανσης αναμένεται να εντείνει τις συνέπειες της παραπάνω ανισοκατανομής (Σχήμα 5-15). Η αυξανόμενη ανάγκη για ψύξη των νοικοκυριών αναμένεται να υπερκεράσει αυτήν για θέρμανση τη μελλοντική περίοδο στην Ελλάδα (Eskeland and Mideksa, 2010; Asimakopoulos et al., 2012), ενώ παράλληλα θα ενταθεί η ήδη καταγραφόμενη επιβάρυνση του UHI στην υγεία των κατοίκων της Αθήνας (Paravantis et al., 2017).

5.5 Συμπεράσματα

Στην παρούσα εργασία ακολουθήθηκε μία νέα προσέγγιση ως προς την ανάπτυξη αστικών θερμικών δεικτών, προτείνοντας έναν δείκτη αστικής θερμικής έκθεσης (UHeatEx) ο οποίος αποτυπώνει την αστική μορφολογία, λειτουργία και ροές ενέργειας σε υψηλή χωρική ανάλυση (100 m). Οι τέσσερις παράμετροι που αντιπροσωπεύουν τις κυριότερες κινητήριες δυνάμεις των διεργασιών του UHI (H/W , β_m , ΔQ_{sm} και Q_F) υπολογίστηκαν κάνοντας χρήση τεχνικών δορυφορικής τηλεπισκόπησης —αξιοποιώντας την προτεινόμενη μεθοδολογία υποκλιμάκωσης του LST της παρούσας διατριβής— και GIS, σε συνδυασμό με μετεωρολογικά, χωρικά και ενεργειακά δεδομένα. Οι παραπάνω επιμέρους θερμικές συνιστώσες ενσωματώθηκαν κατόπιν στον δείκτη UHeatEx μέσω ανάλυσης σε κύριες συνιστώσες.

Οι κεντρικές περιοχές της Αθήνας βρέθηκαν να χαρακτηρίζονται από ιδιαίτερες υψηλές τιμές H/W (συχνά άνω του 2.5), ως αποτέλεσμα των χαρακτηριστικά στενών χαραδρών της περιοχής. Ο επιμερισμός της προσλαμβανουσας ηλιακής ενέργειας μεταξύ των τυρβωδών ροών ενέργειας (δηλ. ο λόγος Bowen) παρατηρήθηκε να εμφανίζει σημαντικά μεγάλη χωρική μεταβλητότητα. Το Q_E είναι ιδιαίτερα χαμηλό στα χαμηλής βλάστησης νοτιοδυτικά προάστια: ως αποτέλεσμα οι εκτιμήσεις β_m (κατά το μέσον της ημέρας) υπερβαίνουν το 20. Η επιφανειακή θερμοκρασία υποκλιμάκωσης εν γένει επέδειξε ικανοποιητική εφαρμογή κατά τον προσδιορισμό των τυρβωδών ροών, μολοντί λόγω των αβεβαιοτήτων της χρησιμοποιούμενης μεθοδολογίας, αυτή χρήζει περαιτέρω μελλοντικής αξιολόγησης. Οι ανθρωπογενείς εκπομπές θερμότητας βρέθηκαν να είναι σε μεγάλο βαθμό τοπικό

φαινόμενο. Συγκεκριμένα, οι συγκεντρωτικές τιμές του Q_F για το σύνολο της περιοχής μελέτης ήταν σχετικά χαμηλές, ωστόσο σημαντική ανθρωπογενής έκλυση θερμότητας καταγράφηκε για το κέντρο της πόλης (υπερβαίνοντας τα 100 W m^{-2} τους θερινούς μήνες) και τις οδικές αρτηρίες με υψηλή κίνηση οχημάτων. Η πλήρης και λεπτομερής αποτύπωση της αστικής μορφολογίας της Αθήνας του παρόντος κεφαλαίου, θα χρησιμοποιηθεί στο Κεφάλαιο 6 που ακολουθεί, κατά τη διερεύνηση με μεθόδους στατιστικής ανάλυσης της σύνδεσης μεταξύ παραμέτρων της αστικής επιφάνειας και του LST στην τοπική χωρική κλίμακα (1 km). Επιπλέον, στο επόμενο κεφάλαιο, τόσο η αστική μορφολογία όσο και η αστική λειτουργία (Q_F) θα αξιοποιηθούν ώστε η εφαρμογή του μοντέλου WRF να πραγματοποιηθεί με τα παρατηρούμενα χαρακτηριστικά της αστικής επιφάνειας και των ανθρωπογενών εκπομπών θερμότητας της Αθήνας.

Συνολικότερα, ο δείκτης UHeatEx κατόρθωσε να αναδείξει την εσωτερική ετερογένεια του θερμικού περιβάλλοντος της Αθήνας, αποτυπώνοντας καλύτερα τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της αστικής μορφολογίας και λειτουργίας σε σχέση με το σύστημα ταξινόμησης των Τοπικών Κλιματικών Ζωνών (LCZ). Παρ' ότι από την ανάλυση που προηγήθηκε αναδείχθηκαν ορισμένες αδυναμίες ως προς την εφαρμογή των LCZ, το συγκεκριμένο σύστημα ταξινόμησης παραμένει ένα πολύ σημαντικό εργαλείο της αστικής κλιματολογίας, ιδιαίτερα όταν μια πιο γενικευμένη περιγραφή των χαρακτηριστικών της αστικής μορφολογίας και λειτουργίας είναι το ζητούμενο. Έτσι, στο Κεφάλαιο 6, η μεθοδολογία ταξινόμησης της Αθήνας σε LCZ θα χρησιμοποιηθεί εκ νέου για την ερμηνεία του ημερήσιου κύκλου της επιφανειακής θερμοκρασίας της πόλης σε χωρική ανάλυση 1 km, καθώς και για την κατηγοριοποίηση των τάξεων της αστικής επιφάνειας κατά τη χρήση του μοντέλου WRF.

Εν κατακλείδι, χρησιμοποιώντας τον δείκτη UHeatEx, το ΠΣΠ βρέθηκε να χαρακτηρίζεται από σημαντική διακύμανση όσον αφορά την τρωτότητα στην αστική θερμική νησίδα και την κλιματική αλλαγή. Αυτή η άνιση κατανομή της θερμικής επιβάρυνσης διαπιστώθηκε να εμφανίζει συσχέτιση με την υπάρχουσα κοινωνική διαστρωμάτωση και να αποτελεί προϊόν των πρακτικών της αστικής ανάπτυξης της πόλης κατά τις προηγούμενες δεκαετίες. Ο UHeatEx μπορεί να αποτελέσει μια σημαντική συνιστώσα του βιώσιμου αστικού σχεδιασμού, καθώς αντιμετωπίζει την πόλη ως ένα τρισδιάστατο, δυναμικό σύστημα, σε αλληλεπίδραση με τις ανθρώπινες δραστηριότητες σε ένα μεταβαλλόμενο παγκόσμιο κλίμα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

Σύνδεση Μεταξύ Αστικών Μορφολογικών Παραμέτρων και Θερμικού Περιβάλλοντος με Χρήση Δορυφορικών Παρατηρήσεων και Αριθμητικής Προσομοίωσης

6.1 Εισαγωγή

Σε μικρές χωρικές κλίμακες (< 50 m) το αστικό περιβάλλον χαρακτηρίζεται από μία ιδιαίτερα ισχυρή ετερογένεια. Κάθε επιμέρους επιφάνεια αποτελείται από υλικά με διαφορετικές ιδιότητες, ενώ κάθε κτήριο ή δέντρο διαμορφώνει διακριτές μικροκλιματικές συνθήκες στον περιβάλλοντα χώρο του. Η πρώτη αστική χωρική ενότητα η οποία μπορεί να θεωρηθεί ότι εμπεριέχει ορισμένη σχετική ομοιογένεια στο εσωτερικό της, είναι το «οικοδομικό τετράγωνο» (χωρική κλίμακα ~100 m), οριοθετούμενο στη μετάβαση από τη μικροκλίμακα στην τοπική κλίμακα των αστικών κλιματικών φαινομένων (Oke et al., 2017). Στα προηγούμενα δύο κεφάλαια, εστίασαμε στην παραπάνω χωρική ανάλυση, υπολογίζοντας την επιφανειακή θερμοκρασία, τις ροές ενέργειας και τα γενικότερα χαρακτηριστικά της αστικής μορφολογίας και λειτουργίας, με σκοπό να υπολογιστεί τελικώς ένας δείκτης θερμικής έκθεσης (UHeatEx) σε υψηλή χωρική διακριτική ικανότητα, ο οποίος αναδεικνύει τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά και τη μεταβλητότητα των παραπάνω διαμορφούμενων αστικών ενοτήτων. Μεταβαίνοντας σε ένα πιο σαφές επίπεδο τοπικής κλίμακας (~1 έως 4 km) τα επιμέρους χαρακτηριστικά των οικοδομικών τετραγώνων συναθροίζονται πλέον σε ένα μέσο, διακριτό θερμικό περιβάλλον «συνοικιών» (neighbourhoods). Η υψηλότερη ομοιογένειά των συνοικιών συγκριτικά με τα οικοδομικά τετράγωνα, επιτρέπει την πιο γενικευμένη περιγραφή τους με βάση ορισμένες θεμελιώδεις ιδιότητες της μορφολογίας τους —όπως το μέσο ύψος των κτηρίων, η πυκνότητα κτηριακής δόμησης και το ποσοστό βλάστησης— κατά την εκτίμηση του θερμικού τους περιβάλλοντος, κάτι το οποίο αποτελεί το αντικείμενο μελέτης του παρόντος κεφαλαίου.

Η παραπάνω τοπική κλίμακα είναι κατά κανόνα και η μεγαλύτερη κατά την οποία μπορεί να επιτευχθεί ομοιογένεια στο αστικό περιβάλλον (Oke et al., 2017). Οι διαφοροποιήσεις μεταξύ γειτονικών αστικών ενοτήτων τοπικής κλίμακας, όσον αφορά την κάλυψη γης και την τρισδιάστατη κτηριακή μορφολογία τους, διαμορφώνουν επακόλουθα διαφορετικά τοπικά θερμικά χαρακτηριστικά. Όπως περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 5, το παραπάνω αποτελεί τη βάση κατά τη θεώρηση των Τοπικών Κλιματικών Ζωνών (Local Climate Zones, LCZ) (Stewart and Oke, 2012). Στο προηγούμενο κεφάλαιο, εν μέρει λόγω της χωρικής κλίμακας η οποία εξετάστηκε, οι LCZ υστέρησαν συγκριτικά με τον προτεινόμενο δείκτη θερμικής έκθεσης UHeatEx· εδώ, το σχήμα των

LCZ επανεξετάζεται κατά την αξιολόγηση της ενδοαστικής διακύμανσης του LST και αξιοποιείται στην αριθμητική προσομοίωση με ατμοσφαιρικό μοντέλο που θα πραγματοποιηθεί.

Η ανομοιογένεια μεταξύ των διαφορετικών ενοτήτων τοπικής κλίμακας στο εσωτερικό μιας πόλης συνεπάγεται ότι για την πλήρη κάλυψη των θερμοκρασιακών χαρακτηριστικών της περιοχής απαιτείται ένα ιδιαίτερα πυκνό δίκτυο σταθμών καταγραφής της θερμοκρασίας αέρα (T_a). Αν και τέτοιου είδους δίκτυα παρατηρούνται συχνότερα κατά τα τελευταία έτη (π.χ. Skarbit et al., 2017) η εγκατάσταση και η συντήρησή τους εμφανίζει δυσκολίες. Ως εκ τούτου, αποτελεί συνήθης πρακτική για τη μελέτη του αστικού μικροκλίματος η χρησιμοποίηση —συχνά επικουρικά των μετρήσεων μετεωρολογικών σταθμών— δορυφορικών παρατηρήσεων ή/και αριθμητικών ατμοσφαιρικών μοντέλων.

Όπως έχει προαναφερθεί στα προηγούμενα στάδια της εργασίας μέσω συστημάτων δορυφορικής τηλεπισκόπησης δύναται να πραγματοποιηθεί η καταγραφή της επιφανειακής θερμοκρασίας του εδάφους (Land Surface Temperature, LST). Μολονότι έχει επιχειρηθεί συχνά στη βιβλιογραφία μια άμεση στατιστική σχέση μεταξύ των T_a και LST, αυτή παρουσιάζει σημαντικό βαθμό αβεβαιότητα (Voogt and Oke, 2003). Για παράδειγμα, πρόσφατα οι Azevedo et al. (2016) κατέδειξαν ότι αν και μπορεί να επιτευχθεί αρκετά καλή συσχέτιση μεταξύ των LST– T_a για επιμέρους σταθμούς, δεν συμβαίνει το ίδιο κατά την ανάπτυξη μιας σχέσης με καθολική εφαρμογή για το σύνολο της περιοχής μελέτης ή ανά χρήση γης. Παρ’ όλα αυτά η φυσική διασύνδεση μεταξύ των δυο θερμοκρασιών είναι αυταπόδεικτη, ως απόρροια των διεργασιών σύζευξης αστικής επιφάνειας-ατμόσφαιρας.

Εκτός από την περίπτωση της συνεξέτασής της με τη θερμοκρασία αέρα, η επιφανειακή θερμοκρασία χρησιμοποιείται συχνά σε μελέτες με σκοπό τη σύνδεσή της με τα χαρακτηριστικά της αστικής επιφάνειας. Η πλειονότητα της σχετικής διεθνούς βιβλιογραφίας έχει εστιάσει στη διερεύνηση της σχέσης που σημειώνεται ανάμεσα στη βλάστηση και το LST. Οι Gallo et al. (1993) μελέτησαν το πως συνδέονται σε ένα αστικό συγκρότημα οι τιμές του LST με εκείνες του Κανονικοποιημένου Διαφορικού Δείκτη Βλάστησης (Normalized Differentiated Vegetated Index, NDVI). Στους Weng et al. (2004) προτάθηκε ότι η χρήση του ποσοστού επιφανειακής βλάστησης λ_v (αντί του NDVI) μπορεί να βελτιώσει την παραγόμενη συσχέτιση. Άλλες μελέτες αξιοποίησαν την παραπλήσια παράμετρο του ποσοστού αδιαπέρατων επιφανειών λ_{imp} (Yuan and Bauer, 2007; Imhoff et al., 2010; Li et al., 2011) και επιπλέον φασματικούς δείκτες (π.χ. τον δείκτη Normalized Difference Built-up Index, NDBI) (Chen et al., 2006). Σε όλες τις παραπάνω περιπτώσεις εντοπίστηκε μία ισχυρή σύνδεση μεταξύ των αστικών επιφανειακών παραμέτρων και του LST.

Μετέπειτα ερευνητικές προσπάθειες διερεύνησαν τη χρήση των δεικτών της δομής του τοπίου (landscape metrics) για την επεξήγηση των χωρικών διακυμάνσεων της επιφανειακής θερμοκρασίας (Li et al., 2011; Zhou et al., 2011; Connors et al., 2013) και της έντασης της επιφανειακής αστικής θερμικής νησίδας (Surface Urban Heat Island, SUHI) (K Ward et al., 2016). Οι παραπάνω δείκτες διαχωρίζονται α) στους δείκτες σύνθεσης (composition) —οι οποίες αντιστοιχούν

εν γένει στην κλασική προσέγγιση του ποσοστού της κάλυψης γης— και β) στους δείκτες της διάρθρωσης (configuration) του τοπίου. Οι δείκτες διάρθρωσης αναφέρονται στον τρόπο με τον οποίο είναι διαταγμένα τα μελετώμενα στοιχεία στον χώρο, και περιλαμβάνουν μεταβλητές όπως η κατάτμηση (fragmentation) του τοπίου. Παρόλο που οι δείκτες διάρθρωσης ανέδειξαν σε ορισμένες μελέτες τη σημαντική επίδραση ιδιαίτερων γνωρισμάτων της αστικής δομής στη θερμοκρασία (Du et al., 2016), τείνουν να εμφανίζουν μικρότερη συσχέτιση με το LST συγκριτικά με τους δείκτες σύνθεσης (Zhou et al., 2011; A Chen et al., 2014; Galletti et al., 2019).

Σε ορισμένες από τις παραπάνω μελέτες με τη χρήση των δεικτών της δομής του τοπίου γίνεται επιπρόσθετα διαχωρισμός των αδιαπέρατων επιφανειών σε α) επιφάνεια κάλυψης των κτηρίων (λ_b) και β) επιφάνεια κάλυψης του αδιαπέρατου εδάφους (λ_i) (δηλ. δρόμων, πεζοδρομίων, κλπ.). Αυτό εντάσσεται σε ένα γενικότερο πλαίσιο μετατόπισης του ενδιαφέροντος προς τη μελέτη της διασύνδεσης του LST με επιπλέον παράγοντες της αστικής μορφολογίας οι οποίοι ενσωματώνουν την τρισδιάστατη δομή της πόλης, πέρα της δισδιάστατης προσέγγισης του ποσοστού βλάστησης ή δόμησης. Για παράδειγμα έχει εξεταστεί η σχέση του LST με τον όγκο των κτηρίων (Wu et al., 2013; Berger et al., 2017), τον συντελεστή θέασης ουρανού (sky view factor) (ψ_{sky}) (Chun and Guldmann, 2014; Du et al., 2016; Guo et al., 2016; Berger et al., 2017; Chun and Guhathakurta, 2017; Yin et al., 2018) και το ύψος των κτηρίων (H) (Guo et al., 2016; Berger et al., 2017; Yang et al., 2018; Sun et al., 2019).

Έκτος από τις δορυφορικές παρατηρήσεις, η χρήση ενός μετεωρολογικού αριθμητικού μοντέλου αποτελεί μία ακόμα εναλλακτική προσέγγιση ως προς τη διερεύνηση του αστικού θερμικού περιβάλλοντος, με την προϋπόθεση ότι η προγνωστική ικανότητα του μοντέλου αξιολογείται με βάση επιτόπιες μετρήσεις. Ένας σημαντικός αριθμός προηγμένων σχημάτων παραμετροποίησης των αστικών χαρακτηριστικών έχει αναπτυχθεί και συζευχθεί με μοντέλα μέσης κλίμακας από τις αρχές της δεκαετίας του 2000 (Masson, 2000; Dupont et al., 2004; Kusaka et al., 2004). Το ατμοσφαιρικό μοντέλο Weather Research and Forecasting Model (WRF) (Skamarock et al., 2008) έχει ενσωματώσει τρία αστικά σχήματα παραμετροποίησης (Chen et al., 2011): α) το «μονοδιάστατο» (bulk) σχήμα (Liu et al., 2006), β) το σχήμα «Single-layer Urban Canopy Model» (SLUCM) (Kusaka et al., 2001), και γ) το σχήμα «Building Effect Parameterization – Building Energy Model» (BEP–BEM) (Martilli et al., 2002; Salamanca et al., 2009). Χάρης στις ευρύτερες δυνατότητες που προσφέρει το WRF, τα τελευταία χρόνια έχει παρατηρηθεί ένας μεγάλος αριθμός μελετών οι οποίες κάνουν χρήση ή/και αναπτύσσουν περαιτέρω τροποποιήσεις του μοντέλου κατά την εφαρμογή του σε αστικό περιβάλλον (Giannaros et al., 2013; Li and Bou-Zeid, 2013; Sarmiento et al., 2017; Mauree et al., 2018; Salamanca et al., 2018; Li et al., 2019).

Επιπλέον, μια αστική περιοχή δεν αντιμετωπίζεται πλέον ως απλώς ένα διακριτό και ομογενές τμήμα της περιοχής ολοκλήρωσης, αλλά αντίθετα ενσωματώνονται οι ενδοαστικές διαφοροποιήσεις με υψηλής χωρικής κλίμακας προσομοιώσεις, έως και 100 m (Ronda et al., 2017). Στο πλαίσιο αυτό, οι εφαρμογές των ατμοσφαιρικών μοντέλων ενισχύονται με τα διαθέσιμα χωρικά

δεδομένα της αστικής μορφολογίας —για παράδειγμα χρησιμοποιώντας συγκεκριμένες τιμές της λευκαύγειας και του ποσοστού βλάστησης (λ_v) από δορυφορικές παρατηρήσεις (Vahmani and Ban-Weiss, 2016) ή επεκτείνοντας τις κατηγορίες χρήσεων και κάλυψης γης (Göndöcs et al., 2017; Giannaros et al., 2018). Επί του τελευταίου βρίσκει εφαρμογή το προαναφερθέν σχήμα των LCZ, εισάγοντας στις τάξεις των χρήσεων γης του μοντέλου την τρισδιάστατη μορφολογία της πόλης. Ελλείψει συγκεκριμένων δεδομένων για μια πόλη, η χαρτογράφηση σε LCZ μπορεί να καταστεί εφικτή μέσω του προγράμματος «World Urban Database and Access Portal Tools» (WUDAPT) (Mills et al., 2015) με χρήση δορυφορικών καταγραφών στο ορατό και το εγγύς υπέρυθρο κομμάτι του φάσματος. Με βάση τα παραπάνω, αυξανόμενος αριθμός μελετών ενσωματώνει τις τοπικές κλιματικές ζώνες κατά την αριθμητική προσομοίωση του αστικού μικροκλίματος με το μοντέλο WRF (Brousse et al., 2016; Hammerberg et al., 2018; Franco et al., 2019; Molnár et al., 2019).

Όπως προκύπτει από την παραπάνω συζήτηση, τα τελευταία έτη επιχειρείται μια πολύπλευρη ανάδειξη των διαφοροποιήσεων στο εσωτερικό του αστικού ιστού με βάση τα χαρακτηριστικά της αστικής μορφολογίας. Σε αρκετές ερευνητικές εργασίες έχει εξεταστεί η συσχέτιση που παρουσιάζεται μεταξύ των χαρακτηριστικών της τρισδιάστατης αστικής επιφάνειας και του LST. Ωστόσο, στις προηγούμενες μελέτες πραγματοποιήθηκε κατά κανόνα ταυτόχρονη διερεύνηση περιορισμένου αριθμού πόλεων και δορυφορικών εικόνων. Συχνά, η σχετική μελέτη περιορίζεται μόνο σε δορυφορικές παρατηρήσεις κατά τη διάρκεια της ημέρας, με τη νυχτερινή αποτύπωση του θερμικού περιβάλλοντος να παραλείπεται. Επίσης, μέχρι στιγμής τα αποτελέσματα των παραπάνω μελετών είναι σε ένα βαθμό αντικρουόμενα, ιδίως σε ότι αφορά την επίδραση της κατακόρυφης διάστασης του κτηριακού περιβάλλοντος. Οι διαφορετικές προσεγγίσεις όσον αφορά τα δορυφορικά δεδομένα, τον τρόπο εξαγωγής του LST, τις εξεταζόμενες παραμέτρους και τα εφαρμοζόμενα στατιστικά μοντέλα δεν έχουν επιτρέψει την εξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων. Ακόμα, σημειώνεται λιγιστή μελέτη για την επίδραση που ασκούν στο LST σημαντικές παράμετροι της αστικής μορφολογίας, όπως η αναλογία διαστάσεων της αστικής χαράδρας (H/W). Όσον αφορά το WRF, η παράλληλη χρήση των SLUCM και LCZ έχει αξιολογηθεί σε λίγες μελέτες (Molnár et al., 2019), ενώ δεν έχει εκτενώς μελετηθεί η προγνωστική ικανότητα του μοντέλου ως προς τις χωρικές διαφοροποιήσεις της επιφανειακής θερμοκρασίας εντός ενός αστικού συγκροτήματος.

Στο παρόν κεφάλαιο θα επιχειρηθεί αρχικά μία συγκριτική, στατιστική μελέτη της σχέσης που σημειώνεται μεταξύ παραμέτρων της αστικής μορφολογίας και της επιφανειακής θερμοκρασίας στην τοπική κλίμακα (1000 m). Για να ισχυροποιηθεί η δυνατότητα γενίκευσης των συμπερασμάτων της στατιστικής ανάλυσης, πέραν της Αθήνας θα εξεταστούν αρχικώς ακόμα 24 ευρωπαϊκές πόλεις. Η εξεταζόμενη περίοδος αφορά τις ανέφελες ημέρες ενός χρονικού διαστήματος τριών μηνών (Ιούνιος – Αύγουστος 2017). Οι παράμετροι που θα εξεταστούν είναι το ποσοστό των αδιαπέρατων επιφανειών (λ_{imp}), το ποσοστό της επιφάνειας κάλυψης από κτήρια (λ_b) και το ύψος των κτηρίων (H). Τα λ_{imp} και λ_b επιλέχθηκαν καθώς αποτελούν βασικές παράμετροι για την περιγραφή της αστικής μορφολογίας, με σημαντική καταγραφόμενη σύνδεση με το LST στη βιβλιογραφία. Η επιλογή του H

έναντι άλλων παραμέτρων που περιγράφουν την κατακόρυφη διάσταση της πόλης (π.χ. H/W) προέκυψε λόγω της διαθεσιμότητας των δεδομένων του για το σύνολο των πόλεων της μελέτης. Η μελέτη εφαρμόζεται τόσο στις ημερήσιες όσο και στις νυχτερινές παρατηρήσεις του αισθητήρα MODIS (χωρική διακριτική ικανότητα 1000×1000 m). Κατόπιν, πραγματοποιείται μία πιο εστιασμένη διερεύνηση για την περίπτωση της Αθήνας με χρήση επιπλέον μεταβλητών της αστικής μορφολογίας, οι οποίες υπολογίστηκαν στο Κεφάλαιο 5, όπως το H/W , η ολική αναλογία διαστάσεων (λ_c) και το ποσοστό αδιαπέρατου εδάφους (λ_i) και αξιολογείται η δυνατότητα ερμηνείας των ενδοημερήσιων διακυμάνσεων μέσω των χαρακτηριστικών της αστικής επιφάνειας και της ταξινόμησης των τοπικών κλιματικών ζωνών. Επιπρόσθετα, για την ίδια περιοχή εφαρμόζεται μία τροποποιημένη έκδοση του ατμοσφαιρικού μοντέλου WRF και του σχήματος παραμετροποίησης SLUCM μέσω της κατηγοριοποίησης των LCZ, αξιοποιώντας τις τιμές των παραμέτρων της αστικής μορφολογίας και λειτουργίας της Αθήνας, όπως υπολογίστηκαν στα προηγούμενα στάδια της εργασίας, συμπεριλαμβανομένης της ταξινόμησης της κάλυψης γης μέσω των καταγραφών του δορυφόρου Sentinel-2 στο Κεφαλαίο 4. Ειδικότερα μελετάται μια περίπτωση επεισοδίου καύσωνα πέντε ημερών εντός της συνολικότερης εξεταζόμενης περιόδου και διερευνάται κατά πόσο το αριθμητικό μοντέλο WRF μπορεί να αναπαραγάγει τις χωρικές διακυμάνσεις της επιφανειακής θερμοκρασίας, όπως αυτή καταγράφεται από τους δορυφορικούς δέκτες. Τέλος, εξετάζεται η προγνωστική ικανότητα του μοντέλου σε ότι αφορά την επιφανειακή θερμοκρασία αέρα σε σύγκριση με παρατηρησιακά δεδομένα από ένα εκτεταμένο δίκτυο αυτόματων μετεωρολογικών σταθμών της περιοχής μελέτης.

Για λόγους πληρότητας, αρχικά θα πραγματοποιηθεί στην ενότητα που ακολουθεί μία σύντομη παρουσίαση των κύριων συνιστωσών του ατμοσφαιρικού μοντέλου WRF.

6.2 Περιγραφή του ατμοσφαιρικού μοντέλου WRF

Τα παρουσιαζόμενα στοιχεία στις Ενότητες 6.2.1 – 6.2.5 που ακολουθούν, βασίζονται εν πολλοίς στην τεχνική έκθεση του μοντέλου WRF των Skamarock et al. (2008)· για μία αναλυτικότερη παρουσίαση των χαρακτηριστικών του μοντέλου ο αναγνώστης παραπέμπεται στην εν λόγω εργασία.

6.2.1 Γενικές εξισώσεις του μοντέλου

Στο μοντέλο WRF για την περιγραφή της κατακόρυφης δομής του πλέγματος χρησιμοποιείται σύστημα συντεταγμένων το οποίο ακολουθεί την τοπογραφία, με την κατακόρυφη συντεταγμένη να δίνεται από την εξίσωση:

$$\eta = \frac{(p_{ah} - p_{aht})}{p_{ahs} - p_{aht}} \quad (6.1)$$

όπου p_{ah} η υδροστατική πίεση του ξηρού αέρα, ενώ μέσω των δεικτών t και s υποδηλώνεται το άνω όριο του πλέγματος και η επιφάνεια του εδάφους αντίστοιχα. Ο παρονομαστής στην παραπάνω

εξίσωσης αντιπροσωπεύει τη μάζα ξηρού αέρα ανά μονάδα επιφάνειας (μ_d) που εμπεριέχεται στην κατακόρυφη στήλη κάθε κυψελίδας της επιφάνειας του πλέγματος. Οι προγνωστικές μεταβλητές της ταχύτητας $\mathbf{v} = (u, v, w)$ και της δυναμικής θερμοκρασίας θ μπορούν να μετασχηματιστούν σε μορφή μεταβλητών με μονάδες ροής ως εξής:

$$\mathbf{V} = \mu \mathbf{v} \quad (6.2)$$

$$\theta = \mu \theta \quad (6.3)$$

Χρησιμοποιώντας τις παραπάνω μεταβλητές, μαζί με τη μη υδροστατική πίεση p , την αναλογία μίγματος q , τον ειδικό όγκο του αέρα a και τον ειδικό όγκο του ξηρού αέρα a_d , οι θεμελιώδεις εξισώσεις των ατμοσφαιρικών διεργασιών υπολογίζονται στο WRF από τις ακόλουθες σχέσεις:

i. Διατήρηση ορμής:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{V}u + \alpha \mu_d \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{a}{a_d} \frac{\partial p}{\partial \eta} \frac{\partial \varphi}{\partial x} = F_U \quad (6.4)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{V}v + \alpha \mu_d \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{a}{a_d} \frac{\partial p}{\partial \eta} \frac{\partial \varphi}{\partial y} = F_V \quad (6.5)$$

$$\frac{\partial W}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{V}w + g(\mu_d - \frac{a}{a_d} \frac{\partial p}{\partial \eta}) = F_W \quad (6.6)$$

ii. Διατήρηση θερμότητας:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{V}\theta = F_\theta \quad (6.7)$$

iii. Διατήρηση μάζας:

$$\frac{\partial \mu_d}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{V} = 0 \quad (6.8)$$

iv. Διατήρηση νερού:

$$\frac{\partial \mu_d q}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{V}q = F_q \quad (6.9)$$

Στις παραπάνω εξισώσεις οι όροι F_U , F_V , F_W , F_θ και F_q αντιπροσωπεύουν κατά περίπτωση φυσικές διεργασίες του μοντέλου, την επίδραση της σφαιρικής προβολής του συστήματος συντεταγμένων και τις φαινόμενες δυνάμεις λόγω της περιστροφής της γης.

6.2.2 Χαρακτηριστικά του πλέγματος

Στο μοντέλο είναι διαθέσιμη η επιλογή μεταξύ τεσσάρων διαφορετικών χαρτογραφικών προβολών: α) της σύμμορφης (conformal) κωνικής προβολής Lambert, β) της πολικής

στερεογραφικής προβολής, γ) της Μερκατορικής προβολής και δ) της προβολής γεωγραφικού πλάτους/μήκους. Σε όλες τις περιπτώσεις, μέσω της εφαρμογής κατάλληλων συντελεστών στις εξισώσεις του μοντέλου εξασφαλίζεται ότι το μέγεθος των κυψελίδων στο οριζόντιο πλέγμα (δηλ. οι τιμές των Δx και Δy) παραμένει σταθερό. Ως προς τη χωρική διαφόριση χρησιμοποιείται το κλιμακούμενο (staggered), οριζόντιο πλέγμα Arakawa-C. Στο συγκεκριμένο πλέγμα οι συνιστώσες της οριζόντιας ταχύτητας u , v και w ορίζονται στις θέσεις $\frac{1}{2}\Delta x$, $\frac{1}{2}\Delta y$ και $\frac{1}{2}\Delta z$ αντίστοιχα των κυψελίδων του πλέγματος, ενώ οι υπόλοιπες μεταβλητές (π.χ. οι θερμοδυναμικές μεταβλητές) υπολογίζονται στο μέσο των κυψελίδων.

Για το οριζόντιο πλέγμα είναι διαθέσιμη η επιλογή της χρήσης επάλληλων (nested) πλεγμάτων —δηλ. εσωτερικών πλεγμάτων στο εξωτερικό πλέγμα του πεδίου ολοκλήρωσης. Κατ' αυτόν τον τρόπο, δίνεται η δυνατότητα για υψηλότερης χωρικής ανάλυσης προσομοίωση σε συγκεκριμένες υποπεριοχές. Η εφαρμογή του μοντέλου με τη χρήση επάλληλων πλεγμάτων περιλαμβάνει είτε μονόδρομη (από το εξωτερικό προς το εσωτερικό πλέγμα) είτε αμφίδρομη αλληλεπίδραση των πλεγμάτων. Στην πρώτη περίπτωση, η προγνωστική πληροφορία του εξωτερικού —μικρότερης χωρικής διακριτικής ικανότητας— πλέγματος αποτελεί τις οριακές συνθήκες του ένθετου πλέγματος. Επιπρόσθετα με την παραπάνω συνθήκη, στη δομή επάλληλων πλεγμάτων δύο δρόμων (αμφίδρομη αλληλεπίδραση) οι προκύπτουσες τιμές από την υψηλής ανάλυσης προσομοίωση του εσωτερικού πλέγματος αντικαθιστούν τις τιμές των μεταβλητών στην αντίστοιχη περιοχή της προσομοίωσης του εξωτερικού πλέγματος. Ο λόγος της χωρικής ανάλυσης των δύο πλεγμάτων πρέπει να είναι ακέραιος αριθμός, προκειμένου οι κυψελίδες να συμπίπτουν στα όρια του εσωτερικού πλέγματος. Εάν οριστούν περισσότερα των δύο επάλληλα πλέγματα, τότε για κάθε επιμέρους περίπτωση ένθετου και εξωτερικού πλέγματος θα πρέπει να ικανοποιούνται τα προαναφερθέντα χαρακτηριστικά.

6.2.3 Χρονική διαφόριση

Η αριθμητική προσομοίωση του μοντέλου πραγματοποιείται με ένα «time-split» σχήμα χρονικής διαφόρισης. Όσον αφορά τα ταχέως διαδιδόμενα κύματα χρησιμοποιείται ένα μικρότερο χρονικό βήμα από τις άλλες διεργασίες έτσι ώστε να ικανοποιούνται τα κριτήρια ευστάθειας, ενώ για τις διεργασίες μικρότερης συχνότητας χρησιμοποιείται το σχήμα Runge-Kutta τρίτης τάξης. Πιο συγκεκριμένα, το σχήμα Runge-Kutta εφαρμόζεται στις προγνωστικές μεταβλητές ψ του μοντέλου, ολοκληρώνοντας χρονικά από τη στιγμή t στη $t + \Delta t$ (Δt : το χρονικό βήμα του μοντέλου) ως εξής:

$$\psi^* = \psi^t + \frac{\Delta t}{3} F(\psi^t) \quad (6.10)$$

$$\psi^{**} = \psi^t + \frac{\Delta t}{2} F(\psi^*) \quad (6.11)$$

$$\psi^{t+\Delta t} = \psi^t + \Delta t F(\psi^{**}) \quad (6.12)$$

όπου με $F(\psi)$ συμβολίζονται οι θεμελιώδεις εξισώσεις του μοντέλου.

6.2.4 Αρχικές και οριακές συνθήκες

Τα δεδομένα εισόδου του WRF χρησιμοποιούνται στους ενσωματωμένους προ-επεξεργαστές του μοντέλου για την παραγωγή των αρχικών και των οριακών συνθηκών της προσομοίωσης. Απαιτούνται τρισδιάστατα πεδία ανάλυσης ως προς τη θερμοκρασία, τη σχετική υγρασία, τον άνεμο και το γεωδυναμικό ύψος, και επιφανειακές τιμές για την πίεση στην επιφάνεια της θάλασσας, τη θερμοκρασία του εδάφους και της θάλασσας, και την περιεκτικότητα του εδάφους σε υγρασία. Τα παραπάνω δεδομένα προέρχονται είτε από τα αποτελέσματα της εφαρμογής μετεωρολογικών μοντέλων παγκόσμιας κλίμακας είτε από μια βάση δεδομένων «επανα-ανάλυσης» (reanalysis). Ταυτόχρονα, για την προσομοίωση του WRF είναι αναγκαία βοηθητικά χωρικά δεδομένα ως προς τις στατικές μεταβλητές της περιοχής ενδιαφέροντος (κάλυψη γης, ορογραφία, κλπ.). Το σύνολο των παραπάνω δεδομένων παρεμβάλλονται χωρικά στις κυψελίδες του μοντέλου κατά την οριζόντια και κατακόρυφη (στην περίπτωση των τρισδιάστατων πεδίων) διεύθυνση και κατόπιν χρησιμοποιούνται κατά την κυρίως εφαρμογή του μοντέλου.

6.2.5 Σχήματα παραμετροποίησης

Στις Ενότητες 6.2.5.1 – 6.2.5.2 πραγματοποιείται μία συνοπτική περιγραφή των κυριότερων σχημάτων παραμετροποίησης του ατμοσφαιρικού μοντέλου WRF. Σε όλες τις περιπτώσεις δίνεται έμφαση κατά την περιγραφή στο σχήμα του οποίου έγινε χρήση στην παρούσα μελέτη (βλ. Ενότητα 6.3.4).

6.2.5.1 Μικροφυσική των νεφών

Στο WRF εμπεριέχονται αρκετά διαφορετικά σχήματα παραμετροποίησης της μικροφυσικής των νεφών, τα οποία διαφέρουν ως προς τις κατηγορίες νερού που συμπεριλαμβάνουν, την περιγραφή ή μη των νεφών μικτής φάσης και τις διεργασίες αύξησης του μεγέθους των νεφοσταγόνων και των παγοκρυστάλλων. Τα σημαντικότερα εξ αυτών είναι α) το σχήμα «WRF μίας ροπής» (WRF Single-Moment, WSM3) (Hong et al., 2004), β) το «Eta GCP» (Eta Grid-scale Cloud and Precipitation) (Mesinger et al., 2012), γ) το «Thompson» (Thompson et al., 2004) και δ) το «Goddard Morrison διπλής ροπής» (Goddard Morrison 2-moment) (Tao and Simpson, 1993). Τα σχήματα διπλής ροπής συμπεριλαμβάνουν επιπρόσθετα την αριθμητική συγκέντρωση των σωματιδίων, σε αντίθεση με τα σχήματα μίας ροπής τα οποία διαθέτουν προγνωστική εξίσωση μόνο για τη σχετική τους συγκέντρωση.

Το σχήμα WMS6 (Hong and Lim, 2006) αποτελεί βελτίωση του WMS3 και συμπεριλαμβάνει έξι τύπους υδρομετεώρων: υδρατμούς, νεφοσταγονίδια, υδροσταγόνες, παγοκρυστάλλους, νιφάδες

χιονιού και μορφώματα πάγου (graupel). Οι υδροσταγόνες μπορούν να βρίσκονται σε κατάσταση υπέρτηξης, ενώ οι διεργασίες κορεσμού ως προς την υγρή και τη στερεά φάση του νερού αντιμετωπίζονται ξεχωριστά. Επιπλέον, το WMS6 επιτρέπει τη δημιουργία υδρομετεώρων μικτής φάσης (πάγος και νερό).

6.2.5.2 Κατακόρυφη μεταφορά

Τα σχήματα παραμετροποίησης της κατακόρυφης μεταφοράς είναι υπεύθυνα για την ενσωμάτωση στο μοντέλο των νεφών κατακόρυφης ανάπτυξης, συμπεριλαμβανομένης της «ρηχής» (shallow) κατακόρυφης μεταφοράς. Αφορούν διαδικασίες υποπλέγματος (subgrid) και εφαρμόζονται κατά κανόνα στα πλέγματα μικρής/μεσαίας χωρικής ανάλυσης (> 5 km), καθώς για υψηλότερη ανάλυση οι αντίστοιχες διεργασίες επιλύονται ρητά (explicitly) από το μοντέλο. Τα ενσωματωμένα σχήματα κατακόρυφης μεταφοράς στο WRF παρουσιάζουν αρκετές διαφορές μεταξύ τους ως προς την περιγραφή της διεργασίας της κατακόρυφης ανάπτυξης: α) το σχήμα «Betts-Miller-Janjic» (BMJ) (Janjic, 1994) βασίζεται στον μετασχηματισμό των κατατομών θερμοκρασίας/υγρασίας σε αντίστοιχες κατατομές αναφοράς, β) το σχήμα «Grell-Devenyi» (Grell and Dévényi, 2002) στηρίζεται στην ύπαρξη εισροής μάζας στο κάτω μέρος του νέφους, ενώ γ) στο σχήμα «Kain-Fritsch (Kain, 2004) γίνεται λεπτομερής ενσωμάτωση των ανοδικών/καθοδικών κινήσεων.

Συγκεκριμένα στο Kain-Fritsch χρησιμοποιούνται μεταβαλλόμενοι ρυθμοί εισχώρησης (entrainment) και διάχυσης (detrainment) του περιβάλλοντος αέρα από και προς το νέφος. Το σχήμα ενεργοποιείται εάν το δείγμα αέρα έχει την απαιτούμενη δυναμική ενέργεια έτσι ώστε να ξεπεράσει την κρίσιμη τιμή της παραμέτρου της «αναστολής των κατακόρυφων κινήσεων μεταφοράς» (convective inhibition, CIN).

6.2.5.3 Ακτινοβολία

Όλα τα σχήματα ακτινοβολίας του μοντέλου είναι μονοδιάστατα, δηλαδή κάθε κατακόρυφη στήλη αντιμετωπίζεται ανεξάρτητα, ενώ γίνεται η παραδοχή ότι το πάχος των κατακόρυφων επιπέδων είναι πολύ μικρότερο από την οριζόντια διάσταση του μοντέλου. Οι κυριότερες διαφορές των σχημάτων εντοπίζονται στον συνολικό αριθμό των επιμέρους φασματικών ζωνών που εξετάζονται, στην πληρότητα που εμφανίζουν στην ενσωμάτωση των διαφορετικών χημικών ενώσεων της ατμόσφαιρας και στην αλληλεπίδραση που εμφανίζουν με τα υπόλοιπα σχήματα του μοντέλου.

Για την ακτινοβολία μεγάλου μήκους κύματος τα κυριότερα σχήματα παραμετροποίησης είναι το α) το «CAM» (Community Atmosphere Model) (Collins et al., 2004), β) το «GFDL» (Geophysical Fluid Dynamics Laboratory) (Schwarzkopf and Fels, 1991) και γ) το «RRTM» (Rapid Radiative Transfer Model) (Mlawer et al., 1997). Το RRTM είναι ένα πλήρες μοντέλο διάδοσης ακτινοβολίας το οποίο χωρίζει το φάσμα της περιοχής του υπέρυθρου σε 16 φασματικές ζώνες. Αναπαριστά το σύνολο των αλληλεπιδράσεων της υπέρυθρης ακτινοβολίας με τους υδρατμούς, το διοξείδιο του άνθρακα, το όζον και το οπτικό πάχος του νέφους.

