



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΙΩΑΝΝΙΝΩΝ
ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΦΥΣΙΚΗΣ



**Αστικοποίηση και κλίμα στο πλαίσιο της
παγκόσμιας θέρμανσης. Προκλήσεις για την
ανθρώπινη υγεία**

Διδακτορική Διατριβή

ΠΕΤΡΟΥ ΗΛΙΑΣ

ΙΩΑΝΝΙΝΑ 2024



UNIVERSITY OF IOANNINA
SCHOOL OF SCIENCES
DEPARTMENT OF PHYSICS



**Urbanization and climate in the context of global
warming. Challenges to human health**

PhD THESIS

PETROU ILIAS

IOANNINA 2024



Τριμελής συμβουλευτική επιτροπή

- Παύλος Κασσωμένος (Επιβλέπων), Αφυπηρετήσας Καθηγητής του Τμήματος Φυσικής του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων
- Χρήστος Λώλης, Αναπληρωτής Καθηγητής του Τμήματος Φυσικής του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων
- Κλεαρέτη Τουρπάλη, Καθηγήτρια του Τμήματος Φυσικής του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης

Επταμελής εξεταστική επιτροπή

- Παύλος Κασσωμένος, Αφυπηρετήσας Καθηγητής του Τμήματος Φυσικής του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων
- Χρήστος Λώλης, Αναπληρωτής Καθηγητής του Τμήματος Φυσικής του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων
- Κλεαρέτη Τουρπάλη, Καθηγήτρια του Τμήματος Φυσικής του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης
- Αριστείδης Μπαρτζώκας, Αφυπηρετήσας Καθηγητής του Τμήματος Φυσικής του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων
- Νικόλαος Χατζηναστασίου, Καθηγητής του Τμήματος Φυσικής του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων
- Νικόλαος Μπάκας, Επίκουρος Καθηγητής του Τμήματος Φυσικής του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων
- Αλέξανδρος Νίντος, Καθηγητής του Τμήματος Φυσικής του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων



Πρόλογος

Η παρούσα διδακτορική διατριβή με τίτλο “Αστικοποίηση και κλίμα στο πλαίσιο της παγκόσμιας θέρμανσης. Προκλήσεις για την ανθρώπινη υγεία”, εκπονήθηκε στο Εργαστήριο Μετεωρολογίας του Τομέα Αστρογεωφυσικής του Τμήματος Φυσικής του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων κατά τη χρονική περίοδο 2018-2023.

Από τα αποτελέσματα της διατριβής προέκυψαν δύο δημοσιεύσεις σε διεθνή επιστημονικά περιοδικά και δύο ανακοινώσεις σε διεθνή συνέδρια. Ακολουθεί η σχετική λίστα δημοσιεύσεων και των ανακοινώσεων:

Petrou I, Kyriazis N, Kassomenos P, (2023) The influence of local weather types on the development and intensity of the urban heat island in Attica region using big data from the Copernicus service. In Proceedings on the 16th International Conference on Meteorology, Climatology and Atmospheric Physics (COMECAP 2023, Athens, 25-29 September, 2023)

Petrou I, Kassomenos P, Ladia E, Mpegou P, (2021) Trends in weather type frequencies across Europe. Proceedings of the 15th International Conference on Meteorology, Climatology and Atmospheric Physics (COMECAP 2021, Eds. A. Bartzokas, P. Nastos), ISBN 978-960-233-267-2, Ioannina, 26-29 September 2021, 554-558

Petrou I, Kassomenos P, Lee CC, (2022) Trends in air mass frequencies across Europe. Theoretical and Applied Climatology. 148, 105–120.

Petrou I, Kyriazis N, Kassomenos P, (2023) Evaluating the Spatial and Temporal Characteristics of Summer Urban Overheating through Weather Types in the Attica Region, Greece. Sustainability. 15(13):10633.

Τμήμα της διδακτορικής διατριβής υλοποιήθηκε στο πλαίσιο της Πράξης «**ΚΕΝΤΡΟ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΔΙΑΚΙΝΔΥΝΕΥΣΗΣ ΚΑΙ ΑΝΘΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ ΠΕΡΙΦΕΡΕΙΑΣ ΑΜΘ**» (MIS 5047293) που εντάσσεται στη Δράση «Ενίσχυση των Υποδομών Έρευνας και Καινοτομίας» και χρηματοδοτείται από το Επιχειρησιακό Πρόγραμμα «Ανταγωνιστικότητα, Επιχειρηματικότητα και Καινοτομία» στο πλαίσιο του ΕΣΠΑ 2014-2020, με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης (Ευρωπαϊκό Ταμείο Περιφερειακής Ανάπτυξης).



Ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική εργασία δεν θα ήταν δυνατή χωρίς τη βοήθεια και την υποστήριξη πολλών ανθρώπων που συμμετείχαν στην εκπόνηση και την ολοκλήρωσή της. Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά όλο το διδακτικό προσωπικό του Εργαστηρίου Μετεωρολογίας του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων, αλλά κυρίως τον επιβλέποντά μου Καθηγητή κ. Παύλο Κασσωμένο που έδειξε πραγματική εμπιστοσύνη στο πρόσωπό μου για την ολοκλήρωση αυτής της διδακτορικής διατριβής. Τόσο κατά τη διάρκεια των μεταπτυχιακών μου σπουδών, όσο και κατά την εκπόνηση της παρούσας διδακτορικής διατριβής με ενέπνευσε και με παρακίνησε να διεξάγω καινοτόμες έρευνες, ενώ οι συμβουλές του και η στήριξή του σε επιστημονικό και σε προσωπικό επίπεδο υπήρξαν καθοριστικές. Ευχαριστώ επίσης θερμά τα υπόλοιπα μέλη της Τριμελούς Επιτροπής για την καθοδήγηση και τις εξαιρετικά χρήσιμες συμβουλές τους. Συγκεκριμένα, ευχαριστώ τον Αναπληρωτή Καθηγητή κ. Χρήστο Λώλη για την καθοδήγηση σε όλη τη διάρκεια των μεταπτυχιακών και των διδακτορικών μου σπουδών και την Καθηγήτρια κ. Κλεαρέτη Τουρπάλη, η οποία ως προπτυχιακό φοιτητή ακόμα, με παρακίνησε και με ενέπνευσε να συνεχίσω τις σπουδές μου, καθώς και για τις χρήσιμες παρατηρήσεις και επισημάνσεις που μου παρείχε κατά τη διάρκεια εκπόνησης της διδακτορικής μου διατριβής. Είμαι ευγνώμων επίσης και σε όλα τα υπόλοιπα μέλη της Επταμελούς Εξεταστικής Επιτροπής για τη βοήθεια, τα σχόλια, τις συμβουλές και τις επισημάνσεις τους, οι οποίες ήταν σημαντικές για τη βελτίωση της διατριβής.

Θα ήθελα επίσης να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στην Αναπληρώτρια Καθηγήτρια κ. Αναστασία Πασχαλίδου, για την άψογη συνεργασία στο πλαίσιο του ερευνητικού προγράμματος ΚΕΔΙΑΚ, για τις ευκαιρίες και τις ερευνητικές ιδέες που μοιράστηκε μαζί μου, καθώς και την εμπιστοσύνη που μου έδειξε και την καθοδήγηση σε πλήθος ερευνητικών εργασιών. Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τον Αναπληρωτή Καθηγητή Cameron Lee του τμήματος Γεωγραφίας του Πανεπιστημίου Kent State, για την υποστήριξη και τις συμβουλές του, που συνέβαλαν στην ολοκλήρωση μεγάλου μέρους της διδακτορικής διατριβής.

Τέλος, αισθάνομαι την ανάγκη να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου στους γονείς μου, στην Αλεξάνδρα και στους φίλους μου, για την ενθάρρυνση και την απεριόριστη στήριξη όλα αυτά τα χρόνια. Οι λέξεις δεν μπορούν να εκφράσουν πόσο ευγνώμων είμαι για όλες τις θυσίες που έκαναν για μένα και συνεχίζουν να κάνουν, παραμένοντας σταθερή πηγή στήριξης και ώθησης όποτε το χρειαζόμουν.



Πίνακας περιεχομένων

Περίληψη.....	7
Abstract	9
Πίνακας Ακρωνυμίων	11
1. Γενική εισαγωγή.....	12
1.1 Θεωρητικό πλαίσιο.....	12
1.2 Αντικείμενο μελέτης.....	15
1.3 Δομή διατριβής.....	17
2. Αστικοποίηση και φαινόμενο Αστικής Θερμικής Νησίδας	18
2.1 Τύποι Αστικής Θερμικής Νησίδας.....	19
2.2 Αιτίες εμφάνισης Αστικής Θερμικής Νησίδας στρώματος θόλου	21
2.3 Δημιουργία της Αστικής Θερμικής Νησίδας στρώματος θόλου	26
2.4 Ένταση Αστικής Θερμικής Νησίδας στρώματος θόλου	27
2.5 Επιπτώσεις του φαινομένου της Αστικής Θερμικής Νησίδας στρώματος θόλου	29
2.6 Αστική Θερμική Νησίδα και προκλήσεις για την ανθρώπινη υγεία	31
2.7 Τεχνικές μετριάσμου με σκοπό τη μείωση των επιβλαβών επιπτώσεων της Αστικής Θερμικής Νησίδας.....	35
3. Ταξινόμηση τύπων καιρού	39
3.1 Θεωρητικό υπόβαθρο	40
3.2 Αξιοσημείωτες ταξινομήσεις τύπων καιρού	42
4. Μεταβολές στην συχνότητα τύπων καιρού στην Ευρώπη	50
4.1 Δεδομένα και Μεθοδολογία	51
4.2 Ανάλυση κύριων συνιστωσών (Principal Component Analysis – PCA)	53
4.3 Ανάλυση κατά συστάδες (Cluster Analysis – CA).....	55
4.4 Μη ιεραρχική μέθοδος ανάλυσης κατά συστάδες K-means	56
4.5 Έλεγχος Mann – Kendall.....	57
4.6 Μέθοδος Sen’s Estimate of Slope	59
4.7 Αποτελέσματα και συζήτηση	60
4.8 Συμπεράσματα.....	71
5. Ταξινόμηση τοπικών τύπων καιρού για τέσσερις Ευρωπαϊκές πόλεις.....	74
5.1 Η βάση δεδομένων NCEP/NCAR Reanalysis.....	74
5.2 Προσδιορισμός τύπων καιρού (WTs).....	75
5.3 Αποτελέσματα	76
5.3.1 Η περίπτωση της Αθήνας	77



5.3.2 Η Περίπτωση της Βαρκελώνης	87
5.3.3 Η Περίπτωση του Λουξεμβούργου	95
5.3.4 Η Περίπτωση του Ελσίνκι	105
6. Αξιολόγηση της ανάπτυξης και της έντασης της αστικής θερμικής νησίδας μέσω τύπων καιρού.....	114
6.1 Η βάση δεδομένων Copernicus urban climate	114
6.2 Υπολογισμός της έντασης της UHI για κάθε πόλη	115
6.3 Αποτελέσματα	117
6.3.1 Η περίπτωση της Αθήνας	117
6.3.2 Η περίπτωση της Βαρκελώνης	126
6.3.3 Η περίπτωση του Λουξεμβούργου	134
6.3.4 Η περίπτωση του Ελσίνκι.....	142
7. Γενικά συμπεράσματα – Προοπτικές.....	151
Βιβλιογραφία.....	157
Παράρτημα 1	173
Παράρτημα 2	177



Περίληψη

Αντικείμενο της παρούσας Διδακτορικής Διατριβής είναι η μελέτη των αλλαγών στην συχνότητα των τύπων καιρού για την ευρύτερη περιοχή της Ευρώπης από το 1979 έως το 2019, και η μελέτη της της αστικής θερμικής νησίδας για 4 μεγάλες Ευρωπαϊκές πόλεις (Αθήνα, Βαρκελώνη, Λουξεμβούργο και Ελσίνκι), κατά τη διάρκεια του θέρους. Για την επίτευξη του τελευταίου στόχου, δημιουργήθηκαν και αξιοποιήθηκαν τοπικές ταξινομήσεις τύπων καιρού για κάθε πόλη και διερευνήθηκαν τα χωρικά και χρονικά χαρακτηριστικά της έντασης του φαινομένου της αστικής θερμικής νησίδας, καθώς και η συσχέτιση συγκεκριμένων τύπων καιρού με το φαινόμενο της αστικής υπερθέρμανσης, κατά τη θερμή περίοδο (Ιούνιος-Σεπτέμβριος) του έτους, για ημέρα και νύχτα, από το 2008 έως το 2017. Στο πρώτο στάδιο, για τη διεύρυνση των μεταβολών στη συχνότητα τύπων καιρού για την ευρύτερη περιοχή της Ευρώπης, χρησιμοποιήθηκε ένα πρόσφατα αναπτυγμένο σύστημα ταξινόμησης τύπων καιρού (Gridded Weather Type Classification 2- GWTC2), ενώ δεδομένα μηνιαίων μέσων τιμών θερμοκρασίας αέρα (στα 2m), σημείου δρόσου (στα 2m) και θερμοκρασίας στην επιφάνεια της θάλασσας ελήφθησαν από τη βάση δεδομένων ERA5 reanalysis (ECMWF), με στόχο τη μελέτη των παραγόντων που οφείλονται στις τάσεις των συχνοτήτων κάθε τύπου καιρού. Τα αποτελέσματα που ελήφθησαν υπέδειξαν μία σημαντική αύξηση στη συχνότητα των θερμών τύπων καιρού από το 1979, ενώ ταυτόχρονα, οι περισσότεροι ψυχροί τύποι παρουσιάζουν σημαντική μείωση. Οι πιο αξιοσημείωτες μεταβολές στη συχνότητα των τύπων καιρού σημειώνονται πρωτίστως στις θαλάσσιες περιοχές, βόρεια της Ευρώπης και δευτερευόντως στον τομέα που περιλαμβάνει τη Νότια και Κεντρική Ευρώπη, ενώ βρέθηκε ότι οι πολικές θαλάσσιες περιοχές (Νορβηγική Θάλασσα, Θάλασσα του Μπάρεντς και Θάλασσα της Γροιλανδίας) παρουσιάζουν μέση αύξηση θερμοκρασίας 3-4 °C, καθώς και αύξηση του σημείου δρόσου και της θερμοκρασίας στην επιφάνεια. Στο δεύτερο στάδιο, επιχειρείται ο ορισμός τοπικών τύπων καιρού για κάθε πόλη. Για το σκοπό αυτό δεδομένα ελήφθησαν από την βάση δεδομένων NCEP/NCAR και αφορούν ημερήσιες τιμές (12UT) των εξής παραμέτρων από το 1950 έως το 2020: γεωδυναμικό ύψος των ισοβαρικών επιφανειών των 500 hPa και 1000 hPa, θερμοκρασία του αέρα και ειδική υγρασία στην ισοβαρική επιφάνεια των 850 hPa, θερμοκρασία του αέρα σε ύψος 2 m από την επιφάνεια του εδάφους, ειδική υγρασία σε ύψος 2 m από την επιφάνεια του εδάφους, ζωνική και μεσημβρινή συνιστώσα της ταχύτητας του ανέμου σε ύψος 10 m από την επιφάνεια του εδάφους, ολική νεφοκάλυψη καθώς και ρυθμό υετού και



ανωμεταφορικού υετού, για κάθε πόλη. Στο στάδιο αυτό, για τους επικρατούντες τύπους καιρού, εξετάζονται τα χαρακτηριστικά τους, καθώς και η συχνότητα εμφάνισης τους (μηνιαία και ετήσια). Η παρούσα διατριβή καταλήγει με τη μελέτη της έντασης του φαινομένου της αστικής θερμικής νησίδας καθώς και της αστικής υπερθέρμανσης για κάθε πόλη από το 2008 έως το 2017, για τη θερινή περίοδο (Ιούνιος - Σεπτέμβριος), τόσο κατά τη διάρκεια της ημέρας όσο και κατά τη διάρκεια της νύχτας. Στο στάδιο αυτό αξιοποιήθηκαν τα δεδομένα από την πρόσφατη βάση δεδομένων Copernicus urban climate. Έπειτα, πραγματοποιείται η κατανομή συχνοτήτων της έντασης της αστικής θερμικής νησίδας για κάθε πόλη, εξετάζεται η συσχέτιση της αστικής υπερθέρμανσης με τους κυριάρχους τύπους καιρού και τέλος, διερευνάται η χρονική και χωρική (hot-spots) κατανομή της αστικής υπερθέρμανσης. Από την μελέτη των χωρικών και χρονικών διακυμάνσεων της θερμικής νησίδας για κάθε πόλη, διαπιστώθηκε η παρουσία μιας ισχυρής αστικής υπερθέρμανσης, η οποία τείνει να είναι ισχυρότερη κατά τη διάρκεια της θερμής περιόδου του έτους και ειδικά κατά τη διάρκεια της νύχτας. Επιπλέον, ένα από τα βασικά συμπεράσματα της συγκεκριμένης μελέτης ήταν το γεγονός ότι αυξάνεται το γεωγραφικό πλάτος, παρατηρείται περιορισμός του φαινομένου, τόσο χωρικά όσο και ως προς τη δυναμική του. Τέλος, από την συσχέτιση τοπικών τύπων καιρού με την αστική υπερθέρμανση, προέκυψε ότι οι θερινοί τύποι καιρού που ενισχύουν το φαινόμενο, σχετίζονται κυρίως με συνθήκες υψηλών θερμοκρασιών, ασθενών ανέμων και χαμηλής/μέτριας νεφοκάλυψης, ενώ μεγαλύτερη επίδραση, φαίνεται να έχουν τοπικά φαινόμενα μικρής ή μεσαίας κλίμακας (π.χ. παρουσία θαλάσσιας αύρας κυρίως στις παράκτιες πόλεις).



Abstract

The scope of the present Doctoral Dissertation is to examine the changes in the frequency of weather types over Europe from 1979 to 2019, as well as the study of the urban heat island in 4 European cities (Athens, Barcelona, Luxembourg and Helsinki), during the summer. To meet this latter goal, regional classifications of weather types for each city were defined and the spatial and temporal characteristics of the intensity of the urban heat island effect, as well as the association of specific weather types with the urban overheating, were investigated during the summer (June–September) and during day and night, from 2008 to 2017. At a first stage, in order to investigate the changes in the frequency of weather types in Europe, a newly developed weather type classification system was used (Gridded Weather Type Classification 2- GWTC2), while monthly means of 2-m air temperature, 2-m dew point, and sea surface temperature were obtained from the recent ERA5 reanalysis database of the European Center for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF), in order to analyze the meteorological background of weather types frequencies trends. The obtained results revealed a significant increase in the frequency of warm weather types since 1979, while at the same time, most cold weather types show a significant decrease. The most notable changes in the frequency of weather types occurred primarily over the sea areas of north Europe and secondarily in the region including southern and central Europe, while increases (sea surface temperature and dew point) occurred (3-4 °C) in the polar sea areas (Norwegian Sea, Barents Sea and Greenland Sea). At a second stage, for each city a definition of local weather types for the 70-year period (1950–2020) was conducted. For this purpose, data obtained from the NCEP/NCAR database and are daily values (12UTC) of the following parameters from 1950 to 2020: 500 and 1000 hPa geopotential heights, 850 hPa temperature, and 850 hPa specific humidity, 2m temperature, specific humidity, 10m zonal and meridional wind, total cloud cover, precipitation rate and convective precipitation, for each city. At this stage, for the prevailing weather types, their characteristics were examined, as well as their frequency of occurrence (monthly and yearly). The present dissertation concludes, by studying the intensity of the urban heat island effect as well as urban overheating for each city, from 2008 to 2017, for the summer season (June to September), for both during day and night. The analysis is performed using the data from the recent Copernicus urban climate database. The frequency distribution of urban heat island intensity for each city, the correlation of urban overheating with the prevailing weather types and finally, the



temporal and spatial (hot-spots) distribution of urban overheating was also investigated. The obtained results indicating the presence of a rather strong urban heat island effect that tends to be more pronounced during the warm half of the year, especially during the night. One key finding of this study was the fact that there is a limitation of the phenomenon (both spatially and in terms of its dynamics) as the latitude increases. Finally, the observational study concludes that urban overheating was amplified under summer weather types, correlate to conditions of high temperatures, weak winds and low/moderate cloud cover, while local effects of small or medium scale (e.g. presence of sea breeze mainly in coastal cities), seems to have a greater impact on the overheating.



Πίνακας Ακρωνυμίων

Σύντμηση - Ακρωνύμιο	Ερμηνεία
UHI	Urban Heat Island
WTs / WT	Weather Types / Weather Type
UCL	Urban Canopy Layer
UBL	Urban Boundary Layer
PBL	Planetary Boundary Layer
UHII	Urban Heat Island Intensity
GWTC	Gridded Weather Typing Classification
UO	Urban Overheating
SEB	Surface Energy Budget
UC	Urban Canyon
TSI	Temporal Synoptic Index
PCA	Principal Components Analysis
PCs	Principal Components
CA	Cluster Analysis
SSI	Spatial Synoptic Index
SSC	Spatial Synoptic Classification
NCEP/NCAR	National Center for Environmental Prediction / National Center for Atmospheric Research
NARR	North American Regional Reanalysis
DFA	Discriminant Function Analysis
ECMWF	European Centre for Medium-Range Weather Forecasts
AMV	Atlantic Multidecadal Variability Index
C	Cool
W	Warm
H	Humid
D	Dry
S	Seasonal
HC	Humid Cool
HW	Humid Warm
DC	Dry Cool
DW	Dry Warm
CFP	Cold Front Passage
WFP	Warm Front Passage



1. Γενική εισαγωγή

1.1 Θεωρητικό πλαίσιο

Η παγκόσμια κλιματική αλλαγή έχει αφήσει το αποτύπωμά της σε όλο τον κόσμο και έχει ήδη προκαλέσει αξιοσημείωτες επιπτώσεις στο περιβάλλον. Οι επιπτώσεις αυτές δεν περιορίζονται μόνο στην επιτάχυνση της αύξησης της παγκόσμιας θερμοκρασίας, αλλά και της απώλειας του θαλάσσιου πάγου, την άνοδο της στάθμης της θάλασσας και την εμφάνιση πιο ακραίων καιρικών φαινομένων και πιο έντονων κυμάτων καύσωνα (IPCC 2019). Κατά τη διάρκεια του περασμένου αιώνα, η παγκόσμια μέση θερμοκρασία σημείωσε αύξηση κατά $0,85^{\circ}\text{C}$ επηρεάζοντας αρνητικά μεταξύ άλλων και τη θερμική άνεση των ανθρώπων, με την περιοχή της Αρκτικής να βιώνει δυσανάλογα εντονότερες επιπτώσεις (Francis and Vavrus 2012). Από τις αρχές του 21^{ου} αιώνα, η Ευρώπη έχει βιώσει μια σειρά από ακραία θερμά και ξηρά καλοκαίρια (2003, 2010, 2013 και 2015) (Ionita et al. 2011). Το καλοκαίρι του 2015 ήταν το πιο θερμό από το 1950 σε μεγάλο μέρος της ανατολικής και νοτιοδυτικής Ευρώπης, ενώ οι περίοδοι του φθινοπώρου του 2006 και του χειμώνα του 2007 κατατάχθηκαν ως οι θερμότεροι των τελευταίων 500 ετών (Schär et al. 2004). Οι επιπτώσεις αυτών των ακραίων καιρικών συνθηκών έχουν γίνει αισθητές στους τομείς της γεωργίας, της υδρολογίας και των υδάτινων πόρων (Van Lanen et al. 2013), της ανθρώπινης υγείας (Robine et al. 2008), καθώς και των φυσικών οικοσυστημάτων (Ciais et al. 2005).

Επιπλέον, σύμφωνα με το World Urbanization Prospects (2019) η αναλογία του παγκόσμιου πληθυσμού που ζει σε αστικές περιοχές προβλέπεται να αυξηθεί κατά 68% έως το 2050. Εκτός από τα αναμφισβήτητα οφέλη της, η αστικοποίηση οδηγεί σε σημαντικές αλλαγές στη χρήση και στην κάλυψη γης στις αστικές περιοχές, γεγονός που συχνά συνοδεύεται και από αρνητικές επιπτώσεις. Η ταχεία και μη σχεδιασμένη αστική ανάπτυξη μεταμορφώνει ακατάλληλα το φυσικό τοπίο και μπορεί να προκαλέσει δυσμενείς επιπτώσεις σε αυτό. Εκτεταμένες έρευνες υποδεικνύουν ότι οι αστικές περιοχές είναι θερμότερες από τις μη αστικές και αγροτικές περιοχές (Arnfield 2003, Livada et al. 2002, Santamouris et al. 2007). Αυτό το φαινόμενο αναφέρεται ως Αστική Θερμική Νησίδα (Urban Heat Island - UHI), το οποίο είναι ένα αρκετά περίπλοκο τοπικό φαινόμενο με πολύπλοκη δυναμική και χωρική κατανομή σε αστικές περιοχές παρουσιάζοντας επίσης μεγάλη χρονική μεταβλητότητα. Το τοπικό κλίμα και οι μετεωρολογικές συνθήκες έχουν μεγάλη επίδραση στο φαινόμενο UHI



επηρεάζοντας την ένταση, τη διάρκεια και το μέγεθός του. Τα αίτια της UHI είναι καλά τεκμηριωμένα στην επιστημονική βιβλιογραφία, περιλαμβάνοντας τις θερμικές ιδιότητες των κτιρίων και των αστικών υποδομών, την απελευθέρωση ατμοσφαιρικών ρύπων και των ανθρωπογενών εκπομπών θερμότητας στην ατμόσφαιρα, του αστικού θόλου και την έλλειψη βλάστησης καθώς και την περιορισμένη εξατμισοδιαπνοή στις αστικές περιοχές. Τα δομικά υλικά εντός των πόλεων χαρακτηρίζονται από πολύπλοκες κατασκευές, χαμηλή διαπερατότητα και υψηλή θερμοχωρητικότητα (Santamouris 2016). Επιπλέον, το μέγεθος της UHI επηρεάζεται από τη γεωμετρία των αστικών επιφανειών, τη μορφολογία και των δομικών παραμέτρων της πόλης, το μέγεθος της, την πληθυσμιακή πυκνότητα και το τοπικό κλίμα (Oke 1982). Επίσης, κατά τη διάρκεια της νύχτας οι διαφορετικοί ρυθμοί ψύξης μεταξύ αστικών και αγροτικών περιοχών σε συνδυασμό με χαμηλές ταχύτητες ανέμου και συνθήκες καθαρού ουρανού ενισχύουν τη UHI (Escourrou 1991, Eliasson 1996).

Οι επιπτώσεις του φαινομένου της UHI είναι πολυάριθμες καλύπτοντας ένα ευρύ φάσμα κοινωνικών, οικονομικών, περιβαλλοντικών και υγειονομικών ζητημάτων. Για παράδειγμα, η UHI θέτει σε κίνδυνο την ανθρώπινη υγεία και ευημερία δεδομένου ότι συμβάλλει στην αύξηση της θερμοκρασίας του αέρα κατά τη διάρκεια της ημέρας και της νύχτας. Επίσης, μπορεί να επιδεινώσει την ένταση και τη διάρκεια των κυμάτων καύσωνα, συμβάλλοντας σε υψηλότερα ποσοστά νοσηρότητας και θνησιμότητας (Pyrgou and Santamouris 2018).

Οι τοπικές καιρικές συνθήκες αποτελούν έναν από τους κύριους μοχλούς της ανάπτυξης και διαμόρφωσης της UHI (Liu et al. 2020, Ngarambe et al. 2021, Yang et al. 2020). Για το λόγο αυτό, η σχέση μεταξύ της έντασης της UHI και μεμονωμένων μετεωρολογικών παραμέτρων, όπως η ταχύτητα και κατεύθυνση του ανέμου, η νέφωση και η βροχόπτωση (σε μικρότερο βαθμό), έχουν αναλυθεί και ποσοτικοποιηθεί σε αρκετές μελέτες (Du et al. 2016, Giannaros and Melas 2012, He 2018, Lauwaet et al. 2016, Lee and Baik 2010). Σύμφωνα με τους Oke et al. (2017), ο άνεμος συμβάλει στην ατμοσφαιρική μεταφορά και ανάμειξη, η οποία περιορίζει τις οριζόντιες και κάθετες διαφορές θερμοκρασίας, ενώ η νεφοκάλυψη επηρεάζει σημαντικά τις ροές ακτινοβολίας μικρού και μεγάλου κύματος που είναι οι κύριοι μηχανισμοί θέρμανσης και ψύξης, αντίστοιχα. Επιπλέον, η υγρασία και η πίεση συσχετίζονται λιγότερο με την UHI από ότι ο άνεμος και η νεφοκάλυψη (Oke et al. 2017).



Δεδομένου ότι η αλληλεπίδραση της UHI με μεμονωμένες μετεωρολογικές παραμέτρους και φαινόμενα μικρής κλίμακας έχουν διερευνηθεί επαρκώς στο παρελθόν, η συσχέτιση μεταξύ της UHI και των μεγάλων κλίμακας ατμοσφαιρικών συνθηκών για μια δεδομένη τοποθεσία/πόλη χρήζει περαιτέρω διερεύνησης. Για το λόγο αυτό θα ήταν σκόπιμο να συνυπολογιστεί το πλήρες φάσμα των τοπικών τύπων καιρού (Weather Types-WTs), περιλαμβάνοντας τις συνθήκες του ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος που περιβάλλει την πόλη, όπως η θερμοκρασία του αέρα, η υγρασία, ο άνεμος (κατεύθυνση και ταχύτητα), η βροχόπτωση και η ηλιακή ακτινοβολία. Οι συνδυασμοί όλων αυτών των κλιματικών μεταβλητών είναι αρκετά περίπλοκοι, γεγονός που εξηγεί την ανάγκη για σύνθεση και ταξινόμηση των επικρατουσών μετεωρολογικών συνθηκών και ως εκ τούτου, τη συσχέτισή τους με την εμφάνιση και την ένταση της UHI.