Για την περίπτωση της ακτινοβολίας μικρού μήκους κύματος, το σχήμα «MM5 Dudhia» (Dudhia, 1989) παρά την παράλειψη της αλληλεπίδρασης της ηλιακής ακτινοβολίας με ορισμένες χημικές ενώσεις (π.χ. διοξείδιο του άνθρακα) αποτελεί ένα αξιόπιστο σχήμα ακτινοβολίας το οποίο καλύπτει τις βασικές διεργασίες διάδοσης στην ατμόσφαιρα —τη σκέδαση της μικρού μήκους ακτινοβολίας από τα στοιχεία της ατμόσφαιρας και την αλληλεπίδρασή της με τους υδρατμούς και τα νέφη. Στα πλεονεκτήματα του MM5 Dudhia συμπεριλαμβάνεται η μικρή απαίτηση για υπολογιστικό χρόνο κατά την εφαρμογή του.

6.2.5.4 Πλανητικό οριακό στρώμα

Με τη χρήση των σχημάτων παραμετροποίησης του πλανητικού οριακού στρώματος ενσωματώνονται στο μοντέλο WRF οι διεργασίες της κατακόρυφης μεταφορά των μετεωρολογικών παραμέτρων μέσω στροβίλων —καθ' όλο το ύψος της στήλης κάθε κυψελίδας του πλέγματος. Το σχήμα «MYJ» (Mellor-Yamada-Janjic) (Janjić, 2002) αποτελεί ένα τοπικό σχήμα πρόβλεψης της τυρβώδους κινητικής ενέργειας. Αντίθετα, το «MRF» (Medium Range Forecast) (Hong and Pan, 1996) (Hong et al., 2006) αποτελεί ένα μη τοπικού χαρακτήρα σχήμα —δηλ. επιτρέπεται στο μοντέλο η μεταφορά τύρβης— με το ύψος του οριακού στρώματος να υπολογίζεται με βάση τον κρίσιμο αριθμό Richardson bulk. Το σχήμα «YSU» (Yonsei University) (Hong et al., 2006) αποτελεί ένα λεπτομερές σχήμα παραμετροποίησης του ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος, το οποίο αναπτύχθηκε ως βελτίωση του MRF. Συγκεκριμένα, η κυριότερη διαφορά των δύο παραπάνω σχημάτων έγκειται στο ότι μέσω του YSU επιλύονται ρητά οι διεργασίες εισροής (entrainment) αέρα στην κορυφή του οριακού στρώματος. Επιπλέον επιτυγχάνεται καλύτερη ανάμιξη των ατμοσφαιρικών μεταβλητών συγκριτικά με το MRF, όπου στην περίπτωση του δεύτερου εσφαλμένα σημειώνονται συχνά συνθήκες ατμοσφαιρικής ευστάθειας εντός του αναμεμιγμένου στρώματος.

6.2.5.5 Επιφανειακό στρώμα

Τα σχήματα παραμετροποίησης της παρούσας κατηγορίας χρησιμοποιούνται κατά κύριο λόγο για τον υπολογισμό των αναγκαίων μεταβλητών ως προς τις διαδικασίες της τυρβώδους μεταφοράς (π.χ. ταχύτητα τριβής, τυρβώδεις συντελεστές μεταφοράς). Όλα τα σχήματα της παραμετροποίησης του επιφανειακού στρώματος που βρίσκονται ενσωματωμένα στο WRF — σχήματα «MM5» (Paulson, 1970), «Eta» (Janjić, 2002) και «PX» (Pleim-Xiu) (Pleim, 2006)— στηρίζονται στη θεωρητικό πλαίσιο της «Θεωρίας Ομοιότητας».

6.2.5.6 Έδαφος

Τα σχήματα παραμετροποίησης του εδάφους —συντά αναφερόμενα ως «Μοντέλα Επιφάνειας Εδάφους (Land Surface Model, LSM)— είναι επιφορτισμένα με την αναπαράσταση σχεδόν του συνόλου των διεργασιών της επιφάνειας, κατέχοντας έτσι τον άκρως σημαντικό ρόλο στο μοντέλο της σύζευξης ατμόσφαιρας-επιφάνειας. Συγκεκριμένα, μέσω των συγκεκριμένων σχημάτων παραμετροποίησης υπολογίζεται μεταξύ άλλων η ανακλώμενη από το έδαφος ηλιακή ακτινοβολία, οι

τυρβώδες ροές ορμής, θερμότητας και υγρασίας, η θερμοκρασία της επιφάνειας και του υπεδάφους, η συσσώρευση του νερού στην επιφάνεια, κ.ά. Ως εκ τούτου, το εκάστοτε σχήμα εδάφους αλληλοεπιδρά με την πλειονότητα των υπολοίπων σχημάτων παραμετροποίησης του μοντέλου, κατά κύριο λόγο εισάγοντας απ' αυτά τις απαραίτητες τιμές των σχετικών παραμέτρων και εξάγοντας κατόπιν τις υπολογιζόμενες ροές ενέργειας.

Στο σχήμα «Pleim-Xiu LSM» (Pleim, 2006) η αναπαράσταση των φυσικών επιφανειών πραγματοποιείται μέσω της θεώρησης ότι το έδαφος αποτελεί ένα μίγμα βλάστησης και χώματος, με το τελευταίο να αποτελείται από ένα λεπτό επιφανειακό στρώμα (1cm) και ένα βαθύτερο στρώμα στο υπεδάφος (1 m). Η εξάτμιση μπορεί να γίνεται απ' ευθείας από το νερό που βρίσκεται στο έδαφος και το φύλλωμα των φυτών ή μέσω της διαδικασίας της διαπνοής των φυτών. Το σχήμα «Noah LSM» (Chen and Dudhia, 2001) αποτελεί ένα ιδιαίτερα πλήρες σχήμα παραμετροποίησης του εδάφους. Υπολογίζει τις ροές αισθητής και λανθάνουσας θερμότητας, την αντίσταση του στρώματος της κόμης του στρώματος βλάστησης και μέσω προγνωστικών εξισώσεων τη θερμοκρασία και την υγρασία σε τέσσερα στρώματα του υπεδάφους. Επιπλέον πραγματοποιεί περιγραφή του επιφανειακού ισοζυγίου ροής, της απορροής των υδάτων και του σχηματισμού πάγου ή χιονιού.

6.2.5.7 Αστικό περιβάλλον

Τις τελευταίες δεκαετίες έχει πραγματοποιηθεί σημαντική πρόοδος στη σύζευξη αστικών σχημάτων παραμετροποίησης με τα ατμοσφαιρικά μοντέλα μέσης κλίμακας —όπως για παράδειγμα το μοντέλο Fifth-generation Penn State/NCAR Mesoscale Model (MM5) (Dupont et al., 2004; Dandou et al., 2005), το MESONH (Lemonsu et al., 2004), το UK Met Office mesoscale model (Best, 2005), και το WRF (Kusaka et al., 2004). Πιο συγκεκριμένα, για το μοντέλο WRF το αστικό περιβάλλον, όπως προαναφέρθηκε στην Ενότητα 6.1, μπορεί να παραμετροποιηθεί με ένα από τρία διαθέσιμα σχήματα: α) το μονοδιάστατο (bulk) σχήμα (Liu et al., 2006), β) το μοντέλο αστικού κτηριακού στρώματος «Building Effect Parameterization» (BEP) (Martilli et al., 2002) —με δυνατότητα παράλληλης εφαρμογής ενός ενεργειακού μοντέλου κτηρίων (Building Energy Model) (BEP-BEM) (Salamanca et al., 2009)—, και γ) το μοντέλο αστικού κτηριακού στρώματος «Single-Layer Urban Canopy Model» (SLUCM) (Kusaka et al., 2001).

Το bulk σχήμα παραμετροποίησης αντιστοιχεί ουσιαστικά στην αστική προσαρμογή του σχήματος παραμετροποίησης του εδάφους Noah LSM, το οποίο περιγράφηκε στην προηγούμενη ενότητα. Έτσι στη συγκεκριμένη περίπτωση —χωρίς να λαμβάνεται άμεσα υπόψη η τρισδιάστατη αστική μορφολογία— ορίζονται οι τυπικές τιμές μιας σειράς αστικών επιφανειακών παραμέτρων (όπως η λευκαύγεια, το μήκος τραχύτητας, η θερμοχωρητικότητα και η θερμική αγωγιμότητα) με σκοπό να ενσωματωθεί η αστική επίδραση στις διεργασίες του μοντέλου. Το σχήμα BEP-BEM ενσωματώνει τις βασικές διαστάσεις της αστικής χαράδρας (δρόμος, τοίχοι και οροφές κτηρίων), ορίζοντας παράλληλα πολλαπλά κατακόρυφα επίπεδα κοντά στο έδαφος. Τα δυναμικά χαρακτηριστικά της τύρβης περιγράφονται θεωρώντας τα κτήρια ως πηγές και καταβόθρες ορμής και

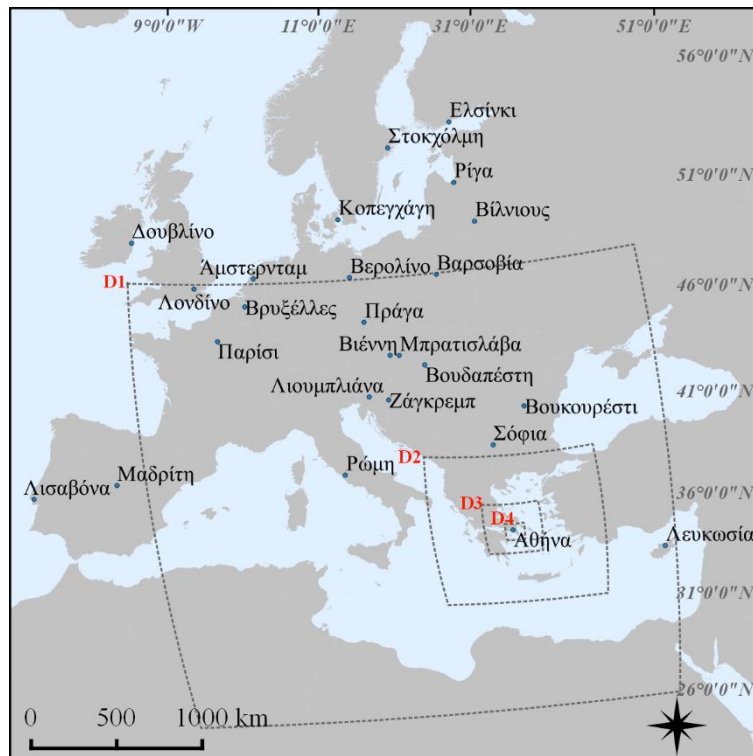
θερμότητας. Η ανθρωπογενείς πηγές θερμότητας υπολογίζονται μέσω της παραμετροποίησης της ενεργειακής κατανάλωσης για ψύξη των κτηρίων από το υπομοντέλο BEM.

Στο σχήμα SLUCM η τρισδιάστατη μορφολογία της πόλης ενσωματώνεται με τη σχηματική θεώρηση μίας συμμετρικής αστικής χαράδρας απείρου μήκους. Εντός της αστικής χαράδρας το SLUCM έχει ενσωματώσει τις διεργασίες της σκίασης, των πολλαπλών ανακλάσεων της ηλιακής ακτινοβολίας και της παρεμπόδισης της διαφυγής της εξερχόμενης θερμικής ακτινοβολίας. Το ενεργειακό ισοζύγιο και οι επιφανειακές θερμοκρασίες επιλύονται ξεχωριστά για το κάτω μέρος της χαράδρας (δηλ. την επιφάνεια του δρόμου), τα τοιχώματα της χαράδρας και την οροφή των κτηρίων. Τα παραπάνω τμήματα της αστικής χαράδρας χωρίζονται περαιτέρω σε τρία εσωτερικά στρώματα. Το μοντέλο δίνει τη δυνατότητα να οριστούν τιμές ποικίλων αστικών παραμέτρων (π.χ. το ύψος των κτηρίων, το πλάτος του δρόμου, η ανακλαστικότητα της οροφής, κ.ά.). Μεταξύ αυτών συμπεριλαμβάνεται η επίδραση της αστικής λειτουργίας, δηλ. η ροή ανθρωπογενούς θερμότητας και η ενδομερήσια διακύμανσή της.

6.3 Δεδομένα και μεθοδολογία

6.3.1 Περιοχή μελέτης

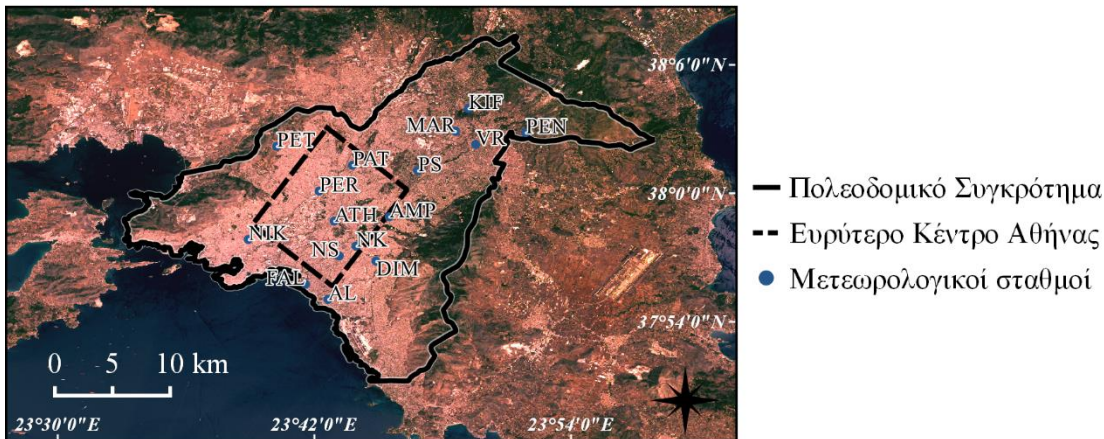
Στο παρόν κεφάλαιο της διατριβής επιπρόσθετα με την περίπτωση της Αθήνας (Πολεοδομικό Συγκρότημα της Πρωτεύουσας) μελετήθηκε το επιφανειακό θερμικό περιβάλλον 25 ευρωπαϊκών πόλεων (Σχήμα 6-1). Σύμφωνα με τα στοιχεία του Πίνακα 6-1 —κλιματική ταξινόμηση Köppen-Geiger, πηγή: Kottek et al., 2006— το κλίμα των εξεταζόμενων πόλεων παρουσιάζει σημαντική ποικιλομορφία, ρυθμιζόμενο κατά κύριο λόγο από το γεωγραφικό πλάτος και την εγγύτητα στη θάλασσα κάθε περιοχής. Υπό κανονικές συνθήκες το UHI αποτελεί επιβαρυντικό παράγοντα κυρίως για τα κράτη της νότιας Ευρώπης, ως επακόλουθο της υψηλότερης μέσης θερμοκρασίας αέρα που σημειώνεται σε αυτά. Ωστόσο, η συνέργεια του UHI με τα επεισόδια καύσωνα έχει βρεθεί να είναι ιδιαίτερα ισχυρή για τις κεντρικές και βορειότερες πόλεις της Ευρώπης (με βάση δορυφορικές παρατηρήσεις: Ward et al., 2016), όπου και έχει συχνά προβεί εξαιρετικά δυσμενής για την υγεία του πληθυσμού (Fouillet et al., 2006). Επιπρόσθετα, η πιθανότητα ακραίων τιμών θερμοκρασίας κατά τους θερινούς μήνες στην Ευρώπη αναμένεται να αυξηθεί σημαντικά τα επόμενα έτη λόγω της κλιματικής αλλαγής (Guerreiro et al., 2018). Για την περιγραφή του αστικού συγκροτήματος της Αθήνας (Σχήμα 6-2) ο αναγνώστης παραπέμπεται στο Κεφάλαιο 3.



Σχήμα 6-1 Το σύνολο των εξεταζόμενων ευρωπαϊκών πόλεων. Οι διακεκομμένες μαύρες γραμμές υποδεικνύουν τα τέσσερα επάλληλα πλέγματα της προσομοίωσης με το μοντέλο WRF, με αρίθμηση από το χαμηλότερης (D1) στο υψηλότερης χωρικής ανάλυσης πλέγμα (D4).

Πίνακας 6-1 Κλιματική ταξινόμηση Köppen-Geiger των εξεταζόμενων ευρωπαϊκών πόλεων. Πηγή: Kottek et al. (2006).

Τύπος κλίματος	Πόλεις
Bsh Θερό ημερημικό	Λευκωσία
Csa Μεσογειακό, θερμού θέρους	Αθήνα, Λισαβόνα, Μαδρίτη, Ρώμη
Cfa Υγρό υποτροπικό	Βουκουρέστι
Cfb Εύκρατο ωκεάνιο	Αμστερνταμ, Βερολίνο, Βουδαπέστη, Βρυξέλλες, Δουβλίνο, Ζάγκρεμπ, Κοπεγχάγη, Λιουμπλιάνα, Μπρατισλάβα, Παρίσι, Πράγα, Σόφια
Dfb Υγρό ηπειρωτικό, θερμού θέρους	Βαρσοβία, Βιέννη, Βίλνιους, Ελσίνκι, Ρίγα, Στοκχόλμη



Σχήμα 6-2 Το Πολεοδομικό Συγκρότημα της Πρωτεύουσας και η τοποθεσία των εξεταζόμενων μετεωρολογικών σταθμών. Η αντιστοίχιση των κωδικών των σταθμών δίνεται στον Πίνακα 6-2. Υπόβαθρο: εικόνα Landsat 8 (28 Ιουνίου 2017) σε χρωματική σύνθεση κόκκινο-πράσινο-μπλε (RGB).

6.3.2 Δορυφορικές παρατηρήσεις και μορφολογικές παράμετροι

Το ποσοστό των αδιαπέρατων επιφανειών (λ_{imp}) που χρησιμοποιήθηκε κατά τη συγκριτική μελέτη των ευρωπαϊκών πόλεων προέρχεται από το προϊόν «Imperviousness Density» (IMD) της ευρωπαϊκής υπηρεσίας Copernicus Land Monitoring Service (CLMS), με έτος αναφοράς το 2015 (<https://land.copernicus.eu/pan-european/high-resolution-layers/imperviousness/status-maps/2015>).

Αυτό παράγεται μέσω μίας ημιαυτόματης διαδικασίας με χρήση πολλαπλών δορυφορικών συστημάτων υψηλής χωρικής διακριτικής ικανότητας (Resourcesat-2 LISS-III, SPOT 5 και Landsat 8): Αρχικά μέσω μιας διαδικασίας επιβλεπόμενης ταξινόμησης κατηγοριοποιούνται τα εικονοστοιχεία της εικόνας σε δομημένες και φυσικές περιοχές. Έπειτα, η ταξινομημένη εικόνα υπόκειται σε μετεπεξεργασία για τη διόρθωση των παραγόμενων σφαλμάτων με χρήση επιπλέον βοηθητικών δεδομένων. Το προϊόν IMD υπολογίζεται τελικώς μέσω βαθμονόμησης του δείκτη βλάστησης NDVI. Το αρχικό προϊόν παράγεται σε χωρική ανάλυση 20 m για τις ανάγκες της εργασίας λήφθηκε η διαθέσιμη έκδοσή του στα 100 m.

Ως προς το ύψος των κτηρίων των ευρωπαϊκών πόλεων χρησιμοποιήθηκε το προϊόν «Urban Atlas - Building Height 2012» (BH) του CLMS (<https://land.copernicus.eu/local/urban-atlas/building-height-2012>). Αυτό είναι διαθέσιμο ως αρχείο ψηφιδωτής (raster) μορφής σε παρεχόμενη χωρική διακριτική ικανότητα 10 m, με έτος αναφοράς το 2012. Παράγεται με χρήση στερεοεικόνων, προερχόμενες από δεδομένα πολύ υψηλής χωρικής διακριτικής ικανότητας του δορυφόρου Cartosat-1 (IRS-P5). Στα προϊόν BH οι θετικές τιμές αντιστοιχούν στα σημεία όπου βρίσκονται κτήρια, ενώ για την περίπτωση σημείων του εδάφους ή μιας περιοχής με κάλυψη δέντρων, η τιμή του αντίστοιχου εικονοστοιχείου είναι κατά κανόνα ίση με μηδέν.

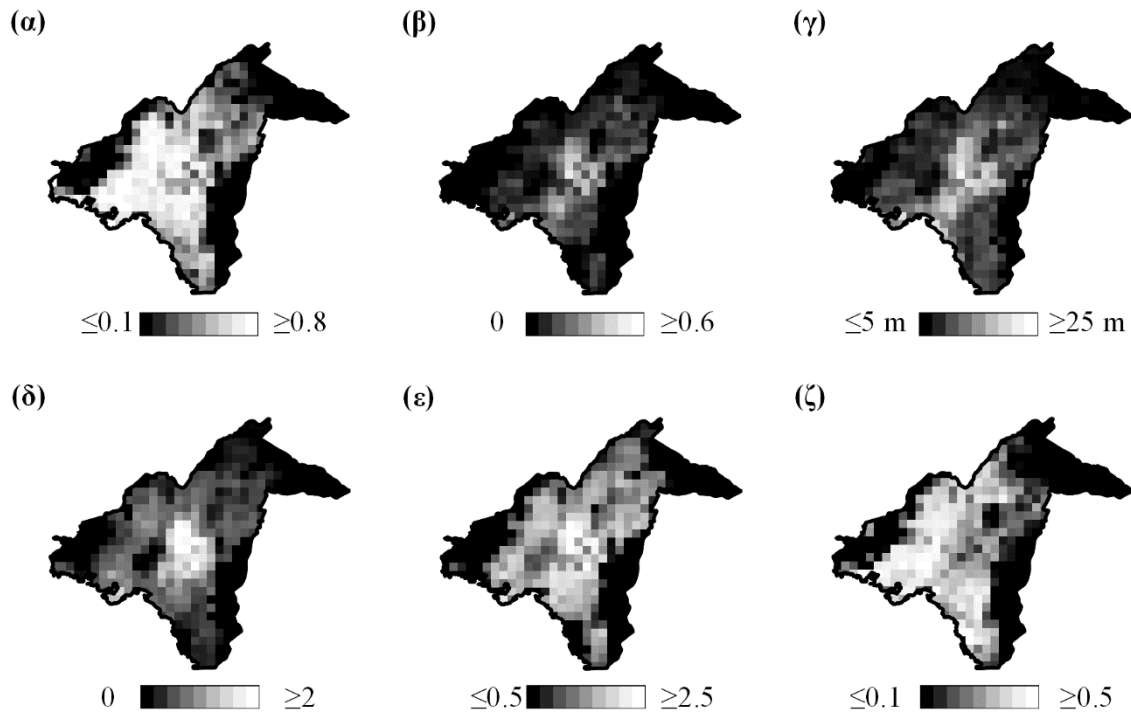
Τα προϊόντα IMD και BH διατίθενται στο προβολικό σύστημα συντεταγμένων ETRS89 – Lambert Azimuthal Equal Area (LAEA). Για την περαιτέρω επεξεργασία τους ακολουθήθηκε

αναδειγματοληψία από την αρχική τους χωρική ανάλυση (100 και 10 m αντίστοιχα) στο 1 km, με χρήση σταθμισμένης μέσης τιμής ως προς το εμβαδόν κάλυψης. Στη συγκεκριμένη χωρική διακριτική ικανότητα υπολογίστηκε στη συνέχεια η παράμετρος λ_b , βάσει του αθροιστικού εμβαδού κάλυψης των 10×10 m εικονοστοιχείων με $H > 0$, εντός των αντίστοιχων εικονοστοιχείων εμβαδού 1 km². Για την περίπτωση της Αθήνας χρησιμοποιήθηκαν επιπλέον τα διαθέσιμα περιγράμματα των κτηρίων σε διανυσματική μορφή (βλ. Κεφάλαιο 5).

Για τον καθορισμό της τελικής μελετώμενης έκτασης ανά πόλη ακολουθήθηκε η εξής προσέγγιση. Το χρησιμοποιούμενο προϊόν BH έχει εν γένει περιοχή κάλυψης τον κύριο συνεχή αστικό κορμό κάθε πόλης, χωρίς τις περιβάλλουσες φυσικές ενότητες ή δευτερογενείς αστικούς πυρήνες γειτονικών περιοχών. Εντούτοις, για μερικές περιπτώσεις πόλεων διαπιστώθηκε ότι στο προϊόν συμπεριλαμβάνονται εκτεταμένες περιοχές υπαίθρου. Έτσι, για την ομογενοποίηση των δεδομένων διατηρήθηκαν σε όλες τις περιπτώσεις μόνο τα εικονοστοιχεία με $\lambda_{imp} > 0.05$ (με βάση το προϊόν IMD) και $H > 5$ m (με βάση το BH) για τη χωρική ανάλυση του 1 km. Από την υπηρεσία CLMS λήφθηκε επιπλέον το προϊόν «Water and Wetness», με έτος αναφοράς το 2015 και σε χωρική διακριτική ικανότητα 100 m (<https://land.copernicus.eu/pan-european/high-resolution-layers/water-wetness>). Με χρήση αυτού έγινε εντοπισμός και αφαίρεση των εικονοστοιχείων (στο 1 km) με υδάτινη κάλυψη σε επίπεδο υπό-εικονοστοιχείου, προκειμένου η σύγκριση των επιδράσεων στο LST για τις διάφορες πόλεις να είναι ισοδύναμη.

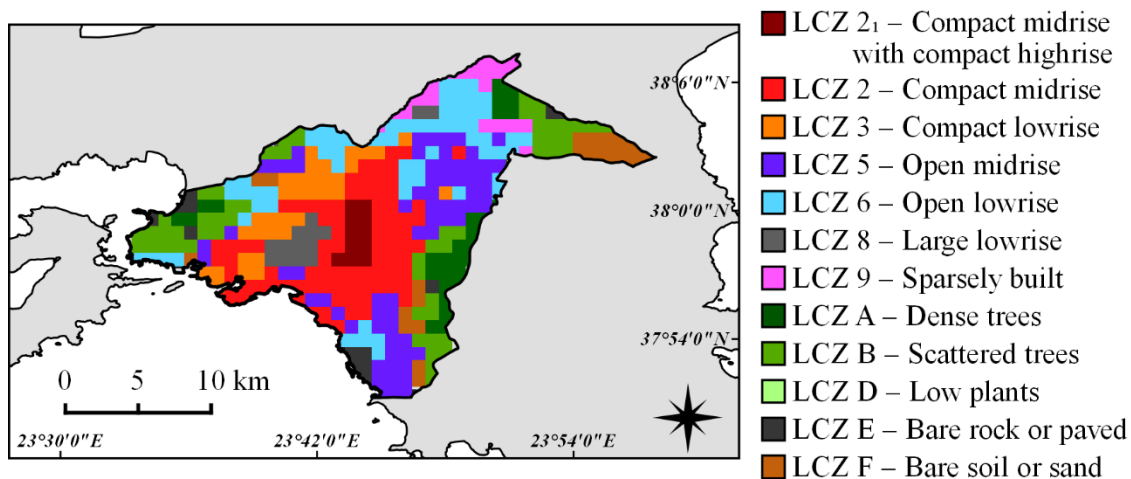
Το προϊόν BH έχει παραχθεί από το CLMS για 31 ευρωπαϊκές πόλεις· τελικώς στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα για 25 από αυτές (βλ. Σχήμα 6-1). Αυτό ακολουθήθηκε καθώς α) για τη Βέρνη (Ελβετία) δεν ήταν διαθέσιμα τα δεδομένα προς λήψη και β) για τη Βαλέτα (Μάλτα), την πόλη του Λουξεμβούργου (Λουξεμβούργο), το Όσλο (Νορβηγία), το Ρέικιαβικ (Ισλανδία) και το Ταλίν (Εσθονία) έπειτα από τους προηγουμένως αναφερόμενους περιορισμούς ως προς το λ_{imp} , το H και τις υδάτινες επιφάνειες δεν υπήρχε επαρκής αριθμός (> 100) εικονοστοιχείων για την εξασφάλιση της αξιοπιστίας των διενεργούμενων στατιστικών αναλύσεων.

Για την περίπτωση της Αθήνας χρησιμοποιήθηκαν επιπρόσθετα περεταίρω παράμετροι της αστικής μορφολογίας: α) η αναλογία διαστάσεων αστικής χαράδρας (H/W), β) η ολική αναλογία διαστάσεων (λ_c) και γ) η επιφάνεια κάλυψης του αδιαπέρατου εδάφους (λ_i). Οι παραπάνω μεταβλητές προσδιορίστηκαν μέσω των δεδομένων και της μεθοδολογίας της Ενότητας 5.2.1. Πιο συγκεκριμένα, το λ_c υπολογίστηκε ως το πηλίκο του εμβαδού του συνόλου των αστικών επιφανειών — συμπεριλαμβανομένων των ελεύθερων κάθετων επιφανειών, δηλ. των εξωτερικών τοίχων— που εμπεριέχονται εντός ενός εικονοστοιχείου προς το εμβαδόν του τελευταίου. Για όλες τις παραπάνω παραμέτρους πραγματοποιήθηκε χωρική αναδειγματοληψία στη χωρική ανάλυση του 1×1 km. Η χωρική αποτύπωση για την Αθήνα των H/W , λ_c και λ_i , συμπεριλαμβανομένων των λ_{imp} , λ_b και H που αναφέρθηκαν προηγουμένως, δίνεται στο Σχήμα 6-3.



Σχήμα 6-3 Χωρική αποτύπωση μορφολογικών παραμέτρων για την περιοχή της Αθήνας σε χωρική διακριτική ικανότητα 1 km: (α) λ_{imp} , (β) λ_b , (γ) H , (δ) H/W , (ε) λ_c και (ζ) λ_i .

Στην Ενότητα 5.2.2 παρουσιάστηκε η μεθοδολογία για την ταξινόμηση της περιοχής της Αθήνας σε τοπικές κλιματικές ζώνες (LCZ). Η διαδικασία επαναλήφθηκε για τις ανάγκες του παρόντος κεφαλαίου στην ανάλυση του 1 km (Σχήμα 6-4). Όπως περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 5, η ταξινόμηση των LCZ αδυνατεί να αναδείξει ως ξεχωριστή ενότητα το κέντρο της Αθήνας. Ακολουθώντας την προτεινόμενη προσέγγιση από τους Stewart and Oke (2012) για την περίπτωση αδυναμίας ταξινόμησης μίας περιοχής σε LCZ, θεωρήθηκε εδώ μία επιπλέον τάξη: LCZ 2₁ («Compact midrise with compact highrise»). Αυτή καθορίστηκε για την περίπτωση των εικονοστοιχείων της τάξης LCZ 2 με τιμές $H/W \geq 2$ ή/και $H \geq 20$ m. Αν και η παραπάνω προσέγγιση δεν ανταποκρίνεται απόλυτα στα μορφολογικά χαρακτηριστικά της περιοχής, κρίνεται κατάλληλη για τη χωρική διακριτική ικανότητα της ανάλυσης και τον στόχο του παρόντος κεφαλαίου. Σημειώνεται επίσης ότι με βάση αεροφωτογραφίες του Ελληνικού Κτηματολογίου αποδόθηκαν επιπρόσθετα στο Σχήμα 6-4 οι LCZ που αντιστοιχούν στις φυσικές ενότητες στα όρια του πολεοδομικού συγκροτήματος.



Σχήμα 6-4 Χαρτογράφηση της αστικής περιοχής της Αθήνας σε Τοπικές Κλιματικές Ζώνες (LCZ), σε χωρική διακριτική ικανότητα 1 km.

Τα χρησιμοποιούμενα δεδομένα επιφανειακής θερμοκρασίας προέρχονται από το προϊόν LST «MOD11A1» (δορυφόρος Terra) και «MYD11A1» (δορυφόρος Aqua) (Collection 6) του αισθητήρα MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer). Αυτά αντιστοιχούν σε ημερήσιες καταγραφές της επιφανειακής θερμοκρασίας με δύο λήψεις ημέρα/νύχτα ανά δορυφόρο— Terra: ~09 – 11 UTC και ~20 – 22 UTC, και Aqua: ~11 – 13 UTC και ~00 – 02 UTC. Τα δεδομένα LST βρίσκονται σε χωρική διακριτική ικανότητα 1 km. Παράγονται μέσω εφαρμογής ενός αλγορίθμου «διαχωρισμού των παραθύρων» για τα φασματικά κανάλια 31 (10.78 – 11.28 μm) και 32 (11.77 – 12.27 μm) του αισθητήρα, και με χρήση των τιμών του συντελεστή εκπομπής προερχόμενες από φασματική ταξινόμηση παγκόσμιας κάλυψης (Wan, 2014). Μία πρόσφατη αξιολόγηση του προϊόντος MODIS – LST με επιτόπιες μετρήσεις επιφανειακής θερμοκρασίας κατέδειξε μία ακρίβεια της τάξης του 1 K ως προς μέσο τετραγωνικό σφάλμα (Root Mean Square Error, RMSE) για την περίπτωση εξέτασης ομοιογενών περιοχών (Duan et al., 2019).

Τα δεδομένα MODIS του συνόλου της περιοχής μελέτης λήφθηκαν από τον διακομιστή Land Processes Distributed Active Archive Center (LP DAAC) Distribution Server της NASA (<http://e4ftl01.cr.usgs.gov/>) για την περίοδο του Ιουνίου – Αυγούστου 2017. Στις εικόνες LST εφαρμόστηκε αλλαγή του συστήματος συντεταγμένων στο σύστημα ETRS89 – LAEA μέσω του προγράμματος «MODIS Reprojection Tool» (MRTSwath), εξαγωγή των δεδομένων για τις ακριβείς περιοχές κάλυψης των πόλεων της μελέτης και βαθμονόμηση των τιμών τους σε μονάδες Kelvin. Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε ο υπολογισμός της μέσης τιμής των δεδομένων LST (ανά δορυφόρο και χρονική στιγμή καταγραφής) για την εξεταζόμενη περίοδο. Οι τιμές του προϊόντος MODIS – LST αντιστοιχούν σε εικονοστοιχεία χωρίς νέφη, με βάση τον αλγόριθμο ποιότητας που εφαρμόζεται κατά την παραγωγή του. Για κάθε πόλη μία δορυφορική εικόνα συμπεριλήφθηκε στον υπολογισμό της μέσης τιμής της περιόδου μόνο κατά την περίπτωση όπου τουλάχιστον το 95% της έκτασης της πόλης δεν καλύπτονταν από νέφη. Ως αποτέλεσμα, η μέση τιμή του LST προσδιορίστηκε με βάση τις ίδιες

δορυφορικές λήψεις για όλη την έκταση μιας πόλης, επιτρέποντας έτσι την ορθή εξαγωγή συμπερασμάτων για την παρατηρούμενη ενδοαστική διακύμανση. Επιπλέον, για την περαιτέρω ομογενοποίηση των συνθηκών εξέτασης διατηρήθηκαν μόνο όσες εικόνες αντιστοιχούν σε γωνία επίτευξης (viewing zenith angle, VZA) του αισθητήρα μικρότερη από 55° (κατ' απόλυτη τιμή).

6.3.3 Στατιστική ανάλυση

Η διερεύνηση της σχέσης που σημειώνεται μεταξύ της αστικής μορφολογίας και της επιφανειακής θερμοκρασίας του εδάφους έγινε με τη συνδυαστική χρήση ποικίλων στατιστικών προσεγγίσεων. Αρχικά, προσδιορίστηκε η ένταση της συμμεταβολής ανάμεσα σε κάθε ένα από τα λ_{imp} , λ_b και H και το LST, καθώς και αναμεταξύ τους. Αυτό πραγματοποιήθηκε μέσω του συντελεστή γραμμικής συσχέτισης Pearson r (Pearson product-moment coefficient):

$$r = \frac{Cov(X, Y)}{S_X S_Y} \quad (6.13)$$

όπου X και Y οι εξεταζόμενες ανά περίπτωση μεταβλητές, και $Cov(X, Y)$ η συνάρτηση της συνδιακύμανσης των μεταβλητών. Εξετάσθηκε επίσης ο συντελεστής συσχέτισης Spearman ρ (Spearman rank correlation coefficient), ο οποίος προσδιορίζει την ένταση της σχέσης μεταξύ δύο μεταβλητών, θεωρώντας μια μη-παραμετρική συνάρτηση η οποία παρουσιάζει μονότονη αύξηση ή μείωση, όχι κατ' ανάγκη με γραμμικής μορφής σχέση. Το ρ προϋποθέτει τον μετασχηματισμό των πραγματικών τιμών των δεδομένων σε τιμές της σειράς της κατάταξής τους (rank), και δίνεται από την εξίσωση:

$$\rho = \frac{Cov(X', Y')}{S_{X'} S_{Y'}} \quad (6.14)$$

όπου X' και Y' οι μεταβλητές κατάταξης των αρχικών μεταβλητών X και Y .

Ακολούθως, αναπτύχθηκαν μοντέλα πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης για την περαιτέρω εξέταση της σχέσης που παρουσιάζεται μεταξύ των μεταβλητών της αστικής επιφάνειας (ανεξάρτητες/ερμηνευτικές μεταβλητές) και του LST (εξαρτημένη μεταβλητή). Μέσω της ανάλυσης παλινδρόμησης δύναται να προσδιοριστεί ο βαθμός της επίδρασης κάθε μεταβλητής στο LST εφόσον διατηρούνται όλες οι άλλες μεταβλητές σταθερές. Η πολλαπλή γραμμική παλινδρόμηση ελαχίστων τετραγώνων (Ordinary Least Squares, OLS) n παρατηρήσεων και k ανεξάρτητων μεταβλητών δίνεται υπό τη μορφή πινάκων ως:

$$y = x\beta + e \quad (6.15)$$

όπου y το $n \times 1$ διάνυσμα της εξαρτημένης μεταβλητής, x ο $n \times (k + 1)$ πίνακας των ανεξάρτητων μεταβλητών, β το $(k + 1) \times 1$ διάνυσμα των συντελεστών της παλινδρόμησης και e το $n \times 1$ διάνυσμα των υπολοίπων (residuals) του μοντέλου παλινδρόμησης. Με σκοπό τη δυνατότητα άμεσης σύγκρισης των επιδράσεων των διαφορετικών μεταβλητών προηγήθηκε η κανονικοποίηση τους,

αφαιρώντας από τις τιμές τους τον αριθμητικό μέσο και διαιρώντας κατόπιν με την τυπική απόκλιση. Παράλληλα, για την ανάδειξη της μη γραμμικής ή/και μη μονότονης σχέσης μεταξύ των παραμέτρων της αστικής μορφολογίας και του LST εφαρμόστηκε στα αντίστοιχα διαγράμματα διασποράς η τοπική παλινδρόμηση τύπου «lowess» (locally weighted scatterplot smoothing) (Cleveland, 1979). Αυτή η μέθοδος αποτελεί μία μη-παραμετρική μορφή παλινδρόμησης, όπου η γραμμική παλινδρόμησης προσδιορίζεται έπειτα από την τοπική εφαρμογή πολυωνυμικών συναρτήσεων στα δεδομένα.

Η ορθή εφαρμογή της παλινδρόμησης τύπου OLS προϋποθέτει την ικανοποίηση ορισμένων στατιστικών παραδοχών (βλ. επίσης Ενότητα 4.3.2.4). Μία από αυτές ορίζει ότι οι ανεξάρτητες μεταβλητές να είναι μεταξύ τους γραμμικά ανεξάρτητες —δηλ. να μην σημειώνεται στο μοντέλο πολυσυγγραμμικότητα (multicollinearity)—, καθώς διαφορετικά μεταξύ άλλων καθίσταται δύσκολο να εντοπιστεί η ξεχωριστή επίδραση της κάθε μεταβλητής. Επί αυτού, εκτός από τις τιμές του συντελεστή γραμμικής συσχέτισης Pearson μεταξύ των μορφολογικών μεταβλητών, υπολογίστηκε επιπρόσθετα ο «συντελεστής πληθωρισμού της διακύμανσης» (variance inflation factor, VIF) των μοντέλων παλινδρόμησης. Τιμές του VIF άνω του 10 αντιστοιχούν σε έντονο πρόβλημα πολυσυγγραμμικότητας στο μοντέλο.

Μία άλλη παραδοχή της γραμμικής παλινδρόμησης αποτελεί η ύπαρξη ανεξαρτησίας μεταξύ των εκτιμήσεων του μοντέλου —δηλ. τα σφάλματα να μην εμφανίζουν συσχέτιση μεταξύ τους και να ακολουθούν την κανονική κατανομή. Αυτό συχνά δεν ισχύει κατά τη χρησιμοποίηση γεωχωρικών δεδομένων και δορυφορικών θερμοκρασιακών παρατηρήσεων λόγω της αυτοσυσχέτισης που σημειώνεται μεταξύ των γειτονικών περιοχών. Ένα μέτρο της χωρικής αυτοσυσχέτισης μιας μεταβλητής x (n παρατηρήσεων) αποτελεί ο συντελεστής χωρικής αυτοσυσχέτισης I του Moran (Moran's I):

$$I = \frac{n}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij}} \quad (6.16)$$

όπου \bar{x} ο αριθμητικός μέσος του x , i και j δείκτες, και w_{ij} τα στοιχεία του πίνακα των χωρικών σταθμίσεων (W). Για $\alpha) I = 0$ σημειώνεται τυχαία κατανομή των δεδομένων στον χώρο, $\beta) I = 1$ τα δεδομένα είναι πλήρως κατανεμημένα σε συστάδες (clusters) μεγάλων και μικρών τιμών, και $\gamma)$ όταν $I = -1$ οι μεγάλες και οι μικρές τιμές εναλλάσσονται με συστηματικό τρόπο (χωρικό πρότυπο σκακιέρας).

Για την ενσωμάτωση της χωρικής συσχέτισης στην εξέταση της επίδρασης των παραμέτρων της αστικής μορφολογίας στο LST χρησιμοποιήθηκε ένα «χωρικά αυτοπαλίνδρομο μοντέλο» (spatial autoregressive model, SAR) (συχνά στη βιβλιογραφία αναφέρεται και ως «μοντέλο χωρικής υστέρησης», spatial lag model, SLM). Σε αυτό θεωρείται ότι οι τιμές της εξαρτημένης μεταβλητής y ενός σημείου επηρεάζονται από τις τιμές της μεταβλητής στις γειτονικές περιοχές. Στο μοντέλο SAR

η εξίσωση της OLS παλινδρόμησης (Εξίσωση 6.15) μετασχηματίζεται με τη χρήση του πίνακα χωρικών σταθμίσεων W ως εξής:

$$y = \rho W y + x\beta + e \quad (6.17)$$

όπου ρ η παράμετρος που αντανακλά την ισχύ των χωρικών συσχετίσεων των στοιχείων της μεταβλητής y (συντελεστής χωρικής υστέρησης). Για την κατασκευή του πίνακα W χρειάζεται να οριστεί αρχικά το εύρος χωρικής γειτνίασης που θα λαμβάνεται υπόψη από το χωρικό μοντέλο. Δύο εικονοστοιχεία θεωρήθηκαν ότι εμφανίζουν γειτονία εάν χαρακτηρίζονται από μία κοινή ακμή ή μία κοινή κορυφή· δηλ. για κάθε εικονοστοιχείο χρησιμοποιήθηκαν τα οκτώ γειτονικά του. Εκτός από το SAR, η χωρική παλινδρόμηση μπορεί να πραγματοποιηθεί με ένα «μοντέλο χωρικού σφάλματος» (spatial error model, SEM). Αυτό το μοντέλο στηρίζεται στην παραδοχή ότι η αυτοσυσχέτιση προκύπτει λόγω της παράληψης σημαντικών ανεξάρτητων μεταβλητών στο μοντέλο, οι οποίες παρουσιάζουν χωρική αυτοσυσχέτιση. Εντέλει, το SAR προτιμήθηκε με βάση τις υψηλότερες τιμές συγκριτικά με το SEM των «πολλαπλασιαστών Lagrange» (Lagrange Multipliers) για το σύνολο σχεδόν των εξεταζόμενων περιπτώσεων.