Η ανάλυση των κλιματικών φαινομένων σε μέση (τοπική) και μικρή κλίμακα απαιτεί ένα αρκετά πυκνό πλέγμα μετεωρολογικών μετρήσεων με υψηλή χρονική ανάλυση που δεν είναι γενικά εύκολα διαθέσιμο, λόγω υλικοτεχνικών και οικονομικών περιορισμών. Για αυτούς τους λόγους, η χρήση κλιματικών δεδομένων που έχουν μοντελοποιηθεί και συνταχθεί σε μεγάλα σύνολα δεδομένων, αποτελεί μια ολοένα και πιο βιώσιμη και πολύτιμη επιλογή. Στο πλαίσιο αυτό, το πρόγραμμα Copernicus (European Union Earth Observation Program) που συντονίζει και διαχειρίζεται η Ευρωπαϊκή Επιτροπή σε συνεργασία με τον Ευρωπαϊκό Οργανισμό Διαστήματος, κυκλοφόρησε πρόσφατα ένα πλήρες σύνολο δεδομένων που περιέχει τη θερμοκρασία του αέρα, την ειδική υγρασία, τη σχετική υγρασία και την ταχύτητα του ανέμου, για 100 Ευρωπαϊκές πόλεις από το 2008 έως το 2017. Λόγω της πολύ υψηλής χρονικής του ανάλυσης (ωριαία) και της επίσης πολύ υψηλής χωρικής ανάλυσης (100x100m), το Ευρωπαϊκό αυτό σύνολο δεδομένων αποδεικνύεται εξαιρετικά χρήσιμο για λεπτομερή ανάλυση και μελέτη του αστικού κλίματος, ειδικά σε αστικές περιοχές όπου τέτοιου είδους δεδομένα είναι ανεπαρκή ή ακόμη και ανύπαρκτα.

Η παρούσα διατριβή εστιάζει κυρίως στη μελέτη του φαινομένου της UHI στο επίπεδο του στρώματος αστικού θόλου (Urban Canopy Layer - UCL). Οι έρευνες του φαινομένου UHI στο UCL διεξάγονται παραδοσιακά χρησιμοποιώντας ταυτόχρονες μετρήσεις θερμοκρασίας του αέρα κοντά στην επιφάνεια στις λεγόμενες αστικές και αγροτικές περιοχές. Η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ των αστικών περιοχών και των αγροτικών περιοχών αναφέρεται ως ένταση της αστικής θερμικής νησίδας (Urban Heat



Island Intensity - UHI) και θεωρείται το πιο ευρέως διαδεδομένο μέτρο της αλλαγής του αστικού κλίματος. Μελέτες σχετικά με τον υπολογισμό και την εκτίμηση της UHI έχουν διεξαχθεί σε πολλές πόλεις ανά τον κόσμο, συμπεριλαμβανομένων πολλών μεγάλων πόλεων της Ευρώπης, της Βόρειας Αμερικής και της Ανατολικής Ασίας, συνεισφέροντας τα μέγιστα στη διερεύνηση της αστικής κλιματολογίας.

Επιπλέον, η εφαρμογή των ταξινομήσεων τοπικών τύπων καιρού (WTs) στις μελέτες που αφορούν το αστικό κλίμα και ειδικά, σε μελέτες του φαινομένου της UHI είναι αρκετά πρόσφατη και εξελίξιμη. Το μικρόκλιμα μιας πόλης προκύπτει ως το αποτέλεσμα τριών κυρίως συνιστωσών: του ευρύτερου κλίματος της περιοχής στην οποία βρίσκεται μια πόλη, των τοπικών γεωμορφολογικών χαρακτηριστικών και των αστικών χαρακτηριστικών της εκάστοτε πόλης (Lowry 1977). Οι ταξινομήσεις των τοπικών WTs, αντιστοιχούν στην πρώτη συνιστώσα, η οποία σχετίζεται με την ανάλυση των κλιματικών συνθηκών χωρίς την επίδραση των τοπογραφικών είτε των αστικών χαρακτηριστικών μιας πόλης. Σύμφωνα με τους Hidalgo and Jougle (2018), αυτή η μεθοδολογία επιτρέπει την απλοποίηση του πλήθους των καιρικών συνθηκών που επικρατούν και αντιπροσωπεύουν μια συγκεκριμένη τοποθεσία. Η ταξινόμηση WTs, έχει αποδειχθεί ένα εξαιρετικά χρήσιμο εργαλείο στην μελέτη των επιπτώσεων της UHI σε μεγάλα αστικά κέντρα παγκοσμίως (Reis et al. 2020, Khan et al. 2021, Kassomenos et al. 2022) και σε αυτή τη μελέτη η UHI αναλύεται μέσω τοπικών WTs για 4 μεγάλα Ευρωπαϊκά κέντρα, χρησιμοποιώντας ένα σύνολο δεδομένων θερμοκρασίας αέρα που παρήχθη από την Υπηρεσία για την Κλιματική Αλλαγή Copernicus (Copernicus Climate Change Service).

1.2 Αντικείμενο μελέτης

Στην παρούσα μελέτη, το φαινόμενο UHI σε 4 μεγάλες Ευρωπαϊκές πόλεις (Αθήνα, Βαρκελώνη, Λουξεμβούργο και Ελσίνκι) αναλύεται μέσω τοπικών WTs. Για το σκοπό αυτό, μεγάλος όγκος από δεδομένα (big data) μετεωρολογικών παραμέτρων χρησιμοποιήθηκαν τόσο για τον υπολογισμό της UHI, όσο και για την ταξινόμηση τοπικών WTs για κάθε πόλη. Θα μπορούσαμε να συνοψίσουμε το αντικείμενο της μελέτης σε τρεις βασικούς στόχους, ως εξής:

1. Στο πλαίσιο του πρώτου στόχου, εξετάζονται οι αλλαγές στη συχνότητα των WTs για την ευρύτερη περιοχή της Ευρώπης από το 1979 έως το 2019, χρησιμοποιώντας ένα πρόσφατα αναπτυγμένο σύστημα ταξινόμησης τύπων



- καιρού (Gridded Weather Typing Classification 2-GWTC2), δημιουργώντας έτσι την πρώτη μεγάλη εικόνα του αντικειμένου της μελέτης.
2. Στο δεύτερο στόχο τα πράγματα γίνονται πιο συγκεκριμένα. Εδώ, επιχειρείται ο σχηματισμός και η ταξινόμηση των επικρατέστερων τοπικών WTs για κάθε πόλη, καθώς και η ανάλυση των βασικών χαρακτηριστικών τους, ως υποστηρικτικού εργαλείου για τη μελέτη της UHI σε μεγάλα Ευρωπαϊκά αστικά κέντρα.
 3. Ως τρίτο στόχο, αξιοποιώντας τις παραπάνω ταξινομήσεις για κάθε πόλη, επιχειρείται η συσχέτιση συγκεκριμένων WTs τόσο με την ένταση της UHI, όσο και με το φαινόμενο της αστικής υπερθέρμανσης (Urban Overheating - UO), κατά τη θερμή περίοδο (Ιούνιος-Σεπτέμβριος) για ημέρα και νύχτα, από το 2008 έως το 2017, με σκοπό την καλύτερη ανάλυση/πρόβλεψη του φαινομένου UHI και των δυσμενών επιπτώσεών του στην ανθρώπινη θερμική άνεση.

Επιπλέον, με βάση τους παραπάνω στόχους, τα ερωτήματα τα οποία εγείρονται και με τα οποία η παρούσα διατριβή πραγματεύεται είναι πολλαπλά:

- Εκτός από τις μεταβολές στη συχνότητα WTs στην Ευρώπη, ποιες άλλες μετεωρολογικές μεταβλητές (θερμοκρασία στο επίπεδο του εδάφους, θερμοκρασία στην επιφάνεια της θάλασσάς και σημείο δρόσου) παρουσιάζουν ενδιαφέρον ως προς τη μεταβολή στη συχνότητά τους και με ποιόν τρόπο;
- Σύμφωνα με τον προσδιορισμό και την περιγραφή WTs για μεγάλα αστικά κέντρα στην Ευρώπη, ποιοι από αυτούς τους WTs παρουσιάζουν τις μεγαλύτερες συχνότητες εμφάνισης κατά τη διάρκεια της περιόδου μελέτης (1950-2020), και τι ισχύει για τις διαχρονικές διακυμάνσεις στη συχνότητας εμφάνισης τους;
- Υπάρχει αξιοσημείωτη διαφορά κατά τη διάρκεια ημέρας και νύχτας στην κατανομή συχνοτήτων της έντασης της UHI;
- Με ποιόν τρόπο η UO μεταβάλλεται χρονικά και χωρικά, και που εντοπίζονται οι μέγιστες τιμές της (hot-spots), στα 4 μεγάλα Ευρωπαϊκά κέντρα υπό μελέτη; Ποιοι παράγοντες (τοπικό κλίμα, μικρής κλίμακας μετεωρολογικές συνθήκες, χαρακτηριστικά πόλης, γεωγραφικό πλάτος) φαίνεται να επηρεάζουν τόσο τη δυναμική όσο και την έκταση του φαινομένου της UO;



- Θα ήταν δυνατή η ανάπτυξη και η αξιοποίηση των τοπικών κατηγοριοποιήσεων WTs σε συνδυασμό με τη μελέτη της UHI, να λειτουργήσουν επιχειρησιακά, συνεισφέροντας στη βελτίωση της θερμικής άνεσης των πληθυσμών μεγάλων αστικών κέντρων και στη μείωση των κινδύνων που αφορούν την ανθρώπινη υγεία;

1.3 Δομή διατριβής

Η δομή της παρούσας διατριβής έχει ως εξής:

Στο Κεφάλαιο 1, παρουσιάζεται μια γενική επισκόπηση του ερευνητικού θέματος της παρούσας διατριβής, διευκρινίζοντας τους ερευνητικούς στόχους που πρέπει να επιτευχθούν και τις ερωτήσεις που πρέπει να απαντηθούν μέσω της διεξαγόμενης έρευνας. Εν συνεχεία, στο Κεφάλαιο 2 παρουσιάζεται μια εκτενής και λεπτομερής εισαγωγή στην αστικοποίηση καθώς και στο φαινόμενο της UHI, συζητώντας τα αίτια του φαινομένου, τις δυσμενείς επιπτώσεις του στο περιβάλλον και στην ανθρώπινη υγεία, καθώς και τα εργαλεία που χρησιμοποιούνται ευρύτερα για τη μελέτη του. Στο Κεφάλαιο 3, παρουσιάζεται το θεωρητικό υπόβαθρο των συνοπτικών ταξινομήσεων, καθώς και οι μεθοδολογίες που έχουν αναπτυχθεί για τη μελέτη τους. Περιγράφονται επίσης αξιολογικότες ταξινομήσεις τύπων καιρού, όπως έχουν περιγραφεί στη διεθνή βιβλιογραφία. Έπειτα, τα αποτελέσματα και η μεθοδολογία της μελέτης σχετικά με τις μεταβολές στη συχνότητα τύπων καιρού στην Ευρώπη αποτυπώνονται στο Κεφάλαιο 4. Το Κεφάλαιο 5, εισάγει τα αποτελέσματα της ταξινόμησης WTs που επιχειρήθηκε για 4 Ευρωπαϊκές πόλεις (Αθήνα, Βαρκελώνη, Λουξεμβούργο και Ελσίνκι), ενώ στο Κεφάλαιο 6, αξιολογείται η ανάπτυξη και η ένταση της UHI και της UO μέσω των WTs για κάθε πόλη. Η παρούσα διατριβή ολοκληρώνεται με το Κεφάλαιο 7, όπου συνοψίζονται όλα τα ευρήματα της παρούσας διατριβής καθώς και οι μελλοντικές προοπτικές.



2. Αστικοποίηση και φαινόμενο Αστικής Θερμικής Νησίδας

Τα οφέλη της αστικοποίησης είναι αναμφισβήτητα πολλά για τον άνθρωπο, δεδομένου ότι δημιουργεί συνθήκες στις οποίες μπορεί να διασφαλίζει την ευημερία και την ασφάλειά του. Ωστόσο, απρόβλεπτες συνέπειες συνοδεύουν αυτά τα οφέλη. Μία από τις συνέπειες της οποίας ο αντίκτυπος δεν έχει ακόμη εκτενώς μελετηθεί είναι η επιρροή που έχουν οι πόλεις στον καιρό και το κλίμα γύρω τους. Η αστική επέκταση οδηγεί σε σημαντικές αλλαγές στην κάλυψη της γης. Καθώς οι πόλεις εξαπλώνονται στον περιβάλλοντα φυσικό βιότοπο, η βλάστηση και οι φυσικές επιφάνειες αντικαθίστανται από δρόμους, κτήρια, και άλλες δομές απαραίτητες για τη συντήρηση και υποδοχή αυξανόμενων πληθυσμών. Οι αλλαγές στην κάλυψη της γης στις αστικές περιοχές επηρεάζουν σημαντικά το τοπικό κλίμα και τον καιρό. Η θερμοκρασία, η βροχόπτωση, η υγρασία, ο άνεμος, η ακτινοβολία και η νεφοκάλυψη είναι συχνά πολύ διαφορετικές μεταξύ μιας πόλης και του υπαίθριου/αγροτικού της περιβάλλοντος. Τέτοιες διαφορές έχουν τεκμηριωθεί καλά στην επιστημονική βιβλιογραφία, έτσι ώστε να θεωρείται ότι οι πόλεις έχουν αναπτύξει τοπικά κλιματικά χαρακτηριστικά (μικροκλίμα), όπως τα δάση, οι λίμνες, οι κοιλάδες και οι ακτές.

Το φαινόμενο UHI, αναγνωρίζεται ως το πιο εμφανές χαρακτηριστικό του αστικού κλίματος και ίσως το πιο αντιπροσωπευτικό περιβαλλοντικό πρόβλημα που προκύπτει από τις τοπικές κλιματικές τροποποιήσεις λόγω του αυξανόμενου ρυθμού αστικοποίησης (Santamouris 2007), στο οποίο συμβάλει φυσικά και το φαινόμενο της πλανητικής θέρμανσης. Ουσιαστικά, ορίζεται ως η διαφορά της θερμοκρασίας του αέρα που παρατηρείται στις πυκνοκατοικημένες αστικές περιοχές, η οποία είναι υψηλότερη σε σχέση με την αντίστοιχη των γειτονικών ημιαστικών/αγροτικών περιοχών. Οι διαφορές αυτές προέρχονται από την αντικατάσταση του φυσικού τοπίου με πολύπλοκες κατασκευές και υλικά που χαρακτηρίζονται από χαμηλή διαπερατότητα και υψηλή θερμοχωρητικότητα. Η απελευθέρωση ρύπων και ανθρωπογενούς θερμότητας στην αστική ατμόσφαιρα συμβάλλει επίσης στη δημιουργία μιας «τεχνητά» θερμής πόλης. Οι επιπτώσεις των διαφορών αστικών – αγροτικών περιοχών ως προς τα γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά, η περαιτέρω αστική χωρική κάλυψη της γης, η ποιότητα του αέρα και η ανθρωπογενής δραστηριότητα στο πλαίσιο της συνεχόμενης αστικής επέκτασης, συμβάλουν καθοριστικά στη δημιουργία «νησιών» υψηλότερης θερμοκρασίας στην ψυχρότερη ύπαιθρο.