6.3.4 Αριθμητική προσομοίωση

Η εφαρμογή του μετεωρολογικού μοντέλου WRF (έκδοση 3.7.1) με σκοπό τη μελέτη του θερμικού περιβάλλοντος της περιοχής της Αθήνας πραγματοποιήθηκε για τις 6 έως 11 Αυγούστου 2017. Η συγκεκριμένη περίοδος μελέτης αντιστοιχεί σε μία θερμή σειρά ημερών για την πόλη, με τη μέση θερμοκρασία αέρα για το σύνολο των εξεταζόμενων σταθμών της περιοχής (βλ. Σχήμα 6-2) να ήταν ίση με 32.0 °C (τυπική απόκλιση: 2.5 °C). Η περιοχή βρισκόταν κάτω από την επίδραση ενός συστήματος υψηλών πιέσεων· η κύρια κατεύθυνση του ανέμου ήταν βόρεια-βορειοανατολική. Η πρώτη ημέρα προσομοίωσης χρησιμοποιήθηκε για να επέλθει το μοντέλο σε ισορροπία (χρόνος «spin-up» του μοντέλου).

Χρησιμοποιήθηκαν τέσσερα επάλληλα πλέγματα (βλ. Σχήμα 6-1) διπλή κατεύθυνσης, δηλ. η προγνωστική πληροφορία μεταβιβάζόταν τόσο από τα εξωτερικά προς τα ένθετα πλέγματα όσο και αντίστροφα. Η οριζόντια χωρική ανάλυση των πλεγμάτων από το αραιότερο, εξωτερικό πλέγμα (περιοχή κάλυψης: κεντρική-νότια Ευρώπη) προς το τελευταίο ένθετο πλέγμα (περιοχή κάλυψης: ευρύτερη περιοχή Αθήνας) ήταν η ακόλουθη: α) πλέγμα 1 (domain 1, D1): 27 km (118 × 104 κυψελίδες), β) D2: 9 km (112 × 121 κυψελίδες), γ) D3: 3 km (136 × 115 κυψελίδες) και δ) D4: 1 km (121 × 100 κυψελίδες). Ως προς την κατακόρυφη διακριτοποίηση χρησιμοποιήθηκαν 32 ασύμμετρα καταναμεμένα επίπεδα (με υψηλότερη κάλυψη για τα πρώτα χιλιόμετρα): το πρώτο επίπεδο ήταν ~30 m άνω του επιπέδου των κτηρίων. Οι αρχικές και οριακές συνθήκες του μοντέλου προήλθαν από τα πεδία ανάλυσης του Ευρωπαϊκού Κέντρου Μεσοπρόθεσμης Πρόγνωσης Καιρού (European Centre for Medium-Range Weather Forecast, ECMWF) (ERA-Interim, <https://apps.ecmwf.int/datasets/>).

Αυτά βρίσκονται σε χωρική ανάλυση $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ και χρησιμοποιήθηκαν ανά έξι ώρες κατά την εκτέλεση του μοντέλου.

Η προσομοίωση της μικροφυσικής των νεφών πραγματοποιήθηκε με το σχήμα WMS6 (Hong and Lim, 2006), ενώ οι διεργασίες της κατακόρυφης ανάπτυξης με το σχήμα Kain-Fritsch (Kain, 2004) (το τελευταίο χρησιμοποιήθηκε για τα πλέγματα D1 – D3, καθώς για το D4 η κατακόρυφη ανάπτυξη επιλύεται ρητά από το μοντέλο). Τα σχήματα παραμετροποίησης για τη μικρού και μεγάλου μήκους ακτινοβολία ήταν τα MM5 Dudhia (Dudhia, 1989) και RRTM (Mlawer et al., 1997) αντίστοιχα. Οι φυσικές διεργασίες του πλανητικού οριακού στρώματος προσομοιώθηκαν από το σχήμα YSU (Hong et al., 2006), του επιφανειακού στρώματος από το MM5 και της επιφάνειας του εδάφους από το Noah LSM (Chen and Dudhia, 2001). Η επιλογή των παραπάνω σχημάτων παραμετροποίησης έγινε ως επί το πλείστον με βάση προηγούμενες προσομοιώσεις του μοντέλου WRF με επίκεντρο το αστικό περιβάλλον της Αθήνας, των οποίων η προγνωστική ικανότητα είχε αξιολογηθεί από επιτόπια δεδομένα (Giannaros et al., 2013; Giannaros et al., 2018).

Ένα βασικό στοιχείο της προσομοίωσης με το μοντέλο WRF είναι ο προκαθορισμός των διαφόρων κατηγοριών των χρήσεων και κάλυψης γης (land use and land cover, LULC) της επιφάνειας. Για τα χαμηλότερης ανάλυσης πλέγματα D1 – D3 χρησιμοποιήθηκε η ενσωματωμένη στο μοντέλο ταξινόμηση IGBP (International Geosphere Biosphere Programme) – MODIS (Friedl et al., 2010), η οποία συμπεριλαμβάνει 20 διαφορετικές τάξεις. Για το εσωτερικό πλέγμα (χωρική ανάλυση 1 km) ακολουθήθηκε διαφορετική προσέγγιση όσον αφορά τις τάξεις που αντιστοιχούν στις φυσικές και τις αστικές περιοχές. Οι φυσικές κατηγορίες LULC διατηρήθηκαν οι ίδιες με την ταξινόμηση IGBP – MODIS (όπως και οι τιμές των παραμέτρων τους), αλλά η χωρική τους κατανομή επαναπροσδιορίστηκε με βάση τα πιο πρόσφατα δεδομένα χρήσεων και κάλυψης γης CORINE της υπηρεσίας CLMS, με έτος αναφοράς το 2018 (<https://land.copernicus.eu/pan-european/corine-land-cover>). Χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα ψηφιδωτής μορφής CORINE στα 100 m, για τα οποία έγινε αναδειγματοληψία κατά πλειοψηφία στο 1 km.

Για τις αστικές κατηγορίες χρήσεων και κάλυψης γης της Αθήνας εφαρμόστηκε το σχήμα ταξινόμησης των τοπικών κλιματικών ζωνών, με τη χωρική τους κατανομή στην περιοχή προσομοίωσης να γίνεται σύμφωνα με το Σχήμα 6-4. Κατ' αυτόν τον τρόπο επεκτάθηκε ο αριθμός των αστικών κατηγοριών από τις τρεις κατά τη βασική έκδοση του μοντέλου («Low Intensity Residential», «High Intensity Residential», «Industrial or Commercial») σε οκτώ: LCZ 2₁, LCZ 2, LCZ 3, LCZ 5, LCZ 6, LCZ 8, LCZ 9 και LCZ E.

Για τις αστικές περιοχές του πλέγματος χρησιμοποιήθηκε το σχήμα παραμετροποίησης SLUCM. Αυτό λειτουργεί σε παραλληλία με το σχήμα Noah LSM, με το πρώτο να παραμετροποιεί το αστικό τμήμα (tile) της κυψελίδας του πλέγματος και το δεύτερο να εφαρμόζεται στο τμήμα το οποίο καλύπτεται από βλάστηση. Για την εφαρμογή του SLUCM απαιτείται ο προκαθορισμός ανά τάξη (εδώ, ανά LCZ) ενός σημαντικού αριθμού αστικών παραμέτρων, μέσω των οποίων ενσωματώνεται η αστική μορφολογία και λειτουργία στο μοντέλο.

Για την περίπτωση του ποσοστού της δομημένης επιφάνειας (λ_{urb}) επιλέχθηκε ωστόσο η ενσωμάτωση στο μοντέλο των διαφορετικών τιμών της παραμέτρου να γίνει ανά κυψελίδα του πλέγματος με σκοπό τη βέλτιστη περιγραφή της χωρικής διαφοροποίησης των χώρων πρασίνου εντός του αστικού συγκροτήματος. Αυτό κατέστη δυνατόν αξιοποιώντας τη φασματική ταξινόμηση υψηλής χωρικής ανάλυσης του Sentinel-2 (10 m) η οποία παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 4 (βλ. Σχήμα 4-5). Με χρήση της παραπάνω ταξινομημένης εικόνας υπολογίστηκε η ποσοστιαία κάλυψη του συνόλου των τάξεων δομημένου περιβάλλοντος στο πλέγμα χωρικής ανάλυσης 1×1 km του μοντέλου. Για τις υπόλοιπες αστικές παραμέτρους του SLUCM διατηρήθηκε η προσέγγιση της χρήσης μίας μέσης τιμής της παραμέτρου για κάθε τάξη. Μία συγκεντρωτική παρουσίαση των παραμέτρων και των τιμών τους για τις διάφορες τοπικές κλιματικές ζώνες δίνεται στον Πίνακα 6-2. Ο καθορισμός των παραπάνω τιμών πραγματοποιήθηκε χάρις στα υψηλής χωρικής διακριτικής ικανότητας χαρακτηριστικά της αστικής μορφολογίας και λειτουργίας του Κεφαλαίου 5· ειδικότερα, η μεθοδολογία του προσδιορισμού τους ήταν η ακόλουθη:

Η μέση τιμή του Q_F ανά LCZ, καθώς και η ενδοημερήσια διακύμανσή του (ένα χρονικό προφίλ για όλες τις τάξεις) προσδιορίστηκαν σύμφωνα με τους υπολογισμούς του Κεφαλαίου 5. Η αντίστοιχη χρονική περίοδος (πρώτο δεκαήμερο του Αυγούστου) του 2012 χαρακτηριζόταν από παραπλήσιες τιμές θερμοκρασίες αέρα, επομένως το μέσο προσδιοριζόμενο Q_F θεωρήθηκε αντιπροσωπευτικό για την προσομοίωση.

Ως προς το ύψος των κτηρίων H , την τυπική απόκλιση του ύψους H_{std} και την αναλογία διαστάσεων της αστικής χαράδρας H/W υπολογίστηκε η μέση τιμή τους για κάθε τοπική κλιματική ζώνη, χρησιμοποιώντας τα παραγόμενα δεδομένα του Κεφαλαίου 5. Οι τιμές του H/W δεν εισάγονται απ' ευθείας στο σχήμα SLUCM, αλλά χρησιμοποιήθηκαν εν προκειμένω για τον υπολογισμό της παραμέτρου του μέσου πλάτους των δρόμων (W). Η τιμή του πλάτους της οροφής των κτηρίων (R) προσδιορίστηκε αντίστοιχα μέσω των διαθέσιμων δεδομένων της επιφάνειας κάλυψης των οροφών των κτηρίων (λ_b). Για όλες τις παραπάνω παραμέτρους εφαρμόστηκε χωρική αναδειγματοληψία στην ανάλυση 1×1 km του πλέγματος.

Στο SLUCM ορίζονται διαφορετικές τιμές της λευκαύγειας (α) για τις οροφές των κτηρίων, τους τοίχους των κτηρίων και την επιφάνεια των δρόμων. Η διάκριση όλων των τριών παραπάνω επιφανειών μέσω τεχνικών δορυφορικής τηλεπισκόπησης δεν είναι δυνατή, κατά συνέπεια διατηρήθηκαν οι ενσωματωμένες τυπικές τιμές του μοντέλου ανά επιφάνεια. Ο προσδιορισμός του συντελεστή εκπομπής της υπέρυθρης ακτινοβολίας έγινε μέσω φασματικών βιβλιοθηκών και της μεθοδολογίας του Κεφαλαίου 4, χρησιμοποιώντας το σύνολο των διαθέσιμων δεδομένων στο θερμικό τμήμα του φάσματος.

Τα χρησιμοποιούμενα δομικά υλικά της Αθήνας χαρακτηρίζονται εν γένει από υψηλή θερμική μάζα, με το κύριο κατασκευαστικό υλικό να αποτελεί το τσιμέντο/σκυρόδεμα (Paramanolis, 2015). Για τον καθορισμό των τιμών του συντελεστή αγωγιμότητας k και της θερμοχωρητικότητας C χρησιμοποιήθηκε ένας πίνακας αναφοράς με τις τυπικές τιμές των θερμικών ιδιοτήτων των δομικών

υλικών από τους Oke et al., (2017): α) για τις οροφές και τους τοίχους των κτηρίων χρησιμοποιήθηκαν οι τιμές που αντιστοιχούν στο πυκνό τσιμέντο (για τις τάξεις LCZ 6 και LCZ 9 χρησιμοποιήθηκε η κεραμική πλάκα για τις οροφές) και β) για την επιφάνεια των δρόμων χρησιμοποιήθηκε το άνω εύρος των τιμών της ασφάλτου, θεωρώντας ότι αποτελεί μίγμα ανάμειξης με πετρώδεις προσμίξεις.

Πίνακας 6-2 Οι χρησιμοποιούμενες αστικές παράμετροι για το σχήμα παραμετροποίησης SLUCM. Το σύνολο των συμβόλων δίνεται στο κείμενο.

Παράμετροι ¹	LCZ 2 ₁	LCZ 2	LCZ 3	LCZ 5	LCZ 6	LCZ 8	LCZ 9	LCZ E
H (m)	20	14	9	12	9	7.5	8	7.5
H_{sid} (m)	5	4.5	3.5	3.5	2.5	2	2	2
W (m)	10	11	9.5	15	15	25	20	35
R (m)	12	12	12	12	12	20	12	20
Q_F (W m ⁻²)	60	40	20	20	20	10	10	10
a_r (-)	0.2	0.2	0.2	0.2	0.15	0.2	0.15	0.2
a_w (-)	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
a_g (-)	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17
ε_r (-)	0.935	0.935	0.935	0.935	0.93	0.91	0.93	0.935
ε_w (-)	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93
ε_g (-)	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95
C_r (J m ⁻³ K ⁻¹)	2	2	2	2	1.4	2	1.4	2
C_w (J m ⁻³ K ⁻¹)	2	2	2	2	2	2	2.5	2
C_g (J m ⁻³ K ⁻¹)	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1
k_r (W m ⁻¹ K ⁻¹)	1.5	1.5	1.5	1.5	1	1.5	1	1.5
k_w (W m ⁻¹ K ⁻¹)	1.5	1.5	1.5	1.5	1	1.5	2	1.5
k_g (W m ⁻¹ K ⁻¹)	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4

¹Οι δείκτες αντιστοιχούν σε: r : οροφή κτηρίου, w : τοίχος κτηρίου και g : επιφάνεια δρόμου.

Όπως εντοπίστηκε από τους Li and Bou-Zeid (2014), όταν χρησιμοποιούνται οι παραμετροποιήσεις SLUCM και Noah LSM, το μοντέλο εξάγει τις διαγνωστικές μεταβλητές (μεταβλητές εξόδου) της επιφανειακής θερμοκρασίας T_s και της επιφανειακής θερμοκρασίας αέρα (near-surface air temperature, T_{as}) χρησιμοποιώντας τον συντελεστή τυρβώδους μεταφοράς ο οποίος αντιστοιχεί μόνο στη διαπερατή επιφάνεια των αστικών κυψελίδων. Ωστόσο, το SLUCM προσδιορίζει παράλληλα σε κάθε χρονικό βήμα του μοντέλου τις προγνωστικές μεταβλητές της επιφανειακής θερμοκρασίας της οροφής των κτηρίων (T_r), των τοίχων των κτηρίων (T_w) και της επιφάνειας του δρόμου (T_g), συνδυάζοντας τα δύο τελευταία στη θερμοκρασία της αστικής χαράδρας (T_{can}). Επομένως, σύμφωνα με τους Li and Bou-Zeid (2014) το T_s για μια αστική κυψελίδα μπορεί να υπολογιστεί μέσω των παραπάνω μεταβλητών του μοντέλου από την εξίσωση:

$$T_s = \lambda_{urb} \times (\lambda_r \times T_r + \lambda_{can} \times T_{can}) + (1 - \lambda_{urb}) \times T_{veg} \quad (6.18)$$

όπου $\lambda_r = R/(R + W)$ το ποσοστό της επιφάνειας των κτηρίων, $\lambda_{can} = 1 - \lambda_r$ το ποσοστό της επιφάνειας της αστικής χαράδρας, και T_{veg} η επιφανειακή θερμοκρασία του μη δομημένου (διαπερατού) τμήματος των αστικών κυψελίδων, η οποία υπολογίζεται από το σχήμα παραμετροποίησης Noah LSM. Για την εξαγωγή της διαγνωστικής μεταβλητής T_{as} διατηρήθηκε εδώ η μεθοδολογία της βασικής έκδοσης του WRF, χρησιμοποιώντας ωστόσο το μήκος τραχύτητας για τη μεταφορά ορμής και θερμότητας από τους Kanda et al. (2007) για το αστικό τμήμα της κυψελίδας και αντιμετωπίζοντας τα δύο τμήματα ξεχωριστά. Η μέση θερμοκρασία T_{as} για το σύνολο της κυψελίδας (αστικό και φυσικό τμήμα) υπολογίστηκε έπειτα από τη σχέση (Trusilova et al., 2013):

$$T_{as} = \lambda_{urb} \times T_{as,urb} + (1 - \lambda_{urb}) \times T_{as,veg} \quad (6.19)$$

Η εκτιμήσεις του μοντέλου ως προς την επιφανειακή θερμοκρασία αέρα έγινε με τις μετρήσεις (σε επίπεδο άνω της οροφής των κτηρίων) του δικτύου αυτόματων μετεωρολογικών σταθμών του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών (Lagouvardos et al., 2017) (Ινστιτούτο Ερευνών Περιβάλλοντος και Βιώσιμης Ανάπτυξης, ΙΕΠΒΑ) (βλ. Σχήμα 6-2). Η πρόσβαση στα δεδομένα των σταθμών έγινε μέσω της διαδικτυακής εφαρμογής του ΙΕΠΒΑ: <http://stratus.meteo.noa.gr/front>. Το σύνολο των εξεταζόμενων σταθμών δίνεται στον Πίνακα 6-3· χρησιμοποιήθηκαν οι διαθέσιμοι σταθμοί οι οποίοι εμπεριέχονταν σε κυψελίδες του πλέγματος εντός του αστικού ιστού της Αθήνας.

Πίνακας 6-3 Οι χρησιμοποιούμενοι μετεωρολογικοί σταθμοί κατά την αξιολόγηση του WRF.

Όνομα	Κωδικός	Συντεταγμένες (E – N)	Υψόμετρο (m)	LCZ
Αθήνα	ATH	23°42'55" – 37°58'42"	50	LCZ 2
Αλιμος	AL	23°42'38" – 37°55'3"	25	LCZ 2
Αμπελόκηποι	AMP	23°45'30" – 37°58'54"	136	LCZ 2
Βριλήσσια	VR	23°49'32" – 38°2'17"	245	LCZ 6
Δάφνη-Υμηττός	DIM	23°44'52" – 37°56'50"	125	LCZ 2
Κηφισιά	KIF	23°49'12" – 38°3'57"	315	LCZ 6
Μαρούσι	MAR	23°48'36" – 38°2'54"	235	LCZ 5
Νέα Σμύρνη	NS	23°38'54" – 37°57'50"	51	LCZ 2
Νέος Κόσμος	NK	23°43'57" – 37°57'32"	85	LCZ 2 ₁
Νίκαια	NIK	23°43'10" – 37°57'5"	23	LCZ 3
Πατήσια	PAT	23°43'47" – 38°1'19"	90	LCZ 2
Πεντέλη	PEN	23°51'52" – 38°2'49"	495	LCZ 9
Περιστέρη	PER	23°34'2" – 37°58'2"	55	LCZ 2
Πετρούπολη	PET	23°42'13" – 38°0'6"	223	LCZ 5
Φάληρο	FAL	23°41'34" – 37°55'45"	25	LCZ 5
Ψυχικό	PS	23°46'50" – 38°1'3"	209	LCZ 6

6.4 Αποτελέσματα

6.4.1 Σύνολο ευρωπαϊκών πόλεων

Το πλήθος των δορυφορικών εικόνων MODIS – LST υπό ανέφελο ουρανό κατά την εξεταζόμενη περίοδο (Ιούνιος – Αύγουστος 2017) παρουσίασε σημαντική διακύμανση ανά πόλη: από 38 εικόνες για το Άμστερνταμ έως 245 για τη Λισαβόνα (μέση τιμή: 119 εικόνες ανά πόλη, Αθήνα: 213 εικόνες). Η χωρική διακύμανση της επιφανειακής θερμοκρασίας στο εσωτερικό των περιοχών μελέτης ήταν περίπου διπλάσια κατά τις ημερήσιες δορυφορικές καταγραφές συγκριτικά με τις νυχτερινές· συγκεκριμένα, η μέση τυπική απόκλιση του LST υπολογίστηκε σε 2.1 K και 1.1 K αντίστοιχα.

Η επιφανειακή θερμοκρασία προσδιορίστηκε μέσω των προϊόντων MOD11A1 (Terra) και MYD11A1 (Aqua) σε τέσσερις χρονικές στιγμές της ημέρας. Οι κανονικοποιημένες μέσες τιμές LST των παρατηρήσεων των Terra και MODIS παρουσίασαν σημαντική ταύτιση κατά τη σύγκριση α) των δύο αντίστοιχων λήψεων τους κατά τη διάρκεια της ημέρας και β) των δύο της νύχτας. Δηλαδή, οι χωρικές διαφοροποιήσεις στο εσωτερικό των πόλεων ανά εξεταζόμενο χρονικό διάστημα (ημέρα – νύχτα) ήταν εν γένει σταθερές ανεξαρτήτως του χρησιμοποιούμενου δορυφόρου, παρά τη διαφορά της μίας έως τριών ωρών στις καταγραφές τους (διαφοροποίηση μόνο ως προς τις απόλυτες τιμές LST). Ο μέσος συντελεστής γραμμικής συσχέτισης r μεταξύ των Terra – Aqua ήταν ίσος με 0.89 για το σύνολο των πόλεων, ενώ η συμφωνία των δύο προϊόντων LST επιβεβαιώθηκε και με τη χρήση «συσχετισμένου ελέγχου t » (paired sample t -test) μεταξύ των κανονικοποιημένων τιμών τους ανά εικονοστοιχείο. Ως εκ τούτου, οι δύο δορυφόροι εμφάνισαν μικρές διαφοροποιήσεις και ως προς τους στατιστικούς δείκτες κατά τη διεξαγόμενη στατιστική ανάλυση της σχέσης μεταξύ των αστικών μορφολογικών παραμέτρων και του LST. Έτσι λόγω μη πρόσθετης πληροφορίας, για την παρουσίαση των αποτελεσμάτων επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί μόνο ο δορυφόρος Aqua (προϊόν MYD11A1). Αυτός προτιμήθηκε έναντι του Terra, καθώς η ώρα διέλευσής του αντιστοιχεί σε συνθήκες πλήρως αναπτυγμένου ημερήσιου και νυχτερινού αστικού οριακού στρώματος.

Στον Πίνακα 6-4 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης συσχέτισης (γραμμική συσχέτιση Pearson r) μεταξύ των μορφολογικών παραμέτρων και της επιφανειακής θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια της ημέρας. Για την πλειονότητα των εξεταζόμενων πόλεων ο συνδυασμός λ_{imp} – LST παρουσιάζει μία ισχυρή, στατιστικά σημαντική συσχέτιση, με μέση τιμή για όλες τις πόλεις $r = 0.53$. Για τις πόλεις οι οποίες χαρακτηρίζονται από θερμότερο και ξηρότερο κλίμα (μεσογειακές πόλεις, κατάταξη Bsh και Csa στον Πίνακα 6-1) οι αντίστοιχες συσχετίσεις είναι εμφανώς ασθενέστερες, με το λ_{imp} για δύο περιπτώσεις να είναι αρνητικά συσχετισμένο με το LST (Λευκωσία και Μαδρίτη). Οι παραπάνω πέντε μεσογειακές πόλεις εμφανίζουν μέσο r ίσο με 0.01 (για τη σχέση λ_{imp} – LST), ενώ για τις υπόλοιπες πόλεις ισχύει $r = 0.66$. Το λ_{imp} βρέθηκε εμφανίζει σημαντική συσχέτιση και κατά την εξέτασή του με τις έτερες μορφολογικές παραμέτρους: μέσο $r = 0.83$ ως προς το λ_b και $r = 0.53$ ως προς το H για το σύνολο των πόλεων. Συνεπώς, για την περίπτωση του λ_b είναι

σε ένα βαθμό αναμενόμενο ότι κατά τη συνεξέτασή του με το LST (βλ. Πίνακα 6-4) εμφανίζει παρόμοια συμπεριφορά με αυτήν που υπολογίστηκε προηγουμένως για το λ_{imp} . Η σχέση του H με το LST κατά τη διάρκεια της ημέρας παρουσιάζει μεγαλύτερη μεταβλητότητα ανά περίπτωση, με το r να λαμβάνει γενικά μικρότερες τιμές. Ανάλογα με την εξεταζόμενη πόλη, η συσχέτιση $H - LST$ κυμαίνεται από ισχυρά αρνητική (π.χ. Μαδρίτη), μηδενική ή αρκετά ασθενής (π.χ. Αθήνα, Λονδίνο), έως θετική (για την πλειονότητα των περιπτώσεων).

Πίνακας 6-4 Γραμμικός συντελεστής συσχέτισης Pearson (r) μεταξύ των μορφολογικών παραμέτρων και του LST (MODIS – Aqua) κατά τη διάρκεια της ημέρας για το σύνολο των εξεταζόμενων πόλεων.

Πόλη	Συσχέτιση (r) με LST			Πόλη	Συσχέτιση (r) με LST		
	λ_{imp}	λ_b	H		λ_{imp}	λ_b	H
Αθήνα	0.56	0.33	0.08	Λευκωσία	-0.59	-0.66	-0.48
Άμστερνταμ	0.60	0.50	0.50	Λιουμπλιάνα	0.77	0.69	0.61
Βαρσοβία	0.72	0.49	0.53	Λισαβόνα	0.25	0.06	0.24
Βερολίνο	0.75	0.59	0.49	Λονδίνο	0.63	0.57	0.13
Βιέννη	0.63	0.61	0.36	Μαδρίτη	-0.22	-0.52	-0.37
Βίλνιους	0.75	0.60	0.63	Μπρατισλάβα	0.45	0.30	0.01
Βουδαπέστη	0.60	0.44	0.39	Παρίσι	0.73	0.49	0.31
Βουκουρέστι	0.72	0.61	0.38	Πράγα	0.68	0.59	0.48
Βρυξέλλες	0.75	0.46	0.39	Ρίγα	0.67	0.64	0.12
Δουβλίνο	0.65	0.60	0.10	Ρώμη	0.06	-0.10	-0.04
Ελσίνκι	0.55	0.38	0.23	Σόφια	0.64	0.44	0.43
Ζάγκρεμπ	0.78	0.68	0.58	Στοκχόλμη	0.53	0.54	0.26
Κοπεγχάγη	0.65	0.53	0.21				

Κατά τη διάρκεια της νύχτας (Πίνακας 6-5) η συνεξέταση των αστικών μορφολογικών παραμέτρων με το LST παρουσιάζει πιο μεγάλη ομοιομορφία. Όλες οι παράμετροι βρέθηκαν υψηλά, θετικά συσχετισμένες με την επιφανειακή θερμοκρασία: μέσο r ίσο με 0.55, 0.53 και 0.49 για τα λ_{imp} , λ_b , και H αντίστοιχα. Παρατηρείται ότι σε αντίθεση με την ημέρα, το H παρουσιάζει αρκετά ισχυρή, θετική συσχέτιση με το LST, παραπλήσια με αυτή του λ_{imp} (μόνη εξαίρεση αποτελεί η πόλη του Δουβλίνου). Σημειώνεται ότι για τα στοιχεία των Πινάκων 6-4 και 6-5, όλες οι συσχετίσεις ήταν στατιστικά σημαντικές ($p < 0.05$) εκτός από τις συσχετίσεις $\lambda_{imp} - LST$ και $H - LST$ για την πόλη της Ρώμης κατά τη διάρκεια της ημέρας. Η χρήση του συντελεστή συσχέτισης Spearman (ρ) αντί του r οδήγησε σε αμελητέα διαφοροποίηση της έντασης των συσχετίσεων με το LST. Η μέση μεταβολή του βαθμού συσχέτισης με το LST με τη χρήση του ρ ήταν κατά τη διάρκεια της ημέρας 0.01, 0.004 και 0.031 για τα λ_{imp} , λ_b , και H αντίστοιχα, ενώ για τις νυχτερινές εικόνες οι αντίστοιχες τιμές ήταν -0.003, -0.006 και 0.015.

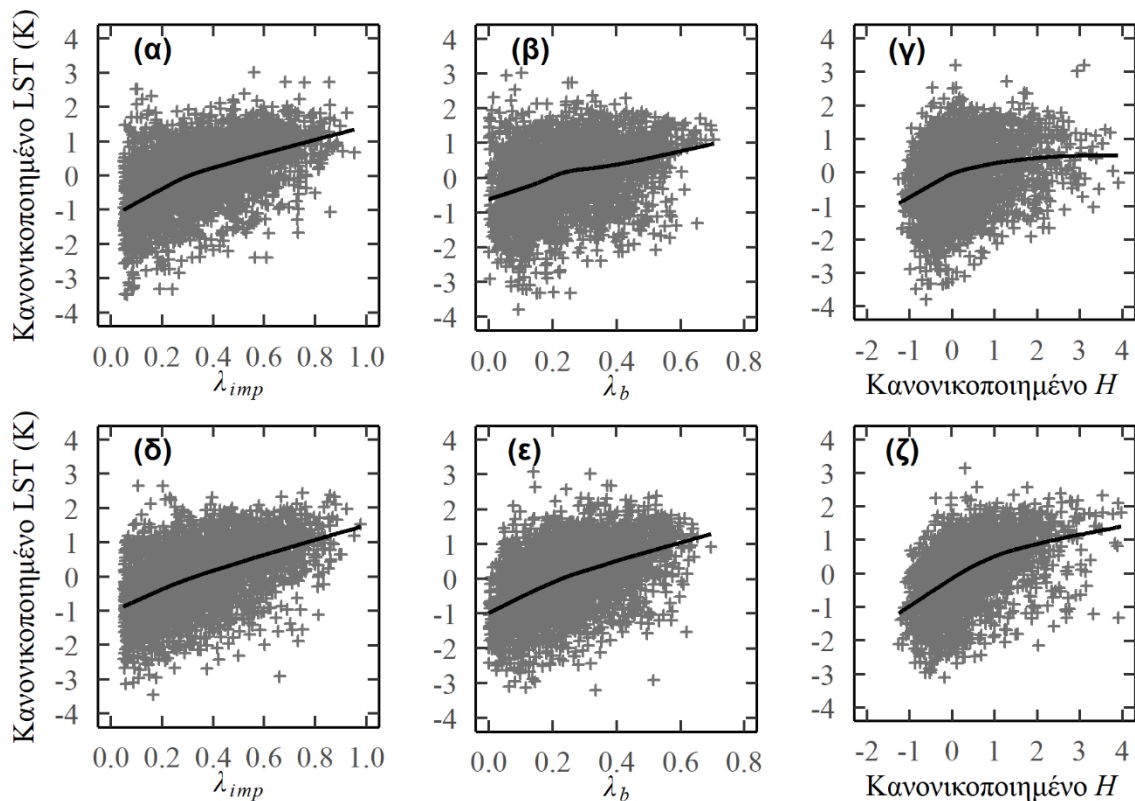
Πίνακας 6-5 Όμοια με τον Πίνακα 6-4, για τις παρατηρήσεις κατά τη διάρκεια της νύχτας.

Πόλη	Συσχέτιση (r) με LST			Πόλη	Συσχέτιση (r) με LST		
	λ_{imp}	λ_b	H		λ_{imp}	λ_b	H
Αθήνα	0.75	0.74	0.56	Λευκωσία	0.54	0.60	0.45
Αμστερνταμ	0.41	0.34	0.41	Λιουμπλιάνα	0.59	0.55	0.61
Βαρσοβία	0.54	0.44	0.63	Λισαβόνα	0.48	0.46	0.44
Βερολίνο	0.59	0.57	0.65	Λονδίνο	0.65	0.57	0.40
Βιέννη	0.52	0.44	0.57	Μαδρίτη	0.59	0.55	0.49
Βίλνιους	0.43	0.53	0.45	Μπρατισλάβα	0.49	0.48	0.44
Βουδαπέστη	0.62	0.44	0.50	Παρίσι	0.70	0.58	0.57
Βουκουρέστι	0.57	0.54	0.73	Πράγα	0.65	0.65	0.64
Βρυξέλλες	0.51	0.60	0.56	Ρίγα	0.51	0.47	0.18
Δουβλίνο	0.56	0.70	-0.07	Ρώμη	0.70	0.66	0.72
Ελσίνκι	0.47	0.43	0.51	Σόφια	0.60	0.64	0.46
Ζάγκρεμπ	0.49	0.40	0.38	Στοκχόλμη	0.26	0.35	0.31
Κοπεγχάγη	0.52	0.55	0.54				

Η μη βελτίωση των συσχετίσεων με τη χρήση του rho υποδηλώνει την πιθανή ύπαρξη μη μονότονων συναρτησιακών σχέσεων μεταξύ των παραμέτρων της αστικής μορφολογίας και του LST. Για το σκοπό αυτό διερευνήθηκαν οι κατανομές των τιμών τους με χρήση διαγραμμάτων διασποράς και με ταυτόχρονο προσδιορισμό της μη παραμετρικής συνάρτησης (γραμμή παλινδρόμησης) που προκύπτει από την παλινδρόμηση τύπου lowess. Για την περίπτωση του λ_{imp} βρέθηκε μία σχεδόν γραμμική σχέση με το LST τόσο κατά τη διάρκεια της ημέρας όσο και της νύχτας. Το παραπάνω εντοπίζεται τόσο ανά πόλη (δεν παρουσιάζεται), όσο και στη συνδυαστική αποτύπωση των Σχημάτων 6-5α και 6-5δ, όπου συμπεριλαμβάνονται οι συνδυασμοί των τιμών λ_{imp} και LST για το σύνολο των εξεταζόμενων περιπτώσεων της μελέτης. Για την αποφυγή της υπεραντιπροσώπησης ορισμένων πόλεων στο παραπάνω διάγραμμα, προηγήθηκε αναδειγματοληψία 100 τυχαίων εικονοστοιχείων ανά πόλη· επιπλέον η κανονικοποίηση του LST έγινε για κάθε περίπτωση ξεχωριστά. Παραπλήσιας μορφής, σχεδόν γραμμική σχέση βρέθηκε και για την περίπτωση των λ_b – LST, με σχετικά μικρότερη κλίση της καμπύλης για την περίπτωση της ημέρας (Σχήματα 6-5β και 6-5ε).

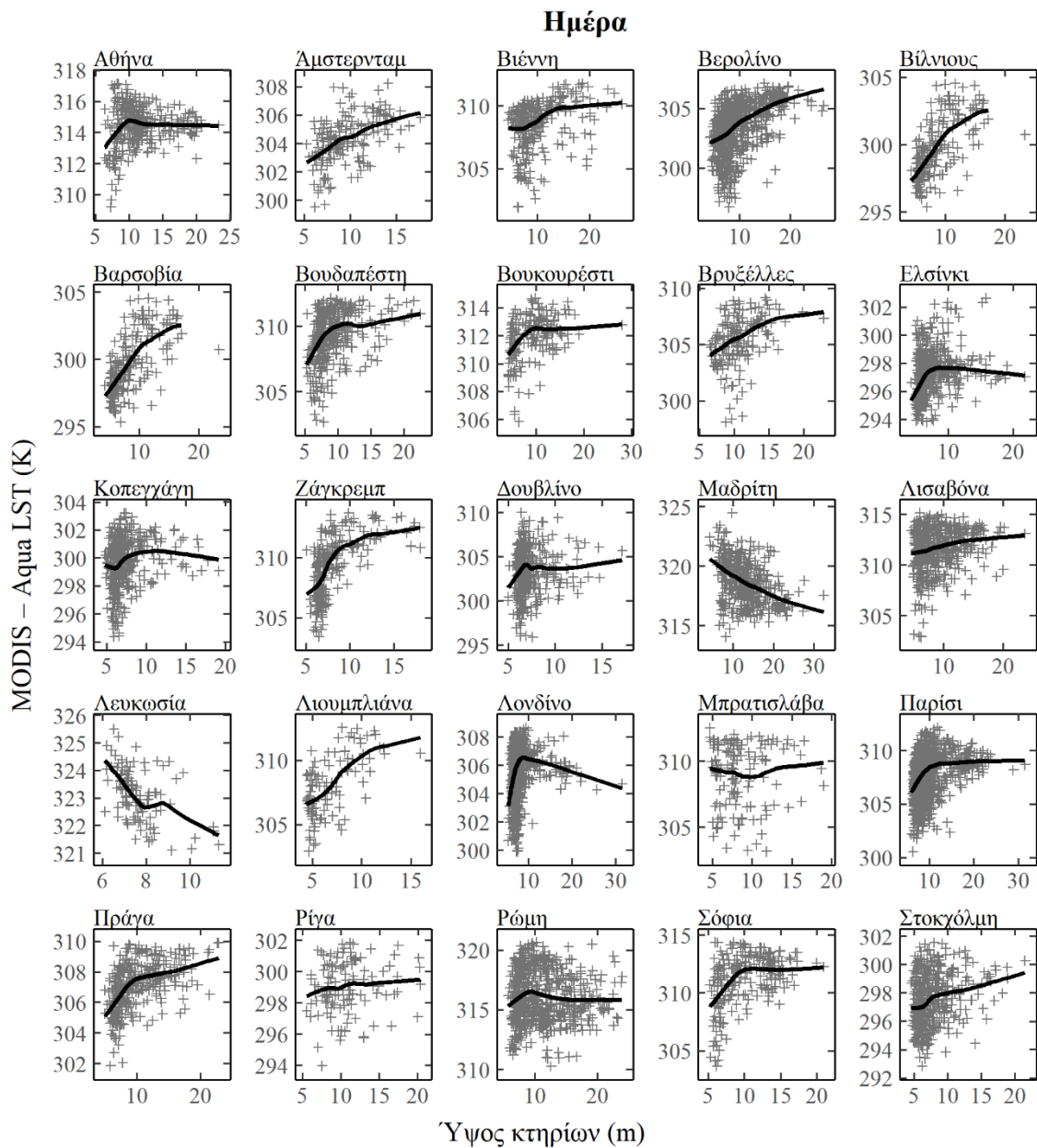
Μία πολυπλοκότερη σχέση φαίνεται να χαρακτηρίζει τα H και LST (Σχήματα 6-5γ και 6-5ζ). Κατά τη διάρκεια της ημέρας παρατηρείται ότι το LST για τα μικρότερα ύψη αυξάνεται σταθερά με αυξανόμενο H . Σε κάποια τιμή κατωφλίου —η οποία αντιστοιχεί προσεγγιστικά λίγο έπειτα από το μέσο ύψος των κτηρίων ανά πόλη— η αυξητική τάση της επιφανειακής θερμοκρασίας ανακόπτεται, με διασπορά των τιμών της τόσο προς μεγαλύτερες όσο και προς μικρότερες τιμές. Παράλληλα, μπορεί να παρατηρηθεί μία συσσώρευση υψηλών τιμών του LST στο άνω αριστερά τμήμα του διαγράμματος (μικρά κτηριακά ύψη). Από την άλλη πλευρά, για τις νυχτερινές παρατηρήσεις

(Σχήμα 6-5ζ) η αυξητική τάση του LST είναι πιο ομαλή, μολονότι παρατηρείται μία εξασθένηση του αυξητικού ρυθμού για μεγαλύτερο H .

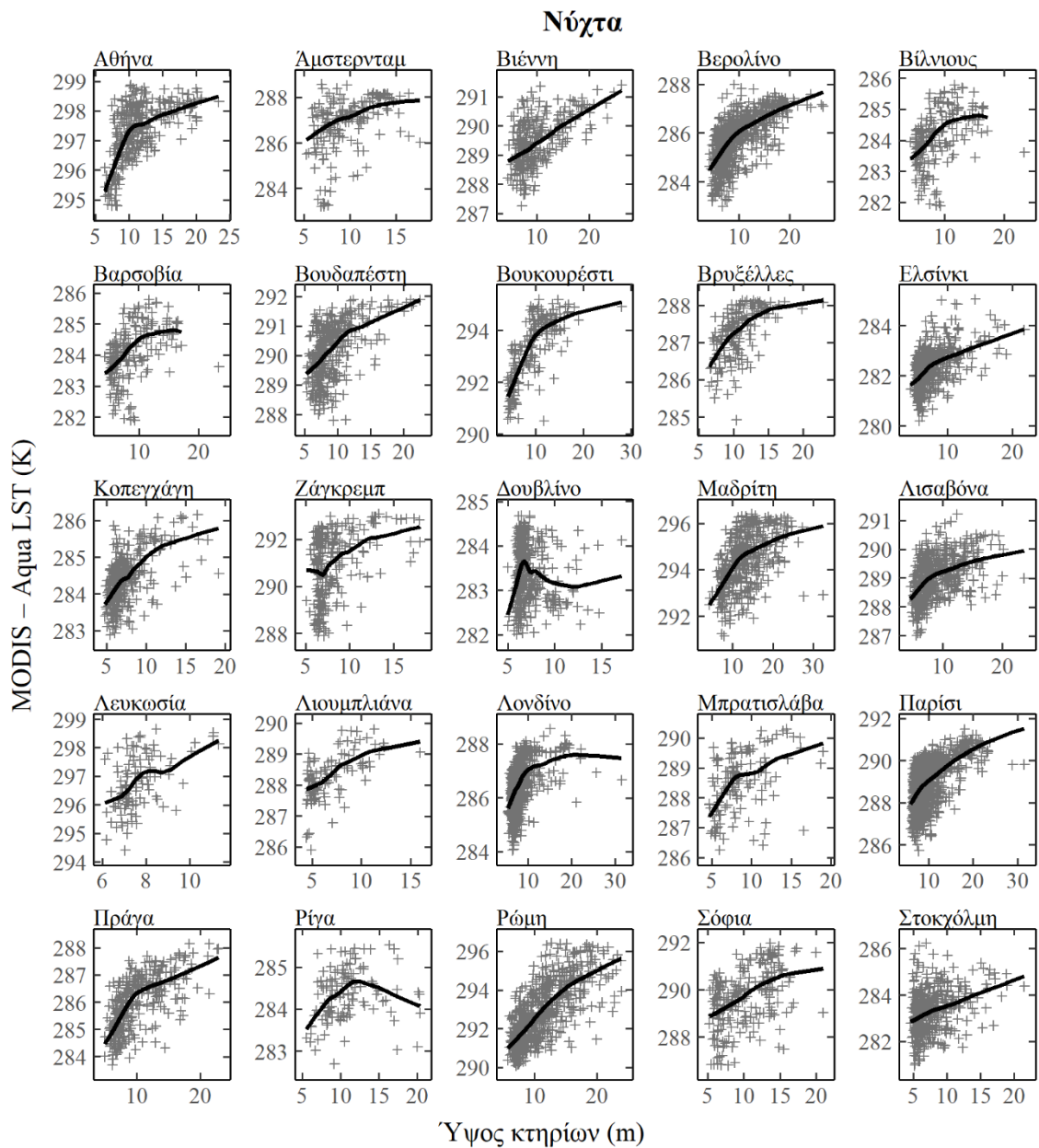


Σχήμα 6-5 Η σχέση μεταξύ του LST και των λ_{imp} , λ_b και H για το σύνολο των εξεταζόμενων πόλεων: κατά τη διάρκεια της ημέρας (α), (β) και (γ), και κατά τη διάρκεια της νύχτας (δ), (ε) και (ζ) αντίστοιχα. Οι καμπύλες μαύρου χρώματος αντιστοιχούν στη γραμμή παλινδρόμησης τύπου lowess.

Για μία ασφαλέστερη διερεύνηση των χαρακτηριστικών της σχέσης $H - LST$ παρουσιάζεται η κατανομή των αντίστοιχων τιμών ανά πόλη (Σχήματα 6-6 και 6-7). Για το Σχήμα 6-6 (επιφανειακή θερμοκρασία ημέρας) παρουσιάζεται σημαντική διαφοροποίηση ανάλογα με την εξεταζόμενη περίπτωση. Για σημαντικό αριθμό πόλεων (π.χ. Βουκουρέστι, Κοπεγχάγη, Παρίσι, κ.ά.) η κατανομή των τιμών του LST προσομοιάζει αυτήν της συγκεντρωτικής κατάστασης του Σχήματος 6-5γ, δηλ. για τα μικρότερα ύψη παρουσιάζεται μία αύξηση του LST με το H , ενώ αντίθετα για μεγαλύτερα ύψη είτε η αυξητική τάση ανακόπτεται είτε αντιστρέφεται. Για άλλες πόλεις (π.χ. Άμστερνταμ και Βρυξέλλες) το LST αυξάνει σταθερά αυξανόμενου του H . Τέλος, για τις μεσογειακές πόλεις παρουσιάζεται σχεδόν μηδενική (π.χ. Αθήνα και Ρώμη) ή αρνητική (Μαδρίτη και Λευκωσία) τάση μεταξύ των $H - LST$. Η κατάσταση αντιστρέφεται τη νύχτα (Σχήμα 6-7) όπου τα H και LST εμφανίζουν μία πιο σταθερή συμπεριφορά, με αυξανόμενο LST με το ύψος κτηρίων για τη συντριπτική πλειοψηφία των πόλεων.



Σχήμα 6-6 Η σχέση μεταξύ του LST και του H ανά εξεταζόμενη πόλη κατά τη διάρκεια της ημέρας. Οι καμπύλες μαύρου χρώματος αντιστοιχούν στη γραμμή παλινδρόμησης τύπου lowess.



Σχήμα 6-7 Ομοια με το Σχήμα 6-6, κατά τη διάρκεια της νύχτας.

Καθώς οι τρεις εξεταζόμενες μορφολογικές παράμετροι συσχετίζονται ιδιαίτερα η μία με την άλλη, η ξεχωριστή επίδραση της κάθε μεταβλητής στο LST (κατά την ανάλυση συσχετίσεων και στα διαγράμματα διασποράς) αποκρύπτεται σε έναν βαθμό από την ταυτόχρονη επίδραση των άλλων μεταβλητών. Για τη διερεύνηση της μοναδικής συμβολής της κάθε μεταβλητής αναπτύχθηκαν μοντέλα πολλαπλής παλινδρόμησης OLS με τα λ_{imp} , λ_b , και H ως ανεξάρτητες μεταβλητές και το LST ως εξαρτημένη μεταβλητή. Τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα της ανάλυσης παλινδρόμησης δίνονται στον Πίνακα 6-6, όπου οι παρουσιαζόμενοι συντελεστές αντιστοιχούν στους κανονικοποιημένους συντελεστές παλινδρόμησης, επομένως η ισχύς της επίδρασης των μεταβλητών στο LST είναι άμεσα συγκρίσιμη μεταξύ τους.

Πίνακας 6-6 Κανονικοποιημένοι συντελεστές παλινδρόμησης και συντελεστής προσδιορισμού R^2 για τα μοντέλα γραμμικής παλινδρόμησης OLS μεταξύ των αστικών μορφολογικών παραμέτρων και του LST.

Πόλη	Ημέρα				Νύχτα			
	λ_{imp}	λ_b	H	R^2	λ_{imp}	λ_b	H	R^2
Αθήνα	0.75***	-0.16	-0.15**	0.36	0.48***	0.24***	0.17***	0.64
Άμστερνταμ	0.44***	0.03	0.24***	0.40	0.24	0.03	0.26**	0.22
Βαρσοβία	0.72***	-0.12*	0.15***	0.53	0.19**	0.07	0.48***	0.44
Βερολίνο	0.81***	-0.11*	0.04	0.56	0.17**	0.18***	0.45***	0.49
Βιέννη	0.69***	0.15	-0.25**	0.43	0.02	0.17	0.47***	0.35
Βίλνιους	0.63***	-0.06	0.32***	0.64	-0.33**	0.67***	0.37***	0.38
Βουδαπέστη	0.65***	-0.01	-0.06	0.36	0.45***	0.06	0.20***	0.40
Βουκουρέστι	0.72***	-0.06	0.16**	0.54	0.22*	0.16	0.61***	0.66
Βρυξέλλες	0.89***	-0.10	-0.11	0.58	-0.02	0.44***	0.37***	0.46
Δουβλίνο	0.65***	0.03	-0.08	0.44	-0.21*	0.89***	-0.06	0.51
Ελσίνκι	0.90***	-0.21**	-0.27***	0.34	-0.13	0.38***	0.48***	0.35
Ζάγκρεμπ	0.77***	-0.09	0.15**	0.62	0.64***	-0.22	0.09	0.26
Κοπεγχάγη	0.84***	-0.13	-0.16**	0.44	-0.23**	0.62***	0.49***	0.48
Λευκωσία	0.34	-0.88***	-0.30***	0.52	-0.29	0.77***	0.28***	0.44
Λιουμπλιάνα	0.91***	-0.22	0.10	0.61	0.31	0.02	0.37**	0.42
Λισαβόνα	0.80***	-0.71***	0.15**	0.19	0.23**	0.14	0.26***	0.29
Λονδίνο	0.71***	0.05	-0.24***	0.45	0.37***	0.23***	0.15***	0.42
Μαδρίτη	0.50***	-0.79***	-0.26***	0.40	0.34***	0.17**	0.25***	0.43
Μπρατισλάβα	1.01***	-0.52**	-0.18*	0.29	0.31	0.06	0.26**	0.30
Παρίσι	1.13***	-0.40***	-0.15***	0.59	0.53***	0.02	0.27***	0.54
Πράγα	0.94***	-0.38***	0.16**	0.50	0.35***	0.08	0.37***	0.52
Ρίγα	0.48***	0.22	-0.01	0.47	0.39*	0.12	0.08	0.27
Ρώμη	0.73***	-0.70***	-0.10*	0.12	0.27***	0.18***	0.47***	0.65
Σόφια	1.06***	-0.63***	0.21***	0.49	0.16	0.44***	0.09	0.43
Στοκχόλμη	0.41***	0.32***	-0.10*	0.36	-0.12	0.34***	0.28***	0.17

*** $p < 0.001$

** $p < 0.01$

* $p < 0.05$

Τα αποτελέσματα που προκύπτουν για το θερμικό περιβάλλον των ευρωπαϊκών πόλεων κατά τη διάρκεια της ημέρας μπορούν να συνοψιστούν στα εξής: Το λ_{imp} αποτελεί τον ισχυρότερο και στατιστικά σημαντικότερο παράγοντα καθορισμού της επιφανειακής θερμοκρασίας. Για όλες τις πόλεις λαμβάνει σημαντικά υψηλότερες τιμές ως προς τον κανονικοποιημένο συντελεστή παλινδρόμησης συγκριτικά με τα λ_b και H . Το ποσοστό αδιαπέρατου εδάφους μετά τον έλεγχο της επίδρασης των άλλων μεταβλητών έχει θετική επίδραση στη θερμοκρασία και για την περίπτωση των

μεσογειακών χωρών. Όσον αφορά τα λ_b και H , τα πρόσημα και η στατιστική σημαντικότητα των συντελεστών παλινδρόμησης διαφέρουν ανά εξεταζόμενη περίπτωση. Σε όλες τις περιπτώσεις όπου το λ_b είναι στατιστικά σημαντικά διαφορετικό από το μηδέν βρέθηκε να έχει αρνητική επίδραση στη θερμοκρασία, με τον συντελεστή να κυμαίνεται από -0.10 έως -0.88. Όσον αφορά το H , όσες πόλεις εμφάνισαν ομοιόμορφα αυξητική σχέση στο Σχήμα 6-6 εμφανίζουν στο μοντέλο παλινδρόμησης θετική σύνδεση με το LST. Για την πλειονότητα των πόλεων όπου η αυξητική τάση διακοπτόταν ή/και αντιστρεφόταν ο συντελεστής παλινδρόμησης είναι στατιστικά σημαντικά αρνητικός, με μικρές ωστόσο εν γένει τιμές (κατ' απόλυτη τιμή) συγκριτικά με το λ_{imp} .

Κατά τις νυχτερινές εικόνες του LST η ένταση της επίδρασης των διαφορετικών αστικών μορφολογικών παραμέτρων στη θερμοκρασία είναι αρκετά πιο ισοδύναμη μεταξύ τους. Το λ_{imp} δεν είναι πλέον ο καθοριστικός παράγοντας του μοντέλου παλινδρόμησης· αν και σε λιγότερες περιπτώσεις εμφανίζει αρνητική σχέση με το LST, εξακολουθεί να εμφανίζει πάντα θετικό πρόσημο στους περισσότερους στατιστικά σημαντικούς συντελεστές. Τα λ_b και H παρουσιάζουν τη νύχτα αρκετά διαφοροποιημένα αποτελέσματα συγκριτικά με εκείνα που παρουσιάστηκαν προηγουμένως για την ημέρα. Αρχικά, για την πλειονότητα των περιπτώσεων εμφανίζουν ενισχυμένη θετική επίδραση στις τιμές του LST, είτε με αλλαγή πρόσημου από αρνητικό σε θετικό είτε με μεγαλύτερες θετικές τιμές. Επιπλέον, οι στατιστικά σημαντικές τιμές των λ_b και H είναι θετικές και παραπλήσιας τάξης μεγέθους με αυτές που σημειώνονται για το λ_{imp} .

Ο συντελεστής προσδιορισμού (R^2) των μοντέλων γραμμικής πολλαπλής παλινδρόμησης είχε μέση τιμή ίση με 0.45 για την περίπτωση των εικόνων της ημέρας, ενώ για τις νυχτερινές εικόνες βρέθηκε ίσος με 0.42. Παρά τη θετική γραμμική συσχέτιση που υπολογίστηκε προηγουμένως μεταξύ των μορφολογικών παραμέτρων το μέτρο έντασης της πολυσυγγραμμικότητας VIF έλαβε τιμές κάτω της θεωρητικής οριακής τιμής 10 (μέση τιμή VIF: 4.28). Στατιστικά σημαντική και σχετικά υψηλή ήταν η χωρική αυτοσυσχέτιση των αναπτυσσόμενων μοντέλων παλινδρόμησης, όπως υπολογίστηκε σύμφωνα με τον δείκτη Moran's I. Για τα μοντέλα OLS κατά τη διάρκεια της ημέρας η μέση τιμή του δείκτη ήταν ίση με 0.61 και για τη νύχτα 0.66. Το γεγονός αυτό υποδηλώνει την αναγκαιότητα επιπρόσθετης εξέτασης ενός μοντέλου χωρικής παλινδρόμησης προκειμένου να ενσωματωθεί στην ένταση του LST κάθε εικονοστοιχείου η επίδραση των γειτονικών του.

Χρησιμοποιήθηκε ένα χωρικά αυτοπαλίνδρομο μοντέλο παλινδρόμησης (SAR) θεωρώντας—όπως και κατά τον υπολογισμό του δείκτη Moran's I— ότι η χωρική επίδραση περιορίζεται στους οκτώ άμεσους γείτονες κάθε εικονοστοιχείου. Διαφορετικές επιλογές ως προς την επιλογή των χωρικών σταθμιστικών βαρών δεν οδήγησαν σε καλύτερα αποτελέσματα του μοντέλου. Στον Πίνακα 6-7 δίνονται τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα της χωρικής παλινδρόμησης. Οι συντελεστές παλινδρόμησης έχουν υπολογιστεί σε κανονικοποιημένη μορφή κατά συνέπεια είναι συγκρίσιμοι μεταξύ τους· έχει συνυπολογιστεί η ολική—άμεση συν έμμεση— επίδραση της κάθε μεταβλητής (LeSage and Pace, 2009). Τα αποτελέσματα του SAR είναι εν γένει παραπλήσια με αυτά της παλινδρόμησης OLS ως προς την κατεύθυνση της επίδρασης των μεταβλητών. Σε ορισμένες

περιπτώσεις εντοπίζονται μη στατιστικά σημαντικές αλλαγές πρόσημου (σε σχέση με το μοντέλο OLS) των παραμέτρων. Για την ημέρα, όλες οι στατιστικά σημαντικές τιμές του λ_{imp} είναι θετικές, ενώ για τη συντριπτική πλειονότητα των λ_b και H είναι αρνητικές και μικρότερης έντασης (κατά απόλυτη τιμή) από αυτές του λ_{imp} . Αντίθετα για τη νύχτα όλες οι στατιστικά σημαντικές τιμές των λ_{imp} , λ_b και H είναι θετικές (με εξαίρεση την πόλη του Δουβλίνου).

Πίνακας 6-7 Κανονικοποιημένοι συντελεστές παλινδρόμησης (ολική επίδραση) για τα μοντέλα χωρικής παλινδρόμησης SAR μεταξύ των αστικών μορφολογικών παραμέτρων και του LST.

Πόλη	Ημέρα			Νύχτα		
	λ_{imp}	λ_b	H	λ_{imp}	λ_b	H
Αθήνα	2.76***	-0.88	-1.48**	0.98***	1.03***	-0.15
Άμστερνταμ	0.75*	0.29	0.22	1.27	0.02	-0.18
Βαρσοβία	1.98***	-0.29	-0.06	0.35	0.85	1.25***
Βερολίνο	2.13***	-0.10	-0.54***	0.30	1.02***	0.56**
Βιέννη	4.01***	0.37	-1.75**	0.49	1.21	0.93
Βίλνιους	2.04***	-0.57**	0.14	0.06	1.64**	-0.02
Βουδαπέστη	1.82***	0.26	-0.71**	1.11*	1.23***	-0.21
Βουκουρέστι	1.36***	-0.25	0.10	0.44	0.29	1.00***
Βρυξέλλες	3.20*	0.57	-0.61	0.58	2.60***	1.22**
Δουβλίνο	2.72***	-0.68	-0.49*	1.40**	0.62	-0.50*
Ελσίνκι	3.18***	-0.71*	-0.98***	-0.21	0.83**	0.73**
Ζάγκρεμπ	1.98***	-0.23	-0.15	0.67	0.11	0.80*
Κοπεγχάγη	2.51***	-0.01	-0.74***	-0.34	1.57***	0.58*
Λευκωσία	0.37	-2.15*	-0.44	3.03*	-0.18	-0.16
Λιουμπλιάνα	2.18***	-0.56	-0.08	1.57	0.07	0.48
Λισαβόνα	2.10***	-1.28**	-0.12	0.98	-0.14	0.85*
Λονδίνο	3.41***	-0.32	-1.52***	1.78***	0.47	-0.39
Μαδρίτη	1.00***	-1.59***	-0.54**	1.13***	0.46*	0.47**
Μπρατισλάβα	1.67**	-0.46	-0.24	-0.01	0.88	0.55
Παρίσι	2.67***	-0.47**	-0.76***	1.43***	0.53*	0.07
Πράγα	2.79***	-1.07**	-0.18	1.70**	-0.21	1.11***
Ρίγα	0.91*	0.57	-0.02	0.25	1.05	0.52
Ρώμη	2.97***	-2.69***	-0.83**	0.84***	0.58**	0.47***
Σόφια	2.69***	-1.31***	0.21	0.41	1.81**	-0.12
Στοκχόλμη	1.47***	0.60***	-0.56***	-0.61	1.03***	0.49

*** $p < 0.001$

** $p < 0.01$

* $p < 0.05$

Το μοντέλο SAR είχε σταθερά μεγαλύτερες τιμές του R^2 σε σχέση με το OLS. Εν τούτοις ο διαφορετικός τρόπος υπολογισμού του συντελεστή προσδιορισμού κατά τη χωρική παλινδρόμηση, τον καθιστά μη άμεσα συγκρίσιμο με αυτόν της παλινδρόμησης OLS και για αυτό δεν παρουσιάζεται στα στοιχεία του Πίνακα 6-7. Πιο ασφαλές κριτήριο σύγκρισης των δύο διαφορετικών μοντέλων αποτελεί το «κριτήριο πληροφoρίας του Akaike» (Akaike information criterion, AIC), οι μικρότερες τιμές του οποίου αντιστοιχούν σε καλύτερες εκτιμήσεις του μοντέλου. Οι ελαττωμένες τιμές για το μοντέλο SAR —κατά 67% την ημέρα και 81.6% τη νύχτα— κατέδειξαν την ανωτερότητα του σε σύγκριση με τη μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων.

6.4.2 Αστική περιοχή της Αθήνας

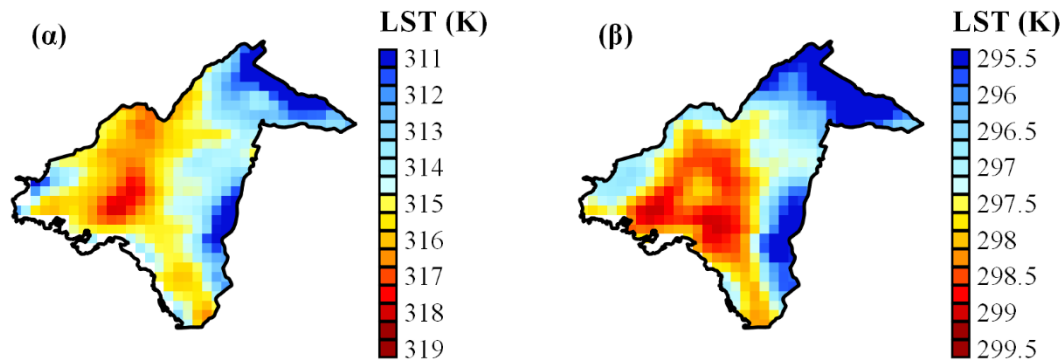
Στην προηγούμενη ενότητα πραγματοποιήθηκε μία ευρεία στατιστική εξέταση της σχέσης μεταξύ βασικών αστικών μορφολογικών παραμέτρων και του LST για 25 ευρωπαϊκές πόλεις. Παράλληλα με την εξαγωγή ορισμένων συμπερασμάτων με γενικότερη ισχύ ως προς την επίδραση των εξεταζόμενων μεταβλητών, διαπιστώθηκε ταυτόχρονα σημαντική ποικιλομορφία κυρίως όσον αφορά τη σύνδεση της πυκνότητας και του ύψους του κτηριακού περιβάλλοντος με την επιφανειακή θερμοκρασία κατά τη διάρκεια της ημέρας. Αυτή η διαφοροποίηση διαμορφώνεται από τα ιδιαίτερα μορφολογικά γνωρίσματα κάθε πόλης, καθώς και από περαιτέρω παραμέτρους (π.χ. είδος βλάστησης) οι οποίες δεν υπεισήλθαν στην ανάλυση. Για μία φυσική ερμηνεία των αποτελεσμάτων των αναλύσεων συσχέτισης και παλινδρόμησης έγινε στη συνέχεια μία πιο εστιασμένη ανάλυση της περίπτωσης της πόλης της Αθήνας. Παράλληλα, πραγματοποιήθηκε μία προσομοίωση του θερμικού περιβάλλοντος της Αθήνας (επιφανειακή θερμοκρασία και επιφανειακή θερμοκρασία αέρα), εφαρμόζοντας το ατμοσφαιρικό μοντέλο WRF.

Ένα σημείο προβληματισμού κατά την προηγηθείσα διερεύνηση ήταν η υψηλή συσχέτιση αναμεταξύ των παραγόντων λ_{imp} , λ_b και H . Είναι δηλαδή σύνηθες φαινόμενο στις αστικές περιοχές οι τιμές του αδιαπέρατου εδάφους, της πυκνότητας δόμησης και του ύψους των κτηρίων να αυξάνονται σχεδόν ταυτόχρονα —κατά κανόνα ακτινωτά από την περιφέρεια προς το κέντρο της πόλης. Μολονότι με τη χρήση μοντέλων πολλαπλής παλινδρόμησης μπορεί να διερευνηθεί η ξεχωριστή επίδραση της κάθε μεταβλητής, η στατιστική ανάλυση εμπεριέχει αβεβαιότητα και προϋποθέτει στατιστικές παραδοχές που δεν εκπληρώνονται απολύτως στην πράξη. Τα χαρακτηριστικά του αστικού περιβάλλοντος της Αθήνας παρέχουν τη δυνατότητα για μια παράλληλη μελέτη των επιφανειακών παραμέτρων ανά αστικές ζώνες διακριτών μορφολογικών χαρακτηριστικών, απομονώνοντας κατ' αυτόν τον τρόπο την επίδραση της τρισδιάστατης μορφολογίας από αυτήν της βλάστησης.

Όπως παρατηρείται στο Σχήμα 6-3 σημειώνεται καταρχάς ένας σαφής διαχωρισμός μεταξύ των αστικών ενοτήτων με εκτεταμένη βλάστηση και αραιή δόμηση στο βορειοανατολικό τμήμα της πόλης (σε μικρότερο βαθμό και στα νοτιοανατολικά προάστια) και του κυρίως αστικού κορμού. Ειδικότερα για το ευρύτερο κέντρο της πόλης —όπως ορίζεται με το διακεκομμένο πλαίσιο του

Σχήματος 6-2, εμβαδόν περιοχής $\sim 73 \text{ km}^2$ — μπορούν να εντοπιστούν τα ακόλουθα χαρακτηριστικά: Το κέντρο του δήμου Αθηναίων (LCZ 2₁ και LCZ 2, βλ. Σχήμα 6-4) αντιστοιχεί σε μία περιοχή υψηλής και πυκνής κτηριακής δόμησης, και λιγοστού πρασίνου —εκτός από την περίπτωση μεμονωμένων αστικών πάρκων (βλ. Σχήμα 6-2). Σε εγγύς απόσταση βρίσκεται μία εκτεταμένη χωρική ενότητα ελαφρών βιομηχανικών χρήσεων, ανοικτής δόμησης και εν γένει μικρού ύψους κτηρίων (LCZ 8) (ευρύτερη βιομηχανική περιοχή Ελαιώνα). Παράλληλα, τα δυτικά προάστια του κεντρικού πυρήνα της πόλης αντιστοιχούν σε μία πυκνοδομημένη ζώνη μέσου/χαμηλού ύψους κτηρίων (LCZ 2 και ως επί το πλείστον LCZ 3). Για όλες τις παραπάνω περιπτώσεις το ποσοστό των φυσικών ενοτήτων οι οποίες παρεμβάλλονται στον κτηριακό χώρο είναι χαμηλό και παραπλήσιο μεταξύ των διαφόρων LCZ· το μέσο λ_{imp} εντός του ευρύτερου κέντρου υπολογίστηκε ίσο με 0.66, 0.66, 0.70 και 0.69 για τις LCZ 2₁, LCZ 2, LCZ 3 και LCZ 8 αντίστοιχα. Κατά τον τελευταίο υπολογισμό, καθώς και στα επόμενα σημεία της ανάλυσης, στην τάξη LCZ 2₁ δεν συμπεριελήφθησαν τρία εικονοστοιχεία τα οποία εμπεριέχουν εκτεταμένα αστικά πάρκα (Εθνικός Κήπος, Πεδίον του Άρεως και Λόφος Φιλοπάππου).

Στο Σχήμα 6-8 δίνεται η μέση τιμή της επιφανειακής θερμοκρασίας της Αθήνας κατά τους θερινούς μήνες του 2017 (για ημέρες χωρίς νεφοκάλυψη) μέσω του προϊόντος MODIS – Aqua (ημέρα και νύχτα). Παρατηρείται ότι τα βορειοανατολικά προάστια χαρακτηρίζονται και στις δύο χρονικές στιγμές από χαμηλότερη επιφανειακή θερμοκρασία, σε συμφωνία με τα στοιχεία του Σχήματος 6-5 και των Πινάκων 6-6 και 6-7 ως προς τη σχέση του λ_{imp} με το LST. Οι τάξεις LCZ 5, 6 και 9 είχαν συνολικά μικρότερο μέσο LST κατά $\sim 1.9 \text{ K}$ συγκριτικά με τις άλλες ανθρωπογενείς τοπικές κλιματικές ζώνες. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η χωρική ανομοιομορφία που εμφανίζεται στο ευρύτερο κέντρο του πολεοδομικού συγκροτήματος. Εκεί, κατά τη διάρκεια της ημέρας οι περιοχές οι οποίες συμπεριλαμβάνονται στην τοπική κλιματική ζώνη LCZ 8 (υψηλές τιμές λ_{imp} και σχετικά μικρές τιμές λ_b και H) διαχωρίζονται διακριτά ως τα θερμότερα σημεία της Αθήνας (LST $\sim 317 \text{ K}$). Η περιοχή του αστικού ιστού για την οποία κυριαρχεί η πυκνή δόμηση, μεγάλου ύψους κτηρίων (LCZ 2₁) παρουσιάζει εμφανώς χαμηλότερες θερμοκρασίες (LST $\sim 315.3 \text{ K}$). Παρατηρείται δηλαδή το φαινόμενο της αρνητικής σύνδεσης του H με το LST την ημέρα το οποίο προσδιορίστηκε προηγουμένως στην πολλαπλή παλινδρόμηση για την Αθήνα (Πίνακας 6-6). Η δυτική περιφέρεια χαρακτηρίζεται από μία ενδιάμεση κατάσταση όσον αφορά τον συνδυασμό των μορφολογικών παραμέτρων λ_b και H και επακόλουθα ως προς το ύψος των τιμών LST. Κατά τις νυχτερινές δορυφορικές καταγραφές MODIS – Aqua η κατάσταση του θερμικού περιβάλλοντος στο ευρύτερο κέντρο αναστρέφεται: ο κύριος, πυκνός οικιστικός ιστός παρουσιάζει τις υψηλότερες τιμές LST (LST $\sim 298.6 \text{ K}$) ενώ τώρα η περιοχή LCZ 8 χαρακτηρίζεται από χαμηλότερες θερμοκρασίες. Στον Πίνακα 6-8 παρουσιάζεται η συνολική κατανομή των θερμοκρασιών ανά τοπική κλιματική ζώνη για το σύνολο του πολεοδομικού συγκροτήματος (συμπεριλαμβάνονται μόνο οι τάξεις που αντιστοιχούν στο ανθρωπογενές περιβάλλον).

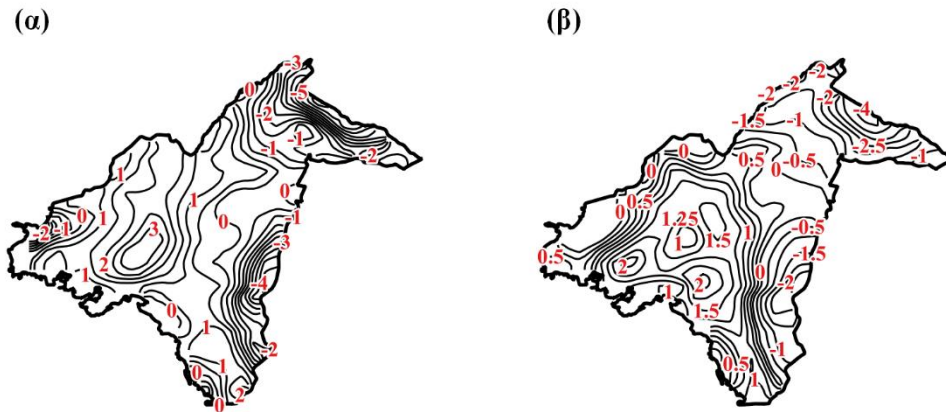


Σχήμα 6-8 Χωρική αποτύπωση της μέσης τιμής της περιόδου Ιούνιος – Αύγουστος 2017 του MODIS – LST (Aqua) για την Αθήνα, (α) ~14.30 τοπική ώρα και (β) ~02.30 τοπική ώρα.

Πίνακας 6-8 Μέση (\pm μία τυπική απόκλιση), ελάχιστη και μέγιστη επιφανειακή θερμοκρασία (βαθμοί Kelvin) των δορυφορικών παρατηρήσεων MODIS – Aqua για την Αθήνα ανά LCZ (Ιούνιος – Αύγουστος 2017).

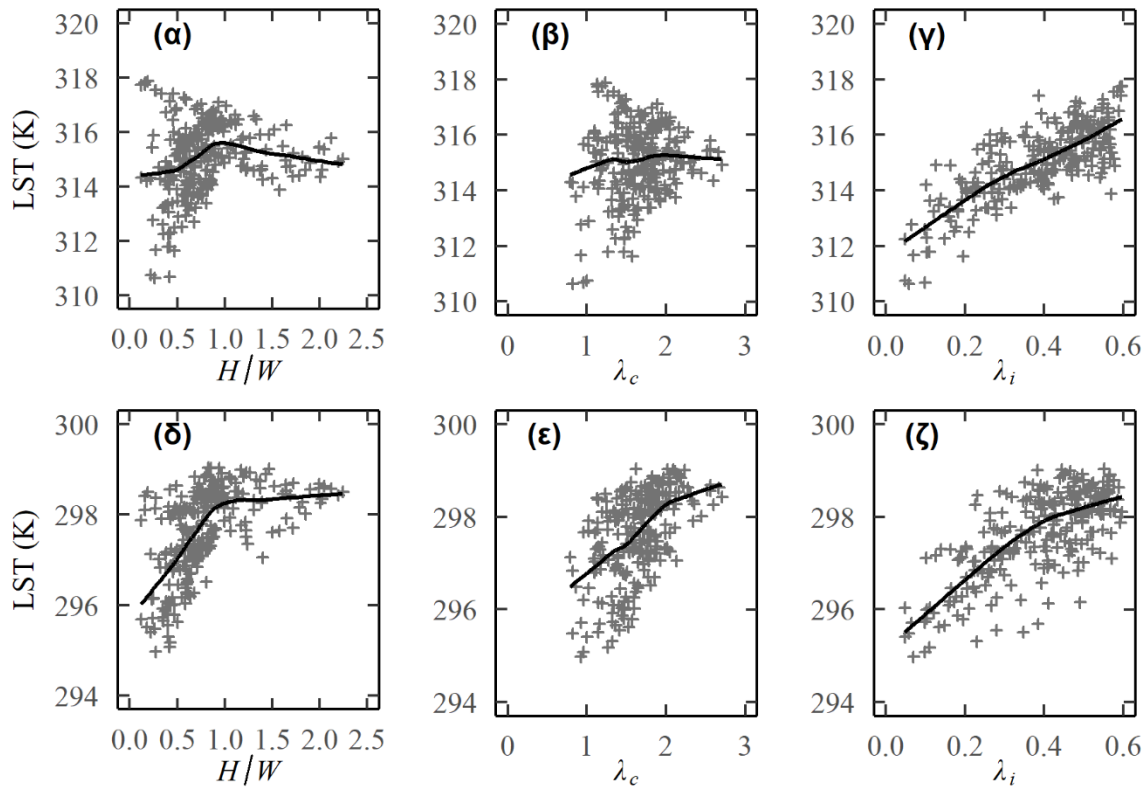
	Ημέρα			Νύχτα		
	Μέση	Ελάχ.	Μέγ.	Μέση	Ελάχ.	Μέγ.
LCZ 2 ₁	315.3 \pm 0.3	314.6	315.8	298.6 \pm 0.2	298.4	299.0
LCZ 2	315.3 \pm 0.8	313.8	317.1	298.2 \pm 0.6	296.5	299.0
LCZ 3	316.1 \pm 0.6	314.0	316.8	298.2 \pm 0.4	297.3	298.8
LCZ 5	314.6 \pm 0.8	312.7	316.2	297.4 \pm 0.6	296.2	298.5
LCZ 6	314.3 \pm 1.6	310.7	316.8	296.7 \pm 0.8	294.9	298.1
LCZ 8	317.1 \pm 0.9	314.3	317.9	297.9 \pm 0.8	295.7	298.6
LCZ 9	313.3 \pm 1.5	310.6	316.2	295.5 \pm 0.5	294.8	296.8

Η παραπάνω χωρική διαφοροποίηση μπορεί να αποτυπωθεί πιο ευκρινώς, υπολογίζοντας τη διαφορά της θερμοκρασίας κάθε εικονοστοιχείου με τη μέση θερμοκρασία του συνολικού αστικού συγκροτήματος και κατασκευάζοντας κατόπιν, ισοπληθείς καμπύλες. Όπως αποτυπώνεται στο Σχήμα 6-9 το κέντρο της ζώνης LCZ 8 έχει υψηλότερο LST κατά τη διάρκεια της ημέρας άνω των 3 °C από τη μέση τιμή της πόλης και ~2 °C από τις γειτονικές πυκνοδομημένες αστικές περιοχές. Τη νύχτα —όπου γενικότερα οι διαφοροποιήσεις της επιφανειακής θερμοκρασίας είναι μικρότερες— το ίδιο σημείο αντιστοιχεί σε ένα τοπικό ελάχιστο, με μικρότερο LST έως και 1 °C από τις γύρω χωρικές ενότητες. Επιπρόσθετα, στην ευρύτερη περιοχή φαίνονται να εμφανίζονται τρία διαφορετικά κέντρα υψηλής θερμικής επιβάρυνσης.



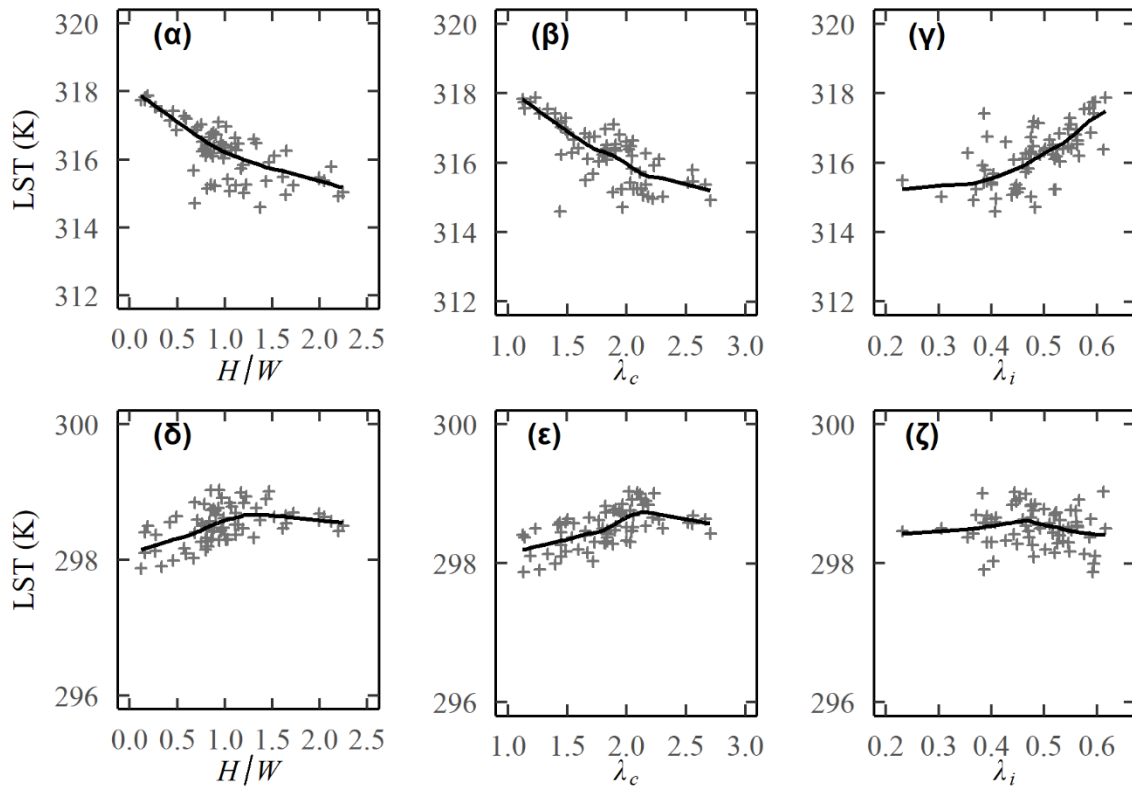
Σχήμα 6-9 Ομοια με το Σχήμα 6-8, για τις ισοπληθείς καμπύλες της διαφοράς ως προς τη μέση τιμή του συνόλου της περιοχής μελέτης.

Οι διακυμάνσεις του LST ανά τοπική κλιματική ζώνη διαμορφώνονται αφενός από το ποσοστό της επιφανειακής βλάστησης και αφετέρου από την τρισδιάστατη αστική μορφολογία, με τον δεύτερο παράγοντα να τείνει να είναι ο επικρατέστερος για το ευρύτερο κέντρο της πόλης. Στην προηγούμενη συζήτηση χρησιμοποιώντας το μέσο ύψος κτηρίων H , συμπεριλήφθηκε εμμέσως στην ανάλυση η συνολικότερη τρισδιάστατη δομή της πόλης. Στο Σχήμα 6-10 παρουσιάζεται η σχέση του LST με δύο επιπλέον παραμέτρους που περιγράφουν αμεσότερα την πλήρη τρισδιάστατη αστική μορφολογία (H/W και λ_c) και με μία παράμετρο που αποτυπώνει το ποσοστό της επιφανειακής κάλυψης από ανθρωπογενή υλικά χωρίς κτήρια (ποσοστό αδιαπέρατου εδάφους, λ_i). Κατά τη διάρκεια της ημέρας το H/W εμφανίζει μία συμπεριφορά ανάλογη με εκείνη που παρουσιάστηκε προηγουμένως στο Σχήμα 6-6 για το H . Συγκεκριμένα, το LST αυξάνει αρχικά αυξανόμενου του H/W για το διάστημα των τιμών 0 έως ~ 1 , ενώ έπειτα παρουσιάζεται σαφής πτωτική τάση. Το ίδιο παρατηρείται σε έναν βαθμό και για το λ_c , ωστόσο με αρκετά μεγαλύτερη διασπορά του LST για τις ενδιάμεσες τιμές της παραμέτρου (Σχήμα 6-10β). Για το αντίστοιχο διάγραμμα διασποράς του λ_i (Σχήμα 6-10γ) η αυξητική τάση του LST είναι αρκετά ισχυρή και σχεδόν γραμμική, ενώ έχει επιπλέον υψηλότερη γραμμική συσχέτιση Pearson ($r = 0.74$, $p < 0.01$) συγκριτικά με το λ_{imp} . Κατά τις νυχτερινές ώρες και οι τρεις παραπάνω παράμετροι βρέθηκαν να έχουν ενισχυτική επίδραση στις τιμές της επιφανειακής θερμοκρασίας (Σχήματα 6-10δ έως 6-10ζ). Για την περίπτωση της αναλογίας διαστάσεων αστικής χαράδρας παρατηρείται ότι η επίδρασή της στο LST ομαλοποιείται όσον αφορά τις τιμές H/W άνω του 1.



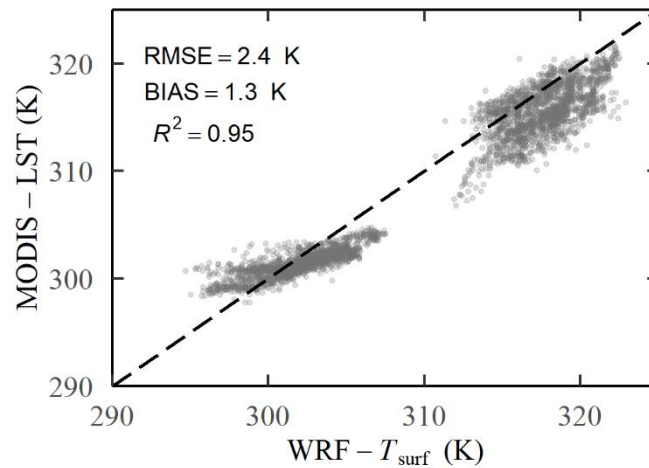
Σχήμα 6-10 Η σχέση μεταξύ του LST και των H/W , λ_c και λ_i για το πολεοδομικό συγκρότημα της Αθήνας: κατά τη διάρκεια της ημέρας (α), (β) και (γ), και κατά τη διάρκεια της νύχτας (δ), (ε) και (ζ) αντίστοιχα. Οι καμπύλες μαύρου χρώματος αντιστοιχούν στη γραμμή παλινδρόμησης τύπου lowess.

Για τον περιορισμό της επίδρασης της κάλυψης γης στην παραπάνω διερεύνηση, παρουσιάζονται στο Σχήμα 6-11 τα αντίστοιχα διαγράμματα για το ευρύτερο κέντρο της Αθήνας, για το οποίο —μη λαμβάνοντας υπόψη τα εικονοστοιχεία των αστικών πάρκων— η κατανομή της βλάστησης είναι σε σημαντικό βαθμό ομοιόμορφη (βλ. Σχήματα 6-2 και 6-3) (συνολικός αριθμός εικονοστοιχείων: 70). Η διαφοροποίηση της σχέσης που σημειώνουν τα H/W και λ_c με το LST ανάλογα με τη χρονική στιγμή της ημέρας είναι ιδιαίτερα εμφανής. Οι παραπάνω μορφολογικές παράμετροι —εμφανίζοντας σχεδόν ταυτόσημες κατανομές— έχουν στατιστικά σημαντική ($p < 0.01$) αρνητική σύνδεση με το LST την ημέρα ($r = -0.71$ και -0.72 αντίστοιχα) και θετική τη νύχτα ($r = 0.40$ και 0.55 αντίστοιχα). Για $H/W > 2$ και $\lambda_c > 2.5$ παρουσιάζεται κατά τις νυχτερινές ώρες μία ασθενής αρνητική τάση για τη θερμοκρασία για αύξουσες τιμές των παραμέτρων· ωστόσο ο αριθμός των σημείων για αυτό το εύρος είναι μικρός ώστε να εξαχθούν γενικότερα συμπεράσματα. Όπως αναμενόταν το LST αυξάνεται σταθερά αυξανόμενου του λ_i κατά τη διάρκεια της ημέρας ($r = 0.65$, $p < 0.01$). Τη νύχτα δεν εμφανίζεται στατιστικά σημαντική συσχέτιση ή εμφανής τάση μεταξύ των τιμών των δύο παραμέτρων για τη συγκεκριμένη περιοχή μελέτης. Για τα H/W και λ_c βρέθηκε επιπρόσθετα υψηλή συσχέτιση με το H ($r = 0.76$ και 0.92 αντίστοιχα), κάτι που επεξηγεί τις ομοιότητες ως προς τη σύνδεση που εμφάνισαν με το LST σε σχέση με εκείνη που παρουσιάστηκε σε προηγούμενα βήματα της εργασίας για το ύψος των κτηρίων.