Σε αντίθεση με τον παραπάνω απλοϊκό ορισμό, η UHI είναι ένα σύνθετο φαινόμενο που εμφανίζεται σε διάφορες χωρικές και χρονικές κλίμακες. Σε μικρότερη κλίμακα, μεμονωμένα κτίρια, οχήματα και δέντρα δημιουργούν ένα θερμικό μικροκλίμα που μπορεί να αλλάξει πολύ γρήγορα. Σε μεγαλύτερη κλίμακα, οι πόλεις επηρεάζουν το περιφερειακό κλίμα και τα καιρικά μοτίβα ακόμα και σε μεγάλη έκταση. Όσον αφορά την κλίμακα του φαινομένου, θεμελιώδες ζήτημα αποτελεί η διάκριση μεταξύ του στρώματος αστικού θόλου (urban canopy layer - UCL) και του αστικού οριακού στρώματος (urban boundary layer - UBL). Αυτή η διάκριση προτάθηκε αρχικά από τον Oke (1976) και αποτελεί από τότε βασική καθοδήγηση για όλους τους τύπους έρευνας που αφορούν το αστικό κλίμα. Στο UCL, που ορίζεται χονδρικά από το έδαφος μέχρι το μέσο επίπεδο στέγης, οι διαδικασίες ροής αέρα και ανταλλαγής ενέργειας ελέγχονται κατά κύριο λόγο από μικρής κλίμακας και τοπικά (συγκεκριμένα για κάθε τοποθεσία) χαρακτηριστικά. Αντίθετα, το UBL, που ορίζεται πάνω από το μέσο επίπεδο στέγης, είναι εκείνο το τμήμα του πλανητικού οριακού στρώματος (planetary boundary layer - PBL) του οποίου η δομή και τα χαρακτηριστικά επηρεάζονται από την παρουσία της υποκείμενης αστικής επιφάνειας. Ως εκ τούτου, η παραπάνω διάκριση υπερβαίνει την απλή κλίμακα, εισάγοντας διαφορετικές επιλογές διαδικασιών.

2.1 Τύποι Αστικής Θερμικής Νησίδας

Εκτεταμένη έρευνα τις τελευταίες δεκαετίες έχει υποδείξει ότι το φαινόμενο UHI παρουσιάζει μεγαλύτερη πολυπλοκότητα από ό,τι αρχικά υποψιαζόμαστε (Arnfield 2003). Μπορούν να οριστούν διάφοροι τύποι UHI ανάλογα του μέσου παρατήρησης και τη μεθοδολογίας μέτρησης που υιοθετείται. Αν και όλοι οι τύποι UHI συνδέονται με την ανταλλαγή ενέργειας, μάζας και ορμής, κάθε μεμονωμένος τύπος περιλαμβάνει διαφορετικές μεθοδολογίες, τεχνικές μέτρησης και χωρικές και χρονικές κλίμακες.

Ανάλογα με το μέσο ανίχνευσης, οι αστικές θερμικές νησίδες μπορούν πρώτα να διαχωριστούν στις παρακάτω κατηγορίες:

- **UHI επιφάνειας (Surface UHI):** Ο τύπος αυτός παρατηρείται στην επιφάνεια των εκάστοτε περιοχών μελέτης και τυπικά ορίζεται εφαρμόζοντας διαφορές θερμοκρασίας μεταξύ αστικών (δρόμων, κτιρίων) και υπαίθριων/αγροτικών επιφανειών (έδαφος, βλάστηση). Τα διαφορετικά υλικά που υπάρχουν σε αστικές και αγροτικές περιοχές, των οποίων η θερμοκρασία επιφάνειας μπορεί να ποικίλλει κατά αρκετούς βαθμούς, περιπλέκουν σημαντικά τη δομή των επιφανειακών UHI. Το μέγεθός τους ποικίλλει ανάλογα με την εποχή λόγω των



αλλαγών στην ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας, της επιφανειακής κάλυψης και των μετεωρολογικών συνθηκών. Λόγω αυτής της διακύμανσης, οι επιφανειακοί τύποι UHI τείνουν να παρουσιάζουν μεγαλύτερη ένταση κατά τη διάρκεια της ημέρας (Oke 1982). Μελετάται κυρίως με βάση τις παρατηρήσεις απομακρυσμένων αισθητήρων, μέσω της μεθόδου της τηλεπισκόπησης, που βασίζεται σε δεδομένα υπέρυθρης ακτινοβολίας. Ο δορυφορικός αισθητήρας αντιλαμβάνεται την εκπομπή υπέρυθρων κυμάτων που εκπέμπει η επιφάνεια και άρα τη θερμοκρασία αυτής και όχι τη θερμοκρασία του αέρα.

- **UHI υπό-επιφάνειας (Sub-surface UHI):** Ο τύπος αυτός εντοπίζεται κάτω από την επιφάνεια μιας πόλης. Οι υπό-επιφανειακές UHI έχουν λάβει γενικά λίγη προσοχή από την επιστημονική κοινότητα. Μια ζεστή αστική επιφάνεια μεταφέρει τη θερμότητα προς τα κάτω στο έδαφος και ως εκ τούτου, το μοτίβο θερμοκρασίας κάτω από την επιφάνεια συσχετίζεται καλά με αυτό της πάνω επιφάνειας. Γενικά, υψηλές υπό-επιφανειακές θερμοκρασίες παρατηρούνται κάτω από πυκνοκατοικημένες αστικές περιοχές, ενώ χαμηλές θερμοκρασίες βρίσκονται κάτω από υπαίθριες/αγροτικές περιοχές (Taniguchi et al. 2008).
- **UHI ατμόσφαιρας (Atmospheric UHI):** Ο πιο συχνά μελετημένος τύπος UHI, ο οποίος παρατηρείται στην ατμόσφαιρα. Χαρακτηρίζεται από μικρότερη χωρική αλλά και χρονική διακύμανση σε σχέση με την επιφανειακή UHI. Βασίζεται κυρίως σε επί τόπου μετρήσεις (σταθεροί μετεωρολογικοί σταθμοί) της θερμοκρασίας του ατμοσφαιρικού αέρα και μπορεί να θεωρηθεί ως ο πιο κλασσικός τρόπος εύρεσης και αξιολόγησης του φαινομένου. Ο Oke (1976) ήταν ο πρώτος που διέκρινε δύο τύπους ατμοσφαιρικών UHI, ο καθένας συνδεδεμένος με διαφορετικά στρώματα της αστικής ατμόσφαιρας. Ο πρώτος τύπος αφορά την UHI οριακού στρώματος (boundary-layer UHI), ο οποίος βασίζεται σε διαδικασίες τοπικής και μέσης κλίμακας. Αυτός ο τύπος UHI συνδέεται με εκείνο το τμήμα του πλανητικού οριακού στρώματος (planetary boundary layer-PBL), του οποίου τα χαρακτηριστικά επηρεάζονται από την υποκείμενη πόλη. Ο δεύτερος τύπος αφορά την UHI στρώματος θόλου (urban canopy-layer-UCL), που παρατηρείται στο χαμηλότερο ατμοσφαιρικό στρώμα που εκτείνεται από το έδαφος μέχρι το μέσο επίπεδο των στεγών μιας πόλης. Τα χαρακτηριστικά των UHI στρώματος θόλου καθορίζονται από διαδικασίες που λειτουργούν κυρίως σε τοπική κλίμακα και παρουσιάζουν μεγάλο



ενδιαφέρον και σημασία για τους ερευνητές, καθώς επηρεάζουν διάφορες πτυχές της καθημερινής ανθρώπινης δραστηριότητας.

Παρακάτω, επικεντρωνόμαστε στην UHI στρώματος θόλου (UCL), το οποίο αποτελεί και το αντικείμενο της παρούσας διατριβής.

2.2 Αιτίες εμφάνισης Αστικής Θερμικής Νησίδας στρώματος θόλου

Οι θερμικές νησίδες αναπτύσσονται κυρίως ως αποτέλεσμα των διαφορών των αστικών/αγροτικών ενεργειακών ισοζυγίων (Oke 1982). Αυτές οι διαφορές οφείλονται σε συνδυασμό θερμικών, επαγωγικών και αεροδυναμικών ιδιοτήτων συγκεκριμένων περιοχών, οι οποίες καθορίζουν τον τρόπο με τον οποίο οι αστικές και αγροτικές επιφάνειες ρυθμίζουν και κατανέμουν τη διαθέσιμη ενέργειά τους (Oke 1987). Ο καταμερισμός ενέργειας με τη σειρά του επηρεάζει το θερμικό μικροκλίμα αυτών των επιφανειών και του ατμοσφαιρικού στρώματος με το οποίο συνδέονται.

Για να γίνει πιο κατανοητή η διαδικασία και η ερμηνεία του επιφανειακού ενεργειακού ισοζυγίου (surface energy budget - SEB), θα βασιστούμε σε μια απλοϊκή προσέγγιση όπου, οι δύο τοποθεσίες που αντιπροσωπεύουν τις "αστικές" και "υπαίθριες" συνθήκες είναι ένα αστικό φαράγγι (Urban Canyon - UC) και ένα γυμνό χωράφι αντίστοιχα. Το αστικό φαράγγι αποτελείται από τον αέρα μεταξύ παρακείμενων κτιρίων, που περιλαμβάνει τις επιφάνειες αυτών των κτιρίων και το δρόμο, τον κλειστό όγκο αέρα, τις ανοιχτές «κορυφές» στο επίπεδο της οροφής και τα «άκρα» του φαραγγιού σε διασταυρώσεις δρόμων, μέσω των οποίων οι ροές ενέργειας και μάζας μπορούν να μεταφέρονται οριζόντια. Η κατασκευή του, είναι το βασικό δομικό μοντέλο που υιοθετείται στην αστική κλιματολογία για να διακρίνει αυτό που είναι κοινό σε πολλά αστικά τοπία από αυτό που είναι μοναδικό σε ένα συγκεκριμένο αρχιτεκτονικό, γεωγραφικό και πολιτιστικό περιβάλλον. Σε αντίθεση με το αστικό φαράγγι, το γυμνό χωράφι αντιπροσωπεύει μια τυπική γεωργική (ή μη αστική) έκταση γης. Η επιφάνειά του θεωρείται επίπεδη και ομοιογενής και δεν περιπλέκεται από δέντρα ή ανομοιόμορφη γεωμετρία.

Κατά τη διάρκεια της ημέρας, η ηλιακή ακτινοβολία είναι η κύρια κινητήρια δύναμη του επιφανειακού ενεργειακού ισοζυγίου τόσο στο αστικό φαράγγι όσο και στο γυμνό χωράφι (Oke 1987). Έρευνα των τελευταίων δεκαετιών έχει αποδείξει ότι δεν φαίνεται να υπάρχει λόγος να αμφισβητηθεί η ιδέα που δόθηκε για πρώτη φορά από τον Oke (1974), ότι είναι δηλαδή απίθανο να παρατηρηθούν μεγάλες διακυμάνσεις στην



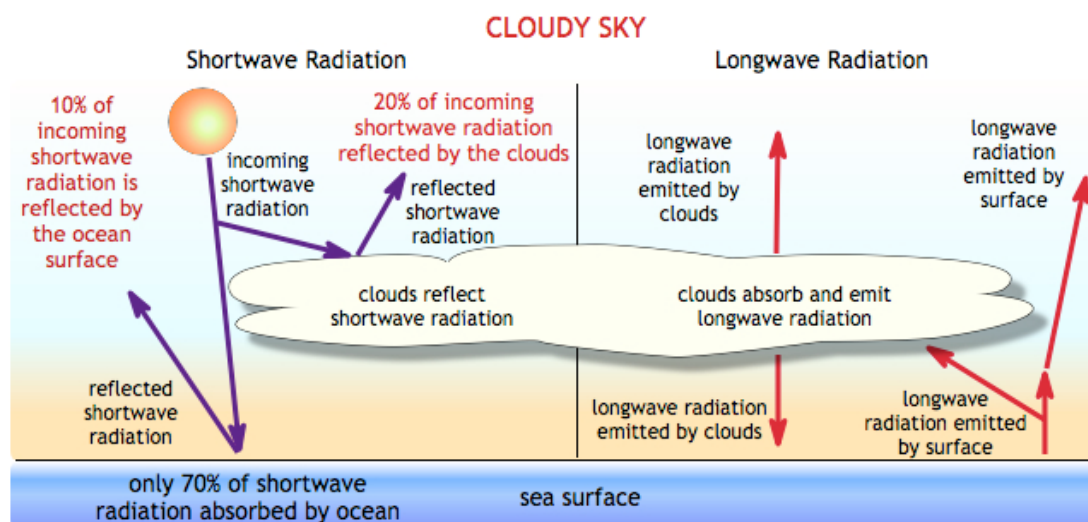
καθαρή ροή ακτινοβολίας όλων των μηκών κύματος μεταξύ αστικών και αγροτικών περιοχών.

Η εισερχόμενη μικρού μήκους κύματος ακτινοβολία (shortwave radiation) μειώνεται στις αστικές περιοχές λόγω της απορρόφησης από τους ατμοσφαιρικούς ρύπους και τα αιρούμενα σωματίδια (Landsberg 1981). Ωστόσο, αυτή η εξασθένηση εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη φύση και την ποσότητα των ρύπων. Για παράδειγμα, σε μια αστική ατμόσφαιρα με υψηλά επίπεδα ρύπανσης, η μείωση της εισερχόμενης μικρού κύματος ακτινοβολίας μπορεί να φτάσει το 10-20%, ενώ σε μια πόλη με χαμηλότερα επίπεδα ρύπανσης το εύρος μπορεί να είναι 2-10%. Κατά τη διάρκεια των ημερών που χαρακτηρίζονται από ιδιαίτερα υψηλές συγκεντρώσεις ατμοσφαιρικών ρύπων και σε περιόδους χαμηλού ηλιακού υψομέτρου, η εξασθένηση μπορεί να φτάσει το 30% (Oke 1987). Επιπλέον, η ποσότητα της μικρού μήκους κύματος ακτινοβολίας που ανακλάται εξαρτάται τόσο από τη λευκαύγεια (albedo) των επιφανειών όσο και από τη γεωμετρική τους διάταξη. Τα υλικά που χρησιμοποιούνται συνήθως σε αστικές περιοχές γενικά χαρακτηρίζονται από χαμηλότερες τιμές λευκαύγειας της επιφάνειας σε σύγκριση με τις αγροτικές επιφάνειες (Oke 1987, Taha 1997). Η επιφανειακή λευκαύγεια των αστικών περιοχών παρουσιάζει περαιτέρω μείωση λόγω της παγιδευμένης ακτινοβολίας που προκαλείται από τη σύνθετη γεωμετρία που μοιάζει με φαράγγι. Όταν συνδυάζονται, αυτά τα χαρακτηριστικά καταλήγουν σε τιμές αστικής λευκαύγειας περίπου 0,15, οι οποίες είναι χαμηλότερες από την πλειονότητα των τιμών των αγροτικών επιφανειών, εξαιρουμένων των δασών και των περιοχών με πιο σκούρα εδάφη (Oke 1987). Συνοψίζοντας, αναμένεται ότι η εισερχόμενη μικρού μήκους κύματος ακτινοβολία να παρουσιάζει μείωση στις αστικές περιοχές σε σύγκριση με την αγροτική ύπαιθρο. Ωστόσο, αυτή η μείωση φαίνεται να αντισταθμίζεται ως επί το πλείστον από τη μειωμένη λευκαύγεια των αστικών επιφανειών. Ως αποτέλεσμα, η καθαρή εισερχόμενη μικρού μήκους κύματος ακτινοβολία της αστικής επιφάνειας δεν διαφέρει σημαντικά από αυτή μιας αγροτικής επιφάνειας (Oke 1982, Christen and Vogt 2004).