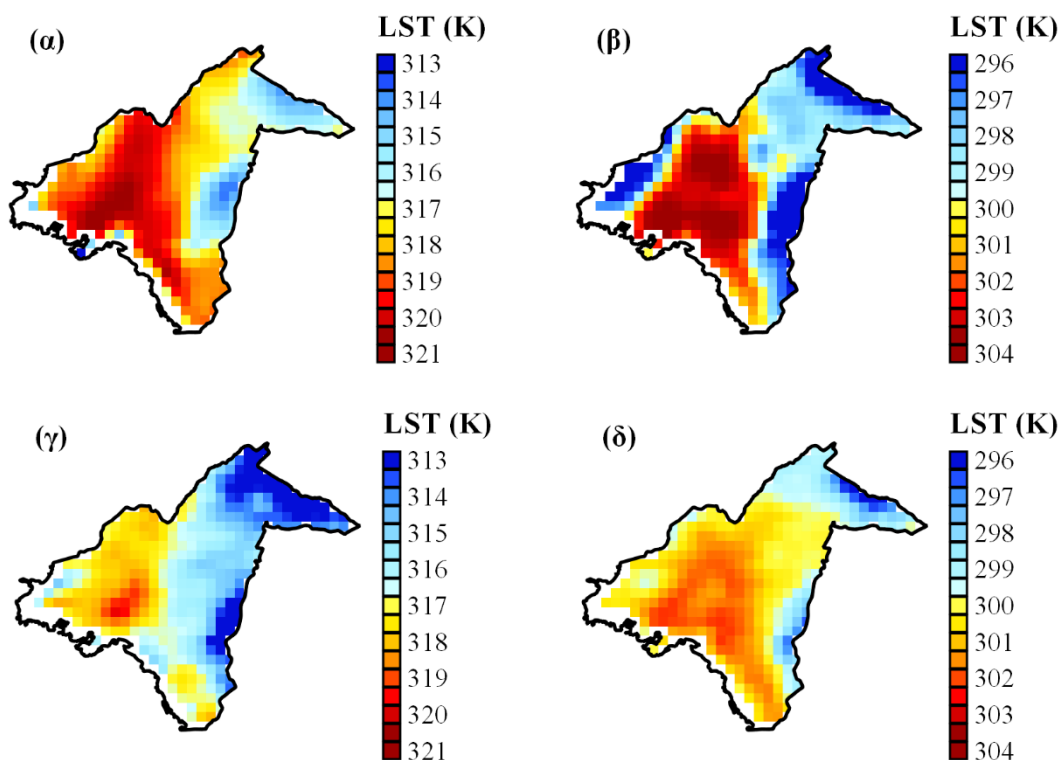
Σχήμα 6-11 Όμοια με το Σχήμα 6-10, για το ευρύτερο κέντρο της Αθήνας.

Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκε διερεύνηση του αστικού θερμικού περιβάλλοντος της Αθήνας μέσω του μοντέλου WRF για μία τυπική θερμή περίοδο πέντε ημερών. Αρχικά, έγινε σύγκριση του εκτιμώμενου T_s του μοντέλου με τις διαθέσιμες εικόνες LST του προϊόντος MODIS (Terra και Aqua) (χωρίς νεφοκάλυψη) στις αντίστοιχες χρονικές στιγμές. Βρέθηκε ικανοποιητική συμφωνία μεταξύ των δύο επιφανειακών θερμοκρασιών για τις κυψελίδες του μοντέλου εντός του αστικού ιστού ($\lambda_{urb} > 0$), με μέσο σφάλμα RMSE = 2.4 K και μέσο απόλυτο σφάλμα (Mean Absolute Error, MAE) ίσο με 2.0 K. Συμπεριλαμβάνοντας τους ορεινούς όγκους στα όρια του πολεοδομικού συγκροτήματος, τα σφάλματα RMSE και MAE ήταν ίσα με 2.8 K και 2.3 K αντίστοιχα. Ωστόσο, όπως φαίνεται από το Σχήμα 6-12 το WRF παρουσίασε συστηματικά σφάλματα κατά τον υπολογισμό του T_s . Η μέση διαφορά των $T_s - LST$ (σφάλμα Bias) ήταν 1.3 K (2.0 K για την ημέρα και 0.6 K για τη νύχτα), δηλ. διαπιστώθηκε συνολικά υπερεκτίμηση της επιφανειακής θερμοκρασίας. Επιπλέον, τη νύχτα οι τοπικές κλιματικές ζώνες με εκτεταμένη κάλυψη πρασίνου (LCZ 5, 6 και 9) παρουσίασαν μία σχετικά μικρή υποεκτίμηση της εκτίμησης της επιφανειακής θερμοκρασίας (μέσο Bias = -0.4 K).



Σχήμα 6-12 Διάγραμμα διασποράς μεταξύ του MODIS – LST και της εκτιμώμενης επιφανειακής θερμοκρασίας από το μοντέλο WRF (T_s) (7 – 11 Αυγούστου 2017).

Οι παραπάνω διαφοροποιήσεις μπορούν να παρατηρηθούν στη χωρική κατανομή των επιφανειακών θερμοκρασιών του Σχήματος 6-13 (εκτιμήσεις του μοντέλου και LST από τον δορυφόρο Aqua). Παρ' όλα αυτά, πέραν των συστηματικών διαφορών διαπιστώνεται ότι το WRF – SLUCM αναπαράγει σε καλό βαθμό τα χωρικά μοτίβα των δορυφορικών παρατηρήσεων. Συγκεκριμένα, κατά τη διάρκεια της ημέρας (Σχήμα 6-13α) προσδιορίζεται ορθά ότι η ζώνη LCZ 8



Σχήμα 6-13 Χωρική αποτύπωση της εκτιμώμενης επιφανειακής θερμοκρασίας για την Αθήνα (7 – 11 Αυγούστου 2017) μέσω του μοντέλου WRF (T_s) και του MODIS – LST (Aqua) κατά τη διάρκεια της ημέρας (α) και (γ) (~14.30 τοπική ώρα), και κατά τη διάρκεια της νύχτας (β) και (δ) (~02.30 τοπική ώρα) αντίστοιχα.

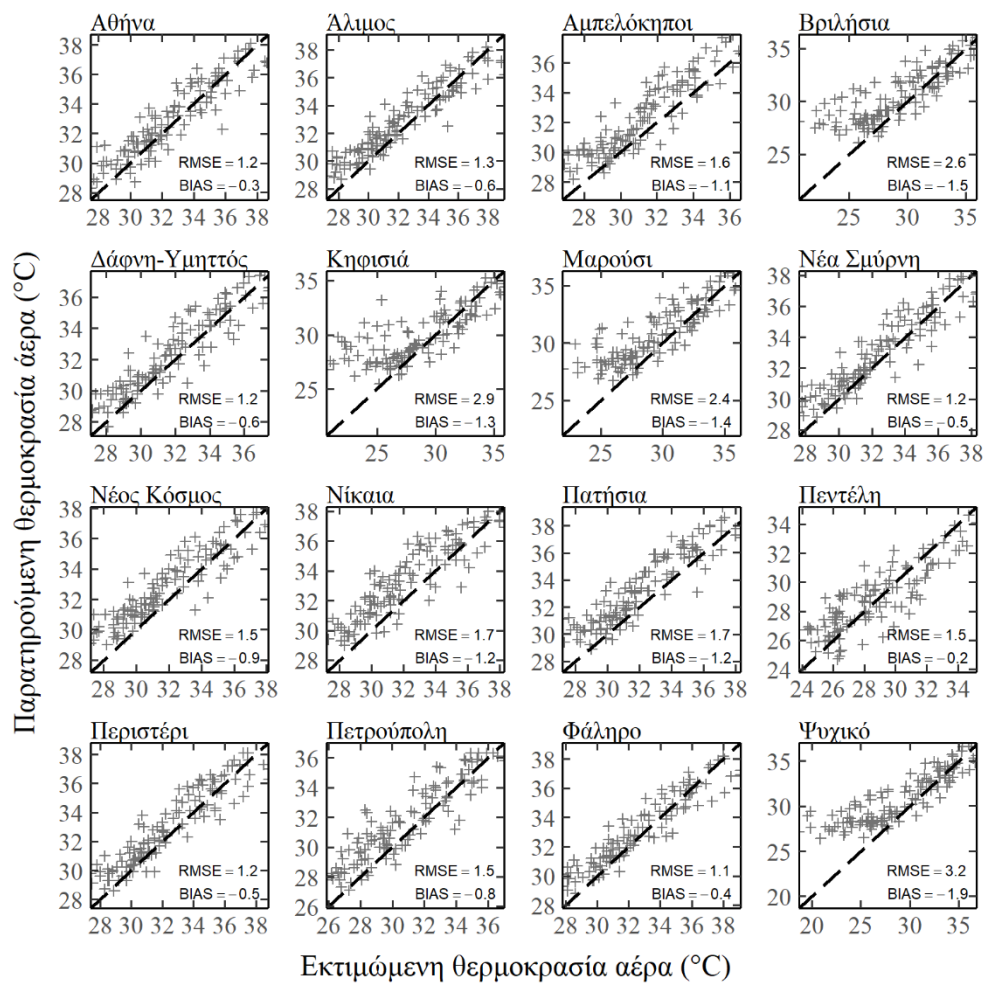
(υψηλές τιμές λ_i και χαμηλές τιμές H/W) εμφανίζει υψηλότερη θερμοκρασία ~ 2 K από τις γειτονικές πυκνοδομημένες συνοικίες (LCZ 2₁ και LCZ 2). Αντίθετα, τη νύχτα το κέντρο της τάξης LCZ 8 παρουσιάζει ένα τοπικό ελάχιστο, όντας ψυχρότερο κατά 0.5 – 1 K (Σχήμα 6-13β) από τον πυκνό αστικό ιστό του ευρύτερου κέντρου της Αθήνας. Το παραπάνω διαπιστώνεται να είναι σε συμφωνία με τις σχετικές θερμοκρασιακές διαφορές που εμφανίζουν οι καταγραφές του Aqua (Σχήμα 6-13δ). Επιπρόσθετα, στην εκτίμηση του μοντέλου διακρίνεται σαφώς το κομμάτι του συγκροτήματος με υψηλό ποσοστό δόμησης (δηλ. υψηλό λ_{imp}) να παρουσιάζει υψηλότερες επιφανειακές θερμοκρασίες συγκριτικά με τις τοπικές κλιματικές ζώνες οι οποίες χαρακτηρίζονται από εκτεταμένο πράσινο. Η ενδοαστική διαφοροποίηση κατά τη διάρκεια της νύχτας είναι εντούτοις υψηλότερη από την παρατηρούμενη, λόγω των προαναφερθέντων συστηματικών σφαλμάτων.

Στο Σχήμα 6-14 παρουσιάζεται η ικανότητα του μοντέλου ως προς την πρόβλεψη της θερμοκρασίας αέρα κοντά στην επιφάνεια του εδάφους (T_{as}). Το WRF δίνει συνολικά ικανοποιητικά αποτελέσματα ως προς το εκτιμώμενο T_{as} για την πλειοψηφία των σταθμών, με το RMSE να κυμαίνεται από 1.2 έως 3.2 K (μέσο RMSE = 1.7 K). Οι υψηλότερες τιμές του σφάλματος εντοπίζονται για τις αραιοδομημένες περιοχές, ως απόρροια της σημαντικής υποεκτίμησης του T_{as} κατά τις νυχτερινές ώρες για τις συγκεκριμένες LCZ (συνολικό μέσο Bias ίσο με -0.9 K για όλους τους εξεταζόμενους σταθμούς).

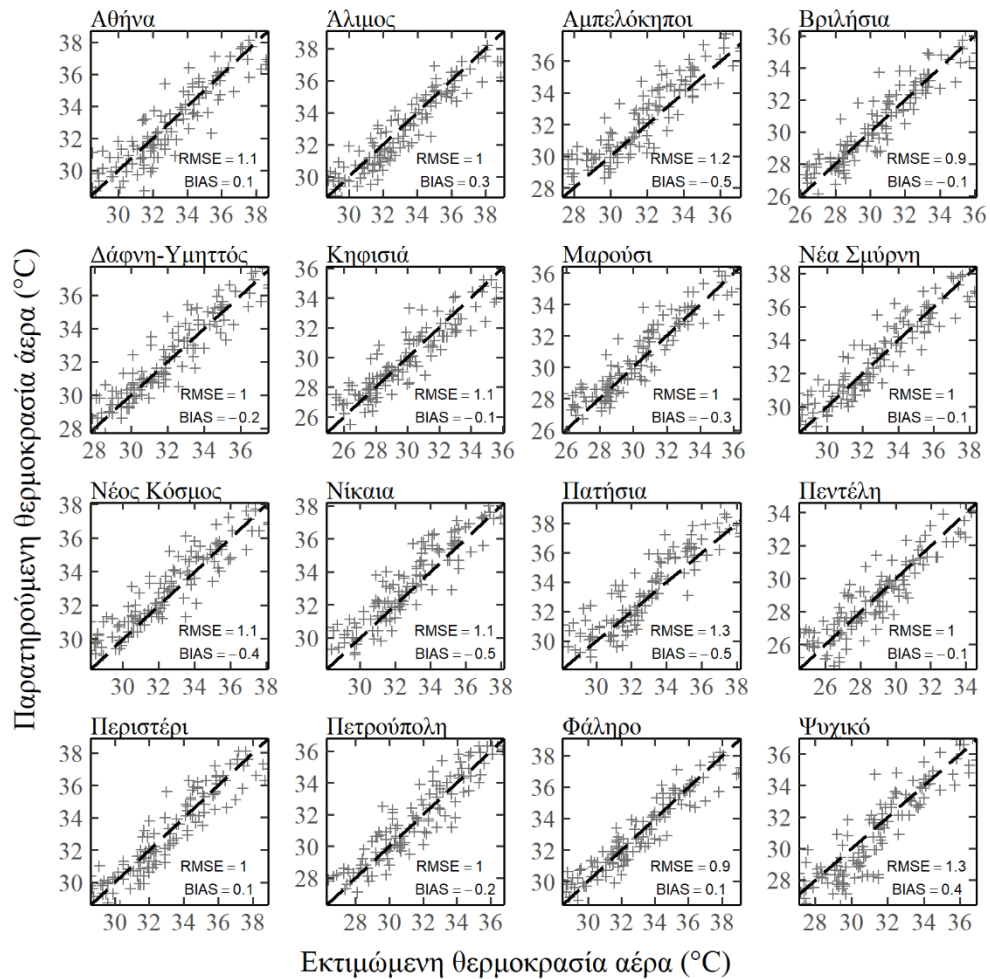
Εκτός από προγνωστική αστοχία του μοντέλου για τις αστικές περιοχές με μικρό λ_{urb} —το οποίο παρατηρήθηκε για τις εν λόγω χωρικές ενότητες και στη προηγούμενη συζήτηση όσον αφορά τις επιφανειακές θερμοκρασίες— η παραπάνω υποεκτίμηση εκτιμάται ότι διαμορφώνεται επιπρόσθετα από τη θέση εγκατάστασης των αυτόματων μετεωρολογικών σταθμών στην εξεταζόμενη περιοχή. Συγκεκριμένα, ενώ η πλειοψηφία των σταθμών είναι εγκατεστημένοι εντός ή πλησίον οικιστικών ενοτήτων, το T_{as} αντιστοιχεί στη μέση τιμή της θερμοκρασίας αέρα (κοντά στην επιφάνεια) τόσο του αστικού και του φυσικού τμήματος κάθε κυψελίδας. Λαμβάνοντας υπόψη μόνο το ανθρωπογενές τμήμα της κυψελίδας ($T_{as,urb}$), τα αρνητικά σφάλματα Bias σχεδόν εξαλείφονται (μέσο Bias = -0.1 K), ενώ ελαττώνεται ταυτόχρονα το RMSE από 1.7 K σε 1.1 K (Σχήμα 6-15).

Οι πολύ μικρές τιμές του σφάλματος Bias με τη χρήση της παραπάνω διαγνωστικής μεταβλητής αποτυπώνονται στην προσδιοριζόμενη μέση θερμοκρασία αέρα ανά LCZ, για το σύνολο της εξεταζόμενης περιόδου (Πίνακας 6-9). Τα αποτελέσματα χωρίστηκαν ως προς τις ώρες κατά τη διάρκεια της ημέρας (7 π.μ. έως 8 μ.μ. τοπική ώρα) και της νύχτας (9 μ.μ. έως 7 π.μ.). Παρατηρείται ότι προσομοιώνεται με αρκετά καλή συμφωνία η μέση κατάσταση στις διαφορετικές τοπικές κλιματικές ζώνες. Οι τάξεις κάλυψης γης οι οποίες αντιστοιχούν σε πυκνή δόμηση χαρακτηρίζονται όπως αναμενόταν από υψηλότερες θερμοκρασίες από τις αραιοδομημένες LCZ. Ως προς την ερμηνεία της παραπάνω διαφοροποίησης σημειώνεται ότι πρέπει να ληφθεί υπόψη και το μεγαλύτερο μέσο υψόμετρο για την περίπτωση των LCZ 5, 6 και 9. Η σχετική διαφοροποίηση μεταξύ των κλιματικών ζωνών φαίνεται να διατηρείται σχετικά σταθερή κατά την ημέρα και τη νύχτα. Στο Σχήμα 6-16 δίνεται η χωρική αποτύπωση της εκτιμώμενης επιφανειακής θερμοκρασίας αέρα για το

αστικό τμήμα των κυψελίδων ($T_{as,urb}$) στο σύνολο του πολεοδομικού συγκροτήματος της Αθήνας. Διαπιστώνεται ότι η κατανομή του $T_{as,urb}$ όπως προσδιορίζεται από το μοντέλο παρουσιάζει ομοιότητες με αυτήν της επιφανειακής θερμοκρασίας των Σχημάτων 6-8 και 6-13, με ωστόσο περισσότερο εξομαλυμένες τις ενδοαστικές διαφοροποιήσεις. Οι τοπικές κλιματικές ζώνες πυκνής δόμησης του ευρύτερου κέντρου της Αθήνας (LCZ 2₁ και LCZ 2) παρουσιάζουν μικρότερη θερμοκρασία αέρα κατά ~ 0.5 K συγκριτικά με τη γειτονική LCZ 8 την ημέρα. Τη νύχτα εντοπίζεται μία ίδια τάξης μεγέθους, υψηλότερη τιμή της επιφανειακής θερμοκρασίας αέρα για τις LCZ 2₁ και LCZ 2.



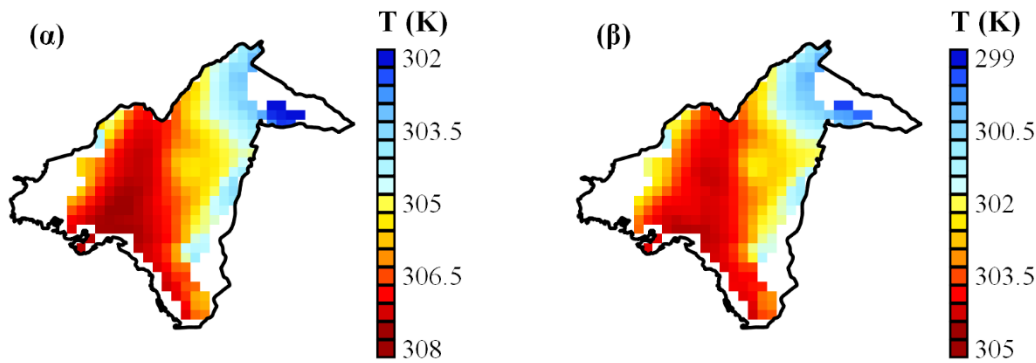
Σχήμα 6-14 Διαγράμματα διασποράς μεταξύ της παρατηρούμενης και της εκτιμώμενης επιφανειακής θερμοκρασίας αέρα από το μοντέλο WRF (διαγνωστική μεταβλητή T_{as}) (7 – 11 Αυγούστου 2017).



Σχήμα 6-15 Όμοια με το Σχήμα 6-14, για τη διαγνωστική μεταβλητή $T_{as,urb}$.

Πίνακας 6-9 Μέση παρατηρούμενη και εκτιμώμενη επιφανειακή θερμοκρασία αέρα στο αστικό τμήμα της κυψελίδας του πλέγματος ($T_{as,urb}$) για την Αθήνα ανά LCZ (βαθμοί Κελσίου) (7 – 11 Αυγούστου 2017).

	Ημέρα		Νύχτα	
	Παρατηρήσεις	Μοντέλο	Παρατηρήσεις	Μοντέλο
LCZ 2 ₁	34.1	33.8	31.3	30.8
LCZ 2	33.7	33.5	30.5	30.4
LCZ 3	34.5	34.0	31.6	31.1
LCZ 5	33.1	33.0	30.0	29.9
LCZ 6	31.8	31.8	28.5	28.8
LCZ 9	29.9	29.8	27.5	27.3



Σχήμα 6-16 Χωρική αποτύπωση της εκτιμώμενης επιφανειακής θερμοκρασίας αέρα από το μοντέλο WRF (διαγνωστική μεταβλητή $T_{as,urb}$) (7 – 11 Αυγούστου 2017), κατά τη διάρκεια της ημέρας (α) και κατά τη διάρκεια της νύχτας (β).

6.5 Σχολιασμός αποτελεσμάτων

Στην παρούσα μελέτη εξετάστηκε αρχικά μέσω στατιστικής ανάλυσης η σύνδεση των τιμών του MODIS – LST με τις παραμέτρους λ_{imp} , λ_b και H για ένα σύνολο 25 ευρωπαϊκών πόλεων (Ιούνιος – Αύγουστος 2017). Διαπιστώθηκε ότι οι τιμές του λ_{imp} παρουσιάζουν μία σαφή και σταθερή θετική επίδραση στο LST, κάτι που ήταν αναμενόμενο με βάση προηγούμενες ερευνητικές μελέτες (Yuan and Bauer, 2007; Imhoff et al., 2010; Li et al., 2011). Το παραπάνω συνδέεται στενά με τη δροσιστική επίδραση της εξατμισοδιαπνοής των φυτών στην επιφανειακή θερμοκρασία. Εξαίρεση για τη σχέση λ_{imp} – LST βρέθηκε να αποτελούν κατά τη διάρκεια της ημέρας οι μεσογειακές πόλεις (θερμό και ξηρό κλίμα τη περίοδο του θέρους), με το λ_{imp} να εμφανίζει ασθενή ή και αρνητική συσχέτιση με το LST. Αυτό βρίσκεται σε παραλληλία με τα αποτελέσματα των Imhoff et al. (2010), όπου για τις ημι-ερημικές πόλεις των ΗΠΑ διαπιστώθηκαν υψηλότερες επιφανειακές θερμοκρασίες στην περιφέρειά τους, ενώ το λ_{imp} χαρακτηριζόταν εκεί από μικρότερες τιμές. Εκτιμάται ότι η παραπάνω σύνδεση προκύπτει α) από τα φυσικά χαρακτηριστικά της βλάστησης των εν λόγω περιοχών —χαμηλή υγρασία και κατά συνέπεια χαμηλή θερμοχωρητικότητα— και β) από την πυκνή δόμηση και επακόλουθα τη μεγάλη θερμική μάζα του αστικού τους χώρου. Όταν απομονώθηκε η επίδραση των λ_b και H μέσω πολλαπλής παλινδρόμησης βρέθηκε μία μικρή αυξητική τάση του LST με το λ_{imp} . Ως εκ τούτου, μπορεί να εκτιμηθεί ότι για τις παραπάνω πόλεις την ημέρα οι ανθρωπογενείς επιφάνειες ανοικτής δόμησης (π.χ. επιφάνεια δρόμων) θα εμφανίζουν υψηλότερες θερμοκρασίες από τη βλάστηση.

Για τα H και λ_b παρατηρήθηκε σημαντική διαφοροποίηση ανά πόλη όσον αφορά τη σχέση τους με το LST κατά τη διάρκεια της ημέρας. Αυτό εκτιμάται ότι διαμορφώνεται από τη μίξη των ποικίλων και αντικρουόμενων επιδράσεων που ασκεί η πυκνή, μεγάλου ύψους κτηρίων δόμηση στο αστικό μικροκλίμα την ημέρα: Από τη μία μεριά, τα παραπάνω μορφολογικά χαρακτηριστικά οδηγούν σε αυξανόμενη απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας στην αστική χαράδρα λόγω πολλαπλών ανακλάσεων και σε εγκλωβισμό του θερμού αέρα εντός του αστικού κτηριακού

στρώματος. Από την άλλη πλευρά, τα υψηλά κτήρια συνδέονται με υψηλότερη σκίαση της αστικής χαράδρας και ιδιαίτερα της επιφάνειας των δρόμων· ως συνέπεια, η πρόσπτωση της ηλιακής ακτινοβολίας πραγματοποιείται κυρίως στην οροφή των κτηρίων, η οποία συχνά χαρακτηρίζεται από υψηλότερη λευκαύγεια. Επιπλέον, ο μεγαλύτερος κτηριακός όγκος και το αυξανόμενο πλήθος των ενεργών αστικών επιφανειών (για τις περιοχές με υψηλές τιμές H και λ_b) έχει ως επακόλουθο μεγαλύτερα ποσά θερμότητας να διοχετεύονται προς το εσωτερικό του περιβλήματος των κτηρίων τις πρωινές ώρες. Ανάλογα με τον συνδυασμό των μορφολογικών χαρακτηριστικών κάθε πόλης εκτιμάται ότι διαμορφώνεται μία ξεχωριστή σύνδεση του LST με τα H και λ_b όπως αποτυπώθηκε στα Σχήματα 6-5 έως 6-7 και στα αποτελέσματα του Πίνακα 6-6.

Ωστόσο, από τη συνδυαστική θεώρηση των ευρημάτων της ανάλυσης μπορούν εξαχθούν ορισμένα γενικότερα συμπεράσματα: Όσον αφορά τη συμμεταβολή των H και λ_b με το LST, βρέθηκαν συνολικά θετικές συσχετίσεις r και ρ , σε συμφωνία με προηγούμενες εργασίες (Berger et al., 2017; Yang et al., 2018). Παρ' όλα αυτά, θεωρείται ότι η παραπάνω σύνδεση εξαρτάται σε σημαντικό βαθμό από τη συσχέτιση που εμφανίζουν τα H και λ_b με το ποσοστό δόμησης (λ_{imp}). Έπειτα από την απομάκρυνση της επίδρασης του λ_{imp} χρησιμοποιώντας πολλαπλή γραμμική παλινδρόμηση OLS, προκύπτει ότι α) η πυκνή και υψηλή δόμηση κατά τη διάρκεια της ημέρας δεν αποτελεί εν γένει τον κυρίαρχο παράγοντα διαμόρφωσης υψηλών τιμών LST για τη χωρική κλίμακα των 1000 m, και β) σε αρκετές περιπτώσεις οδηγεί σε ασθενή/μέτρια αρνητική επίδραση λόγω επικράτησης των φαινομένων της σκίασης και της υψηλής θερμικής αδράνειας. Αντίθετα, τη νύχτα τα H και λ_b σχετίζονται —συχνά ισχυρά— με υψηλότερες επιφανειακές θερμοκρασίες κατά την ανάλυση παλινδρόμησης, ως αποτέλεσμα της συσχέτισής τους με την παρεμπόδιση της ψύξης της επιφάνειας μέσω υπέρυθρης ακτινοβολίας. Τα παραπάνω ευρήματα διατηρούνται και για τις στατιστικά σημαντικές περιπτώσεις του μοντέλου χωρικής παλινδρόμησης SAR (Πίνακας 6-7).

Ιδιαίτερα ως προς την κατανομή των τιμών των H και LST κατά τη διάρκεια της ημέρας, παρατηρήθηκε για έναν σημαντικό αριθμό πόλεων μία διακριτή τάση μείωσης (ή εξομάλυνσης) των τιμών του LST για τα εικονοστοιχεία που αντιστοιχούν σε μεγαλύτερα κτηριακά ύψη (Σχήμα 6-6). Προηγούμενες στατιστικές μελέτες ως προς την επίδραση του H στο ημερήσιο LST είχαν παραγάγει αντικρουόμενα αποτελέσματα ανά εκάστοτε πόλη. Σε ορισμένες περιπτώσεις, το H είχε διαπιστωθεί να έχει ενισχυτική επίδραση (Guo et al., 2016; Berger et al., 2017; Yang et al., 2018), ενώ σε άλλες περιοχές το αυξανόμενο H είχε σχετιστεί με χαμηλότερες θερμοκρασίες (Cai et al., 2018; Quan, 2019; Sun et al., 2019; Zheng et al., 2019). Η ταυτόχρονη στατιστική διερεύνηση πολλαπλών πόλεων στην παρούσα διατριβή δείχνει ότι μία επίδραση με καθολική ισχύ είναι δύσκολο να γενικευτεί. Παρ' όλα αυτά, μέσω των αποτελεσμάτων της παρούσας μελέτης διαπιστώθηκε ότι κατά κανόνα σημειώνεται είτε μη σημαντική θετική είτε σαφής αρνητική επίδραση στο LST αυξανόμενου του κτηριακού ύψους κατά τη διάρκεια της ημέρας. Το παραπάνω συμφωνεί με τα αποτελέσματα από επιπλέον προηγούμενες μελέτες κατά τις οποίες διαπιστώθηκε ποιοτικά ότι οι πυκνοδομημένες χωρικές ενότητες υψηλού κτηριακού ύψους δεν αποτελούσαν τα θερμότερα σημεία της εξεταζόμενης αστικής

περιοχής την ημέρα: για το Βανκούβερ, Καναδάς (Roth et al., 1989), τη Σανγκάη, Κίνα (Li et al., 2011), το Φοίνιξ, ΗΠΑ (Myint et al., 2013) και το Λονδίνο, Αγγλία (Crawford, Grimmond, et al., 2018). Επιπρόσθετα, στους Bechtel, Demuzere, et al., (2019) βρέθηκε ότι η τοπική κλιματική ζώνη LCZ 1 —η οποία αντιστοιχεί στο LCZ με το μέγιστο μέσο κτηριακό ύψος— παρουσιάζει σε αρκετές πόλεις μικρότερο LST συγκριτικά με άλλες τάξεις LCZ ανάλογου ποσοστού δόμησης και μικρότερου ύψους κτηρίων.

Η προηγηθείσα συζήτηση καταδεικνύει τη σημασία της συνεξέτασης του ενδοημερήσιου κύκλου της επιφανειακής θερμοκρασίας κατά τη μελέτη του θερμικού περιβάλλοντος μίας πόλης. Όπως έχει καταγραφεί (Zhou et al., 2019) η πλειονότητα των διενεργούμενων μελετών του SUHI πραγματοποιείται μόνο βάσει ημερήσιων εικόνων της επιφανειακής θερμοκρασίας. Το παραπάνω μπορεί να οδηγήσει σε λανθασμένο εντοπισμό των σημείων της μέγιστης θερμικής ευπάθειας μίας πόλης με σκοπό την εφαρμογή μέτρων μετριασμού της αστικής θερμικής νησίδας.

Τα κυριότερα σφάλματα ως προς τον υπολογισμό της επιφανειακής θερμοκρασίας μέσω τεχνικών τηλεπισκόπησης —εισάγοντας κατά συνέπεια αβεβαιότητα στην παραπάνω ανάλυση— σχετίζονται α) με την ατμοσφαιρική διόρθωση των δορυφορικών εικόνων, β) με τον προσδιορισμό του επιφανειακού συντελεστή εκπομπής (ε) και γ) με τη θερμική ανισοτροπία που χαρακτηρίζει τις αστικές περιοχές. Όσον αφορά την επίδραση της ατμόσφαιρας στον προσδιορισμό του LST, εκτιμάται ότι αυτή παρουσιάζει αμελητέο αντίκτυπο στην προσδιοριζόμενη ενδοαστική διακύμανση, καθώς η έκταση της περιοχής μελέτης κάθε πόλης ήταν περιορισμένη (δηλ. η ατμοσφαιρική απορρόφηση μεταξύ επιφάνειας και δέκτη ήταν ομοιόμορφη ανά πόλη).

Η αβεβαιότητα του προϊόντος MODIS – LST ως προς τον συντελεστή εκπομπής σχετίζεται καταρχάς με την ακρίβεια της χρησιμοποιούμενης ταξινόμησης και με τον καθορισμό των τυπικών τιμών του ε ανά τάξη (Duan et al., 2019) (βλ. επίσης Κεφάλαιο 4). Το παραπάνω έχει επίπτωση κυρίως όσον αφορά τη σχέση $\lambda_{imp} - LST$, συνεισφέροντας ένα μέρος της παρατηρούμενης διασποράς των τιμών τους στα αντίστοιχα διαγράμματα διασποράς (βλ. Σχήμα 6-5). Αντίθετα, ως προς τη σύνδεση μεταξύ των H και LST η ισχυρότερη επίδραση εκτιμάται ότι προκύπτει από την ανάγκη τροποποίησης των τιμών του ε κάθε εικονοστοιχείου ανάλογα με την τρισδιάστατη αστική του μορφολογία (Yang et al., 2015). Ωστόσο, η διαφοροποίηση των συντελεστών παλινδρόμησης του H μεταξύ των εικόνων της ημέρας (ασθενής θετική ή αρνητική επίδραση) και της νύχτας (ισχυρή θετική επίδραση) (Πίνακας 6-6) υποδεικνύει ότι το κύριο μέρος της γενικότερης επίδρασης της αστικής μορφολογίας στο LST σημειώνεται ξέχωρα από τον αντίκτυπο του προσδιορισμού του συντελεστή εκπομπής.

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, ένα από τα ευρήματα της παρούσας μελέτης ήταν η σχετικά χαμηλότερη θερμοκρασία κατά τη διάρκεια της ημέρας για τα εικονοστοιχεία (χωρική ανάλυση 1000 m) με υψηλές τιμές H . Η καταγραφόμενη ακτινοβολία από τους δορυφορικούς αισθητήρες προέρχεται κατά κύριο λόγο από τις οροφές των κτηρίων και την επιφάνεια των δρόμων, λόγω της γωνίας θέασης του οργάνου. Προσαρμόζοντας την επιφανειακή θερμοκρασία ως προς τη θερμική

ανισοτροπία —δηλ. συμπεριλαμβάνοντας τη θερμοκρασία των τοίχων και σταθμίζοντας το σύνολο των αστικών επιφανειών— εκτιμάται ότι θα ενίσχυε την παρατηρούμενη αρνητική επίδραση του H στο LST κατά τη διάρκεια της ημέρας, καθώς η θερμική ανισοτροπία αυξάνεται αυξανόμενου του H/W (Krayenhoff and Voogt, 2016).

Η παραπάνω σύνδεση μεταξύ των μορφολογικών χαρακτηριστικών και της επιφανειακής θερμοκρασίας του εδάφους αποτυπώθηκε και ερμηνεύτηκε στο πολεοδομικό συγκρότημα της Αθήνας βάσει της θεώρησης των τοπικών κλιματικών ζωνών. Όπως αναμενόταν, οι τοπικές κλιματικές ζώνες με εκτεταμένη βλάστηση (LCZ 6 και LCZ 9) (μικρές τιμές λ_{imp}) εμφάνισαν τις χαμηλότερες επιφανειακές θερμοκρασίες της περιοχής. Κατά τη διάρκεια της ημέρας η ανοικτής δόμησης τάξη LCZ 8 χαρακτηριζόταν από τις υψηλότερες τιμές LST στην Αθήνα, ως επακόλουθο του μεγάλου ποσοστού αδιαπέρατου εδάφους (λ_i). Αντίθετα τη νύχτα οι πυκνοδομημένες χωρικές ενότητες του κέντρου της πόλης (LCZ 2₁, LCZ 2 και LCZ 3) εμφάνισαν υψηλότερο LST συγκριτικά με τη LCZ 8, καθώς για την τελευταία ευνοείται η ψύξη μέσω θερμικής ακτινοβολίας. Τα παραπάνω αποτελέσματα επιβεβαιώνουν τη χρησιμότητα των LCZ κατά τη διερεύνηση των κυριότερων διαφοροποιήσεων στο εσωτερικό ενός αστικού συγκροτήματος. Οι σχετικές διαφορές ανά τοπική κλιματική ζώνη είναι σε συμφωνία με προηγούμενες ερευνητικές εργασίες (Geletič et al., 2016; Bechtel, Demuzere, et al., 2019; Quan, 2019).

Η χρήση του μετεωρολογικού μοντέλου WRF σε συνδυασμό με μία τροποποιημένη έκδοση της αστικής παραμετροποίησης SLUCM βρέθηκε να παρουσιάζει ικανοποιητική συμφωνία όσον αφορά την προσομοίωση της επίδρασης των μορφολογικών παραμέτρων στο θερμικό περιβάλλον της Αθήνας. Τα συστηματικά σφάλματα που παρατηρήθηκαν όσον αφορά την επιφανειακή θερμοκρασία είναι ανάλογη τάξης μεγέθους με αυτά που είχαν καταγραφεί σε προηγούμενες μελέτες (Giannaros et al., 2013; Li and Bou-Zeid, 2014; Göndöcs et al., 2017). Ένα μέρος του θετικού μέσου σφάλματος Bias θεωρείται ότι προέρχεται από την υποεκτίμηση των τιμών του MODIS (τιμές αναφοράς κατά τη σύγκριση του WRF) για την περιοχή της Αθήνας, το οποίο καταγράφηκε στην ανάλυση του Κεφαλαίου 4. Κατά τη στατιστική αξιολόγηση της επιφανειακής θερμοκρασίας αέρα με επιτόπιες μετρήσεις μετεωρολογικών σταθμών επιτεύχθηκε ένα σχετικά χαμηλό μέσο σφάλμα πρόγνωσης (RMSE = 1.7 K). Σημαντική υποεκτίμηση εντοπίστηκε εντούτοις τις νυκτερινές ώρες για τις τοπικές κλιματικές ζώνες με εκτεταμένο ποσοστό βλάστησης. Χρησιμοποιώντας τις εκτιμήσεις του μοντέλου μόνο για το αστικό τμήμα των κυψελίδων, η παραπάνω υποεκτίμηση ελαχιστοποιήθηκε. Εκτός της επίδρασης της θέσης εγκατάστασης των χρησιμοποιούμενων σταθμών, το ανωτέρω θεωρείται ότι διαμορφώνεται σε σημαντικό βαθμό από το γεγονός ότι το αστικό και το φυσικό τμήμα κάθε κυψελίδας δεν αλληλοεπιδρούν άμεσα στη βασική έκδοση του μοντέλου. Σε μελλοντική έρευνα θα εξεταστεί η επίπτωση στα προγνωστικά αποτελέσματα μιας τροποποίησης του μοντέλου WRF για την οποία η βλάστηση ενσωματώνεται άμεσα στην αστική χαράδρα (π.χ., Li and Bou-Zeid, 2014). Το παραπάνω αποτελεί το αντικείμενο διαφόρων πρόσφατων ερευνητικών μελετών κατά τη σύζευξη

αστικών σχημάτων παραμετροποίησης με ατμοσφαιρικά μοντέλα μέσης κλίμακας (π.χ. Nice et al., 2018).

6.6 Συμπεράσματα

Στο παρόν κεφάλαιο εξετάστηκε η επίδραση που επιφέρουν βασικές μορφολογικές παράμετροι του αστικού περιβάλλοντος στην καταγραφόμενη επιφανειακή θερμοκρασία τοπικής χωρικής κλίμακας (1000×1000 m) στο εσωτερικό των αστικών συγκροτημάτων. Τα γενικά συμπεράσματα που μπορούν να εξαχθούν είναι τα ακόλουθα: Το ποσοστό αδιαπέρατων επιφανειών (λ_{imp}) παρουσίασε την πιο σταθερή και στατιστικά σημαντική σύνδεση με το LST για την πλειονότητα των εξεταζόμενων πόλεων. Κατά τη διάρκεια της ημέρας τα λ_b και H παρουσίασαν ανάλογα με την εξεταζόμενη πόλη είτε ασθενή θετική συνεισφορά στο LST είτε —απομακρύνοντας την επίδρασή του λ_{imp} μέσω παλινδρόμησης— αρνητική σύνδεση με το LST. Μία σαφής μεταστροφή καταγράφηκε για τις νυχτερινές δορυφορικές παρατηρήσεις, όπου το LST είχε σχεδόν πάντα μεγαλύτερες τιμές αυξανόμενων των λ_b και H (για τις στατιστικά σημαντικές περιπτώσεις). Η ανάλυση της χωρικής αυτοσυσχέτισης κατέδειξε ότι η επιφανειακή θερμοκρασία ενός σημείου της πόλης συνδέεται σε σημαντικό βαθμό με εκείνες των γειτονικών τους χωρικών ενοτήτων. Οι στατιστικά σημαντικοί συντελεστές του χωρικού μοντέλου παλινδρόμησης SAR σημείωσαν κατά κανόνα συμφωνία με αυτούς του μοντέλου παλινδρόμησης OLS. Η παραπάνω ανάλυση ως προς τη σύνδεση της πυκνότητας/ύψους δόμησης με την επιφανειακή θερμοκρασία τοπικής κλίμακας αναδείχθηκε για την περίπτωση του πολεοδομικού συγκροτήματος της Αθήνας με τη χρήση της ταξινόμησης των τοπικών κλιματικών ζωνών και επιπλέον μορφολογικών παραμέτρων. Η χρησιμοποίηση του WRF κατέδειξε ότι αυτό μπορεί να αναπαραγάγει τα βασικά χωρικά μοτίβα του θερμικού περιβάλλοντος της Αθήνας, σημειώνοντας ωστόσο κατά περιπτώσεις μη αμελητέα συστηματικά προγνωστικά σφάλματα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

Συμπεράσματα

Στο πλαίσιο της παρούσας διδακτορικής διατριβής διερευνήθηκε η ενδοαστική διαφοροποίηση των χαρακτηριστικών του θερμικού περιβάλλοντος της Αθήνας. Εξετάστηκαν και αναπτύχθηκαν τεχνικές δορυφορικής τηλεπισκόπησης, αξιοποιήθηκαν μέθοδοι GIS και εφαρμόστηκε μία τροποποιημένη έκδοση του αριθμητικού μοντέλου WRF. Το ενδιαφέρον της διατριβής επικεντρώθηκε στη μέση κατάσταση της πόλης της Αθήνας κατά τους θερινούς μήνες του έτους, όπου και επικρατούν οι κατάλληλες συνθήκες για την ανάπτυξη της αστικής θερμικής νησίδας και επιπλέον οι επιπτώσεις του φαινομένου είναι δυσμενέστερες για τους κατοίκους. Οι χωρικές κλίμακες που εξετάστηκαν ήταν τα 100 m (χωρική ενότητα οικοδομικού τετραγώνου) και το 1 km (χωρική ενότητα συνοικίας).

Στο πρώτο στάδιο της εργασίας αναπτύχθηκε μία νέα μεθοδολογική προσέγγιση για την υποκλιμάκωση των θερμικών καταγραφών του αισθητήρα MODIS, με βάση το γενικό πλαίσιο της μεθοδολογίας της στατιστικής υποκλιμάκωσης (Kustas et al., 2003). Η υποκλιμάκωση εφαρμόστηκε στα θερμικά κανάλια 31 (10.78–11.28 μm) και 32 (11.77–12.27 μm) του MODIS με σκοπό τη βελτίωση της χωρικής τους διακριτικής ικανότητας από το 1 km στα 100 m. Η παραπάνω υποκλιμάκωση του LST αποτέλεσε βασικό στοιχείο κατά τον υπολογισμό των επιφανειακών ροών ενέργειας σε μετέπειτα τμήμα της εργασίας. Για τον υπολογισμό της χωρικά ενισχυμένης επιφανειακής θερμοκρασίας ήταν αρχικά απαραίτητος ο προσδιορισμός του συντελεστή εκπομπής σε υψηλή χωρική ανάλυση.

Αυτό επιτεύχθηκε μέσω της επιβλεπόμενης φασματικής ταξινόμησης δορυφορικών παρατηρήσεων του Sentinel-2, με σκοπό τον εντοπισμό 10 διαφορετικών κατηγοριών ανθρωπογενών και φυσικών στοιχείων και την επακόλουθη αντιστοίχισή τους με αντιπροσωπευτικές τιμές του συντελεστή εκπομπής από φασματικές βιβλιοθήκες (SLUM και ECOSTRESS). Για την επίτευξη της βέλτιστης χωρικής ανάλυσης χρησιμοποιήθηκαν μόνο τα τέσσερα φασματικά κανάλια του Sentinel-2 τα οποία διαθέτουν χωρική ανάλυση 10 m. Για την ενίσχυση της ακρίβειας της ταξινόμησης αναπτύχθηκε ένα πολυκριτηριακό σύστημα βημάτων, ενσωματώνοντας υφιστάμενα δεδομένα χρήσεων γης (Urban Atlas και OpenStreetMap) και θέτοντας με βάση αυτά περιορισμούς στην επιλεγόμενη κάλυψη γης από τον ταξινομητή. Το παραπάνω επέτρεψε τον ορθό διαχωρισμό των τάξεων με παρόμοια φασματικά χαρακτηριστικά (π.χ. τσιμέντο και βραχώδες έδαφος) στις τέσσερις χρησιμοποιούμενες περιοχές του φάσματος. Το συνολικό αποτέλεσμα της κατηγοριοποίησης προέκυψε από τη χρήση του ταξινομητή μηχανικής μάθησης Random Forest. Η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της ταξινόμησης κρίνεται αρκετά ικανοποιητική, με μέση ακρίβεια ταξινόμησης ίση

με 90.7% (ακρίβεια χρήστη 90.1% και ακρίβεια παραγωγού 92.1%). Επομένως, για τη χρησιμοποιούμενη προσέγγιση της συνδυαστικής αξιοποίησης του Sentinel-2 με βοηθητικά χωρικά δεδομένα διαπιστώθηκε ότι μπορεί να αποτελέσει μία εναλλακτική προσέγγιση ταξινόμησης, στην περίπτωση όπου δεδομένα από υψηλότερης χωρικής ανάλυσης (< 10 m) εμπορικούς δορυφόρους (π.χ. WorldView) δεν είναι διαθέσιμα. Η χρήση των καναλιών του Sentinel-2 στη χωρική διακριτική ικανότητα των 10 m επέτρεψε τα εικονοστοιχεία της ταξινόμησης να είναι σε επαρκή βαθμό ομοιογενή, το οποίο δεν θα ήταν δυνατό στην περίπτωση όπου είχε προτιμηθεί δορυφόρος ελαφρώς μικρότερης χωρικής ανάλυσης (π.χ. Landsat 8: χωρική ανάλυση 30 m). Η παραγόμενη εικόνα ταξινόμησης της χρήσης γης βρήκε επιπλέον εφαρμογή σε όλα τα επόμενα στάδια της διατριβής, παρέχοντας τα ποσοστά κάλυψης των διαφορετικών επιφανειών στις διάφορες εξεταζόμενες χωρικές κλίμακες.

Οι τιμές του συντελεστή εκπομπής για τα δύο εξεταζόμενα κανάλια του MODIS κυμάνθηκαν από 0.935 έως 0.99 (στη χωρική ανάλυση των 100 m), με τις περιοχές βιομηχανικών χρήσεων και τις κεντρικές οδικές αρτηρίες να διακρίνονται ως τα σημεία της πόλης με τις μικρότερες τιμές του συντελεστή. Αντίστοιχα, οι υψηλότερες τιμές του εντοπίστηκαν, όπως αναμενόταν, στα αστικά άλση και τις δασοκαλυμμένες εκτάσεις των ορεινών όγκων που περιβάλλουν την Αθήνα, και κατά δεύτερο λόγο στις περιοχές εντός του αστικού ιστού που διαθέτουν εκτενή βλάστηση. Ο συντελεστής εκπομπής παρουσίασε επιπλέον καλή συμφωνία κατά τη σύγκρισή του με τα δεδομένα αναφοράς ASTER GED (RMSE ~0.01). Ενσωματώνοντας τον συντελεστή σε αλγόριθμο διαχωρισμού των παραθύρων και χρησιμοποιώντας τις αρχικές θερμικές καταγραφές του MODIS, παρατηρήθηκαν κατανομές των τιμών του παραγόμενου LST πλησιέστερες εκείνων των δεδομένων ASTER – LST (τα τελευταία υπό αναδειγματοληψία στα 1000 m) σε σύγκριση με το αρχικό προϊόν MODIS.

Η διερεύνηση των μεθόδων στατιστικής υποκλιμάκωσης είχε τρεις κυρίους στόχους: α) την αξιολόγηση της επίδρασης του υψηλής χωρικής ανάλυσης συντελεστή εκπομπής, β) την εύρεση του κατάλληλου αλγορίθμου για την ταυτόχρονη χρήση του συνόλου των μεταβλητών πρόβλεψης, και γ) τη σύγκριση της προτεινόμενης μεθοδολογίας με τη μεθοδολογία αναφοράς (DisTrad), καθώς και με περαιτέρω αλγορίθμους στατιστικής υποκλιμάκωσης που έχουν προταθεί στο παρελθόν για χρήση σε ανθρωπογενές περιβάλλον.

Όσον αφορά τη χρήση του νέου συντελεστή εκπομπής διαπιστώθηκε ότι αυτός οδήγησε σε καλύτερη εκτίμηση για τις τέσσερις από τις έξι ημέρες που εξετάστηκαν (μέση βελτίωση 0.4 K για το σφάλμα RMSE), ενώ για τις υπόλοιπες παρατηρήθηκε αμελητέα διαφοροποίηση των αποτελεσμάτων. Το κύριο γνώρισμα της προτεινόμενης μεθοδολογίας ήταν η αποσύνδεση του αλγορίθμου υποκλιμάκωσης από τα συγκεκριμένα χαρακτηριστικά της περιοχής όπου εφαρμόζεται, μέσω της ενσωμάτωσης ενός μεγάλου αριθμού μεταβλητών πρόβλεψης, οι οποίες καλύπτουν την πλειονότητα των περιπτώσεων που έχουν χρησιμοποιηθεί στο παρελθόν. Ωστόσο, αρκετές από τις χρησιμοποιούμενες 16 μεταβλητές παρουσιάζουν ισχυρή συσχέτιση μεταξύ τους (π.χ. οι δείκτες βλάστησης NDVI και EVI)· ως εκ τούτου η εμφανιζόμενη πολυσυγγραμμικότητα στην

παλινδρόμηση καθιστά τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων (OLS) ασταθή και αντίθετη με τις θεωρητικές στατιστικές παραδοχές της. Για την αντιμετώπιση της πολυσυγγραμμικότητας και την εν γένει εξέταση πιο σύνθετων αλγορίθμων με στόχο τη βελτίωση της ακρίβειας της υποκλιμάκωσης χρησιμοποιήθηκαν η ομαλοποιημένη (regularized) παλινδρόμηση τύπου ridge (RR), τεχνητά νευρωνικά δίκτυα (ANN) και τεχνικές παλινδρόμησης random forest (RF).

Τα μοντέλα RF έδωσαν σταθερά τα λιγότερα ακριβή αποτελέσματα —λαμβάνοντας υπόψη τη βέλτιστη αρχιτεκτονική τους— από τις τρεις παραπάνω μεθόδους. Οι μέθοδοι RR και ANN εμφάνισαν παραπλήσιες τιμές σφάλματος· ωστόσο συνεκτιμώντας την πολυπλοκότητα που απαιτείται για την ανάπτυξη των ANN και το πρόσθετο υπολογιστικό κόστος κατά την εφαρμογή τους, το μοντέλο υποκλιμάκωσης με χρήση της γραμμικής πολλαπλής παλινδρόμησης τύπου ridge αξιολογήθηκε ως η βέλτιστη μεθοδολογία (μοντέλο Radiance-RR).

Με χρήση της προτεινόμενης μεθοδολογίας Radiance-RR προέκυψε σημαντικά καλύτερη υποκλιμάκωση των δεδομένων του MODIS συγκριτικά με τη μέθοδο αναφοράς DisTrad (μοντέλο LST-NDVI), με μικρότερο σφάλμα RMSE κατά 29%. Η συνολική μείωση που παρατηρήθηκε για το RMSE ήταν ίση με 0.51 K κατά τη σύγκριση των δύο παραπάνω μεθόδων —0.55 K κατά τη διάρκεια της ημέρας και 0.31 K κατά τη διάρκεια της νύχτας. Η καλύτερη συμφωνία των επιφανειακών θερμοκρασιών υποκλιμάκωσης του προτεινόμενου αλγορίθμου με το προϊόν ASTER διαπιστώθηκε για το σύνολο των εξεταζόμενων ημερών, παρουσιάζοντας μικρότερο συστηματικό σφάλμα —αν και η υποεκτίμηση των εκτιμήσεων εν μέρει διατηρήθηκε— και μεγαλύτερο εύρος τιμών συγκριτικά με τις αντίστοιχες του DisTrad. Συνολικά, για την προτεινόμενη μέθοδο Radiance-RR βρέθηκε με ένα μέσο σφάλμα RMSE 1.71 K κατά τη σύγκρισή του με το προϊόν ASTER, ενώ η αξιολόγησή του με τις διαθέσιμες επιτόπιες επιφανειακές θερμοκρασίες (πείραμα Thermopolis) οδήγησε σε μέσο σφάλμα 1.81 K. Η συγκριτική μελέτη που πραγματοποιήθηκε με επιπλέον αλγορίθμους στατιστικής υποκλιμάκωσης για αστικές περιοχές (Dominguez et al., 2011; Essa et al., 2013; Bonafoni, 2016) ανέδειξε την υπεροχή του μοντέλου Radiance-RR σύμφωνα με τον δείκτη RMSE. Συγκεκριμένα, για κάθε ημερομηνία που εξετάστηκε το Radiance-RR είχε την καλύτερη εκτίμηση, με μία μέση βελτίωση της τάξης των 0.4 K ως προς το RMSE συγκριτικά με τον εκάστοτε δεύτερο βέλτιστο αλγόριθμο.

Στο Κεφάλαιο 5 ακολούθησε ο προσδιορισμός των χαρακτηριστικών της αστικής μορφολογίας και λειτουργίας της Αθήνας σε υψηλή χωρική διακριτική ικανότητα (100 m), και ειδικότερα: α) η εφαρμογή και κριτική αξιολόγηση της ταξινόμησης των τοπικών κλιματικών ζωνών (LCZ) και β) η ανάπτυξη ενός νέου δείκτη αστικής θερμικής έκθεσης (UHeatEx) μέσω των παραμέτρων H/W , β , ΔQ_s και Q_F . Για τους παραπάνω στόχους, αξιοποιήθηκαν μεταξύ άλλων η μεθοδολογία υποκλιμάκωσης του LST, καθώς και η φασματική ταξινόμηση της αστικής επιφάνειας, προερχόμενα αμφότερα από το Κεφαλαίο 4. Από τη χωρική αποτύπωση των LCZ προκύπτει ότι η κυρίαρχη τάξη του αστικού συγκροτήματος είναι η LCZ 2 (πυκνή δόμηση μεσαίου ύψους κτηρίων), επικρατώντας στο σύνολο σχεδόν του ευρύτερου κέντρου της πόλης. Το χαμηλότερο ύψος κτηρίων

(H) για τα δυτικά προάστια οδήγησε στην ταξινόμησή τους ως LCZ 3, ενώ στους δήμους ανοικτής δόμησης των νοτιοανατολικών και βορειοανατολικών προαστίων κυριαρχούν οι τάξεις LCZ 5 και LCZ 6. Επιπρόσθετα, η χωρική ενότητα της ευρύτερης περιοχής του Ελαιώνα (LCZ 8) διαχωρίζεται σαφώς από τον υπόλοιπο αστικό χώρο. Εντούτοις, από τα αποτελέσματα της χαρτογράφησης των LCZ διαπιστώνεται μία σημαντική αδυναμία του συγκεκριμένου σχήματος ταξινόμησης να αναδεικνύει τις τοπικές διαφοροποιήσεις, κατά κύριο λόγο σε ότι αφορά τον κεντρικό πυρήνα της Αθήνας.

Ο κύριος παράγοντας που συνέβαλλε στην παραπάνω ομοιογενοποίηση των αποτελεσμάτων εκτιμήθηκε ότι είναι η κατανομή των τιμών του H/W για την Αθήνα. Ο προσδιορισμός της παραπάνω παραμέτρου κατέδειξε ότι ο έντονος οικοδομικός κορεσμός της πόλης έχει οδηγήσει σε έναν συνδυασμό των τιμών του H και του H/W που δεν καλύπτεται από τις υφιστάμενες τιμές των παραμέτρων της ταξινόμησης των LCZ. Συγκεκριμένα, σημειώθηκαν ιδιαίτερα υψηλές τιμές H/W (> 2) για αρκετά σημεία των κεντρικών περιοχών της πόλης, απόρροια των ιδιαίτερα στενών δρόμων και όχι του μεγάλου ύψους των κτηρίων. Αξίζει να σημειωθεί ότι ο υπολογισμός του H/W που ακολουθήθηκε στην παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκε από την ανάπτυξη μίας νέας προσέγγισης με συνδυαστική αξιοποίηση ποικίλων τεχνικών GIS για τον λεπτομερειακό υπολογισμό της παραμέτρου ανά οδό της πόλης.

Ο λόγος Bowen β —δηλ. ο καταμερισμός της προσλαμβάνουσας ενέργειας σε Q_H και Q_E — υπολογίστηκε κατά το μέσον την ημέρας (β_m) για τις ανέφελες ημέρες του Ιουλίου 2017. Η χωρική διακύμανση των τιμών του β_m βρέθηκε ότι διαμορφώνεται άμεσα από την κατανομή της βλάστησης στο εσωτερικό του συγκροτήματος. Σε αντίθεση με το H/W όπου οι μέγιστες τιμές του παρατηρούνταν στον κεντρικό πυρήνα της Αθήνας, όσον αφορά το β_m η μεγαλύτερη θερμική επιβάρυνση εντοπίζεται στις νοτιοδυτικές συνοικίες του αστικού συγκροτήματος (περιφερειακή ενότητα Πειραιά), παρουσιάζοντας κατά τη συγκεκριμένη ώρα μελέτης τιμές άνω του 20. Από την άλλη πλευρά, ιδιαίτερα χαμηλές τιμές του λόγου Bowen (< 1) παρατηρήθηκαν για τη βόρεια περιφέρεια της πόλης και για τα αστικά πάρκα. Για την αξιολόγηση της ακρίβειας των τυρβωδών ροών ενέργειας (Q_H και Q_E) χρησιμοποιήθηκαν μετρήσεις μικρομετεωρολογικού πύργου ο οποίος βρισκόταν σε λειτουργία κατά το προγενέστερο ερευνητικό πρόγραμμα Thermopolis. Ειδικότερα, πραγματοποιήθηκε επεξεργασία των υψηλής χρονικής συχνότητας δεδομένων μέσω της μεθόδου της τυρβώδους συνδιακύμανσης (eddy covariance, EC) για τον υπολογισμό των Q_H και Q_E . Παρά το σχετικά μικρό χρονικό διάστημα των διαθέσιμων μετρήσεων, μπορεί να αξιολογηθεί μια ικανοποιητική συμφωνία μεταξύ των ροών θερμότητας όπως υπολογίζονται με βάση τις τεχνικές δορυφορικής τηλεπισκόπησης (μέθοδος αεροδυναμικής αντίστασης) και τη μικρομετεωρολογική μέθοδο: μέσο σφάλμα RMSE $\sim 45 \text{ W m}^{-2}$ για το Q_H και $\sim 15 \text{ W m}^{-2}$ για το Q_E .

Μικρότερες ενδοαστικές διαφοροποιήσεις σε σχέση με εκείνες που παρουσίασαν τα H/W και β_m παρατηρήθηκαν για την καθαρή μεταβολή του ρυθμού αποθήκευσης θερμότητας κατά το μέσον τη ημέρας (ΔQ_{sm}), εκτιμώμενη μέσω του μοντέλου OHM. Οι υψηλότερες τιμές του ΔQ_{sm} τείνουν να εμφανίζονται για τις χωρικές ενότητες ανοικτής δόμησης με μικρή έως ελάχιστη βλάστηση (κεντρικοί

αυτοκινητόδρομοι, πρώην αεροδρόμιο Ελληνικού, κλπ.), με μέση τιμή άνω των 250 W m^{-2} για τον Ιούλιο του 2017. Και σε αυτήν την περίπτωση τα βορειοανατολικά προάστια χαρακτηρίζονται από τις ευνοϊκότερες θερμικές συνθήκες, παρουσιάζοντας τις μικρότερες τιμές της αποθηκευόμενης θερμότητας κατά τη διάρκεια της ημέρας.

Όσον αφορά την εκτίμηση της ανθρωπογενούς ροής θερμότητας (Q_F), αναπτύχθηκε νέος αλγόριθμος που συνδυάζει τις «bottom-up» και «top-down» προσεγγίσεις της βιβλιογραφίας, ειδικά προσαρμοσμένος στα διαθέσιμα ενεργειακά δεδομένα για το πολεοδομικό συγκρότημα. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκαν μετρήσεις κυκλοφορίας από το Κέντρο Διαχείρισης Κυκλοφορίας της Περιφέρειας Αττικής για παραπάνω από 400 σημεία κεντρικών οδικών αρτηριών, ενώ παράλληλα πραγματοποιήθηκε έρευνα των διαθέσιμων κυκλοφοριακών μελετών για την περιοχή μελέτης για τον προσδιορισμό των τυπικών τιμών της κυκλοφορίας οχημάτων ανά κατηγορία δρόμου (διαχωρίστηκαν πέντε κατηγορίες δρόμων). Επιπρόσθετα, λήφθηκαν δεδομένα ηλεκτρικής κατανάλωσης από τον ΔΕΔΔΗΕ ανά είδος χρήσης (οικιακή, εμπορική, κτλ.) και ανά ταχυδρομικό κωδικό, τα οποία σταθμίστηκαν σε υψηλότερη ανάλυση μέσω της κτηριακής κάλυψης. Με βάση τα παραπάνω δεδομένα και αξιοποιώντας χρονικούς συντελεστές από προηγούμενες μελέτες, επετεύχθη μια αρκετά λεπτομερειακή χαρτογράφηση των ανθρωπογενών εκπομπών θερμότητας.

Ειδικότερα, η χωρική κατανομή του Q_F κατά τη θερινή περίοδο κατέδειξε ότι στη χωρική ανάλυση των 100 m ο αντίκτυπος των ανθρωπογενών εκπομπών παρουσιάζει πρωτίστως τοπικά χαρακτηριστικά, με ιδιαίτερα έντονη ενδοαστική διακύμανση. Ειδικότερα, για το εμπορικό τρίγωνο του κέντρου της πόλης προσδιορίστηκε μία μέση τιμή της τάξης των 75 W m^{-2} για τον Ιούλιο του 2012 (συμπεριλαμβανομένων και των νυχτερινών ωρών). Στην ίδια περιοχή παρουσιάστηκαν τοπικά μέγιστα του Q_F άνω των 185 W m^{-2} για τις θερμότερες ημέρες της εξεταζόμενης περιόδου. Τις ώρες αιχμής οι κεντρικές οδικές αρτηρίες παρουσιάζουν εκπομπές θερμότητας της τάξης των 100 W m^{-2} , ενώ οι πιο πυκνοκατοικημένες συνοικίες παρουσιάζουν επίσης υψηλές εκτιμήσεις για το Q_F (μέση τιμή $\sim 55 \text{ W m}^{-2}$). Ωστόσο, για την πλειονότητα των χωρικών ενοτήτων εκτός των ορίων του Δήμου Αθηναίων προσδιορίστηκαν σχετικά χαμηλές μέσες θερινές τιμές του Q_F ($< 30 \text{ W m}^{-2}$). Το παραπάνω αποτυπώθηκε και στην εκτιμώμενη συγκεντρωτική μέση τιμή των 14 W m^{-2} του πολεοδομικού συγκροτήματος —συμπεριλαμβάνοντας στην παραπάνω τιμή το σύνολο του 24ώρου καθώς και τις μη δομημένες περιοχές του αστικού ιστού— για το σύνολο του 2012. Οι παραπάνω χαμηλές τιμές κατά την εξέταση της ευρύτερης αστικής περιοχής είναι σε συμφωνία με τις αντίστοιχες εκτιμήσεις σε πρόσφατες μελέτες των ανθρωπογενών εκπομπών θερμότητας (Iamarino et al., 2012; Dong et al., 2017; Stewart and Kennedy, 2017).

Το αστικό θερμικό μικροκλίμα διαμορφώνεται εν πολλοίς από τις τέσσερις παραπάνω παραμέτρους: H/W , β , ΔQ_s και Q_F . Αυτές ενσωματώθηκαν στη συνέχεια σε έναν πρωτότυπο δείκτη θερμικής έκθεσης (Urban Heat Exposure, UHeatEx), βάσει της στατιστικής μεθοδολογίας της ανάλυσης στις κύριες συνιστώσες (PCA). Μέσω του UHeatEx αναδείχθηκε ότι το αστικό θερμικό περιβάλλον της Αθήνας χαρακτηρίζεται από έντονη χωρική διακύμανση τόσο μεταξύ των

διαφορετικών δήμων όσο και μεταξύ όμορων συνοικιών ή οικοδομικών τετραγώνων. Οι υψηλότερες τιμές του δείκτη παρουσιάστηκαν κατά κύριο λόγο για το κέντρο της Αθήνας όπου το σύνολο των εξεταζόμενων παραμέτρων λαμβάνουν υψηλές τιμές και συμβάλλουν στη θερμική ευπάθεια της περιοχής. Μέσω του UHeatEx εντοπίζεται σημαντικός αριθμός σημείων του ευρύτερου κέντρου της πόλης και των νοτιοδυτικών προαστίων με ιδιαίτερα χαμηλές τιμές για μια παράμετρο (π.χ. του λόγου Bowen β), καταδεικνύοντας το πλεονέκτημα του δείκτη συγκριτικά με την ταξινόμηση των LCZ. Το γεγονός ότι το ο δείκτης αναπαριστά πληρέστερα το θερμικό περιβάλλον της πόλης επιβεβαιώθηκε περαιτέρω εξετάζοντας τις καταγραφές της θερμοκρασίας αέρα μετεωρολογικών σταθμών, οι περιοχές εγκατάστασης των οποίων αντιστοιχούν στην ίδια τάξη LCZ και σε διαφορετικές τιμές του UHeatEx.

Στο επόμενο κεφάλαιο (Κεφάλαιο 6), η μελέτη του αστικού θερμικού περιβάλλοντος πραγματοποιήθηκε σε μεγαλύτερη χωρική κλίμακα (τοπική κλίμακα, 1000 m), δηλ. σε επίπεδο συνοικίας. Ως συνοικίες περιγράφονται διαφορετικά τμήματα του αστικού ιστού τα οποία εμφανίζουν στο εσωτερικό τους μια σχετική ομοιογένεια ως προς τις αποστάσεις μεταξύ των κτηρίων, το μέσο ύψος των κτηρίων και το ποσοστό κάλυψης της επιφάνειας από βλάστηση ή αδιαπέρατα υλικά. Έτσι, στο συγκεκριμένο κεφάλαιο, πραγματοποιήθηκε η διερεύνηση της σύνδεσης που εντοπίζεται μεταξύ των παραπάνω βασικών αστικών επιφανειακών παραμέτρων και της επιφανειακής θερμοκρασίας του εδάφους (LST) στην τοπική κλίμακα. Σε αντίθεση με τα υπόλοιπα τμήματα της εργασίας, εδώ μαζί με την περίπτωση της Αθήνας εξετάστηκαν 24 επιπλέον ευρωπαϊκές πόλεις για την ενίσχυση της αξιοπιστίας των αποτελεσμάτων των στατιστικών μεθοδολογιών. Οι κοινές παράμετροι για όλες τις περιοχές μελέτης ήταν το ποσοστό των αδιαπέρατων επιφανειών (λ_{imp}), το ποσοστό της επιφάνειας κάλυψης από κτήρια (λ_b) και το ύψος των κτηρίων (H), ενώ για το LST χρησιμοποιήθηκε το προϊόν του αισθητήρα MODIS (MOD/MYD11A1).

Για το λ_{imp} διαπιστώθηκε μία ξεκάθαρη, στατιστικά σημαντική σύνδεση με υψηλότερες τιμές του LST για το σύνολο σχεδόν των περιπτώσεων, τόσο για τις δορυφορικές παρατηρήσεις κατά τη διάρκεια της ημέρας όσο και της νύχτας. Ο μέσος συντελεστής γραμμικής συσχέτισης r μεταξύ των λ_{imp} και LST ήταν 0.54, ενώ η ενισχυτική επίδραση του λ_{imp} επιβεβαιώθηκε επιπλέον από την ανάλυση παλινδρόμησης OLS, δηλ. απομακρύνοντας τη συμβολή των υπόλοιπων δύο μεταβλητών.

Όσον αφορά την επίδραση των λ_b και H , η στατιστική ανάλυση ανέδειξε μια πολυπλοκότερη διασύνδεση με το LST. Παρότι το r μεταξύ των δύο παραπάνω μεταβλητών και του LST ήταν εν γένει θετικό, αυτό εκτιμήθηκε ότι διαμορφώνεται εν πολλοίς από την υψηλή συμμεταβολή που εμφανίζουν με το λ_{imp} . Κατά τον προσδιορισμό της ξεχωριστής συμβολής των λ_b και H ως προς επεξήγηση της διακύμανσης του LST —αναπτύσσοντας μοντέλα πολλαπλής παλινδρόμησης— προέκυψαν τα εξής γενικότερα συμπεράσματα. Κατά τη διάρκεια της ημέρας βρέθηκε σχεδόν πάντα μία ασθενέστερη επίδραση των λ_b και H στις υψηλές τιμές του LST σε σχέση με το λ_{imp} . Μάλιστα, για τις στατιστικά σημαντικά τιμές των συντελεστών τους παρουσιάζεται μία μικρής έντασης, αρνητική σύνδεση με την επιφανειακή θερμοκρασία. Αντίθετα, για τις νυχτερινές παρατηρήσεις του MODIS

και την πλειοψηφία των πόλεων οι παράμετροι λ_b και H εντοπίστηκαν να επιδρούν στατιστικά σημαντικά ενισχυτικά με το LST· επιπλέον, οι τιμές των κανονικοποιημένων συντελεστών τους ήταν σε αυτήν την περίπτωση ανάλογης τάξης μεγέθους συγκριτικά με το λ_{imp} .

Η σαφής μεταστροφή των αποτελεσμάτων ανάμεσα στις ημερήσιες και τις νυχτερινές παρατηρήσεις ενισχύει την αξιοπιστία της γενίκευσης των εξαγόμενων συμπερασμάτων, παρά τις αβεβαιότητες που ενυπάρχουν στα χρησιμοποιούμενα δεδομένα (π.χ. ως προς τον χρησιμοποιούμενο συντελεστή εκπομπής) ή στην ικανοποίηση των θεωρητικών παραδοχών των στατιστικών μεθοδολογιών. Ως προς το τελευταίο, πέραν της παλινδρόμησης OLS εξετάστηκε επιπρόσθετα η μεθοδολογία της χωρικά αυτοπαλινδρομης παλινδρόμησης (SAR) για την αντιμετώπιση της χωρικής αυτοσυσχέτισης στα δεδομένα. Τα στατιστικά σημαντικά αποτελέσματα του μοντέλου SAR ήταν σε συμφωνία με όσα παρατέθηκαν παραπάνω για την περίπτωση της απλής γραμμικής παλινδρόμησης.

Για αρκετές ευρωπαϊκές πόλεις εντοπίστηκε ότι τα εικονοστοιχεία των δορυφορικών εικόνων τους (1000 × 1000 m) τα οποία αντιστοιχούν στις χωρικές ενότητες με κτήρια μεγάλου ύψους τείνουν να παρουσιάζουν μετριασμένες τιμές LST κατά τη διάρκεια της ημέρας. Αυτό αποδίδεται κυρίως στις διεργασίες της εντονότερης σκίασης της επιφάνειας των δρόμων και στη μεγαλύτερη θερμική αδράνεια αυξανόμενου του κτηριακού όγκου και των ενεργών επιφανειών.

Η μελέτη της σύνδεσης μεταξύ των χαρακτηριστικών της τρισδιάστατης επιφάνειας του εδάφους και του LST τοπικής κλίμακας αναλύθηκε εκτενέστερα για την περίπτωση της Αθήνας, αξιοποιώντας την πληρέστερη περιγραφή της αστικής μορφολογίας και λειτουργίας, όπως εκτιμήθηκε στα Κεφάλαια 4 και 5. Συγκεκριμένα, η διαφοροποίηση του ημερήσιου LST μεταξύ ανοικτής και συμπαγής κτηριακής δόμησης παρατηρήθηκε ιδιαίτερα χαρακτηριστικά για την πόλη της Αθήνας και επιβεβαιώθηκε χρησιμοποιώντας δύο περαιτέρω παραμέτρους οι οποίες αποτυπώνουν την τρισδιάστατη αστική μορφολογία (H/W και λ_c). Ειδικότερα, απομονώνοντας την περιοχή του ευρύτερου κέντρου της Αθήνας παρατηρήθηκε για τα H/W και λ_c στατιστικά σημαντική ισχυρή, αρνητική συσχέτιση με το LST κατά τη διάρκεια της ημέρας ($r = -0.71$ και -0.72 αντίστοιχα). Αντίθετα, η σύνδεση τους με το LST μεταστράφηκε σε θετική τις νυχτερινές ώρες ($r = 0.40$ και 0.55 αντίστοιχα).

Η ερμηνεία της χωρικής κατανομής του LST (Ιούνιος – Αύγουστος 2017) για το πολεοδομικό συγκρότημα της Αθήνας πραγματοποιήθηκε επιπρόσθετα με χρήση της ταξινόμησης των τοπικών κλιματικών ζωνών (LCZ), σύμφωνα με τη μεθοδολογία του Κεφαλαίου 5. Κατά τη διάρκεια της ημέρας η ανοικτής δόμησης τάξη LCZ 8 (ευρύτερη βιομηχανική περιοχή Ελαιώνα) εμφάνισε τις υψηλότερες τιμές LST, ως συνέπεια των χαμηλών τιμών λ_b και H/W . Από την άλλη πλευρά, τη νύχτα οι πυκνοδομημένες LCZ του ευρύτερου κέντρου της πόλης παρουσίασαν υψηλότερο LST συγκριτικά με τη LCZ 8 (κατά περίπου 1 K) η οποία ψύχεται ταχύτερα μέσω της εκπεμπόμενης υπέρυθρης ακτινοβολίας.

Στο τελευταίο μέρος του Κεφαλαίου 6 εξετάστηκε η δυνατότητα αναπαραγωγής των ενδοαστικών διακυμάνσεων του αστικού κλίματος της Αθήνας μέσω του ατμοσφαιρικού μοντέλου

WRF. Για τον σκοπό αυτό αναπτύχθηκε μία τροποποίηση του σχήματος αστικής παραμετροποίησης SLUCM: α) αξιοποιώντας τις τιμές των παραμέτρων της αστικής μορφολογίας και λειτουργίας από τα προηγούμενα στάδια της μελέτης (Κεφάλαια 4 και 5), β) αντικαθιστώντας την υφιστάμενη κατηγοριοποίηση κάλυψης γης με την ταξινόμηση των LCZ και γ) χρησιμοποιώντας μία διαφορετική προσέγγιση (ως προς το μήκος τραχύτητας για τη μεταφορά θερμότητας) για τον υπολογισμό της διαγνωστικής μεταβλητής της επιφανειακής θερμοκρασίας αέρα (T_{as}).

Η εκτιμώμενη από το μοντέλο επιφανειακή θερμοκρασία (T_s) του αστικού ιστού της Αθήνας παρουσίασε ικανοποιητική συμφωνία με τις δορυφορικές παρατηρήσεις του LST (RMSE ~ 2.4 K). Ωστόσο, για το T_s εντοπίστηκε παράλληλα μη αμελητέο συστηματικό σφάλμα: εν γένει, σημειώθηκε υπερεκτίμηση της επιφανειακής θερμοκρασίας από το WRF (κατά 1.3 K), μολονότι για τις περιοχές υψηλής βλάστησης παρατηρήθηκε υποεκτίμηση του T_s τη νύχτα. Σε γενικές γραμμές η υιοθέτηση των LCZ για την περιγραφή της κάλυψης γης στο μοντέλο οδήγησε στην ορθή αναπαραγωγή των βασικών μοτίβων της επιφανειακής θερμοκρασίας. Το παραπάνω μπορεί να εκτιμηθεί και για την περίπτωση της χωρικής διακύμανσης του T_{as} κατά τη στατιστική του αξιολόγηση με παρατηρήσεις αστικών μετεωρολογικών σταθμών (RMSE ~ 1.7 K). Παρ' όλα αυτά, κατά τη διάρκεια της νύχτας το συστηματικό σφάλμα της θερμοκρασίας κοντά στην επιφάνεια του εδάφους ήταν έντονο, με μια μέση υποεκτίμηση ίση με 0.9 K. Συγκρίνοντας τις μετεωρολογικές μετρήσεις μόνο με τις εκτιμήσεις του μοντέλου που αντιστοιχούν στο αστικό τμήμα των κυψελίδων του πλέγματος, το σφάλμα RMSE και κυρίως το συστηματικό σφάλμα προέκυψαν σημαντικά ελαττωμένα. Συνεκτιμώντας τα ευρήματα των Κεφαλαίων 5 και 6, εκτιμάται ότι η ταξινόμηση των LCZ, αν και αδυνατεί να αναδείξει με υψηλή λεπτομέρεια τις ενδοαστικές χωρικές διαφοροποιήσεις, είναι ιδιαίτερα χρήσιμη στη μελέτη και ερμηνεία των γενικότερων χωρικών μοτίβων του θερμικού περιβάλλοντος.

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας πραγματοποιήθηκε μία πολυπαραγοντική μελέτη του αστικού θερμικού περιβάλλοντος, με στόχο τη χωρική αποτύπωση και την κατανόηση των ενδοαστικών διακυμάνσεων και των αλληλοεπιδρώντων μηχανισμών του. Με κύριο πεδίο μελέτης την Αθήνα χρησιμοποιήθηκαν πρωτίστως τεχνικές θερμικής τηλεπισκόπησης με ενσωμάτωση δεδομένων από πολλαπλές πηγές. Κατά την εκπόνηση της ερευνητικής προσπάθειας προέκυψαν ωστόσο σημεία τα οποία μπορούν να αποτελέσουν αντικείμενο μελλοντικής έρευνας, με σκοπό είτε τη διεξοδικότερη διερεύνηση των μεθοδολογιών της διατριβής είτε την αξιοποίησή τους σε διαφορετικές εφαρμογές.

Ένα από τα κύρια πλεονεκτήματα της προτεινόμενης μεθοδολογίας της στατιστικής υποκλιμάκωσης ήταν η δυνατότητα της άμεσης εφαρμογής της σε διαφορετικές περιοχές μελέτης, χάριν στην ταυτόχρονη ενσωμάτωση πολλαπλών μεταβλητών πρόβλεψης μέσω της παλινδρόμησης ridge. Ταυτόχρονα, είναι σημαντικό να εξεταστεί η ακρίβεια των εκτιμήσεων της υποκλιμάκωσης μέσω πολλαπλών επιτόπιων μετρήσεων της επιφανειακής θερμοκρασίας. Με βάση τα παραπάνω ενδιαφέρον θα είχε η εφαρμογή και αξιολόγηση του αλγορίθμου υποκλιμάκωσης μέσω του διεθνούς

δικτύου σταθμών καταγραφής της επιφανειακής θερμοκρασίας «Surface Radiation Budget Network» (SURFRAD), το οποίο καλύπτει ποικίλες περιπτώσεις κάλυψης γης και κλιματολογικών συνθηκών.

Σε ότι αφορά τις τοπικές κλιματικές ζώνες και τον δείκτη UHeatEx η μελλοντική έρευνα που προτείνεται εντοπίζεται στη διενέργεια εκτεταμένων πειραματικών μετρήσεων για την περαιτέρω αξιολόγηση της σύνδεσής τους με το αστικό κλίμα. Ειδικότερα, προκρίνεται η διεξαγωγή μακροχρόνιων μετρήσεων της θερμοκρασίας αέρα εντός του κτηριακού στρώματος, δηλ. κάτω από το επίπεδο της οροφής των κτηρίων. Η λεπτομερειακή χαρτογράφηση των LCZ, καθώς και επιμέρους αστικών παραμέτρων (π.χ. του H/W) η οποία πραγματοποιήθηκε στην παρούσα εργασία επιτρέπει τον προσεκτικό σχεδιασμό της εγκατάστασης ενός τέτοιου δικτύου των σταθμών με σκοπό τη διερεύνηση της επίδρασης επιμέρους παραγόντων της αστικής μορφολογίας.

Η εξέταση της διασύνδεσης που εμφανίζει το LST με αστικές επιφανειακές παραμέτρους θα μπορούσε να επεκταθεί για επιπλέον χωρικές κλίμακες και χρονικές στιγμές της ημέρας. Ο πρόσφατος θερμικός δέκτης ECOsystem Spaceborne Thermal Radiometer Experiment on Space Station (ECOSTRESS) επί του Διεθνούς Διαστημικού Σταθμού θα μπορούσε να αξιοποιηθεί στη συγκεκριμένη κατεύθυνση, καθώς παρέχει θερμικές παρατηρήσεις σε πολλαπλά τμήματα του φάσματος, σε υψηλή χωρική ανάλυση (70 m) και για διαφορετικές στιγμές μέσα στην ημέρα.

Η μελλοντική έρευνα που προτείνεται ως προς την αριθμητική προσομοίωση του θερμικού περιβάλλοντος της Αθήνας εντοπίζεται στην εφαρμογή του μοντέλου για πιο εκτεταμένο χρονικό διάστημα. Η αναπαράσταση της αστικής επιφάνειας με μεγάλη λεπτομέρεια που πραγματοποιήθηκε στην παρούσα μελέτη δίνει τη δυνατότητα οι μελλοντικές εφαρμογές του WRF για την Αθήνα να εστιάσουν στην εμβάθυνση της ξεχωριστής επίδρασης διαφορετικών διεργασιών ή/και στην εξέταση ποικίλων μετεωρολογικών συνθηκών. Μακροχρόνιες αριθμητικές προσομοιώσεις του θερμικού κλίματος της Αθήνας, θα μπορούσαν να συνδυαστούν με τον δείκτη UHeatEx για την ανάπτυξη ενός «κλιματικού χάρτη» (climatope) του πολεοδομικού συγκροτήματος της πόλης.

Βιβλιογραφία

- Agam N, Kustas WP, Anderson MC, Li F, Neale CMU. 2007. A vegetation index-based technique for spatial sharpening of thermal imagery. *Remote Sensing of Environment* 107(4): 545–558.
- Agathangelidis I, Cartalis C. 2019. Improving the disaggregation of MODIS land surface temperatures in an urban environment: a statistical downscaling approach using high-resolution emissivity. *International Journal of Remote Sensing* 40(13): 5261–5286.
- Agathangelidis I, Cartalis C, Santamouris M. 2016. Estimation of Air Temperatures for the Urban Agglomeration of Athens with the Use of Satellite Data. *Geoinformatics & Geostatistics: An Overview* 4(2): 2–7.
- Aida M. 1982. Urban albedo as a function of the urban structure—A model experiment. *Boundary-layer meteorology* 23(4): 405–413.
- Akbari H, Cartalis C, Kolokotsa D, Muscio A, Pisello AL, Rossi F, Santamouris M, Synnefa A, Wong NH, Zinzi M. 2016. Local climate change and urban heat island mitigation techniques—the state of the art. *Journal of Civil Engineering and Management* 22(1): 1–16.
- Akbari H, Kolokotsa D. 2016. Three decades of urban heat islands and mitigation technologies research. *Energy and Buildings* 133: 834–842.
- Alavipanah S, Haase D, Lakes T, Qureshi S. 2017. Integrating the third dimension into the concept of urban ecosystem services: A review. *Ecological Indicators* 72: 374–398.
- Alavipanah S, Schreyer J, Haase D, Lakes T, Qureshi S. 2018. The effect of multi-dimensional indicators on urban thermal conditions. *Journal of Cleaner Production* 177: 115–123.
- Alexander PJ, Mills G. 2014. Local Climate Classification and Dublin’s Urban Heat Island. *Atmosphere* 5(4): 755–774.
- Alexandri G. 2018. Planning Gentrification and the ‘Absent’ State in Athens. *International Journal of Urban and Regional Research* 42(1): 36–50.
- Allen L, Lindberg F, Grimmond CSB. 2011. Global to city scale urban anthropogenic heat flux: model and variability. *International Journal of Climatology* 31(13): 1990–2005.
- Allen RG, Trezza R, Tasumi M. 2006. Analytical integrated functions for daily solar radiation on slopes. *Agricultural and Forest Meteorology* 139(1): 55–73.
- Amoros-Lopez J, Gomez-Chova L, Alonso L, Guanter L, Moreno J, Camps-Valls G. 2011. Regularized multiresolution spatial unmixing for ENVISAT/MERIS and Landsat/TM image fusion. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters* 8(5): 844–848.
- Anderson MC, Norman J, Mecikalski JR, Torn RD, Kustas WP, Basara JB. 2004. A multiscale remote sensing model for disaggregating regional fluxes to micrometeorological scales. *Journal of Hydrometeorology* 5(2): 343–363.
- Andreu A, Kustas WP, Polo MJ, Carrara A, González-Dugo MP. 2018. Modeling Surface Energy Fluxes over a Dehesa (Oak Savanna) Ecosystem Using a Thermal Based Two-Source Energy Balance Model (TSEB) I. *Remote Sensing* 10(4): 567.
- Antonopoulou S. 1991. Postwar Transformation of the Greek Economy and the Residential Phenomenon. Athens: Papazisis.

- Arnds D, Böhner J, Bechtel B. 2017. Spatio-temporal variance and meteorological drivers of the urban heat island in a European city. *Theor Appl Climatol* 128(1): 43–61.
- Arnfield AJ. 1982. An approach to the estimation of the surface radiative properties and radiation budgets of cities. *Physical Geography* 3(2): 97–122.
- Arnfield AJ. 1990. Canyon geometry, the urban fabric and nocturnal cooling: a simulation approach. *Physical Geography* 11(3): 220–239.
- Arnfield AJ. 2003. Two decades of urban climate research: a review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island. *International Journal of Climatology* 23(1): 1–26. doi: 10.1002/joc.859
- Arya PS. 2001. *Introduction to Micrometeorology*. Elsevier. (Vol. 79).
- Asaeda T, Ca VT. 1993. The subsurface transport of heat and moisture and its effect on the environment: a numerical model. *Boundary-Layer Meteorology* 65(1–2): 159–179.
- Asimakopoulos D, Santamouris M, Farrou I, Laskari M, Saliari M, Zanis G, Giannakidis G, Tigas K, Kapsomenakis J, Douvis C, et al. 2012. Modelling the energy demand projection of the building sector in Greece in the 21st century. *Energy and Buildings* 49: 488–498.
- As-syakur AR, Adnyana IWS, Arthana IW, Nuarsa IW. 2012. Enhanced Built-Up and Bareness Index (EBBI) for Mapping Built-Up and Bare Land in an Urban Area. *Remote Sensing* 4(10): 2957–2970.
- Azevedo JA, Chapman L, Muller CL. 2016. Quantifying the Daytime and Night-Time Urban Heat Island in Birmingham, UK: A Comparison of Satellite Derived Land Surface Temperature and High Resolution Air Temperature Observations. *Remote Sensing* 8(2): 153.
- Balchin WGV, Pye N. 1947. A micro-climatological investigation of bath and the surrounding district. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 73(317–318): 297–323.
- Baldrige A, Hook S, Grove C, Rivera G. 2009. The ASTER spectral library version 2.0. *Remote Sensing of Environment* 113(4): 711–715.
- Bandura R. 2008. A survey of composite indices measuring country performance: 2008 update. *New York: United Nations Development Programme, Office of Development Studies (UNDP/ODS Working Paper)*, in press.
- Barlow JF. 2014. Progress in observing and modelling the urban boundary layer. *Urban Climate* 10: 216–240. doi: 10.1016/j.uclim.2014.03.011
- Bastiaanssen WGM, Menenti M, Feddes RA, Holtslag AAM. 1998. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL). 1. Formulation. *Journal of Hydrology* 212–213: 198–212. doi: 10.1016/S0022-1694(98)00253-4
- Basu R. 2009. High ambient temperature and mortality: a review of epidemiologic studies from 2001 to 2008. *Environ Health* 8: 40. doi: 10.1186/1476-069X-8-40
- Bechtel B, Alexander PJ, Beck C, Böhner J, Brousse O, Ching J, Demuzere M, Fonte C, Gál T, Hidalgo J, et al. 2019. Generating WUDAPT Level 0 data – Current status of production and evaluation. *Urban Climate* 27: 24–45. doi: 10.1016/j.uclim.2018.10.001
- Bechtel B, Demuzere M, Mills G, Zhan W, Sismanidis P, Small C, Voogt J. 2019. SUHI analysis using Local Climate Zones—A comparison of 50 cities. *Urban Climate* 28: 100451. doi: 10.1016/j.uclim.2019.01.005
- Bechtel B, Wiesner S, Zakšek K. 2014. Estimation of dense time series of urban air temperatures from multitemporal geostationary satellite data. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing* 7(10): 4129–4137.