Παρόμοια φαινόμενα μπορούν επίσης να παρατηρηθούν στο ενεργειακό ισοζύγιο της μεγάλου μήκους κύματος ακτινοβολίας (longwave radiation). Οι διεργασίες της μεγάλου μήκους κύματος ακτινοβολίας δεν επηρεάζονται μόνο από τις αυξημένες συγκεντρώσεις ρύπων και τις γενικά χαμηλότερες επιφανειακές εκπομπές, αλλά και από την παρουσία της UHI. Οι επιπτώσεις των υψηλών θερμοκρασιών των αστικών



επιφανειών φαίνεται να υπερτερούν των επιπτώσεων σε μεταβολές των εκπομπών, με αποτέλεσμα μια πιθανή ενισχυμένη εξερχόμενη ροή μεγάλου κύματος ακτινοβολίας. Ωστόσο, σημαντικό μέρος αυτής της ροής απορροφάτε από τους ρύπους της αστικής ατμόσφαιρας, η οποία δημιουργεί ένα ψευδο-θερμοκηπικό φαινόμενο. Αυτό το τμήμα της ακτινοβολίας μεγάλου μήκους κύματος στη συνέχεια ακτινοβολείται εκ νέου στην επιφάνεια, μαζί με αυτό της εισερχόμενης ακτινοβολίας που μεταδίδεται στην επιφάνεια (Σχήμα 2.1). Συνοπτικά, φαίνεται ότι οι τροποποιήσεις των ροών ακτινοβολίας μεγάλου μήκους κύματος τείνουν να αλληλοαναιρούνται, με αποτέλεσμα μάλλον αμελητέες διαφορές της καθαρής ακτινοβολίας μεγάλου μήκους κύματος μεταξύ αστικών - αγροτικών περιοχών (Oke 1982, 1987). Συνολικά, η μεγάλη εισροή μικρού μήκους κύματος ακτινοβολίας κατά τη διάρκεια της ημέρας στις αστικές περιοχές, λόγω χαμηλότερης επιφανειακής λευκαύγειας (Taha 1997, Christen and Vogt 2004), αντισταθμίζεται κυρίως από τη μεγάλη απώλεια ενέργειας της ακτινοβολίας μεγάλου μήκους κύματος, που προκύπτει από τις υψηλότερες θερμοκρασίες των αστικών επιφανειών (Christen and Vogt 2004). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, την εμφάνιση περίπου ίδιων τιμών ημερήσιας συνολικής καθαρής ροής ακτινοβολίας όλων των κυμάτων, σε αστικές και αγροτικές περιοχές (Σχήμα 2.2).



Σχήμα 2.1. Η κατανομή της ηλιακής και της γήινης ακτινοβολίας στην ατμόσφαιρα και στην επιφάνεια της Γης (πηγή: Center of Multiscale Modeling of Atmospheric Processes)

Ωστόσο, στις επιφάνειες του αστικού φαραγγιού και του γυμνού χωραφιού η ενέργεια ακτινοβολίας κατανέμεται διαφορετικά. Αυτές οι διαφορές επηρεάζονται κυρίως από τη γεωμετρία των επιφανειών. Η σύνθετη τρισδιάστατη αστική γεωμετρία σχεδόν διπλασιάζει τη συνολική επιφάνεια μιας πόλης σε σύγκριση με την επίπεδη επιφάνεια ενός γυμνού χωραφιού, με αποτέλεσμα την παγίδευση και την απορρόφηση περαιτέρω



ενέργειας. Επιπλέον, η υψηλή αεροδυναμική αντίσταση των πόλεων έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της ταχύτητας του ανέμου. Μικρές τιμές μήκους τραχύτητας σε συνδυασμό με τη χαμηλή ταχύτητα ανέμου εμποδίζουν σημαντικά την τυρβώδη ανταλλαγή θερμότητας και την ψύξη μέσω εξάτμισης των αστικών περιοχών. Κατά συνέπεια, διαφορές στην αστική και υπαίθρια/αγροτική γεωμετρία, δημιουργούν διαφορές στην επιφανειακή λευκαύγεια, στη ροή του αέρα και τέλος, στην αποθήκευση θερμότητας κατά τη διάρκεια της ημέρας. Το αυξημένο μέγεθος της αποθήκευσης θερμότητας στο αστικό φαράγγι θεωρείται χαρακτηριστικό γνώρισμα του αστικού επιφανειακού ενεργειακού ισοζυγίου (Grimmond and Oke 1995, Grimmond and Oke 1999b). Εκτός από τη γεωμετρία της επιφάνειας, οι θερμικές ιδιότητες (θερμοχωρητικότητα, θερμική αγωγιμότητα) των αστικών επιφανειών παίζουν βασικό ρόλο στην αύξηση της αποθηκευμένης θερμότητας. Επιπλέον, η κατανομή της ενέργειας στο αστικό φαράγγι και στην περιοχή γυμνού χωραφιού διαφοροποιείται περαιτέρω λόγω των διαφορών στις ιδιότητες των επιφανειών και στη διαθεσιμότητα υγρασίας (Σχήμα 2.2).

Συνήθως, η βλάστηση καλύπτει μόνο ένα μικρό μέρος των επιφανειών στις πόλεις. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την στεγανοποίηση της αστικής επιφάνειας που με τη σειρά της οδηγεί σε αυξημένη επιφανειακή απορροή, μειωμένη διείσδυση, μειωμένη εξάτμιση καθώς και τη δραματική μείωση της εξατμισοδιαπνοής, μια διαδικασία κατά την οποία η βλάστηση απελευθερώνει νερό στον ατμοσφαιρικό αέρα. Δεδομένων των παραπάνω επιπτώσεων που προκαλούνται από τα αστικά κέντρα στο ισοζυγίου νερού, οι αστικές περιοχές τείνουν να κατανέμουν, σχεδόν αποκλειστικά, το πλεόνασμα ενέργειας τους σε αισθητή και όχι σε λανθάνουσα θερμότητα (Oke 1982).

Όσον αφορά τα ισοζύγια της επιφανειακής ενέργειας και ακτινοβολίας, κατά τη διάρκεια της ημέρας, αυτά συνδέονται άμεσα με τις αλλαγές θερμοκρασίας στον υπερκείμενο όγκο του ατμοσφαιρικού αέρα. Στο αστικό φαράγγι, οι διάφορες επιφάνειες (δρόμοι, τοίχοι κτιρίων) θερμαίνονται όταν ακτινοβολούνται και δημιουργείται μια επιφανειακή ροή θερμότητας, διεισδύοντας στον όγκο του αέρα μέσω αγωγιμότητας και μεταφοράς (Oke 1987). Αυτή η συγκλίνουσα ροή θερμότητας θερμαίνει τον αέρα που περικλείεται στο φαράγγι, διαδραματίζοντας βασικό ρόλο στη δημιουργία θερμικών μικροκλιμάτων κατά τη διάρκεια της ημέρας. Από την άλλη πλευρά, οι αλλαγές θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια της ημέρας στο γυμνό χωράφι ελέγχονται κυρίως από τη διαθεσιμότητα υγρασίας και τη δυνατότητα σύγκλισης ή απόκλισης της ροής θερμότητας στην επιφάνεια και τα στρώματα αέρα. Υποθέτοντας

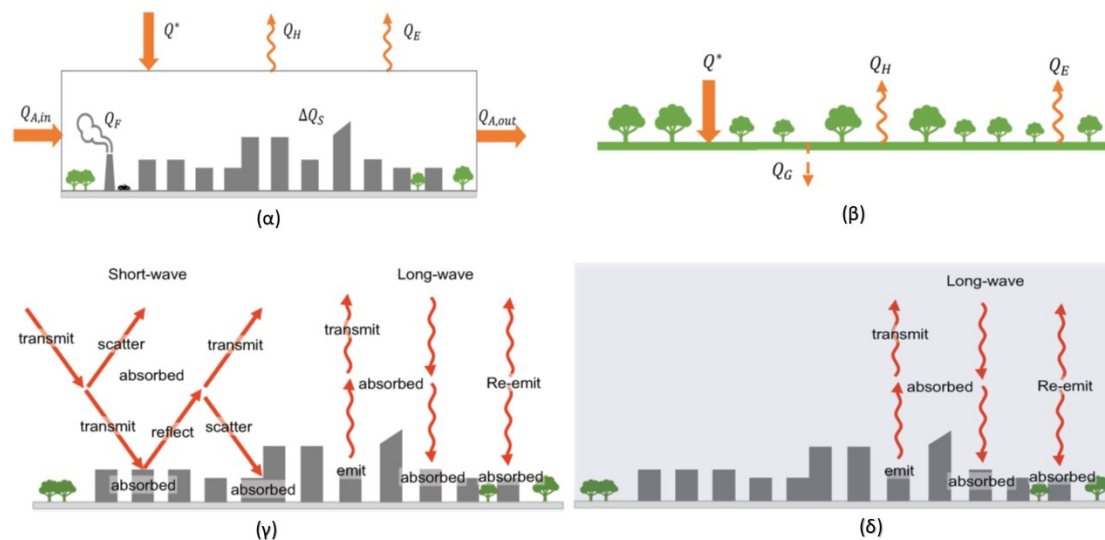


αμελητέα μεταφορά, η ανοδική ροή αισθητής θερμότητας από την επιφάνεια προς το κατώτερο στρώμα αέρα γενικά υπερβαίνει τη ροή θερμότητας από την κορυφή του όγκου αέρα. Όπως και στο αστικό φαράγγι, αυτή η σύγκλιση ροής θερμότητας δημιουργεί μια αύξηση της θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια της ημέρας στο γυμνό πεδίο (Oke 1987). Στην πραγματικότητα, οι θερμοκρασίες στην ύπαιθρο κατά τη διάρκεια της ημέρας μπορεί συχνά να είναι υψηλότερες από τις ταυτόχρονες αστικές θερμοκρασίες (Giannaros and Melas 2012), ανάλογα με τη γεωμετρία των φαραγγιών και τη διαθεσιμότητα εδαφικής υγρασίας στις αγροτικές τοποθεσίες (Σχήμα 2.2).

Σε αντιδιαστολή με τα παραπάνω, κατά τη διάρκεια της νύχτας η ισορροπία ενέργειας και ακτινοβολίας στο αστικό φαράγγι και στο γυμνό χωράφι διαφοροποιείται σε μεγάλο βαθμό. Λόγω της απουσίας μικρού μήκους κύματος ακτινοβολίας (ηλιακή), η μεγάλου μήκους κύματος ακτινοβολία (επίγεια) γίνεται όλο και πιο σημαντική στη ρύθμιση της ισορροπίας ακτινοβολίας και των σχετικών μεταβολών της θερμοκρασίας στον αστικό και υπαίθριο αέρα (Nunez and Oke 1976). Οι επιφανειακές θερμοκρασίες αρχίζουν να πέφτουν και η αισθητή θερμότητα απελευθερώνεται από τα κατώτερα στρώματα αέρα και το έδαφος. Κατά συνέπεια, μπορεί να παρατηρηθεί πτώση της θερμοκρασίας του αέρα κοντά στην επιφάνεια μετά τη δύση του ηλίου. Η ανοδική ροή θερμότητας από την κορυφή του αστικού φαραγγιού αντισταθμίζεται εν μέρει από την ανοδική ροή θερμότητας από το έδαφος και την εσωτερική ροή θερμότητας από τους τοίχους των κτιρίων. Ως αποτέλεσμα, η απόκλιση ροής θερμότητας (δηλαδή η ψύξη) παρεμποδίζεται σημαντικά στο αστικό φαράγγι και η επακόλουθη πτώση της θερμοκρασίας μετά το ηλιοβασίλεμα είναι πιο περιορισμένη από ό,τι στο γυμνό χωράφι. Επιπλέον, η νυχτερινή πτώση της θερμοκρασίας του αέρα κοντά στην επιφάνεια εντός του αστικού φαραγγιού παρεμποδίζεται περαιτέρω από την απελευθέρωση θερμότητας που είναι αποθηκευμένη εντός των αστικών δομών. Τα υλικά που χρησιμοποιούνται ευρέως σε αστικές περιοχές έχουν θερμικές ιδιότητες (θερμοχωρητικότητα, θερμική αγωγιμότητα) που είναι ουσιαστικά διαφορετικές από εκείνες των υλικών που βρίσκονται στην ύπαιθρο (Oke 1987). Ως εκ τούτου, οι πόλεις είναι σε θέση να αποθηκεύουν θερμότητα κατά τη διάρκεια της ημέρας πιο αποτελεσματικά από τις υπαίθριες περιοχές (Christen και Vogt 2004). Οι αστικές επιφάνειες αρχίζουν να απελευθερώνουν αυτό το πλεόνασμα ενέργειας κατά τη διάρκεια της νύχτας, μειώνοντας την διαδικασία ψύξης της επιφάνειας του αστικού φαραγγιού και επομένως την απόκλιση της ροής θερμότητας (Nunez and Oke 1976).



Τέλος, οι χαμηλότερες ταχύτητες του ανέμου, μετριάζουν επίσης την ψύξη της επιφάνειας και του αέρα στο αστικό φαράγγι, όπως και η ανθρωπογενής ροή θερμότητας από τα κτίρια, οχήματα ακόμη και από τον ανθρώπινο μεταβολισμό (Sailor 2011).



Σχήμα 2.2. Σχηματικό ισοζύγιο ενέργειας: (α) ενεργειακό ισοζύγιο επιφάνειας σε αστική περιοχή, (β) ενεργειακό ισοζύγιο επιφάνειας σε αγροτική περιοχή, (γ) ισοζύγιο επιφανειακής ακτινοβολίας κατά τη διάρκεια της ημέρας και (δ) ισοζύγιο επιφανειακής ακτινοβολίας τη νύχτα. Q^* είναι η καθαρή ροή θερμότητας όλων των κυμάτων ακτινοβολίας, Q_F είναι η ανθρωπογενής ροή θερμότητας που απελευθερώνεται λόγω ανθρώπινων δραστηριοτήτων όπως κυκλοφορία, κτίρια και βιομηχανικές δραστηριότητες, Q_H είναι η τυρβώδης ροή αισθητής θερμότητας, Q_E είναι λανθάνουσα ροή θερμότητας και ΔQ_S είναι η αποθηκευμένη ροή θερμότητας που αναφέρεται σε όλους τους μηχανισμούς αποθήκευσης ενέργειας εντός του αστικού κλοιού. Για τις αγροτικές περιοχές, το αντίστοιχο του ΔQ_S είναι η ροή θερμότητας του εδάφους Q_G , η οποία αντιπροσωπεύει την αισθητή θερμότητα μέσω αγωγιμότητας στο έδαφος για το ενεργειακό ισοζύγιο αγροτικής επιφάνειας

2.3 Δημιουργία της Αστικής Θερμικής Νησίδας στρώματος θόλου

Στο πλαίσιο των παρατηρήσεων που παρουσιάστηκαν προηγουμένως, η δημιουργία του νυχτερινού φαινομένου UHI στρώματος θόλου μπορεί να γίνει εύκολα κατανοητή. Κατά τη διάρκεια της ημέρας, οι αστικές περιοχές αποθηκεύουν περισσότερη θερμότητα από τις αγροτικές περιοχές λόγω της μεγαλύτερης αστικής επιφάνειας, που τα γεωμετρικά της χαρακτηριστικά μπορούν να παραπέμψουν σε φαράγγι, καθώς επίσης και λόγω των θερμικών ιδιοτήτων του αστικού ιστού. Μετά τη δύση του ηλίου, οι αστικές και αγροτικές επιφανειακές θερμοκρασίες αρχίζουν να αποκλίνουν, δημιουργώντας τη θερμική νησίδα στο στρώμα του θόλου. Το αγροτικό περιβάλλον αρχίζει να ψύχεται γρήγορα μετά τη δύση του ηλίου λόγω της ανοιχτής έκθεσής με τον ουρανό. Αντίθετα, ο ρυθμός ψύξης του αστικού περιβάλλοντος μειώνεται σημαντικά λόγω της μειωμένης απευθείας έκθεσης του με τον ουρανό και της αυξημένης



απελευθέρωσης θερμότητας που αποθηκεύεται στις αστικές επιφάνειες. Υπό κανονικές συνθήκες, η θερμική νησίδα στρώματος θόλου παρατηρείται κατά τη διάρκεια της νύχτας έως την ανατολή του ηλίου, όπου αρχίζει ο ημερήσιος κύκλος της ηλιακής ακτινοβολίας και η αγροτική περιοχή αρχίζει να θερμαίνεται γρήγορα. Επομένως, η UHI είναι κυρίως ένα νυχτερινό φαινόμενο που προκύπτει από τους διαφορετικούς ρυθμούς ψύξης μεταξύ αστικών και αγροτικών περιοχών.