- Bechtel B, Zakšek K, Hoshyaripour G. 2012. Downscaling Land Surface Temperature in an Urban Area: A Case Study for Hamburg, Germany. *Remote Sensing* 4(10): 3184–3200.
- Benas N, Chrysoulakis N, Cartalis C. 2017. Trends of urban surface temperature and heat island characteristics in the Mediterranean. *Theoretical and applied climatology* 130(3–4): 807–816.
- Berger C, Rosentreter J, Voltersen M, Baumgart C, Schullius C, Hese S. 2017. Spatio-temporal analysis of the relationship between 2D/3D urban site characteristics and land surface temperature. *Remote Sensing of Environment* 193: 225–243. doi: 10.1016/j.rse.2017.02.020
- Best M. 2005. Representing urban areas within operational numerical weather prediction models. *Boundary-Layer Meteorology* 114(1): 91–109.
- Bindhu V, Narasimhan B, Sudheer K. 2013. Development and verification of a non-linear disaggregation method (NL-DisTrad) to downscale MODIS land surface temperature to the spatial scale of Landsat thermal data to estimate evapotranspiration. *Remote sensing of environment* 135: 118–129.
- Bisquert M, Sánchez JM, Caselles V. 2016. Evaluation of disaggregation methods for downscaling MODIS land surface temperature to Landsat spatial resolution in Barrax test site. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing* 9(4): 1430–1438.
- Bonafoni S. 2016. Downscaling of Landsat and MODIS Land Surface Temperature Over the Heterogeneous Urban Area of Milan. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing* 9(5): 2019–2027. doi: 10.1109/JSTARS.2016.2514367
- Bonafoni S, Anniballe R, Pichierri M. 2015. Comparison between surface and canopy layer urban heat island using MODIS data. 2015 Joint Urban Remote Sensing Event (JURSE): 1–4.
- Bowler DE, Buyung-Ali L, Knight TM, Pullin AS. 2010. Urban greening to cool towns and cities: A systematic review of the empirical evidence. *Landscape and Urban Planning* 97(3): 147–155.
- Breiman L. 2001. Random forests. *Machine learning* 45(1): 5–32.
- Brousse O, Martilli A, Foley M, Mills G, Bechtel B. 2016. WUDAPT, an efficient land use producing data tool for mesoscale models? Integration of urban LCZ in WRF over Madrid. *Urban Climate* 17: 116–134.
- Brutsaert W. 1982. *Evaporation into the Atmosphere: Theory History, and Applications*. D. Reidel Publishing Co.
- Burian SJ, Velugubantla SP, Brown MJ. 2002. Morphological analyses using 3D building databases: Salt Lake City, Utah. LA-UR-02-6197, Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, New Mexico.
- Cai M, Ren C, Xu Y, Dai W, Wang XM. 2016. Local Climate Zone Study for Sustainable Megacities Development by Using Improved WUDAPT Methodology – A Case Study in Guangzhou. *Procedia Environmental Sciences* 36: 82–89.
- Cai Z, Han G, Chen M. 2018. Do water bodies play an important role in the relationship between urban form and land surface temperature? *Sustainable Cities and Society* 39: 487–498.
- Chavez PS. 1996. Image-based atmospheric corrections-revisited and improved. *Photogrammetric engineering and remote sensing* 62(9): 1025–1035.
- Chen A, Yao L, Sun R, Chen L. 2014. How many metrics are required to identify the effects of the landscape pattern on land surface temperature? *Ecological Indicators* 45: 424–433.
- Chen F, Dudhia J. 2001. Coupling an advanced land surface–hydrology model with the Penn State–NCAR MM5 modeling system. Part I: Model implementation and sensitivity. *Monthly Weather Review* 129(4): 569–585.

- Chen F, Kusaka H, Bornstein R, Ching J, Grimmond CSB, Grossman-Clarke S, Loridan T, Manning KW, Martilli A, Miao S, et al. 2011. The integrated WRF/urban modelling system: development, evaluation, and applications to urban environmental problems. *International Journal of Climatology* 31(2): 273–288.
- Chen F, Yang S, Su Z, Wang K. 2016. Effect of emissivity uncertainty on surface temperature retrieval over urban areas: Investigations based on spectral libraries. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 114: 53–65.
- Chen X, Li W, Chen J, Rao Y, Yamaguchi Y. 2014. A Combination of TsHARP and Thin Plate Spline Interpolation for Spatial Sharpening of Thermal Imagery. *Remote Sensing* 6(4): 2845–2863.
- Chen X-L, Zhao H-M, Li P-X, Yin Z-Y. 2006. Remote sensing image-based analysis of the relationship between urban heat island and land use/cover changes. *Remote Sensing of Environment* 104(2): 133–146.
- Ching J, Mills G, Bechtel B, See L, Feddema J, Wang X, Ren C, Brousse O, Martilli A, Neophytou M, et al. 2018. WUDAPT: An Urban Weather, Climate, and Environmental Modeling Infrastructure for the Anthropocene. *Bull Amer Meteor Soc* 99(9): 1907–1924.
- Christen A. 2005. Atmospheric turbulence and surface energy exchange in urban environments: results from the Basel Urban Boundary Layer Experiment (BUBBLE) [PhD Thesis]. University_of_Basel.
- Christen A, Rotach MW, Vogt R. 2009. The Budget of Turbulent Kinetic Energy in the Urban Roughness Sublayer. *Boundary-Layer Meteorol* 131(2): 193–222. doi: 10.1007/s10546-009-9359-5
- Chrysoulakis N, de Castro EA, Moors EJ. 2014. *Understanding Urban Metabolism: A Tool for Urban Planning*. Routledge.
- Chrysoulakis N, Grimmond S, Feigenwinter C, Lindberg F, Gastellu-Etchegorry J-P, Marconcini M, Mitraka Z, Stagakis S, Crawford B, Olofson F, et al. 2018. Urban energy exchanges monitoring from space. *Scientific Reports* 8(1): 11498.
- Chrysoulakis N, Lopes M, San José R, Grimmond CSB, Jones MB, Magliulo V, Klostermann JEM, Synnefa A, Mitraka Z, Castro EA, et al. 2013. Sustainable urban metabolism as a link between bio-physical sciences and urban planning: The BRIDGE project. *Landscape and Urban Planning* 112: 100–117.
- Chun B, Guhathakurta S. 2017. Daytime and nighttime urban heat islands statistical models for Atlanta. *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science* 44(2): 308–327.
- Chun B, Guldmann J-M. 2014. Spatial statistical analysis and simulation of the urban heat island in high-density central cities. *Landscape and Urban Planning* 125: 76–88.
- Cleveland WS. 1979. Robust locally weighted regression and smoothing scatterplots. *Journal of the American statistical association* 74(368): 829–836.
- Collins WD, Rasch PJ, Boville BA, Hack JJ, McCaa JR, Williamson DL, Kiehl JT, Briegleb B, Bitz C, Lin S-J, et al. 2004. Description of the NCAR community atmosphere model (CAM 3.0). *NCAR Tech Note NCAR/TN-464+ STR* 226.
- Coma J, Pérez G, de Gracia A, Burés S, Urrestarazu M, Cabeza LF. 2017. Vertical greenery systems for energy savings in buildings: A comparative study between green walls and green facades. *Building and environment* 111: 228–237.
- Connors JP, Galletti CS, Chow WTL. 2013. Landscape configuration and urban heat island effects: assessing the relationship between landscape characteristics and land surface temperature in Phoenix, Arizona. *Landscape Ecol* 28(2): 271–283.
- Copernicus Land Monitoring Service. n.d. Urban Atlas 2012. Available at <https://land.copernicus.eu/local/urban-atlas/urban-atlas-2012>. Accessed 2019 Mar 14.

- Crawford B, Grimmond SB, Gabey A, Marconcini M, Ward HC, Kent CW. 2018. Variability of urban surface temperatures and implications for aerodynamic energy exchange in unstable conditions. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 144(715): 1719–1741.
- Crawford B, Krayenhoff ES, Cordy P. 2018. The urban energy balance of a lightweight low-rise neighborhood in Andacollo, Chile. *Theor Appl Climatol* 131(1): 55–68.
- Daglis IA, Rapsomanikis S, Kourtidis K, Melas D, Papayannis A, Keramitsoglou I, Giannaros T, Amiridis V, Petropoulos G, Georgoulas A, et al. 2010. Results of the DUE THERMOPOLIS campaign with regard to the urban heat island (UHI) effect in Athens. Proc. ESA Living Planet Symposium.
- Dandou A, Tombrou M, Akylas E, Soulakellis N, Bossioli E. 2005. Development and evaluation of an urban parameterization scheme in the Penn State/NCAR Mesoscale Model (MM5). *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 110(D10).
- Dandou A, Tombrou M, Soulakellis N. 2009. The Influence of the City of Athens on the Evolution of the Sea-Breeze Front. *Boundary-Layer Meteorol* 131(1): 35–51.
- Danylo O, See L, Bechtel B, Schepaschenko D, Fritz S. 2016. Contributing to WUDAPT: A Local Climate Zone Classification of Two Cities in Ukraine. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing* 9(5): 1841–1853.
- De Ridder K. 2010. Bulk Transfer Relations for the Roughness Sublayer. *Boundary-Layer Meteorol* 134(2): 257–267.
- De Ridder K, Lauwaet D, Maiheu B. 2015. UrbClim – A fast urban boundary layer climate model. *Urban Climate* 12: 21–48.
- Dieleman F, Wegener M. 2004 Dec 1. Compact City and Urban Sprawl. doi: info:doi/10.2148/benv.30.4.308.57151
- Doll D, Ching JKS, Kaneshiro J. 1985. Parameterization of subsurface heating for soil and concrete using net radiation data. *Boundary-Layer Meteorol* 32(4): 351–372.
- Dominguez A, Kleissl J, Luvall JC, Rickman DL. 2011. High-resolution urban thermal sharpener (HUTS). *Remote Sensing of Environment* 115(7): 1772–1780.
- Dong Y, Varquez ACG, Kanda M. 2017. Global anthropogenic heat flux database with high spatial resolution. *Atmospheric Environment* 150: 276–294.
- Du S, Xiong Z, Wang Y-C, Guo L. 2016. Quantifying the multilevel effects of landscape composition and configuration on land surface temperature. *Remote Sensing of Environment* 178: 84–92.
- Duan S, Li Z. 2016. Spatial Downscaling of MODIS Land Surface Temperatures Using Geographically Weighted Regression: Case Study in Northern China. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 54(11): 6458–6469.
- Duan S-B, Li Z-L, Li H, Götsche F-M, Wu H, Zhao W, Leng P, Zhang X, Coll C. 2019. Validation of Collection 6 MODIS land surface temperature product using in situ measurements. *Remote Sensing of Environment* 225: 16–29.
- Duan S-B, Li Z-L, Wu H, Leng P, Gao M, Wang C. 2018. Radiance-based validation of land surface temperature products derived from Collection 6 MODIS thermal infrared data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 70: 84–92.
- Dudhia J. 1989. Numerical study of convection observed during the winter monsoon experiment using a mesoscale two-dimensional model. *Journal of the atmospheric sciences* 46(20): 3077–3107.

- Dupont S, Otte TL, Ching JKS. 2004. Simulation of Meteorological Fields Within and Above Urban and Rural Canopies with a Mesoscale Model. *Boundary-Layer Meteorology* 113(1): 111–158.
- EMEP/EEA. 2016. EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook - 2016. European Environment Agency. Available at <https://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-guidebook-2016>. Accessed 2019 Mar 12.
- Eskeland GS, Mideksa TK. 2010. Electricity demand in a changing climate. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* 15(8): 877–897.
- Essa W, van der Kwast J, Verbeiren B, Batelaan O. 2013. Downscaling of thermal images over urban areas using the land surface temperature–impervious percentage relationship. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 23: 95–108.
- Essa W, Verbeiren B, van der Kwast J, Van de Voorde T, Batelaan O. 2012. Evaluation of the DisTrad thermal sharpening methodology for urban areas. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 19: 163–172.
- Essa W, Verbeiren B, Van der Kwast J, Batelaan O. 2017. Improved DisTrad for Downscaling Thermal MODIS Imagery over Urban Areas. *Remote Sensing* 9(12): 1243.
- European Automobile Manufacturers Association (ACEA). 2017. ACEA Report Vehicles in use Europe 2017. Available at https://www.acea.be/uploads/statistic_documents/ACEA_Report_Vehicles_in_use-Europe_2017.pdf. Accessed 2019 Mar 12.
- European Commission. 2012. Mapping Guide for a European Urban Atlas. Copernicus. Available at <https://land.copernicus.eu/user-corner/technical-library/urban-atlas-mapping-guide>. Accessed 2018 Apr 11.
- Fabrizi R, Bonafoni S, Biondi R. 2010. Satellite and ground-based sensors for the urban heat island analysis in the city of Rome. *Remote Sensing* 2(5): 1400–1415.
- Fameli K-M, Assimakopoulos VD. 2016. The new open Flexible Emission Inventory for Greece and the Greater Athens Area (FEI-GREGAA): Account of pollutant sources and their importance from 2006 to 2012. *Atmospheric Environment* 137: 17–37.
- Feigenwinter C, Vogt R, Parlow E, Lindberg F, Marconcini M, Frate FD, Chrysoulakis N. 2018. Spatial Distribution of Sensible and Latent Heat Flux in the City of Basel (Switzerland). *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing* 11(8): 2717–2723.
- Fenner D, Meier F, Bechtel B, Otto M, Scherer D. 2017 Nov 24. Intra and inter ‘local climate zone’ variability of air temperature as observed by crowdsourced citizen weather stations in Berlin, Germany. *Meteorologische Zeitschrift*: 525–547.
- Ferrari C, Libbra A, Cernuschi FM, De Maria L, Marchionna S, Barozzi M, Siligardi C, Muscio A. 2016. A composite cool colored tile for sloped roofs with high ‘equivalent’ solar reflectance. *Energy and Buildings* 114: 221–226.
- Foken T. 2006. 50 years of the Monin–Obukhov similarity theory. *Boundary-Layer Meteorology* 119(3): 431–447.
- Foken T. 2008. The energy balance closure problem: an overview. *Ecological Applications* 18(6): 1351–1367.
- Fortuniak K, Kłysik K, Wibig J. 2006. Urban–rural contrasts of meteorological parameters in Łódź. *Theor Appl Climatol* 84(1): 91–101.
- Fouillet A, Rey G, Laurent F, Pavillon G, Bellec S, Guihenneuc-Jouyaux C, Clavel J, Jouglé E, Hémon D. 2006. Excess mortality related to the August 2003 heat wave in France. *Int Arch Occup Environ Health* 80(1): 16–24.

- Founda D. 2011. Evolution of the air temperature in Athens and evidence of climatic change: A review. *Advances in Building Energy Research* 5(1): 7–41.
- Founda D, Papadopoulos K, Petrakis M, Giannakopoulos C, Good P. 2004. Analysis of mean, maximum, and minimum temperature in Athens from 1897 to 2001 with emphasis on the last decade: trends, warm events, and cold events. *Global and Planetary change* 44(1–4): 27–38.
- Founda D, Santamouris M. 2017. Synergies between Urban Heat Island and Heat Waves in Athens (Greece), during an extremely hot summer (2012). *Scientific Reports* 7(1): 10973.
- Franco DMP, Andrade M de F, Ynoue RY, Ching J. 2019. Effect of Local Climate Zone (LCZ) classification on ozone chemical transport model simulations in Sao Paulo, Brazil. *Urban Climate* 27: 293–313.
- Frey CM, Parlow E. 2012. Flux measurements in Cairo. Part 2: On the determination of the spatial radiation and energy balance using ASTER satellite data. *Remote sensing* 4(9): 2635–2660.
- Friedl MA, Sulla-Menashe D, Tan B, Schneider A, Ramankutty N, Sibley A, Huang X. 2010. MODIS Collection 5 global land cover: Algorithm refinements and characterization of new datasets. *Remote sensing of Environment* 114(1): 168–182.
- Fuchs M, Hadas A. 1972. The heat flux density in a non-homogeneous bare loessial soil. *Boundary-layer meteorology* 3(2): 191–200.
- Gabey AM, Grimmond CSB, Capel-Timms I. 2019. Anthropogenic heat flux: advisable spatial resolutions when input data are scarce. *Theor Appl Climatol* 135(1): 791–807.
- Gaitani N, Spanou A, Saliari M, Synnefa A, Vassilakopoulou K, Papadopoulou K, Pavlou K, Santamouris M, Papaioannou M, Lagoudaki A. 2011. Improving the microclimate in urban areas: a case study in the centre of Athens. *Building Services Engineering Research and Technology* 32(1): 53–71.
- Galletti CS, Li X, Connors JP. 2019. Establishing the relationship between urban land-cover configuration and night time land-surface temperature using spatial regression. *International Journal of Remote Sensing* 40(17): 6752–6774. doi: 10.1080/01431161.2019.1594432
- Gallo KP, McNab AL, Karl TR, Brown JF, Hood JJ, Tarpley JD. 1993. The use of a vegetation index for assessment of the urban heat island effect. *International Journal of Remote Sensing* 14(11): 2223–2230. doi: 10.1080/01431169308954031
- Gao F, Masek J, Schwaller M, Hall F. 2006. On the blending of the Landsat and MODIS surface reflectance: Predicting daily Landsat surface reflectance. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote sensing* 44(8): 2207–2218.
- Garshasbi S, Santamouris M. 2019. Using advanced thermochromic technologies in the built environment: Recent development and potential to decrease the energy consumption and fight urban overheating. *Solar Energy Materials and Solar Cells* 191: 21–32.
- Geletič J, Lehnert M. 2016. GIS-based delineation of local climate zones: The case of medium-sized Central European cities. *Moravian Geographical Reports* 24(3): 2–12.
- Geletič J, Lehnert M, Dobrovolný P. 2016. Land Surface Temperature Differences within Local Climate Zones, Based on Two Central European Cities. *Remote Sensing* 8(10): 788.
- Georgakis C, Santamouris M. 2017. Determination of the Surface and Canopy Urban Heat Island in Athens Central Zone Using Advanced Monitoring. *Climate* 5(4): 97.
- Georgakis Ch, Santamouris M. 2006. Experimental investigation of air flow and temperature distribution in deep urban canyons for natural ventilation purposes. *Energy and Buildings* 38(4): 367–376.

- Ghosh A, Joshi PK. 2014. Hyperspectral imagery for disaggregation of land surface temperature with selected regression algorithms over different land use land cover scenes. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 96: 76–93.
- Ghosh A, Sharma R, Joshi PK. 2014. Random forest classification of urban landscape using Landsat archive and ancillary data: Combining seasonal maps with decision level fusion. *Applied Geography* 48: 31–41.
- Giannaros C, Nenes A, Giannaros TM, Kourtidis K, Melas D. 2018. A comprehensive approach for the simulation of the Urban Heat Island effect with the WRF/SLUCM modeling system: The case of Athens (Greece). *Atmospheric Research* 201: 86–101.
- Giannaros T, Melas D, Daglis I, Keramitsoglou I. 2014. Development of an operational modeling system for urban heat islands: an application to Athens, Greece. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 14(2): 347–358.
- Giannaros TM, Melas D, Daglis IA, Keramitsoglou I, Kourtidis K. 2013. Numerical study of the urban heat island over Athens (Greece) with the WRF model. *Atmospheric Environment* 73: 103–111.
- Giannopoulou K, Livada I, Santamouris M, Saliari M, Assimakopoulos M, Caouris Y. 2014. The influence of air temperature and humidity on human thermal comfort over the greater Athens area. *Sustainable Cities and Society* 10: 184–194.
- Giannopoulou K, Livada I, Santamouris M, Saliari M, Assimakopoulos M, Caouris YG. 2011. On the characteristics of the summer urban heat island in Athens, Greece. *Sustainable Cities and Society* 1(1): 16–28.
- Giannopoulou K, Santamouris M, Livada I, Georgakis C, Caouris Y. 2010. The Impact of Canyon Geometry on Intra Urban and Urban: Suburban Night Temperature Differences Under Warm Weather Conditions. *Pure Appl Geophys* 167(11): 1433–1449.
- Gillespie A, Rokugawa S, Matsunaga T, Cothorn JS, Hook S, Kahle AB. 1998. A temperature and emissivity separation algorithm for Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) images. *IEEE transactions on geoscience and remote sensing* 36(4): 1113–1126.
- Göndöcs J, Breuer H, Pongrácz R, Bartholy J. 2017. Urban heat island mesoscale modelling study for the Budapest agglomeration area using the WRF model. *Urban Climate* 21: 66–86.
- Goswami J, Roy S, Sudhakar S. 2013. A Novel Approach in Identification of Urban Hot Spot Using Geospatial Technology: A Case Study in Kamrup Metro District of Assam. *International Journal of Geosciences* 4(05): 898.
- Goward SN. 1981. Thermal Behavior of Urban Landscapes and the Urban Heat Island. *Physical Geography* 2(1): 19–33.
- Greco S, Ishizaka A, Tasiou M, Torrisi G. 2019. On the Methodological Framework of Composite Indices: A Review of the Issues of Weighting, Aggregation, and Robustness. *Soc Indic Res* 141(1): 61–94.
- Grell GA, Dévényi D. 2002. A generalized approach to parameterizing convection combining ensemble and data assimilation techniques. *Geophysical Research Letters* 29(14): 38–1.
- Grimmond CSB. 1992. The suburban energy balance: Methodological considerations and results for a mid-latitude west coast city under winter and spring conditions. *International Journal of Climatology* 12(5): 481–497.
- Grimmond CSB, Cleugh HA, Oke TR. 1991. An objective urban heat storage model and its comparison with other schemes. *Atmospheric Environment Part B Urban Atmosphere* 25(3): 311–326.
- Grimmond CSB, Oke TR. 1999a. Aerodynamic Properties of Urban Areas Derived from Analysis of Surface Form. *J Appl Meteor* 38(9): 1262–1292.

- Grimmond CSB, Oke TR. 1999b. Heat Storage in Urban Areas: Local-Scale Observations and Evaluation of a Simple Model. *J Appl Meteor* 38(7): 922–940.
- Grimmond S. 2007. Urbanization and global environmental change: local effects of urban warming. *The Geographical Journal* 173(1): 83–88.
- Grineski SE, Collins TW, Ford P, Fitzgerald R, Aldouri R, Velázquez-Angulo G, de Lourdes Romo Aguilar M, Lu D. 2012. Climate change and environmental injustice in a bi-national context. *Applied Geography* 33: 25–35.
- Guerreiro SB, Dawson RJ, Kilsby C, Lewis E, Ford A. 2018. Future heat-waves, droughts and floods in 571 European cities. *Environ Res Lett* 13(3): 034009. doi: 10.1088/1748-9326/aaaad3
- Guillevic P, Götsche F, Nickeson J, Hulley G, Ghent D, Yu Y, Trigo I, Hook S, Sobrino J, Remedios J, et al. 2018. Land Surface Temperature Product Validation Best Practice Protocol. Version 1.1. *Best Practice for Satellite-Derived Land Product Validation; Guillevic, P, Götsche, F, Nickeson, J, Román, M, Eds*: 58.
- Guo G, Zhou X, Wu Z, Xiao R, Chen Y. 2016. Characterizing the impact of urban morphology heterogeneity on land surface temperature in Guangzhou, China. *Environmental Modelling & Software* 84: 427–439. doi: 10.1016/j.envsoft.2016.06.021
- Gurjar BR, Butler TM, Lawrence MG, Lelieveld J. 2008. Evaluation of emissions and air quality in megacities. *Atmospheric Environment* 42(7): 1593–1606. doi: 10.1016/j.atmosenv.2007.10.048
- Haas J. 2016. Remote Sensing of Urbanization and Environmental Impacts [PhD Thesis]. KTH Royal Institute of Technology.
- Hamilton IG, Davies M, Steadman P, Stone A, Ridley I, Evans S. 2009. The significance of the anthropogenic heat emissions of London’s buildings: A comparison against captured shortwave solar radiation. *Building and Environment* 44(4): 807–817.
- Hammerberg K, Brousse O, Martilli A, Mahdavi A. 2018. Implications of employing detailed urban canopy parameters for mesoscale climate modelling: a comparison between WUDAPT and GIS databases over Vienna, Austria. *International Journal of Climatology* 38(S1): e1241–e1257.
- Harman IN. 2003. The energy balance of urban areas [PhD Thesis]. University of Reading.
- Hassid S, Santamouris M, Papanikolaou N, Linardi A, Klitsikas N, Georgakis C, Assimakopoulos DN. 2000. The effect of the Athens heat island on air conditioning load. *Energy and Buildings* 32(2): 131–141.
- Hauser DP. 1974. Some Problems in the Use of Stepwise Regression Techniques in Geographical Research. *The Canadian Geographer / Le Géographe canadien* 18(2): 148–158.
- Heaviside C, Tsangari H, Paschalidou A, Vardoulakis S, Kassomenos P, Georgiou KE, Yamasaki EN. 2016. Heat-related mortality in Cyprus for current and future climate scenarios. *Science of The Total Environment* 569–570: 627–633.
- Hecht-Nielsen R. 1992. Theory of the backpropagation neural network. In: *Neural Networks for Perception*. Elsevier. p. 65–93.
- Heiple S, Sailor DJ. 2008. Using building energy simulation and geospatial modeling techniques to determine high resolution building sector energy consumption profiles. *Energy and buildings* 40(8): 1426–1436.
- Hirano Y, Fujita T. 2012. Evaluation of the impact of the urban heat island on residential and commercial energy consumption in Tokyo. *Energy* 37(1): 371–383.
- Hoerl AE, Kennard RW. 1970. Ridge regression: Biased estimation for nonorthogonal problems. *Technometrics* 12(1): 55–67.

- Hong S-Y, Dudhia J, Chen S-H. 2004. A revised approach to ice microphysical processes for the bulk parameterization of clouds and precipitation. *Monthly Weather Review* 132(1): 103–120.
- Hong S-Y, Lim J-OJ. 2006. The WRF single-moment 6-class microphysics scheme (WSM6). *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences* 42(2): 129–151.
- Hong S-Y, Noh Y, Dudhia J. 2006. A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes. *Monthly weather review* 134(9): 2318–2341.
- Hong S-Y, Pan H-L. 1996. Nonlocal boundary layer vertical diffusion in a medium-range forecast model. *Monthly weather review* 124(10): 2322–2339.
- van Hove LWA, Jacobs CMJ, Heusinkveld BG, Elbers JA, van Driel BL, Holtslag AAM. 2015. Temporal and spatial variability of urban heat island and thermal comfort within the Rotterdam agglomeration. *Building and Environment* 83: 91–103.
- Howard L. 1818. *The Climate of London*. W. Phillips, sold also by J. and A. Arch. (Vol. 1).
- Hu D, Yang L, Zhou J, Deng L. 2012. Estimation of urban energy heat flux and anthropogenic heat discharge using aster image and meteorological data: case study in Beijing metropolitan area. *JARS* 6(1): 063559.
- Hu L, Monaghan A, Voogt JA, Barlage M. 2016. A first satellite-based observational assessment of urban thermal anisotropy. *Remote Sensing of Environment* 181: 111–121.
- Hu X, Xu H. 2018. A new remote sensing index for assessing the spatial heterogeneity in urban ecological quality: A case from Fuzhou City, China. *Ecological Indicators* 89: 11–21.
- Hudson G, Wackernagel H. 1994. Mapping temperature using kriging with external drift: theory and an example from Scotland. *International journal of Climatology* 14(1): 77–91.
- Huete AR. 1988. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environment* 25(3): 295–309.
- Hulley GC, Hook SJ, Abbott E, Malakar N, Islam T, Abrams M. 2015. The ASTER Global Emissivity Dataset (ASTER GED): Mapping Earth's emissivity at 100 meter spatial scale. *Geophysical Research Letters* 42(19): 7966–7976.
- Hutengs C, Vohland M. 2016. Downscaling land surface temperatures at regional scales with random forest regression. *Remote Sensing of Environment* 178: 127–141.
- Iamarino M, Beevers S, Grimmond CSB. 2012. High-resolution (space, time) anthropogenic heat emissions: London 1970–2025. *International Journal of Climatology* 32(11): 1754–1767.
- Ichinose T, Shimodozono K, Hanaki K. 1999. Impact of anthropogenic heat on urban climate in Tokyo. *Atmospheric Environment* 33(24): 3897–3909.
- Imhoff ML, Zhang P, Wolfe RE, Bounoua L. 2010. Remote sensing of the urban heat island effect across biomes in the continental USA. *Remote Sensing of Environment* 114(3): 504–513.
- Jacovides CP, Tymvios FS, Assimakopoulos VD, Kaltsounides NA. 2007. The dependence of global and diffuse PAR radiation components on sky conditions at Athens, Greece. *Agricultural and Forest Meteorology* 143(3): 277–287.
- Jagai JS, Grossman E, Navon L, Sambanis A, Dorevitch S. 2017. Hospitalizations for heat-stress illness varies between rural and urban areas: an analysis of Illinois data, 1987–2014. *Environmental Health* 16(1): 38.
- Jakovljevic B, Paunovic K, Belojevic G. 2009. Road-traffic noise and factors influencing noise annoyance in an urban population. *Environment International* 35(3): 552–556.

- Janjić ZI. 1994. The step-mountain eta coordinate model: Further developments of the convection, viscous sublayer, and turbulence closure schemes. *Monthly weather review* 122(5): 927–945.
- Janjić ZI. 2002. Nonsingular implementation of the Mellor-Yamada level 2.5 scheme in the NCEP meso model. *NCEP Office Note* 437: 61.
- Jarvis P. 1976. The interpretation of the variations in leaf water potential and stomatal conductance found in canopies in the field. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London B, Biological Sciences* 273(927): 593–610.
- Jeganathan C, Hamm NAS, Mukherjee S, Atkinson PM, Raju PLN, Dadhwal VK. 2011. Evaluating a thermal image sharpening model over a mixed agricultural landscape in India. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 13(2): 178–191.
- Jhaldiyal A, Gupta K, Gupta PK, Thakur P, Kumar P. 2018. Urban Morphology Extractor: A spatial tool for characterizing urban morphology. *Urban Climate* 24: 237–246.
- Jiang L, Zhan W, Voogt J, Zhao L, Gao L, Huang F, Cai Z, Ju W. 2018. Remote estimation of complete urban surface temperature using only directional radiometric temperatures. *Building and Environment* 135: 224–236.
- Jiménez-Muñoz JC, Sobrino JA. 2003. A generalized single-channel method for retrieving land surface temperature from remote sensing data. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 108(D22).
- Jiménez-Muñoz JC, Sobrino JA. 2008. Split-Window Coefficients for Land Surface Temperature Retrieval From Low-Resolution Thermal Infrared Sensors. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters* 5(4): 806–809.
- Jiménez-Muñoz JC, Sobrino JA, Gillespie A, Sabol D, Gustafson WT. 2006. Improved land surface emissivities over agricultural areas using ASTER NDVI. *Remote Sensing of Environment* 103(4): 474–487.
- Johnson GT, Oke TR, Lyons TJ, Steyn DG, Watson ID, Voogt JA. 1991. Simulation of surface urban heat islands under ‘IDEAL’ conditions at night part 1: Theory and tests against field data. *Boundary-Layer Meteorol* 56(3): 275–294.
- Johnson MP. 2001. Environmental Impacts of Urban Sprawl: A Survey of the Literature and Proposed Research Agenda. *Environ Plan A* 33(4): 717–735.
- Jolliffe IT, Cadima J. 2016. Principal component analysis: a review and recent developments. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 374(2065): 20150202.
- Kain JS. 2004. The Kain–Fritsch convective parameterization: an update. *Journal of applied meteorology* 43(1): 170–181.
- Kallos G, Kassomenos P, Pielke RA. 1993. Synoptic and Mesoscale Weather Conditions During Air Pollution Episodes in Athens, Greece. In: Kaplan H, Dinar N, Lacser A, Alexander Y, editors. *Transport and Diffusion in Turbulent Fields: Modeling and Measurement Techniques*. Dordrecht: Springer Netherlands. p. 163–184.
- Kalogirou S. 2011. Spatial inequalities and interpretative factors for the geographical distribution of declared income in Greece. *Aihoros* 11: 68–101.
- Kaloustian N, Bechtel B. 2016. Local Climatic Zoning and Urban Heat Island in Beirut. *Procedia Engineering* 169: 216–223.
- Kanda M, Inagaki A, Miyamoto T, Gryschka M, Raasch S. 2013. A New Aerodynamic Parametrization for Real Urban Surfaces. *Boundary-Layer Meteorol* 148(2): 357–377.
- Kanda M, Kanega M, Kawai T, Moriwaki R, Sugawara H. 2007. Roughness Lengths for Momentum and Heat Derived from Outdoor Urban Scale Models. *J Appl Meteor Climatol* 46(7): 1067–1079.

- Kanda M, Kawai T, Nakagawa K. 2005. A Simple Theoretical Radiation Scheme for Regular Building Arrays. *Boundary-Layer Meteorol* 114(1): 71–90.
- Karapiperis PP. 1954. Trends in athens temperature. *Geofisica Pura e Applicata* 29(1): 212–217.
- Karlessi T, Santamouris M, Apostolakis K, Synnefa A, Livada I. 2009. Development and testing of thermochromic coatings for buildings and urban structures. *Solar Energy* 83(4): 538–551.
- Kassomenos PA, Katsoulis BD. 2006. Mesoscale and macroscale aspects of the morning Urban Heat Island around Athens, Greece. *Meteorol Atmos Phys* 94(1): 209–218.
- Kato S, Yamaguchi Y. 2005. Analysis of urban heat-island effect using ASTER and ETM+ Data: Separation of anthropogenic heat discharge and natural heat radiation from sensible heat flux. *Remote Sensing of Environment* 99(1): 44–54.
- Kato S, Yamaguchi Y, Liu C-C, Sun C-Y. 2008. Surface Heat Balance Analysis of Tainan City on March 6, 2001 Using ASTER and Formosat-2 Data. *Sensors* 8(9): 6026–6044.
- Katsoulis BD. 1987. Indications of change of climate from the analysis of air temperature time series in Athens, Greece. *Climatic Change* 10(1): 67–79.
- Katsoulis BD, Theoharatos GA. 1985. Indications of the Urban Heat Island in Athens, Greece. *J Climate Appl Meteor* 24(12): 1296–1302.
- Kawai T, Ridwan MK, Kanda M. 2009. Evaluation of the Simple Urban Energy Balance Model Using Selected Data from 1-yr Flux Observations at Two Cities. *J Appl Meteor Climatol* 48(4): 693–715.
- Kennedy C, Cuddihy J, Engel-Yan J. 2007. The Changing Metabolism of Cities. *Journal of Industrial Ecology* 11(2): 43–59.
- Kent CW, Grimmond S, Gatey D. 2017. Aerodynamic roughness parameters in cities: Inclusion of vegetation. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 169: 168–176.
- Keramitsoglou I, Kiranoudis CT, Ceriola G, Weng Q, Rajasekar U. 2011. Identification and analysis of urban surface temperature patterns in Greater Athens, Greece, using MODIS imagery. *Remote Sensing of Environment* 115(12): 3080–3090.
- Keramitsoglou I, Kiranoudis CT, Weng Q. 2013. Downscaling Geostationary Land Surface Temperature Imagery for Urban Analysis. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters* 10(5): 1253–1257.
- Kikegawa Y, Genchi Y, Yoshikado H, Kondo H. 2003. Development of a numerical simulation system toward comprehensive assessments of urban warming countermeasures including their impacts upon the urban buildings' energy-demands. *Applied Energy* 76(4): 449–466.
- Kolokotsa D, Santamouris M, Zerefos S. 2013. Green and cool roofs' urban heat island mitigation potential in European climates for office buildings under free floating conditions. *Solar Energy* 95: 118–130.
- Kondo A, Ueno M, Kaga A, Yamaguchi K. 2001. The Influence Of Urban Canopy Configuration On Urban Albedo. *Boundary-Layer Meteorology* 100(2): 225–242.
- Kormann R, Meixner FX. 2001. An Analytical Footprint Model For Non-Neutral Stratification. *Boundary-Layer Meteorology* 99(2): 207–224.
- Kosatsky T, Henderson SB, Pollock SL. 2012. Shifts in Mortality During a Hot Weather Event in Vancouver, British Columbia: Rapid Assessment With Case-Only Analysis. *Am J Public Health* 102(12): 2367–2371.
- Kotroni V, Kallos G, Lagouvardos K, Varinou M, Walko R. 1999. Numerical Simulations of the Meteorological and Dispersion Conditions during an Air Pollution Episode over Athens, Greece. *J Appl Meteor* 38(4): 432–447.

- Kotroni V, Lagouvardos K, Retalis A. 2011. The heat wave of June 2007 in Athens, Greece – Part 2: Modeling study and sensitivity experiments. *Atmospheric Research* 100(1): 1–11.
- Kottek M, Grieser J, Beck C, Rudolf B, Rubel F. 2006. World map of the Köppen-Geiger climate classification updated. *Meteorologische Zeitschrift* 15(3): 259–263.
- Kotthaus S, Smith TEL, Wooster MJ, Grimmond CSB. 2014. Derivation of an urban materials spectral library through emittance and reflectance spectroscopy. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 94: 194–212.
- Kourtidis K, Georgoulas AK, Rapsomanikis S, Amiridis V, Keramitsoglou I, Hooyberghs H, Maiheu B, Melas D. 2015. A study of the hourly variability of the urban heat island effect in the Greater Athens Area during summer. *Sci Total Environ* 517: 162–177.
- Krayenhoff ES, Voogt JA. 2007. A microscale three-dimensional urban energy balance model for studying surface temperatures. *Boundary-Layer Meteorol* 123(3): 433–461.
- Krayenhoff ES, Voogt JA. 2016. Daytime Thermal Anisotropy of Urban Neighbourhoods: Morphological Causation. *Remote Sensing* 8(2): 108.
- Krefis AC, Schwarz NG, Nkrumah B, Acquah S, Loag W, Sarpong N, Adu-Sarkodie Y, Ranft U, May J. 2010. Principal component analysis of socioeconomic factors and their association with malaria in children from the Ashanti Region, Ghana. *Malaria Journal* 9(1): 201.
- Kuenzer C, Dech S, editors. 2013. *Thermal Infrared Remote Sensing: Sensors, Methods, Applications*. Springer Netherlands. (Remote Sensing and Digital Image Processing). Available at <https://www.springer.com/gp/book/9789400766389>. Accessed 2019 Feb 27.
- Kusaka H, Chen F, Bao J, Tewari M, Hirakuchi H. 2004. Simulation of the urban heat island effects over the Greater Houston Area with the high resolution WRF/LSM/Urban coupled system. *Simulation* 1: 4.
- Kusaka H, Kondo H, Kikegawa Y, Kimura F. 2001. A Simple Single-Layer Urban Canopy Model For Atmospheric Models: Comparison With Multi-Layer And Slab Models. *Boundary-Layer Meteorology* 101(3): 329–358.
- Kustas WP, Norman JM, Anderson MC, French AN. 2003. Estimating subpixel surface temperatures and energy fluxes from the vegetation index–radiometric temperature relationship. *Remote Sensing of Environment* 85(4): 429–440.
- Kyriakodis G-E, Santamouris M. 2018. Using reflective pavements to mitigate urban heat island in warm climates - Results from a large scale urban mitigation project. *Urban Climate* 24: 326–339.
- Lagouvardos K, Kotroni V, Bezes A, Koletsis I, Kopania T, Lykoudis S, Mazarakis N, Papagiannaki K, Vougioukas S. 2017. The automatic weather stations NOANN network of the National Observatory of Athens: operation and database. *Geoscience Data Journal* 4(1): 4–16.
- Laskari M, Karatasou S, Santamouris M. 2017. A methodology for the determination of indoor environmental quality in residential buildings through the monitoring of fundamental environmental parameters: A proposed Dwelling Environmental Quality Index. *Indoor and Built Environment* 26(6): 813–827.
- Lemonsu A, Grimmond CSB, Masson V. 2004. Modeling the Surface Energy Balance of the Core of an Old Mediterranean City: Marseille. *J Appl Meteor* 43(2): 312–327.
- Leontidou L, Emmanuel LL, Lila L. 1990. *The Mediterranean City in Transition: Social Change and Urban Development*. Cambridge University Press.
- LeSage J, Pace RK. 2009. *Introduction to Spatial Econometrics*. Chapman and Hall/CRC.

- Levinson R, Berdahl P, Akbari H, Miller W, Joedicke I, Reilly J, Suzuki Y, Vondran M. 2007. Methods of creating solar-reflective nonwhite surfaces and their application to residential roofing materials. *Solar Energy Materials and Solar Cells* 91(4): 304–314.
- Li D, Bou-Zeid E. 2013. Synergistic Interactions between Urban Heat Islands and Heat Waves: The Impact in Cities Is Larger than the Sum of Its Parts. *J Appl Meteor Climatol* 52(9): 2051–2064.
- Li D, Bou-Zeid E. 2014. Quality and sensitivity of high-resolution numerical simulation of urban heat islands. *Environ Res Lett* 9(5): 055001.
- Li H, Zhou Y, Wang X, Zhou X, Zhang H, Sodoudi S. 2019. Quantifying urban heat island intensity and its physical mechanism using WRF/UCM. *Science of The Total Environment* 650: 3110–3119.
- Li J, Song C, Cao L, Zhu F, Meng X, Wu J. 2011. Impacts of landscape structure on surface urban heat islands: A case study of Shanghai, China. *Remote Sensing of Environment* 115(12): 3249–3263.
- Li Z-L, Tang B-H, Wu H, Ren H, Yan G, Wan Z, Trigo IF, Sobrino JA. 2013. Satellite-derived land surface temperature: Current status and perspectives. *Remote sensing of environment* 131: 14–37.
- Li Z-L, Wu H, Wang N, Qiu S, Sobrino JA, Wan Z, Tang B-H, Yan G. 2013. Land surface emissivity retrieval from satellite data. *International Journal of Remote Sensing* 34(9–10): 3084–3127.
- Liang S. 2001. Narrowband to broadband conversions of land surface albedo I: Algorithms. *Remote Sensing of Environment* 76(2): 213–238.
- Lindberg F, Grimmond CSB, Gabey A, Huang B, Kent CW, Sun T, Theeuwes NE, Järvi L, Ward HC, Capel-Timms I, et al. 2018. Urban Multi-scale Environmental Predictor (UMEP): An integrated tool for city-based climate services. *Environmental Modelling & Software* 99: 70–87.
- Lindberg F, Grimmond CSB, Martilli A. 2015. Sunlit fractions on urban facets – Impact of spatial resolution and approach. *Urban Climate* 12: 65–84.
- Lindberg F, Grimmond CSB, Yogeswaran N, Kotthaus S, Allen L. 2013. Impact of city changes and weather on anthropogenic heat flux in Europe 1995–2015. *Urban Climate* 4: 1–15.
- Liu HQ, Huete A. 1995. A feedback based modification of the NDVI to minimize canopy background and atmospheric noise. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 33(2): 457–465.
- Liu K, Fang J, Zhao D, Liu X, Zhang X, Wang X, Li X. 2016. An Assessment of Urban Surface Energy Fluxes Using a Sub-Pixel Remote Sensing Analysis: A Case Study in Suzhou, China. *ISPRS International Journal of Geo-Information* 5(2): 11.
- Liu S, Lu L, Mao D, Jia L. 2007. Evaluating parameterizations of aerodynamic resistance to heat transfer using field measurements. *Hydrology and Earth System Sciences* 11(2): 769–783.
- Liu Y, Chen F, Warner T, Basara J. 2006. Verification of a Mesoscale Data-Assimilation and Forecasting System for the Oklahoma City Area during the Joint Urban 2003 Field Project. *J Appl Meteor Climatol* 45(7): 912–929.
- Livada I, Santamouris M, Niachou K, Papanikolaou N, Mihalakakou G. 2002. Determination of places in the great Athens area where the heat island effect is observed. *Theor Appl Climatol* 71(3): 219–230.
- Lontorfos V, Efthymiou C, Santamouris M. 2018. On the time varying mitigation performance of reflective geoeengineering technologies in cities. *Renewable Energy* 115: 926–930.
- Loupa G, Rapsomanikis S, Trepekli A, Kourtidis K. 2016. Energy flux parametrization as an opportunity to get Urban Heat Island insights: The case of Athens, Greece (Thermopolis 2009 Campaign). *Science of The Total Environment* 542: 136–143.

- Macdonald RW, Griffiths RF, Hall DJ. 1998. An improved method for the estimation of surface roughness of obstacle arrays. *Atmospheric Environment* 32(11): 1857–1864.
- Magli S, Lodi C, Lombroso L, Muscio A, Teggi S. 2015. Analysis of the urban heat island effects on building energy consumption. *Int J Energy Environ Eng* 6(1): 91–99.
- Maloutas T. 2000. The Social and Economic Atlas of Greece, Volume I: The Cities National Centre for Social Research. *EKKE-University of Thessaly Press, Athens/Volos*, in press.
- Maloutas T. 2015. Socio-economic segregation in Athens at the beginning of the twenty-first century. *Socio-Economic Segregation in European Capital Cities: East Meets West Routledge, Milton Park*: 156–185.
- Mantouvalou M, Mavridou M, Vaiou D. 1995. Processes of social integration and urban development in Greece: southern challenges to European unification. *European Planning Studies* 3(2): 189–204.
- Martilli A, Clappier A, Rotach MW. 2002. An Urban Surface Exchange Parameterisation for Mesoscale Models. *Boundary-Layer Meteorology* 104(2): 261–304.
- Masson V. 2000. A Physically-Based Scheme For The Urban Energy Budget In Atmospheric Models. *Boundary-Layer Meteorology* 94(3): 357–397.
- Mauree D, Blond N, Clappier A. 2018. Multi-scale modeling of the urban meteorology: Integration of a new canopy model in the WRF model. *Urban Climate* 26: 60–75.
- Mavrakou T, Polydoros A, Cartalis C, Santamouris M. 2018. Recognition of Thermal Hot and Cold Spots in Urban Areas in Support of Mitigation Plans to Counteract Overheating: Application for Athens. *Climate* 6(1): 16.
- Merlin O, Duchemin B, Hagolle O, Jacob F, Coudert B, Chehbouni G, Dedieu G, Garatuza J, Kerr Y. 2010. Disaggregation of MODIS surface temperature over an agricultural area using a time series of Formosat-2 images. *Remote Sensing of Environment* 114(11): 2500–2512.
- Mesinger F, Chou SC, Gomes JL, Jovic D, Bastos P, Bustamante JF, Lazic L, Lyra AA, Morelli S, Ristic I, et al. 2012. An upgraded version of the Eta model. *Meteorology and Atmospheric Physics* 116(3–4): 63–79.
- Meyn SK, Oke T. 2009. Heat fluxes through roofs and their relevance to estimates of urban heat storage. *Energy and Buildings* 41(7): 745–752.
- Mihalakakou G, Flocas HA, Santamouris M, Helmis CG. 2002. Application of Neural Networks to the Simulation of the Heat Island over Athens, Greece, Using Synoptic Types as a Predictor. *J Appl Meteor* 41(5): 519–527.
- Mihalakakou G, Santamouris M, Papanikolaou N, Cartalis C, Tsangrassoulis A. 2004. Simulation of the Urban Heat Island Phenomenon in Mediterranean Climates. *Pure appl geophys* 161(2): 429–451.
- Mills G. 2007. Cities as agents of global change. *International Journal of Climatology* 27(14): 1849–1857.
- Mills G, Ching J, See L, Bechtel B, Foley M. 2015. An Introduction to the WUDAPT project. Proceedings of the 9th International Conference on Urban Climate, Toulouse, France: 20–24.
- Milner J, Harpham C, Taylor J, Davies M, Le Quéré C, Haines A, Wilkinson P. 2017. The challenge of urban heat exposure under climate change: An analysis of cities in the Sustainable Healthy Urban Environments (SHUE) database. *Climate* 5(4): 93.
- Minsky M, Papert SA. 2017. Perceptrons: An Introduction to Computational Geometry. MIT press.
- Mitchell BC, Chakraborty J. 2015. Landscapes of thermal inequity: disproportionate exposure to urban heat in the three largest US cities. *Environmental Research Letters* 10(11): 115005.

- Mitraka Z, Chrysoulakis N, Doxani G, Del Frate F, Berger M. 2015. Urban Surface Temperature Time Series Estimation at the Local Scale by Spatial-Spectral Unmixing of Satellite Observations. *Remote Sensing* 7(4): 4139–4156.
- Mitraka Z, Chrysoulakis N, Kamarianakis Y, Partsinevelos P, Tsouchlaraki A. 2012. Improving the estimation of urban surface emissivity based on sub-pixel classification of high resolution satellite imagery. *Remote Sensing of Environment* 117: 125–134.
- Mitraka Z, Del Frate F, Chrysoulakis N, Gastellu-Etchegorry J-P. 2015. Exploiting earth observation data products for mapping local climate zones. Urban Remote Sensing Event (JURSE), 2015 Joint: 1–4. IEEE.
- Mitraka Z, Doxani G, Frate FD, Chrysoulakis N. 2016. Uncertainty Estimation of Local-Scale Land Surface Temperature Products Over Urban Areas Using Monte Carlo Simulations. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters* 13(7): 917–921.
- Mlawer EJ, Taubman SJ, Brown PD, Iacono MJ, Clough SA. 1997. Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 102(D14): 16663–16682.
- Molnár G, Gyöngyösi AZ, Gál T. 2019. Integration of an LCZ-based classification into WRF to assess the intra-urban temperature pattern under a heatwave period in Szeged, Hungary. *Theor Appl Climatol* 138(1): 1139–1158.
- Moriwaki R, Kanda M, Senoo H, Hagishima A, Kinouchi T. 2008. Anthropogenic water vapor emissions in Tokyo. *Water Resources Research* 44(11).
- Morris CJG, Simmonds I, Plummer N. 2001. Quantification of the Influences of Wind and Cloud on the Nocturnal Urban Heat Island of a Large City. *J Appl Meteor* 40(2): 169–182.
- Mukherjee S, Joshi P, Garg R. 2014. A comparison of different regression models for downscaling Landsat and MODIS land surface temperature images over heterogeneous landscape. *Advances in Space Research* 54(4): 655–669.
- Mukherjee S, Joshi PK, Garg RD. 2015. Regression-Kriging Technique to Downscale Satellite-Derived Land Surface Temperature in Heterogeneous Agricultural Landscape. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing* 8(3): 1245–1250.
- Myint SW, Wentz EA, Brazel AJ, Quattrochi DA. 2013. The impact of distinct anthropogenic and vegetation features on urban warming. *Landscape Ecol* 28(5): 959–978.
- Nastos PT, Matzarakis A. 2012. The effect of air temperature and human thermal indices on mortality in Athens, Greece. *Theor Appl Climatol* 108(3): 591–599.
- Ng E, Ren C, Katschnner L, Yau R. 2008. Urban climatic studies for hot and humid tropical coastal city of Hong Kong. 5 th Japanese-German Meeting on Urban Climatology: 265.
- Ng S. 2013. Variable selection in predictive regressions. In: *Handbook of Economic Forecasting*. Elsevier. p. 752–789.
- Nice KA, Coutts AM, Tapper NJ. 2018. Development of the VTUF-3D v1.0 urban micro-climate model to support assessment of urban vegetation influences on human thermal comfort. *Urban Climate* 24: 1052–1076.
- Nichol J. 2009. An emissivity modulation method for spatial enhancement of thermal satellite images in urban heat island analysis. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 75(5): 547–556.
- Nishida K, Nemani RR, Running SW, Glassy JM. 2003. An operational remote sensing algorithm of land surface evaporation. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 108(D9).

- Nocedal J. 1980. Updating Quasi-Newton Matrices with Limited Storage. *Mathematics of Computation* 35(151): 773–782.
- Norton BA, Coutts AM, Livesley SJ, Harris RJ, Hunter AM, Williams NSG. 2015. Planning for cooler cities: A framework to prioritise green infrastructure to mitigate high temperatures in urban landscapes. *Landscape and Urban Planning* 134: 127–138.
- Nunez M. 1974. The energy balance of an urban canyon [PhD Thesis]. University of British Columbia.
- Offerle B, Grimmond CSB, Fortuniak K. 2005. Heat storage and anthropogenic heat flux in relation to the energy balance of a central European city centre. *International Journal of Climatology* 25(10): 1405–1419.
- Oke TR. 1982. The energetic basis of the urban heat island. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 108(455): 1–24.
- Oke TR. 1984. Methods in urban climatology. *Applied Climatology* 14: 19–29.
- Oke TR. 1988. The urban energy balance. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment* 12(4): 471–508.
- Oke TR. 1989. The micrometeorology of the urban forest. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London B, Biological Sciences* 324(1223): 335–349.
- Oke TR. 2002. *Boundary Layer Climates*. Routledge.
- Oke TR. 2004. Initial guidance to obtain representative meteorological observations at urban sites. , in press.
- Oke TR. 2007. Siting and exposure of meteorological instruments at urban sites. In: *Air Pollution Modeling and Its Application XVII*. Springer. p. 615–631.
- Oke TR, Cleugh HA. 1987. Urban heat storage derived as energy balance residuals. *Boundary-Layer Meteorol* 39(3): 233–245.
- Oke TR, Kalanda BD, Steyn DG. 1981. Parameterization of heat storage in urban areas. *Urban Ecology* 5(1): 45–54.
- Oke TR, Mills G, Christen A, Voogt JA. 2017. *Urban Climates*. Cambridge University Press.
- Oke TR, Spronken-Smith RA, Jáuregui E, Grimmond CSB. 1999. The energy balance of central Mexico City during the dry season. *Atmospheric Environment* 33(24): 3919–3930.
- Oltra-Carrió R, Sobrino JA, Franch B, Nerry F. 2012. Land surface emissivity retrieval from airborne sensor over urban areas. *Remote Sensing of Environment* 123: 298–305.
- OpenStreetMap contributors. 2019. Planet Dump Retrieved from [Https://Planet.Osm.Org](https://Planet.Osm.Org).
- Panori A. 2017. A tale of hidden cities. *REGION* 4(3): 19–38.
- Panori A, Psycharis Y, Ballas D. 2018. Spatial segregation and migration in the city of Athens: Investigating the evolution of urban socio-spatial immigrant structures. *Population, Space and Place*: e2209.
- Pantavou K, Theoharatos G, Mavrakis A, Santamouris M. 2011. Evaluating thermal comfort conditions and health responses during an extremely hot summer in Athens. *Building and Environment* 46(2): 339–344.
- Papamanolis N. 2015. The main characteristics of the urban climate and the air quality in Greek cities. *Urban Climate* 12: 49–64.

- Papangelis G, Tombrou M, Dandou A, Kontos T. 2012. An urban “green planning” approach utilizing the Weather Research and Forecasting (WRF) modeling system. A case study of Athens, Greece. *Landscape and Urban Planning* 105(1): 174–183.
- Paravantis J, Santamouris M, Cartalis C, Efthymiou C, Kontoulis N. 2017. Mortality Associated with High Ambient Temperatures, Heatwaves, and the Urban Heat Island in Athens, Greece. *Sustainability* 9(4): 606.
- Parlow E, Vogt R, Feigenwinter C. 2014. The urban heat island of Basel – seen from different perspectives. *DIE ERDE – Journal of the Geographical Society of Berlin* 145(1–2): 96–110.
- Paulson CA. 1970. The mathematical representation of wind speed and temperature profiles in the unstable atmospheric surface layer. *Journal of Applied Meteorology* 9(6): 857–861.
- Pedregosa F, Varoquaux G, Gramfort A, Michel V, Thirion B, Grisel O, Blondel M, Prettenhofer P, Weiss R, Dubourg V, et al. 2011. Scikit-learn: Machine learning in Python. *Journal of machine learning research* 12(Oct): 2825–2830.
- PEPESEC. n.d. Ενδεικτικά αποτελέσματα μετρήσεων κατανάλωσης ρεύματος στο Δήμο Αμαρουσίου (ΚΑΠΕ). Available at <http://www.cres.gr/pepsec/apotelesmata.html>. Accessed 2019 Mar 12.
- Peres LF, DaCamara CC. 2005. Emissivity maps to retrieve land-surface temperature from MSG/SEVIRI. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 43(8): 1834–1844.
- Piekorz G. 1987. Die Energiebilanz einer städtischen Struktur [PhD Thesis].
- Pigeon G, Augustin C, Legain D, Durand P, Masson V. 2004. Characteristics of the urban thermodynamic island and the energy balance on Toulouse (FRANCE) during winter and spring periods of the CAPITOUL experiment. *ENERGY*, in press.
- Pigeon G, Legain D, Durand P, Masson V. 2007. Anthropogenic heat release in an old European agglomeration (Toulouse, France). *International Journal of Climatology* 27(14): 1969–1981. doi: 10.1002/joc.1530
- Pisello AL. 2017. State of the art on the development of cool coatings for buildings and cities. *Solar Energy* 144: 660–680.
- Pisello AL, Saliari M, Vasilakopoulou K, Hadad S, Santamouris M. 2018. Facing the urban overheating: Recent developments. Mitigation potential and sensitivity of the main technologies. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Energy and Environment* 7(4): e294.
- Pleim JE. 2006. A simple, efficient solution of flux–profile relationships in the atmospheric surface layer. *Journal of applied meteorology and climatology* 45(2): 341–347.
- Polydoros A, Cartalis C. 2015. Assessing the impact of urban expansion to the state of thermal environment of peri-urban areas using indices. *Urban Climate* 14: 166–175. doi: 10.1016/j.uclim.2015.10.004
- Polydoros A, Mavrakou T, Cartalis C. 2018. Quantifying the Trends in Land Surface Temperature and Surface Urban Heat Island Intensity in Mediterranean Cities in View of Smart Urbanization. *Urban Science* 2(1): 16.
- Prieto A, Prieto B, Ortigosa EM, Ros E, Pelayo F, Ortega J, Rojas I. 2016. Neural networks: An overview of early research, current frameworks and new challenges. *Neurocomputing* 214: 242–268.
- Psiloglou BE, Giannakopoulos C, Majithia S, Petrakis M. 2009. Factors affecting electricity demand in Athens, Greece and London, UK: A comparative assessment. *Energy* 34(11): 1855–1863.
- Pyrgou A, Hadjinicolaou P, Santamouris M. 2018. Enhanced near-surface ozone under heatwave conditions in a Mediterranean island. *Scientific Reports* 8(1): 9191.
- Pyrgou A, Santamouris M. 2018. Increasing probability of heat-related mortality in a Mediterranean city due to urban warming. *International journal of environmental research and public health* 15(8): 1571.

- Qiu J, Yang J, Wang Y, Su H. 2018. A comparison of NDVI and EVI in the DisTrad model for thermal sub-pixel mapping in densely vegetated areas: a case study in Southern China. *International Journal of Remote Sensing* 39(8): 2105–2118.
- Quan J. 2019. Multi-Temporal Effects of Urban Forms and Functions on Urban Heat Islands Based on Local Climate Zone Classification. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 16(12): 2140.
- Quan J, Zhan W, Ma T, Du Y, Guo Z, Qin B. 2018. An integrated model for generating hourly Landsat-like land surface temperatures over heterogeneous landscapes. *Remote Sensing of Environment* 206: 403–423.
- Quanz JA, Ulrich S, Fenner D, Holtmann A, Eimermacher J. 2018. Micro-Scale Variability of Air Temperature within a Local Climate Zone in Berlin, Germany, during Summer. *Climate* 6(1): 5.
- Quattrochi DA, Luvall JC. 2004. *Thermal Remote Sensing in Land Surface Processing*. CRC Press.
- Rapsomanikis S, Trepekli A, Loupa G, Polyzou C. 2015. Vertical Energy and Momentum Fluxes in the Centre of Athens, Greece During a Heatwave Period (Thermopolis 2009 Campaign). *Boundary-Layer Meteorol* 154(3): 497–512.
- Raupach MR, Antonia RA, Rajagopalan S. 1991. Rough-Wall Turbulent Boundary Layers. *Appl Mech Rev* 44(1): 1–25.
- Ren C, Lau KL, Yiu KP, Ng E. 2013. The application of urban climatic mapping to the urban planning of high-density cities: The case of Kaohsiung, Taiwan. *Cities* 31: 1–16.
- Repapis C, Metaxas D. 1985. The possible influence of the urbanization in Athens city on the air temperature climatic fluctuations at the national observatory. Proc. of the 3rd Hellenic-British Climatological Congress, Athens: 188–195.
- Rikimaru A. 1997. Development of forest canopy density mapping and monitoring model using indices of vegetation, bare soil and shadow. Presented paper for the 18th ACRS. Kuala Lumpur, Malaysia.
- Roberts SM, Oke TR, Grimmond CSB, Voogt JA. 2006. Comparison of Four Methods to Estimate Urban Heat Storage. *J Appl Meteor Climatol* 45(12): 1766–1781.
- Ronda RJ, Steeneveld GJ, Heusinkveld BG, Attema JJ, Holtslag A a. M. 2017. Urban Finescale Forecasting Reveals Weather Conditions with Unprecedented Detail. *Bull Amer Meteor Soc* 98(12): 2675–2688.
- Rosenzweig C, Solecki W, Slosberg R. 2006. Mitigating New York City's heat island with urban forestry, living roofs, and light surfaces. *A report to the New York State Energy Research and Development Authority*.
- Rosenzweig C, Solecki WD, Hammer SA, Mehrotra S. 2011. *Climate Change and Cities: First Assessment Report of the Urban Climate Change Research Network*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Rossi F, Castellani B, Presciutti A, Morini E, Anderini E, Filipponi M, Nicolini A. 2016. Experimental evaluation of urban heat island mitigation potential of retro-reflective pavement in urban canyons. *Energy and Buildings* 126: 340–352.
- Roth M. 1991. Turbulent transfer characteristics over a suburban surface [PhD Thesis]. University of British Columbia.
- Roth M. 1993. Turbulent transfer relationships over an urban surface. II: Integral statistics. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 119(513): 1105–1120.
- Roth M. 2000. Review of atmospheric turbulence over cities. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 126(564): 941–990.
- Roth M, Oke T, Emery W. 1989. Satellite-derived urban heat islands from three coastal cities and the utilization of such data in urban climatology. *International Journal of Remote Sensing* 10(11): 1699–1720.

- Ruiz Hernandez IE, Shi W. 2018. A Random Forests classification method for urban land-use mapping integrating spatial metrics and texture analysis. *International Journal of Remote Sensing* 39(4): 1175–1198. =
- Saaroni H, Amorim JH, Hiemstra JA, Pearlmutter D. 2018. Urban Green Infrastructure as a tool for urban heat mitigation: Survey of research methodologies and findings across different climatic regions. *Urban Climate* 24: 94–110.
- Sailor DJ. 2011. A review of methods for estimating anthropogenic heat and moisture emissions in the urban environment. *International Journal of Climatology* 31(2): 189–199.
- Sailor DJ, Brooks A, Hart M, Heiple S. 2007. A bottom-up approach for estimating latent and sensible heat emissions from anthropogenic sources. Proceedings of the 7th Symposium on the Urban Environment, American Meteorological Society, San Diego, CA.
- Sailor DJ, Fan H. 2002. Modeling the diurnal variability of effective albedo for cities. *Atmospheric Environment* 36(4): 713–725.
- Sailor DJ, Georgescu M, Milne JM, Hart MA. 2015. Development of a national anthropogenic heating database with an extrapolation for international cities. *Atmospheric Environment* 118: 7–18.
- Sailor DJ, Lu L. 2004. A top-down methodology for developing diurnal and seasonal anthropogenic heating profiles for urban areas. *Atmospheric Environment* 38(17): 2737–2748.
- Salamanca F, Krpo A, Martilli A, Clappier A. 2009. A new building energy model coupled with an urban canopy parameterization for urban climate simulations—part I. formulation, verification, and sensitivity analysis of the model. *Theor Appl Climatol* 99(3): 331.
- Salamanca F, Zhang Y, Barlage M, Chen F, Mahalov A, Miao S. 2018. Evaluation of the WRF-Urban Modeling System Coupled to Noah and Noah-MP Land Surface Models Over a Semiarid Urban Environment. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 123(5): 2387–2408.
- Santamouris M. 2014. Cooling the cities – A review of reflective and green roof mitigation technologies to fight heat island and improve comfort in urban environments. *Solar Energy* 103: 682–703.
- Santamouris M, Cartalis C, Synnefa A, Kolokotsa D. 2015. On the impact of urban heat island and global warming on the power demand and electricity consumption of buildings—A review. *Energy and Buildings* 98: 119–124.
- Santamouris M, Mihalakakou G, Papanikolaou N, Asimakopoulos DN. 1999. A neural network approach for modeling the Heat Island phenomenon in urban areas during the summer period. *Geophysical Research Letters* 26(3): 337–340.
- Santamouris M, Papanikolaou N, Koronakis I, Livada I, Asimakopoulos D. 1999. Thermal and air flow characteristics in a deep pedestrian canyon under hot weather conditions. *Atmospheric Environment* 33(27): 4503–4521.
- Santamouris M, Synnefa A, Karlessi T. 2011. Using advanced cool materials in the urban built environment to mitigate heat islands and improve thermal comfort conditions. *Solar Energy* 85(12): 3085–3102.
- Santamouris M, Papanikolaou N, Livada I, Koronakis I, Georgakis C, Argiriou A, Assimakopoulos DN. 2001. On the impact of urban climate on the energy consumption of buildings. *Solar Energy* 70(3): 201–216.
- Sarmiento DP, Davis KJ, Deng A, Lauvaux T, Brewer A, Hardesty M. 2017. A comprehensive assessment of land surface-atmosphere interactions in a WRF/Urban modeling system for Indianapolis, IN. *Elem Sci Anth* 5(0): 23.
- Schneider A, Friedl MA, Potere D. 2009. A new map of global urban extent from MODIS satellite data. *Environ Res Lett* 4(4): 044003.

- Schultz M, Voss J, Auer M, Carter S, Zipf A. 2017. Open land cover from OpenStreetMap and remote sensing. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 63: 206–213.
- Schuster C, Honold J, Lauf S, Lakes T. 2017. Urban heat stress: Novel survey suggests health and fitness as future avenue for research and adaptation strategies. *Environmental Research Letters* 12(4): 044021.
- Schwarzkopf MD, Fels SB. 1991. The simplified exchange method revisited: An accurate, rapid method for computation of infrared cooling rates and fluxes. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 96(D5): 9075–9096.
- Shashua-Bar L, Hoffman ME. 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 and buildings* 31(3): 221–235.
- Shonkoff SB, Morello-Frosch R, Pastor M, Sadd J. 2011. The climate gap: environmental health and equity implications of climate change and mitigation policies in California—a review of the literature. *Climatic Change* 109(1): 485–503.
- Sismanidis P, Keramitsoglou I, Bechtel B, Kiranoudis CT. 2017. Improving the Downscaling of Diurnal Land Surface Temperatures Using the Annual Cycle Parameters as Disaggregation Kernels. *Remote Sensing* 9(1): 23.
- Skamarock WC, Klemp JB, Dudhia J, Gill DO, Barker DM, Wang W, Powers JG. 2008. A description of the Advanced Research WRF version 3. NCAR Technical note-475+ STR.
- Skarbit N, Stewart ID, Unger J, Gál T. 2017. Employing an urban meteorological network to monitor air temperature conditions in the ‘local climate zones’ of Szeged, Hungary. *International Journal of Climatology* 37(S1): 582–596.
- Skoulika F, Santamouris M, Kolokotsa D, Boemi N. 2014. On the thermal characteristics and the mitigation potential of a medium size urban park in Athens, Greece. *Landscape and Urban Planning* 123: 73–86.
- Smith C, Cavan G, Lindley S. 2015. Urban climatic map studies in UK: Greater Manchester. In: *The Urban Climatic Map*. Routledge. p. 313–326.
- Smith C, Lindley S, Levermore G. 2009. Estimating spatial and temporal patterns of urban anthropogenic heat fluxes for UK cities: the case of Manchester. *Theor Appl Climatol* 98(1): 19–35.
- Snyder WC, Wan Z, Zhang Y, Feng Y-Z. 1998. Classification-based emissivity for land surface temperature measurement from space. *International Journal of Remote Sensing* 19(14): 2753–2774.
- Sobrino JA, Jiménez-Muñoz JC, Balick L, Gillespie AR, Sabol DA, Gustafson WT. 2007. Accuracy of ASTER Level-2 thermal-infrared Standard Products of an agricultural area in Spain. *Remote Sensing of Environment* 106(2): 146–153.
- Sobrino JA, Jimenez-Munoz JC, Soria G, Romaguera M, Guanter L, Moreno J, Plaza A, Martinez P. 2008. Land Surface Emissivity Retrieval From Different VNIR and TIR Sensors. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 46(2): 316–327.
- Sobrino JA, Oltra-Carrió R, Jiménez-Muñoz JC, Julien Y, Sòria G, Franch B, Mattar C. 2012. Emissivity mapping over urban areas using a classification-based approach: Application to the Dual-use European Security IR Experiment (DESIREX). *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 18: 141–147.
- Sobrino JA, Raissouni N. 2000. Toward remote sensing methods for land cover dynamic monitoring: Application to Morocco. *International Journal of Remote Sensing* 21(2): 353–366.
- Spence M, Annez PC, Buckley RM. 2008. *Urbanization and Growth*. World Bank Publications.

- Stathopoulou E, Mihalakakou G, Santamouris M, Bagiorgas H. 2008. On the impact of temperature on tropospheric ozone concentration levels in urban environments. *Journal of Earth System Science* 117(3): 227–236.
- Stathopoulou M, Cartalis C. 2007. Use of Satellite Remote Sensing in Support of Urban Heat Island Studies. *Advances in Building Energy Research* 1(1): 203–212.
- Stathopoulou M, Cartalis C. 2009. Downscaling AVHRR land surface temperatures for improved surface urban heat island intensity estimation. *Remote Sensing of Environment* 113(12): 2592–2605.
- Stathopoulou M, Cartalis C, Petrakis M. 2007. Integrating Corine Land Cover data and Landsat TM for surface emissivity definition: application to the urban area of Athens, Greece. *International Journal of Remote Sensing* 28(15): 3291–3304.
- Stathopoulou M, Synnefa A, Cartalis C, Santamouris M, Karlessi T, Akbari H. 2009. A surface heat island study of Athens using high-resolution satellite imagery and measurements of the optical and thermal properties of commonly used building and paving materials. *International Journal of Sustainable Energy* 28(1–3): 59–76.
- Stewart ID. 2011a. Redefining the urban heat island [PhD Thesis]. University of British Columbia.
- Stewart ID. 2011b. A systematic review and scientific critique of methodology in modern urban heat island literature. *International Journal of Climatology* 31(2): 200–217.
- Stewart ID, Kennedy CA. 2017. Metabolic heat production by human and animal populations in cities. *Int J Biometeorol* 61(7): 1159–1171.
- Stewart ID, Oke TR. 2012. Local Climate Zones for Urban Temperature Studies. *Bull Amer Meteor Soc* 93(12): 1879–1900.
- Stocker T. 2014. Climate Change 2013: The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press.
- Sun Y, Gao C, Li J, Wang R, Liu J. 2019. Quantifying the Effects of Urban Form on Land Surface Temperature in Subtropical High-Density Urban Areas Using Machine Learning. *Remote Sensing* 11(8): 959.
- Sundborg A. 1951. Climatological Studies in Uppsala with Special Regard to the Temperature Conditions in the Urban Area. Geographica.
- Synnefa A, Santamouris M, Apostolakis K. 2007. On the development, optical properties and thermal performance of cool colored coatings for the urban environment. *Solar energy* 81(4): 488–497.
- Synnefa A, Vasilakopoulou K, Kyriakodis G-E, Lontorfos V, De Masi RF, Mastrapostoli E, Karlessi T, Santamouris M. 2017. Minimizing the energy consumption of low income multiple housing using a holistic approach. *Energy and Buildings* 154: 55–71.
- Taesler R. 1980. Studies of the Development and Thermal Structure of the Urban Boundary Layer in Uppsala. Uppsala Universitet.
- Tao W-K, Simpson J. 1993. The Goddard cumulus ensemble model. Part I: Model description. *Terr Atmos Oceanic Sci* 4(1): 35–72.
- Thom A, Stewart J, Oliver H, Gash J. 1975. Comparison of aerodynamic and energy budget estimates of fluxes over a pine forest. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 101(427): 93–105.
- Thompson G, Rasmussen RM, Manning K. 2004. Explicit forecasts of winter precipitation using an improved bulk microphysics scheme. Part I: Description and sensitivity analysis. *Monthly Weather Review* 132(2): 519–542.

- Trusilova K, Früh B, Brienen S, Walter A, Masson V, Pigeon G, Becker P. 2013. Implementation of an Urban Parameterization Scheme into the Regional Climate Model COSMO-CLM. *J Appl Meteor Climatol* 52(10): 2296–2311.
- Tucker CJ. 1979. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment* 8(2): 127–150.
- United Nations. 2018. Press Release of the World Urbanization Prospects. Available at <https://population.un.org/wup/Publications/Files/WUP2018-PressRelease.pdf>. Accessed 2019 Feb 9.
- Vahmani P, Ban-Weiss GA. 2016. Impact of remotely sensed albedo and vegetation fraction on simulation of urban climate in WRF-urban canopy model: A case study of the urban heat island in Los Angeles. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 121(4): 1511–1531.
- Voelkel J, Hellman D, Sakuma R, Shandas V. 2018. Assessing Vulnerability to Urban Heat: A Study of Disproportionate Heat Exposure and Access to Refuge by Socio-Demographic Status in Portland, Oregon. *Int J Environ Res Public Health* 15(4). doi: 10.3390/ijerph15040640
- Voogt JA. 1995. Thermal remote sensing of urban surface temperatures [PhD Thesis]. University of British Columbia.
- Voogt JA, Oke TR. 1991. Validation of an urban canyon radiation model for nocturnal long-wave fluxes. *Boundary-Layer Meteorol* 54(4): 347–361.
- Voogt JA, Oke TR. 1997. Complete Urban Surface Temperatures. *J Appl Meteor* 36(9): 1117–1132.
- Voogt JA, Oke TR. 2003. Thermal remote sensing of urban climates. *Remote Sensing of Environment* 86(3): 370–384.
- Wan Z. 2008. New refinements and validation of the MODIS Land-Surface Temperature/Emissivity products. *Remote Sensing of Environment* 112(1): 59–74.
- Wan Z. 2014. New refinements and validation of the collection-6 MODIS land-surface temperature/emissivity product. *Remote Sensing of Environment* 140: 36–45.
- Wang C, Middel A, Myint SW, Kaplan S, Brazel AJ, Lukasczyk J. 2018. Assessing local climate zones in arid cities: The case of Phoenix, Arizona and Las Vegas, Nevada. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 141: 59–71.
- Wang R, Ren C, Xu Y, Lau KK-L, Shi Y. 2018. Mapping the local climate zones of urban areas by GIS-based and WUDAPT methods: A case study of Hong Kong. *Urban climate* 24: 567–576.
- Ward H, Grimmond C. 2017. Assessing the impact of changes in surface cover, human behaviour and climate on energy partitioning across Greater London. *Landscape and Urban Planning* 165: 142–161.
- Ward HC, Kotthaus S, Järvi L, Grimmond CSB. 2016. Surface Urban Energy and Water Balance Scheme (SUEWS): Development and evaluation at two UK sites. *Urban Climate* 18: 1–32. doi: 10.1016/j.uclim.2016.05.001
- Ward K, Lauf S, Kleinschmit B, Endlicher W. 2016. Heat waves and urban heat islands in Europe: A review of relevant drivers. *Science of The Total Environment* 569–570: 527–539.
- Weng Q. 2009. Thermal infrared remote sensing for urban climate and environmental studies: Methods, applications, and trends. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 64(4): 335–344.
- Weng Qihao, Fu P, Gao F. 2014. Generating daily land surface temperature at Landsat resolution by fusing Landsat and MODIS data. *Remote Sensing of Environment* 145: 55–67.

- Weng Q., Hu X, Quattrochi DA, Liu H. 2014. Assessing Intra-Urban Surface Energy Fluxes Using Remotely Sensed ASTER Imagery and Routine Meteorological Data: A Case Study in Indianapolis, U.S.A. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing* 7(10): 4046–4057.
- Weng Q, Lu D, Schubring J. 2004. Estimation of land surface temperature–vegetation abundance relationship for urban heat island studies. *Remote Sensing of Environment* 89(4): 467–483.
- White MA, Thornton PE, Running SW, Nemani RR. 2000. Parameterization and sensitivity analysis of the BIOME–BGC terrestrial ecosystem model: net primary production controls. *Earth interactions* 4(3): 1–85.
- Whitman S, Good G, Donoghue ER, Benbow N, Shou W, Mou S. 1997. Mortality in Chicago attributed to the July 1995 heat wave. *American Journal of public health* 87(9): 1515–1518.
- Wicki A, Parlow E, Feigenwinter C. 2018. Evaluation and modeling of urban heat island intensity in Basel, Switzerland. *Climate* 6(3): 55.
- Wieringa J. 1993. Representative roughness parameters for homogeneous terrain. *Boundary-Layer Meteorol* 63(4): 323–363.
- Wong MS, Yang J, Nichol J, Weng Q, Menenti M, Chan P. 2015. Modeling of Anthropogenic Heat Flux Using HJ-1B Chinese Small Satellite Image: A Study of Heterogeneous Urbanized Areas in Hong Kong. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters* 12(7): 1466–1470.
- Wong NH, Tan AYK, Tan PY, Wong NC. 2009. Energy simulation of vertical greenery systems. *Energy and buildings* 41(12): 1401–1408.
- Wu C-D, Lung S-CC, Jan J-F. 2013. Development of a 3-D urbanization index using digital terrain models for surface urban heat island effects. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 81: 1–11.
- Wu P, Shen H, Zhang L, Göttsche F-M. 2015. Integrated fusion of multi-scale polar-orbiting and geostationary satellite observations for the mapping of high spatial and temporal resolution land surface temperature. *Remote Sensing of Environment* 156: 169–181.
- Xu H. 2006. Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. *International Journal of Remote Sensing* 27(14): 3025–3033.
- Xu W, Wooster MJ, Grimmond CSB. 2008. Modelling of urban sensible heat flux at multiple spatial scales: A demonstration using airborne hyperspectral imagery of Shanghai and a temperature–emissivity separation approach. *Remote Sensing of Environment* 112(9): 3493–3510.
- Yang J, Su J, Xia J, Jin C, Li X, Ge Q. 2018. The Impact of Spatial Form of Urban Architecture on the Urban Thermal Environment: A Case Study of the Zhongshan District, Dalian, China. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing* 11(8): 2709–2716.
- Yang J, Wong MS, Menenti M, Nichol J. 2015. Modeling the effective emissivity of the urban canopy using sky view factor. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 105: 211–219.
- Yang X. 2011. *Urban Remote Sensing: Monitoring, Synthesis and Modeling in the Urban Environment*. John Wiley & Sons.
- Yang Y, Cao C, Pan X, Li X, Zhu X. 2017. Downscaling Land Surface Temperature in an Arid Area by Using Multiple Remote Sensing Indices with Random Forest Regression. *Remote Sensing* 9(8): 789.
- Yin C, Yuan M, Lu Y, Huang Y, Liu Y. 2018. Effects of urban form on the urban heat island effect based on spatial regression model. *Science of The Total Environment* 634: 696–704.
- Yoshida A, Tominaga K, Watatani S. 1990. Field measurements on energy balance of an urban canyon in the summer season. *Energy and Buildings* 15(3): 417–423.

- Yow DM. 2007. Urban Heat Islands: Observations, Impacts, and Adaptation. *Geography Compass* 1(6): 1227–1251.
- Yow DM, Carbone GJ. 2006. The urban heat island and local temperature variations in Orlando, Florida. *southeastern geographer* 46(2): 297–322.
- Yu C, Hien WN. 2006. Thermal benefits of city parks. *Energy and buildings* 38(2): 105–120.
- Yuan F, Bauer ME. 2007. Comparison of impervious surface area and normalized difference vegetation index as indicators of surface urban heat island effects in Landsat imagery. *Remote Sensing of Environment* 106(3): 375–386.
- Zakšek K, Oštir K. 2012. Downscaling land surface temperature for urban heat island diurnal cycle analysis. *Remote Sensing of Environment* 117: 114–124.
- Zha Y, Gao J, Ni S. 2003. Use of normalized difference built-up index in automatically mapping urban areas from TM imagery. *International Journal of Remote Sensing* 24(3): 583–594.
- Zhan W, Chen Y, Zhou J, Wang J, Liu W, Voogt J, Zhu X, Quan J, Li J. 2013. Disaggregation of remotely sensed land surface temperature: Literature survey, taxonomy, issues, and caveats. *Remote Sensing of Environment* 131: 119–139.
- Zhang Y, Balzter H, Wu X. 2013. Spatial–temporal patterns of urban anthropogenic heat discharge in Fuzhou, China, observed from sensible heat flux using Landsat TM/ETM+ data. *International Journal of Remote Sensing* 34(4): 1459–1477.
- Zheng Y, Ren C, Xu Y, Wang R, Ho J, Lau K, Ng E. 2018. GIS-based mapping of Local Climate Zone in the high-density city of Hong Kong. *Urban Climate* 24: 419–448.
- Zheng Y, Weng Q. 2018. High spatial- and temporal-resolution anthropogenic heat discharge estimation in Los Angeles County, California. *Journal of Environmental Management* 206: 1274–1286.
- Zheng Z, Zhou W, Yan J, Qian Y, Wang J, Li W. 2019. The higher, the cooler? Effects of building height on land surface temperatures in residential areas of Beijing. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C* 110: 149–156.
- Zhou D, Xiao J, Bonafoni S, Berger C, Deilami K, Zhou Y, Froking S, Yao R, Qiao Z, Sobrino JA. 2019. Satellite Remote Sensing of Surface Urban Heat Islands: Progress, Challenges, and Perspectives. *Remote Sensing* 11(1): 48.
- Zhou W, Huang G, Cadenasso ML. 2011. Does spatial configuration matter? Understanding the effects of land cover pattern on land surface temperature in urban landscapes. *Landscape and Urban Planning* 102(1): 54–63. doi: 10.1016/j.landurbplan.2011.03.009
- Zhou Y, Weng Q, Gurney KR, Shuai Y, Hu X. 2012. Estimation of the relationship between remotely sensed anthropogenic heat discharge and building energy use. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 67: 65–72.
- Zhu S, Guan H, Millington AC, Zhang G. 2013. Disaggregation of land surface temperature over a heterogeneous urban and surrounding suburban area: a case study in Shanghai, China. *International Journal of Remote Sensing* 34(5): 1707–1723.
- Zurita-Milla R, Clevers JG, Schaepman ME. 2008. Unmixing-based Landsat TM and MERIS FR data fusion. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters* 5(3): 453–457.
- Αβδελίδη Κ. 2010. Η χωρική εξέλιξη 4 μεγάλων Ελληνικών πόλεων. Ε.Κ.Κ.Ε. Available at <http://www.ekke.gr/publications/wp/wp21.pdf>.

Ανεξάρτητος Διαχειριστής Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΑΔΜΗΕ). n.d. Καθαρές Ροές Διασυνδέσεων (SCADA). Available at <http://www.admie.gr/leitoyrgia-dedomena/leitoyrgia-systimatos/dedomena-pragmatikoy-chronoy/anafores/kathares-roes-diasyndeseon-scada/>. Accessed 2019 Mar 12.

διαΝΕΟσις. 2017. Οι επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής στην ανάπτυξη. Available at https://www.dianeosis.org/wp-content/uploads/2017/06/climate_change10.pdf. Accessed 2019 Mar 12.

Διαχειριστής Εθνικού Συστήματος Φυσικού Αερίου (ΔΕΣΦΑ). n.d. Ιστορικά στοιχεία Παραδόσεων/Παραλαβών ΦΑ. Available at <http://www.desfa.gr/regulated-services/transmission/pliroforisimetaforas-page/historical-data/deliveries-offtakes>. Accessed 2019 Mar 12.

Ελληνική Στατιστική Αρχή (ΕΛΣΤΑΤ). 2011. Απογραφή Πληθυσμού-Κατοικιών 2011. Available at <http://www.statistics.gr/el/2011-census-pop-hous>. Accessed 2019 Feb 9.

Ελληνική Στατιστική Αρχή (ΕΛΣΤΑΤ). 2013. Έρευνα Κατανάλωσης Ενέργειας στα Νοικοκυριά, 2011-2012. Available at <https://www.statistics.gr/documents/20181/e74d6134-8c02-404e-a02b-aa6d959219e3> Accessed 2019 Mar 12.

Ελληνική Στατιστική Αρχή (ΕΛΣΤΑΤ). Ψηφιακά χαρτογραφικά υπόβαθρα. Available at <http://www.statistics.gr/el/digital-cartographical-data>. Accessed 2019 Mar 14.

Ελληνική Στατιστική Αρχή (ΕΛΣΤΑΤ). Πετρελαιοειδή (κατανάλωση) / 2012. Available at <http://www.statistics.gr/el/statistics/-/publication/SDE15/2012>. Accessed 2019 Mar 12.

Ελληνική Στατιστική Αρχή (ΕΛΣΤΑΤ). Στόλος Οχημάτων / Ιανουαρίου 2012. Available at <http://www.statistics.gr/el/statistics/-/publication/SME18/2012-M01>. Accessed 2019 Mar 12.

Καρτάλης Κ, Φεΐδας Χ. 2013. *Αρχές Και Εφαρμογές Δορυφορικής Τηλεπισκόπησης*. Θεσσαλονίκη: Τζίοια.

Λολώνης Π, Παπουτσάκης Εμ. 2017. Γεωχωρικά Δεδομένα της ΕΚΧΑ και ΕΥΓΕΠ. ΥΠΕΝ -WB Workshop.

Σύνδεσμος Εισαγωγέων Αντιπροσώπων Αυτοκινήτων (ΣΕΑΑ). 2014. Ετήσιο φυλλάδιο. Available at <https://www.seaa.gr/sites/seaa/files/final%20web%20version.pdf>. Accessed 2019 Mar 12.

Υπουργείο Περιβάλλοντος & Ενέργειας. Χρήσεις γης. Available at <http://msa.ypeka.gr>. Accessed 2019 Mar 12.