2.4 Ένταση Αστικής Θερμικής Νησίδας στρώματος θόλου

Η ένταση ή το μέγεθος του φαινομένου UHI (Urban Heat Island Intensity-UHII) ορίζεται τυπικά ως η διαφορά στη θερμοκρασία του αέρα, κοντά στην επιφάνεια που πραγματοποιούνται οι μετρήσεις, μεταξύ αστικών και αγροτικών περιοχών. Στην πλειονότητα των μελετών θερμικών νησίδων, η UHII εκτιμάται με έναν συνήθως από τους τρεις παρακάτω τρόπους:

1. Υπολογισμός της διαφοράς θερμοκρασίας μεταξύ των θερμότερων και των ψυχρότερων τοποθεσιών από ένα δίκτυο μετεωρολογικών σταθμών (Chandler 1961),
2. Υπολογισμός της διαφοράς μεταξύ χωρικών μέσων τιμών θερμοκρασίας σε αστικές και αγροτικές τοποθεσίες (Kim and Baik 2005) και
3. Υπολογισμός της διαφοράς θερμοκρασίας μεταξύ μιας απομακρυσμένης αγροτικής τοποθεσίας και μιας τοποθεσίας κοντά στο κέντρο μιας πόλης (Runnalls and Oke 2000).

Οι παράγοντες που καθορίζουν την UHII στρώματος θόλου διαφέρουν από τις αιτίες που την προκαλούν. Η κύρια διαφορά έγκειται στο γεγονός ότι οι πρώτοι δεν συνεισφέρουν στη θερμότητα της εκάστοτε πόλης. Αντίθετα, παίζουν βασικό ρόλο στη διαμόρφωση της απόλυτης διαφοράς θερμοκρασίας (δηλαδή του UHII) μεταξύ αστικών και αγροτικών περιοχών. Σε αυτούς τους καθοριστικούς παράγοντες περιλαμβάνονται:

- **Η ώρα:** Η ένταση της UHI μπορεί να ποικίλλει σημαντικά για ωριαίες, εβδομαδιαίες και εποχιακές χρονικές κλίμακες. Σε ιδανικές συνθήκες (δηλαδή καθαρός ουρανός και χαμηλής έντασης άνεμοι), οι μέγιστες τιμές UHII παρατηρούνται γενικά λίγες ώρες μετά τη δύση του ηλίου λόγω της μεγάλης απόκλισης των ρυθμών ψύξης των αστικών/αγροτικών περιοχών (Kim and Baik 2002). Σε εβδομαδιαία κλίμακα, η εξέλιξη της UHII φαίνεται να συμπίπτει με τον κύκλο των ανθρώπινων δραστηριοτήτων (Kim and Baik 2005), ενώ σε



εποχιακή χρονική κλίμακα, η UHI ποικίλει ανάλογα με τους εποχικούς κύκλους και το γεωγραφικό πλάτος.

- **Οι καιρικές συνθήκες:** Οι τοπικές καιρικές συνθήκες που επικρατούν σε μια πόλη, επηρεάζουν σημαντικά τη δημιουργία καθώς και την ανάπτυξη του φαινομένου της UHI. Πλήθος ερευνών υποδεικνύει ότι συνθήκες μικρής νεφοκάλυψης και ασθενών ανέμων, ευνοούν τη μεγιστοποίηση της UHI (Morris et al. 2001). Επιπλέον, η σχετική υγρασία φαίνεται να επηρεάζει σημαντικά την UHI (Kuttler et al. 2007, Giannaros and Melas 2012), ενώ σύμφωνα με τους Pongracz et al. (2006), αντικυκλωνικές συνθήκες τείνουν να αυξάνουν την ένταση της UHI, σε αντίθεση με κυκλωνικές συνθήκες όπου η UHI τείνει να μειώνεται (Kassomenos and Katsoulis 2006).
- **Τα κλιματικά χαρακτηριστικά:** Το κλίμα της ευρύτερης περιοχής στην οποία βρίσκεται μια πόλη, καθορίζει επίσης σε μεγάλο βαθμό τις θερμοκρασιακές διαφορές μεταξύ αστικών και υπαίθριων περιοχών. Γενικά, έχει παρατηρηθεί ότι οι τιμές της UHI είναι μεγαλύτερες σε πόλεις που βρίσκονται σε ερημικές περιοχές ή ξηρά ηπειρωτικά κλίματα (Hawkins et al. 2004), σε αντίθεση με παράκτιες πόλεις με υγρά κλιματικά χαρακτηριστικά (Giannaros and Melas 2012).
- **Ο πληθυσμός:** Το μέγεθος καθώς και ο πληθυσμός μιας πόλης αναφέρονται επίσης ως μερικοί από τους καθοριστικούς παράγοντες που επηρεάζουν την UHI στρώματος θόλου. Συγκεκριμένα, υποδεικνύεται ότι όσο μεγαλύτερος ο πληθυσμός της πόλης και όσο μεγαλύτερη η πυκνότητα πληθυσμού της, τόσο μεγαλύτερες είναι οι τιμές της UHI (Coutts et al. 2003, Hung et al. 2006, Steeneveld et al. 2011).
- **Τα χαρακτηριστικά των υπό μελέτη αγροτικών επιφανειών:** Οι ιδιότητες και τα χαρακτηριστικά των υπό μελέτη αγροτικών περιοχών που σχετίζονται με το φαινόμενο UHI, διαδραματίζουν βασικό ρόλο στον προσδιορισμό και υπολογισμό της UHI (Arnfield 1990, Oke et al. 1991). Γενικά, έχει παρατηρηθεί ότι οι τιμές της UHI αυξάνονται όταν η θερμοκρασία μετρηθεί πάνω από ξηρές ή χιονισμένες αγροτικές επιφάνειες ενώ μειώνεται όταν μετρείται πάνω από υγρές επιφάνειες (Hawkins et al. 2004).



2.5 Επιπτώσεις του φαινομένου της Αστικής Θερμικής Νησίδας στρώματος θόλου

Η σημαντικότητα του φαινομένου UHI στρώματος θόλου έγκειται στο γεγονός ότι είναι ένα φαινόμενο το οποίο παρατηρείται σε εκείνο το στρώμα της ατμόσφαιρας όπου λαμβάνουν χώρα σχεδόν όλες οι καθημερινές ανθρώπινες δραστηριότητες. Ως εκ τούτου, η μελέτη της UHI παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον, καλύπτοντας ένα ευρύ φάσμα κοινωνικών, οικονομικών και περιβαλλοντικών ζητημάτων. Η παρουσία της UHI, συνοδεύεται όμως και από αρκετές επιπτώσεις που σχετίζονται κυρίως με:

- **Την ανθρώπινη υγεία:** Πλήθος ερευνών καταλήγουν στο συμπέρασμα ότι οι κάτοικοι των μεγάλων κυρίως αστικών κέντρων αντιμετωπίζουν αυξημένο κίνδυνο σε επίπεδο υγείας σε σύγκριση με εκείνους που ζουν σε αγροτικό περιβάλλον, λόγω υπερθέρμανσης (Conti et al. 2005, Matzarakis et al. 2009). Υποκείμενα νοσήματα, όπως καρδιαγγειακές και εγκεφαλοαγγειακές παθήσεις, πνευμονία και άσθμα μπορούν να επιδεινωθούν (Shahmohamadi et al. 2011), ενώ οι θάνατοι που σχετίζονται με αυξημένες θερμοκρασίες παρατηρούνται συχνότερα σε περιόδους συνεχιζόμενων υψηλών θερμοκρασιών (κύματα καύσωνα) κυρίως κατά το θέρος. Τα κύματα καύσωνα και η προκύπτουσα θνησιμότητα μπορούν να επιδεινωθούν σημαντικά εντός των πόλεων ως αποτέλεσμα των υψηλών θερμοκρασιών λόγω της UHI του στρώματος θόλου (Giannaros et al. 2018). Αν και οι θερμοκρασίες είναι υψηλότερες κατά τη διάρκεια της ημέρας, οι αυξημένες νυχτερινές θερμοκρασίες που προκύπτουν από το νυχτερινό φαινόμενο UHI θεωρείται ότι σχετίζονται με πιο επιβλαβείς επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία. Αυτό συμβαίνει επειδή οι κάτοικοι των αστικών περιοχών υπόκεινται σε θερμές συνθήκες τόσο κατά τη διάρκεια της ημέρας όσο και της νύχτας, ενώ οι άνθρωποι που ζουν στην ύπαιθρο μπορούν να αισθανθούν μια κάποια ανακούφιση κατά τις ψυχρότερες νυχτερινές ώρες (Clarke 1972). Ωστόσο, είναι σημαντικό να αναφέρουμε ότι ενώ η παρουσία της UHI μπορεί να προκαλέσει αυξημένη θνησιμότητα λόγω αυξημένων θερμοκρασιών τους καλοκαιρινούς μήνες, μπορεί ταυτόχρονα να οδηγεί σε μείωση των θανάτων που σχετίζονται με ακραία χαμηλές θερμοκρασίες κατά τη διάρκεια του χειμώνα (Mavrogianni et al. 2009). Η παραπάνω διαδικασία γίνεται κατανοητή, καθώς η άνοδος των αστικών θερμοκρασιών παρουσιάζει γενικά θετικό αντίκτυπο όσον αφορά τη θερμική άνεση των κατοίκων των πόλεων κατά τους χειμερινούς μήνες (Hacker et al. 2005).



- **Την κατανάλωση ενέργειας και την ατμοσφαιρική ρύπανση:** Το φαινόμενο της UHI έχει αποδειχθεί ότι προκαλεί σημαντικές αυξήσεις στη ζήτηση και την κατανάλωση ενέργειας, με σκοπό την ψύξη των κατοικιών των πόλεων (Akbari et al. 2001). Το φαινόμενο UHI μπορεί να οδηγήσει ακόμη και σε αύξηση 19,0% στην κατανάλωση ενέργειας με σκοπό την ψύξη και μείωση 18,7% στην κατανάλωση ενέργειας με σκοπό τη θέρμανση (Li et al. 2019). Είναι εμφανές επίσης, ότι η αυξημένη ζήτηση και κατανάλωση ενέργειας μπορεί να οδηγήσει σε σημαντικές οικονομικές απώλειες (Santamouris et al. 2001). Επιπλέον, έχουν αποκαλυφθεί συσχετίσεις μεταξύ της UHI και της ατμοσφαιρικής ρύπανσης όσον αφορά τη χρονική και χωρική διακύμανση. Καθώς η ένταση της UHI στις μεγάλες πόλεις είναι υψηλότερη από αυτή στις μικρές πόλεις, έτσι και η συγκέντρωση ατμοσφαιρικών ρύπων σε οικονομικά ανεπτυγμένους και πυκνοκατοικημένους αστικούς οικισμούς είναι υψηλότερη σε σχέση με άλλες περιοχές (Li et al. 2017). Η χωρική και χρονική συσχέτιση των UHI και της ατμοσφαιρικής ρύπανσης καθοδηγείται σε μεγάλο βαθμό από τις θερμικές και δυναμικές διαδικασίες που συμβαίνουν στις πόλεις (Sarrat et al. 2006). Για παράδειγμα, η διερεύνηση της σχέσης μεταξύ της UHI και των ατμοσφαιρικών ρύπων στην πόλη της Σεούλ, υπέδειξε ότι το όζον συσχετίζεται αρνητικά με τη UHI, ενώ το μονοξείδιο του άνθρακα, το διοξείδιο του θείου, τα αιωρούμενα σωματίδια και το διοξείδιο του αζώτου συσχετίζονται θετικά με την UHI και η μεταξύ τους σχέση παρουσιάζει εποχιακές διαφορές (Ngarambe et al. 2021). Επιπλέον, οι υψηλές αστικές θερμοκρασίες μπορούν να επιταχύνουν ορισμένους ατμοσφαιρικούς χημικούς κύκλους, με αποτέλεσμα, για παράδειγμα, να αυξηθούν οι συγκεντρώσεις του όζοντος στο επίπεδο του εδάφους (Rosenfeld et al. 1998). Εκτός από την αύξηση των ρυθμών αντίδρασης, οι υψηλότερες θερμοκρασίες οδηγούν επίσης σε αυξημένες εκπομπές βιογενών υδρογονανθράκων καθώς και σε υψηλότερους ρυθμούς εξάτμισης ανθρωπογενών πτητικών οργανικών ενώσεων (VOCs), που και οι δύο σχετίζονται με την παραγωγή τροποσφαιρικού όζοντος (Rosenfeld et al. 1998). Τέλος, αύξηση της κατανάλωσης και της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας, για τους λόγους που συζητήθηκαν και παραπάνω, συνεπάγεται και αύξηση στην κατανάλωση περισσότερων ορυκτών καυσίμων, με συνέπεια την επιπλέον εκπομπή θερμοκηπικών αερίων.



- **Τις μετεωρολογικές συνθήκες:** Αποδεδειγμένα θεωρείται ότι το φαινόμενο UHI συμβάλλει στην τροποποίηση αρκετών μετεωρολογικών φαινομένων εντός των πόλεων και γύρω από αυτές. Οι τροποποιήσεις αυτές σχετίζονται και μπορούν να αποδοθούν στην αστική κυκλοφορία του αέρα που προκύπτει από τη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ μιας πόλης και του μη αστικού της περιβάλλοντος. Ο ανερχόμενος θερμότερος αστικός αέρας μπορεί να προκαλέσει το σχηματισμό νεφών και ομίχλης (Sachweh and Koerke 1995) ή ακόμα και καταιγίδες πάνω από την πόλη (Orville et al. 2001, Shem and Shepherd 2009). Έρευνες, υποδηλώνουν επίσης ότι η δράση της UHI μπορεί να προκαλέσει έως και 8% αύξηση νεφώσεων, 14% αύξηση βροχοπτώσεων και 15% περισσότερες καταιγίδες κοντά σε αστικές περιοχές σε σύγκριση με το μη αστικό περιβάλλον τους (Changon and Huff 1986). Τέλος, η άνοδος του θερμότερου αστικού αέρα οδηγεί τελικά στην ανάπτυξη μιας θερμικής κυκλοφορίας, η οποία φαίνεται να επηρεάζει τον σχηματισμό της θαλάσσιας αύρας (Dandou et al. 2009), καθώς και τον σχηματισμό μιας αστικής περιοχής χαμηλής πίεσης και μια συνακόλουθη «εξοχική αύρα» έξω από την πόλη.

2.6 Αστική Θερμική Νησίδα και προκλήσεις για την ανθρώπινη υγεία

Όπως τονίστηκε και στην προηγούμενη παράγραφο, μια από τις βασικότερες επιπτώσεις του φαινομένου UHI στρώματος θόλου, αφορούν εκείνες στην ανθρώπινη υγεία των κατοίκων των μεγάλων κυρίως αστικών κέντρων.

Γενικά, οι επιβλαβείς επιπτώσεις της ενισχυμένης θέρμανσης των πόλεων στην ανθρώπινη υγεία έχουν εκτενώς μελετηθεί και περιλαμβάνουν επιπτώσεις που κυμαίνονται από ήπιες ασθένειες και μειωμένη επαγγελματική απόδοση, έως σοβαρές ασθένειες (π.χ. εμφάνιση ή επιδείνωση καρδιαγγειακών και αναπνευστικών νοσημάτων), νοσηλεία, ακόμη και θάνατο (Basu 2009). Ως εκ τούτου, η παρουσία και η επιμονή του φαινομένου της UHI ενέχει έναν επιπλέον κίνδυνο για την υγεία, κυρίως για τις ασθένειες που σχετίζονται με την αυξημένη θερμότητα. Ο κίνδυνος αυτός ενισχύεται από το γεγονός ότι οι αστικοί πληθυσμοί εκτίθενται συχνά και σε άλλους περιβαλλοντολογικούς κινδύνους, όπως η ατμοσφαιρική ρύπανση, η έκθεση στο θόρυβο, η κακή στέγαση καθώς και σε κινδύνους που σχετίζονται με κοινωνικά ή οικονομικά χαρακτηριστικά (Patz et al. 2005). Σε παγκόσμια κλίμακα, πολλές πόλεις επεκτείνονται και οι αστικοί πληθυσμοί αυξάνονται, λόγω οικονομικών και περιβαλλοντικών πιέσεων. Υψηλότερες εντάσεις της UHI τείνουν να εμφανίζονται σε



κεντρικά μέρη της πόλης, όπου οι άνθρωποι είναι συχνά πιο πιθανό να βρίσκονται σε κοινωνικά μειονεκτική θέση. Με τη σειρά τους, αυτοί οι κοινωνικοοικονομικοί παράγοντες μπορεί να τροποποιήσουν τις επιπτώσεις του φαινομένου και να αυξήσουν την ευαλωτότητα στην UHI των αστικών πληθυσμών (Vardoulakis et al. 2016). Υπάρχουν ενδείξεις ότι οι γειτονίες με βλάστηση και επομένως σχετικά πιο ψυχρές, φιλοξενούν πιο εύπορα κοινωνικά στρώματα, και ως εκ τούτου κίνδυνοι για την υγεία που σχετίζονται με την υπερθέρμανση τείνουν να είναι πιο ήπιοι σε αυτούς τους πληθυσμούς (Mitchell and Chakraborty 2014). Επιπλέον, οι φτωχότερες γειτονίες συχνά στερούνται κρίσιμους φυσικούς και κοινωνικούς πόρους για να αντιμετωπίσουν την υπερβολική ζέση (Harlan et al. 2007). Μελέτες που έχουν διεξαχθεί στις Η.Π.Α., υποδηλώνουν ισχυρές σχέσεις μεταξύ της κάλυψης γης, των κοινωνικών συνθηκών μιας γειτονιάς και των επιφανειακών θερμοκρασιών (Huang and Cadenasso 2016). Ειδικότερα, οι επιφανειακές θερμοκρασίες είναι στατιστικά υψηλότερες σε περιοχές που χαρακτηρίζονται από φτώχεια, εθνοτικές μειονότητες, έλλειψη εκπαίδευσης, γηραιούς πληθυσμούς και αυξημένη εγκληματικότητα, λόγω εν μέρει της υψηλής πυκνότητας πληθυσμού και συνεπώς της αφθονίας ανθρωπογενών επιφανειών σε αυτές τις περιοχές (Huang et al. 2011). Ο τύπος της κατοικίας και τα χαρακτηριστικά του κτιρίου διαδραματίζουν θεμελιώδεις ρόλους στον προσδιορισμό των κινδύνων για την υγεία από τη θερμότητα και είναι πιθανό να συνδέονται με κοινωνικούς παράγοντες. Για παράδειγμα, ο κλιματισμός μπορεί να προστατεύσει από τις επιπτώσεις που σχετίζονται με τη θερμότητα μειώνοντας τη θερμοκρασία των εσωτερικών χώρων, αλλά δεν είναι πάντα διαθέσιμος στις πιο ευάλωτες ομάδες πληθυσμού. Ο κλιματισμός επιπλέον μπορεί να οδηγήσει σε αυξημένη κατανάλωση ενέργειας και εκπομπές αερίων θερμοκηπίου (όταν δεν τροφοδοτείται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας) και μπορεί να επιδεινώσει τη UHI, με τη διάχυση της θερμότητας σε εξωτερικούς χώρους. Ορισμένα στοιχεία δείχνουν ότι ο κλιματισμός πρέπει να είναι διαθέσιμος σε ολόκληρο το σπίτι για να είναι αποτελεσματικός και υπάρχει επίσης ο κίνδυνος η συνεχής χρήση να αυξήσει τη φυσιολογική εξάρτηση από αυτό (Hatvani-Kovacs et al. 2016). Ο σχεδιασμός κτιρίων για την πρόληψη της υπερθέρμανσης στα σπίτια είναι ένας βασικός παράγοντας που καθορίζει την ευπάθεια του πληθυσμού και ένα θέμα έρευνας από μόνο του (Mavrogianni et al. 2012).

Οι τεχνικές χαρτογράφησης που εφαρμόζονται για τον εντοπισμό του κινδύνου από την παρατεταμένη έκθεση σε θερμό περιβάλλον σε μια πόλη, χρησιμοποιούν δεδομένα



εξαιρετικής χωρικής ανάλυσης, προερχόμενα από κλιματικά ή μετεωρολογικά μοντέλα, από δορυφορικές εικόνες (Buscail et al. 2012) ή παρεμβαλλόμενες παρατηρήσεις (Guo et al. 2013), με σκοπό την αξιολόγηση των θερμοκρασιακών διακυμάνσεων μιας πόλης. Άλλοι παράγοντες που τροποποιούν τις επιπτώσεις της θερμότητας στην υγεία, όπως η ηλικία ή οι κοινωνικοοικονομικοί παράγοντες, μπορούν επίσης να χαρτογραφηθούν ταυτόχρονα. Έχουν γίνει προσπάθειες να συνδυαστούν χάρτες κινδύνων, συμπεριλαμβανομένου του φαινομένου UHI, καθώς και περιβαλλοντικών, δημογραφικών ή φυσικών παραγόντων, ώστε να δοθούν ενδείξεις μεταβλητότητας κινδύνου σε μια πόλη, με τη μορφή μοντέλων θερμικού κινδύνου (Dong et al. 2014, Tomlinson et al. 2011). Σε ορισμένες περιπτώσεις, αυτό είχε ως αποτέλεσμα τη δημιουργία ενός δείκτη κινδύνου. Για παράδειγμα, για το Ηνωμένο Βασίλειο, η δημιουργία ενός δείκτη θερμικής ευπάθειας για την πόλη του Λονδίνου βασίστηκε σε 9 αντιπροσωπευτικά μέτρα κινδύνου θερμότητας, που επιλέχθηκαν μετά από σχετική βιβλιογραφική αναζήτηση και εφαρμόζοντας την ανάλυση κύριων συνιστωσών (Principal Component Analysis), σταθμισμένη ανάλογα με τον αντίκτυπο στην υγεία (Wolf and McGregor 2013). Οι 9 μεταβλητές περιλαμβάνουν πληροφορίες σχετικά με τη στέγαση, την κοινωνικοοικονομική κατάσταση, την πυκνότητα του πληθυσμού, την πρόσβαση σε θέρμανση και κλιματισμό, την ηλικία των ενοίκων και την υποκείμενη κατάσταση υγείας. Τα αποτελέσματα έδειξαν ισχυρές στατιστικές ενδείξεις ομαδοποίησης περιοχών υψηλής ευπάθειας (π.χ. υψηλή πληθυσμιακή πυκνότητα στο κεντρικό Λονδίνο και κακή κατάσταση υγείας). Παρόλο που χρησιμοποιήθηκαν δορυφορικά δεδομένα και τοποθεσίες παρακολούθησης για την εκτίμηση της έντασης της UHI, υπήρξε έλλειψη λεπτομερών, χωρικών και χρονικών δεδομένων για τη θερμοκρασία και η ατμοσφαιρική ρύπανση (συχνά ένας σημαντικός παράγοντας κινδύνου στις αστικές περιοχές) δεν συμπεριλήφθηκε ως παράγοντας κινδύνου. Σε μια ακόμη μελέτη για την περιοχή του Λονδίνου, τονίστηκε ο «τριπλός κίνδυνος» της ηλικίας, της έντασης UHI και του τύπου κατοικίας (και όχι κοινωνικοοικονομική κατάσταση) στον κίνδυνο λόγω θερμότητας (Taylor et al. 2015). Στη μελέτη αυτή, συμπεριλήφθηκαν θερμοκρασιακά δεδομένα υψηλής ανάλυσης για μία μόνο θερμή μέρα, και η ανάλυση πραγματοποιήθηκε με τεχνικές GIS. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η ένταση της UHI και ιδιαίτερα ο τύπος κατοικίας ήταν οι κύριοι παράγοντες που συμβάλλουν στον κίνδυνο θνησιμότητας λόγω θερμότητας.



Επιπλέον, μπορούν να αξιοποιηθούν και επιδημιολογικές μέθοδοι για τη διερεύνηση του κινδύνου θνησιμότητας, ανάλογα με την έκθεση στη θερμότητα που παρουσιάζεται σε διάφορα μέρη μιας πόλης, συχνά χρησιμοποιώντας δορυφορικές εικόνες. Η ανάλυση μπορεί να πραγματοποιηθεί: (α) στρωματοποιώντας τα δεδομένα με βάση την τοπική θερμοκρασία (ή την ένταση της UHI) και υπολογίζοντας τη σχέση θερμοκρασίας-θνησιμότητας χωριστά για περιοχές διαφορετικής θερμοκρασίας (Goggins et al. 2012), ή (β) συγκρίνοντας τα αποτελέσματα για αστικές και αγροτικές/προαστιακές περιοχές (Kershaw and Millward 2012). Επιδημιολογικές μελέτες ασθενών-μαρτύρων (case-control studies) μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν, με βάση δείγματα αστικού και αγροτικού πληθυσμού (O'Neill and Ebi 2009). Οι αναλύσεις μπορεί να περιλαμβάνουν τις επιπτώσεις του ψύχους/ζέστης στη νοσηρότητα/θνησιμότητα, όπως για παράδειγμα μια μελέτη από την Τσεχία, η οποία επικεντρώθηκε στα καρδιαγγειακά αποτελέσματα και κατέληξε σε ορισμένα στοιχεία που υποδηλώνουν ότι η UHI αποτελεί πιθανό παράγοντα κινδύνου θερμικού στρες, παράλληλα με δημογραφικούς παράγοντες και έκθεση σε ατμοσφαιρικούς ρύπους (Urban et al. 2014). Μπορούν ακόμη και να χρησιμοποιηθούν μέθοδοι αξιολόγησης των επιπτώσεων στην υγεία, με σκοπό την εκτίμηση της επιβάρυνσης στην υγεία της UHI όσον αφορά τη θνησιμότητα (που σχετίζεται με τη θερμότητα), η οποία με τη σειρά της σχετίζεται με την αυξανόμενη θερμοκρασία λόγω του φαινομένου UHI. Τέτοιες μελέτες χρησιμοποιούν επιδημιολογικές σχέσεις μεταξύ θερμοκρασίας και θνησιμότητας μαζί με μοντελοποιημένα δεδομένα έκθεσης σε ακραία υψηλές θερμοκρασίες και δεδομένα υγείας, για την εκτίμηση της επίδρασης της έντασης της UHI στη θνησιμότητα.

Τέλος, για να εκτιμηθεί άμεσα ο αντίκτυπος στην υγεία που μπορεί να αποδοθεί στην UHI, μπορούν να χρησιμοποιηθούν τεχνικές μοντελοποίησης, με σκοπό την αξιολόγηση του αντίκτυπου της χρήσης γης στις μεταβολές της θερμοκρασίας, και ως εκ τούτου στη θνησιμότητα λόγω ενισχυμένης θερμότητας. Σε ένα πρόσφατο πείραμα μοντελοποίησης, οι θερμοκρασίες προσομοιώθηκαν από τοπικά κλιματικά μοντέλα σε υψηλή ανάλυση, με και χωρίς αστικές επιφάνειες στο West Midlands (περιοχή του Ηνωμένου Βασιλείου), για το κύμα καύσωνα του 2003 και για τις προβλεπόμενες θερμοκρασίες στις επόμενες δεκαετίες (Heaviside et al. 2016). Πραγματοποιήθηκε η εκτίμηση των επιπτώσεων στην υγεία για τις δύο μοντελοποιημένες προσομοιώσεις, με και χωρίς χρήση αστικής γης και τα αποτελέσματα θνησιμότητας συγκρίθηκαν



προκειμένου να ποσοτικοποιηθεί ο ρόλος των αστικών επιφανειών σε σχέση με τη θνησιμότητα λόγω αυξημένης θερμότητας. Τα αποτελέσματα του πειράματος υπέδειξαν ότι περίπου το μισό ποσοστό της θνησιμότητας που σχετίζεται με τη θερμότητα κατά την περίοδο του καύσωνα τον Αύγουστο του 2003 στο West Midlands θα μπορούσε να αποδοθεί στο φαινόμενο UHI, δηλαδή στην αύξηση της θνησιμότητας λόγω ενισχυμένης θερμότητας ως αποτέλεσμα των υψηλών θερμοκρασιών που διαμορφώθηκαν από την παρουσία της UHI. Οι προβλέψεις για το μέλλον υποδηλώνουν ότι ένα παρόμοιο συμβάν καύσωνα το 2080, στο πλαίσιο ενός σεναρίου μεσαίας κλιματικής αλλαγής, θα μπορούσε να οδηγήσει σε τριπλάσια αύξηση της αντίστοιχης θνησιμότητας.

2.7 Τεχνικές μετριασμού με σκοπό τη μείωση των επιβλαβών επιπτώσεων της Αστικής Θερμικής Νησίδας

Υπάρχουν δύο γενικοί τύποι τεχνικών μετριασμού για τη μείωση του φαινομένου UHI σε κλίμακα πόλης:

1. Τεχνικές που στοχεύουν στην αύξηση της ηλιακής ανακλαστικότητας, χρησιμοποιώντας «ψυχρά» ή ανακλαστικά υλικά στα κτίρια και σε επιφάνειες
2. Τεχνικές που στοχεύουν στην αύξηση της εξατμισοδιαπνοής, μέσω της αύξησης των χώρων πρασίνου και της διαθεσιμότητας νερού.

Οι επιβλαβείς επιπτώσεις της υπερβολικής θερμότητας που σχετίζεται με τη UHI μπορούν επίσης να μετριαστούν μέσω αλλαγής συμπεριφοράς, βελτιωμένου σχεδιασμού κτιρίων και μειωμένων ανθρωπογενών εκπομπών θερμότητας σε αστικές περιοχές. Η υιοθέτηση συστημάτων προειδοποίησης για την υγεία προσαρμοσμένων στα αστικά περιβάλλοντα θα μπορούσε να θεωρηθεί επίσης ως εναλλακτικό μέτρο μετριασμού (Harlan and Ruddell 2011). Μπορούμε επίσης να κατηγοριοποιήσουμε τις τεχνικές μετριασμού της UHI, σε τεχνικές ενσωμάτωσης πράσινης υποδομής σε κτιριακές δομές και στην χρήση βιώσιμων υλικών σε αστικές κατασκευές.

Η πράσινη υποδομή περιλαμβάνει την προσθήκη υδάτινων και πράσινων (βλάστηση) συστατικών, σε αντίθεση με το ανθρωπογενές κατασκευασμένο περιβάλλον, και αποτελεί στρατηγική προσέγγιση για την ανάπτυξη και τη βελτιστοποίηση συστημάτων βιώσιμης διαχείρισης των αστικών φυσικών οικοσυστημάτων ενόψει των προκλήσεων της κλιματικής αλλαγής (Sierka et al. 2022). Καινοτόμες και καλά



ανεπτυγμένες πιθανές πρακτικές μπορούν να ληφθούν υπόψη από τους πολεοδόμους εντός του αστικού περιβάλλοντος, συμπεριλαμβανομένης της εφαρμογής πράσινων στρατηγικών στα κύρια στοιχεία, όπως στις στέγες, στις προσόψεις, στους χώρους στάθμευσης, στα πεζοδρόμια, σε τοίχους και γενικά σε εξωτερικούς χώρους. Δεδομένων των περιορισμένων πόρων της γης, η σημαντική αύξηση της πυκνότητας των χώρων πρασίνου αποτελεί ιδιαίτερη πρόκληση. Ως αποτέλεσμα, η ενίσχυση της χωροταξικής διάταξης του πρασίνου θα μπορούσε να είναι μια βιώσιμη επιλογή. Η σημασία των χώρων πρασίνου για το μετριασμό της UHI αποδίδεται στα χωρικά χαρακτηριστικά του, συμπεριλαμβανομένου του μεγέθους, της σύνθεσης και της διαμόρφωσης (Lin et al. 2023). Ως εκ τούτου, είναι σημαντικό να λαμβάνονται υπόψη οι ειδικές ιδιότητες και τα χαρακτηριστικά κάθε περίπτωσης κατά το σχεδιασμό, την κατασκευή και τη συντήρηση τέτοιων υποδομών (Campagna et al. 2020). Οι πράσινες υποδομές αποτελούν πρόκληση για τον περιβαλλοντικό τομέα, απαιτώντας μια ολοκληρωμένη, φιλική προς το περιβάλλον προσέγγιση που λαμβάνει υπόψη πρόσθετα ζητήματα. Μπορεί επίσης να υπάρξουν πιέσεις που σχετίζονται με ζητήματα παραγωγής, ζήτησης και κατανάλωσης ενέργειας, τα οποία έχουν όλα αντίκτυπο στην περιβαλλοντική πτυχή της κατασκευής κτιριακής υποδομής, τόσο άμεσα όσο και έμμεσα. Δεδομένου ότι οι στέγες των κτηρίων αποτελούν τον πιο εκτεθειμένο χώρο, η πρόσληψη και η απώλεια θερμότητας αποτελούν σημαντικό κατασκευαστικό ζήτημα. Οι παραδοσιακές πρακτικές στέγης που χρησιμοποιούν μια ποικιλία υλικών έχουν συμβάλει στην υπερβολική συσσώρευση θερμότητας εντός των κατασκευών και στο γειτονικό περιβάλλοντα χώρο (Tan et al. 2023). Κατά συνέπεια, χρησιμοποιώντας τακτικές πρασίνου και ελέγχοντας την υπερβολική θερμότητα και τις διακυμάνσεις της θερμοκρασίας γύρω από τα φυτά, πολλά μέρη του κόσμου είναι πλέον εξοικειωμένα με την πρακτική έναρξης προσεγγίσεων πράσινης στέγης.

Επιπλέον, οι προσόψεις των κτηρίων είναι τεράστιοι δυνητικοί κάθετοι χώροι και αυτοί οι χώροι επεκτείνονται καθώς τα κτίρια ανέρχονται σε ύψος. Παρά τη κάθετη κατανομή τους στο περιβάλλον, το φαινόμενο της UHI επηρεάζεται σημαντικά από τις προσόψεις λόγω του δυναμικού απορρόφησης της ηλιακής ακτινοβολίας και της απελευθέρωσης θερμότητας από τα γειτονικά κτίρια (Shah et al. 2023). Τέλος, ο αντίκτυπος του UHI επηρεάζεται από τη διάταξη των δρόμων και των πεζοδρομίων, συμπεριλαμβανομένου του εάν οι δομές αυτές είναι εκτεθειμένες ή προστατευμένες από τον ήλιο, καθώς και από τα κοντινά κτίρια και άλλους παράγοντες. Ο σωστός σχεδιασμός των δρόμων και



των πεζοδρομίων, καθώς και η ένταξη βιώσιμης χλωρίδας, αποτελούν πλέον ζητήματα ζωτικής σημασίας στα αστικά περιβάλλοντα. Στον Πίνακα 2.1 παρουσιάζονται μερικές από τις στρατηγικές μετριασμού της UHI που εφαρμόζονται παγκοσμίως.

Πίνακας 2.1. Στρατηγικές μετριασμού της UHI που εφαρμόζονται

Στρατηγικές Μετριασμού της UHI		Περιγραφή
Πράσινες υποδομές	Πράσινες στέγες	Ταράτσα κτιρίου που καλύπτεται μερικώς ή πλήρως με βλάστηση και υπόστρωμα για την ανάπτυξη των φυτών
	Πράσινοι τοίχοι	Κάθετοι τοίχοι που καλύπτονται είτε πλήρως είτε μερικώς από φυτά. Αποτελείται από πάνελ προσαρτημένα σε εσωτερική ή εξωτερική κατακόρυφη κατασκευή
	Πράσινες προσόψεις	Φυσικά φυτά αναρρίχησης καλλιεργούνται στο εξωτερικό ενός κτιρίου με τη βοήθεια ενός βοηθητικού πλαισίου
	Πράσινο πάρκινγκ, πεζοδρόμια και σκιεροί δρόμοι	Η ποσότητα της ηλιακής ενέργειας που απορροφάτε μειώνεται όσο αυξάνεται το ποσοστό της φυτικής κάλυψης, επιτρέποντας τη ψύξη μέσω εξάτμισης σε δρόμους, χώρους στάθμευσης και πεζοδρόμια, χρησιμοποιώντας πεζοδρόμια που συγκρατούν νερό και διαπερατά πορώδη πλακόστρωτα
Βιώσιμα υλικά	Ανακλαστικά οδοστρώματα	Προκειμένου να μειωθεί η επιφανειακή θερμοκρασία και οι αισθητές εκπομπές θερμότητας, χρησιμοποιούνται ανακλαστικά οδοστρώματα που έχουν υψηλότερο albedo (από τα συνηθισμένα οδοστρώματα)
	Υλικά επίστρωσης	Διάφορα υλικά μπορούν να ενσωματωθούν στο εσωτερικό ή στο εξωτερικό των κτιριακών κατασκευών, με στόχο τον μετριασμό των επιπτώσεων των UHI
		Η ικανότητα των ανακλαστικών υλικών να ανακατευθύνουν το φως στην αρχική τους πηγή είναι ένα χρήσιμο και μοναδικό χαρακτηριστικό
		Υλικά που αποθηκεύουν και απελευθερώνουν λανθάνουσα θερμότητα για να ενισχύσουν τη φαινομενική θερμική ικανότητα των κτιρίων και των αστικών κατασκευών και να μειώσουν τις μέγιστες επιφανειακές θερμοκρασίες τους
		Υλικά που υφίστανται θερμοχρωμική αλλαγή χρώματος σε απόκριση της θερμοκρασίας
	Μείωση της κατανάλωσης ενέργειας και του λειτουργικού κόστους και μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου	

Η ενσωμάτωση βιώσιμων δομικών υλικών στον κατασκευαστικό τομέα είναι άλλος ένας βασικός παράγοντας που συμβάλλει στον αντίκτυπο της UHI. Στο πλαίσιο αυτό τα υλικά προκατασκευής, κατασκευής και φινιρίσματος του κτιρίου συμβάλλουν σημαντικά. Επιπλέον, δρόμοι και πεζοδρόμια που αποτελούνται από αδιαπέραστα και εξαιρετικά θερμοαπορροφητικά υλικά, υλικά βαφής με υψηλά θερμικά αποτελέσματα και ενεργειακά αποδοτικές συσκευές που απελευθερώνουν υψηλά ποσά θερμότητας και θερμοκηπικά αέρια, συμβάλλουν σημαντικά στην διαμόρφωση της UHI. Τα βιώσιμα δομικά υλικά δεν είναι μόνο οικονομικά εφικτά, αλλά ελαχιστοποιούν επίσης τις επιβλαβείς εκπομπές και τις επιπτώσεις της UHI, ελαχιστοποιώντας έτσι τις



συνολικές αρνητικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Τα κτίρια θα πρέπει να χρησιμοποιούν φιλικά προς το περιβάλλον δομικά υλικά και τεχνολογίες με τρόπο που να είναι κατάλληλα εφαρμοσμένες. Τα βιώσιμα δομικά υλικά που θα πρωταγωνιστήσουν τα επόμενα χρόνια θα είναι εκείνα που θα έχουν χαμηλές ενεργειακές απαιτήσεις για την παραγωγή τους, μειωμένο περιβαλλοντικό αποτύπωμα, σημαντική επίπτωση στην ενεργειακή απόδοση των κτιρίων και κατασκευών, δυνατότητες υποστήριξης ενσωματωμένων αισθητήρων παρακολούθησης κρίσιμων παραμέτρων των κτιρίων, συμβατότητα με υφιστάμενα δομικά υλικά και μεγάλο χρόνο ζωής. Αυτά τα υλικά κατασκευάζονται από ανακυκλωμένα και βιομηχανικά απόβλητα και φυσικά η κατασκευή τους απαιτεί πολύ λιγότερη ενέργεια από την παραγωγή σύγχρονων ή συμβατικών δομικών υλικών. Μερικά από τα χαρακτηριστικά των βιώσιμων αυτών υλικών παρουσιάζονται στο Πίνακα 2.1.



3. Ταξινόμηση τύπων καιρού

Στο Κεφάλαιο 2, παρουσιάστηκαν τα βασικά χαρακτηριστικά του φαινομένου της UHI, το οποίο όπως εξετάστηκε προκύπτει από την αμοιβαία απόκριση διαφόρων δυναμικών και θερμικών διεργασιών, που κυμαίνονται από τοπική έως και μέση κλίμακα. Τονίστηκε δε, ότι η UHI παίζει κρίσιμο ρόλο στην τροποποίηση μετεωρολογικών φαινομένων εντός των πόλεων και γύρω από αυτές, όπως ο σχηματισμός νεφών και ομίχλης (Sachweh and Koerke 1995), μεταβολές στην συχνότητα της δραστηριότητας των κεραυνών (Orville et al. 2001), ακόμη και την ανάπτυξη καταιγίδων (Shem and Shepherd 2009). Ταυτόχρονα, πλήθος μελετών υποδεικνύουν ότι η ανάπτυξη της UHI επηρεάζεται από τις συνοπτικές καιρικές συνθήκες. Για παράδειγμα, στο Σίδνεϋ της Αυστραλίας η παρουσία θαλάσσιας αύρας στο ανατολικό τμήμα της πόλης, συνδέθηκε με υψηλές εντάσεις της UHI (Santamouris et al. 2017), ενώ στη Μελβούρνη η μέση ετήσια ένταση της UHI για την περίοδο από το 1972 έως το 1991, ήταν 2°C έως 3°C τις νυχτερινές ώρες με άπνοια και καθόλου νεφώσεις, πέφτοντας σε λιγότερο από 1 °C υπό συνθήκες ανέμου και λίγων νεφώσεων (Morris et al. 2001). Συμπεραίνεται επίσης, ότι η ένταση της UHI συνδέεται με την αστικοποίηση, την τοποθεσία, την εποχικότητα, την ώρα της ημέρας και το κλίμα της εκάστοτε περιοχής (Kassomenos and Katsoulis 2006, Lee and Baik 2010, Petralli et al. 2011, Vardoulakis et al. 2013, Zhou et al. 2014). Για παράδειγμα, στην περίπτωση της Ελλάδας, οι Founda et al. (2015) διερευνώντας την εποχιακή μεταβλητότητα της έντασης της UHI στην πόλη της Αθήνας, χρησιμοποιώντας ημερήσια δεδομένα θερμοκρασίας αέρα κατά την περίοδο 1970-2004, κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η ετήσια μέση ένταση της UHI (σε °C) έχει υποστεί σταδιακή αύξηση από δεκαετία σε δεκαετία. Στη Θεσσαλονίκη, το φαινόμενο UHI έχει διερευνηθεί με βάση τα δεδομένα της θερμοκρασίας του αέρα και της σχετικής υγρασίας από τον Μάρτιο του 2008 έως τον Φεβρουάριο του 2009 και βρέθηκε ότι το φαινόμενο παρουσιάζεται πιο ισχυρό τη νύχτα από ότι την ημέρα και μειώνεται με την αύξηση της ταχύτητας του ανέμου (Giannaros and Melas 2012). Αν και η αλληλεπίδραση της έντασης της UHI με μετεωρολογικά φαινόμενα μικρής κλίμακας έχει διερευνηθεί στο παρελθόν καταλήγοντας σε σημαντικά συμπεράσματα, η ισχύς και ο σχηματισμός της UHI υπό διαφορετικούς τύπους καιρού μεγάλης κλίμακας που επικρατούν σε μια δεδομένη τοποθεσία χρήζει περαιτέρω διερεύνησης.



Γενικά, οι ταξινομήσεις μετεωρολογικών προτύπων, αερίων μαζών και τύπων καιρού, έχουν αξιοποιηθεί τις τελευταίες δεκαετίες κατά κόρον στη συνοπτική κλιματολογία, και όχι μόνο, με σκοπό τη μελέτη και τη συσχέτιση των καιρικών συνθηκών με μια σειρά διαφορετικών φαινομένων που λαμβάνουν χώρα στο επίπεδο του επιφανειακού κυρίως εδάφους (Yarnal 1993, Barry and Perry 2001). Η δε ανησυχία για τις επιπτώσεις των ακραίων καιρικών συνθηκών, ειδικά για την κατανόηση των πιθανών επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής, έχει οδηγήσει στην αναζήτηση περισσότερων και καλύτερων ταξινομήσεων. Οι συνοπτικές ταξινομήσεις έχουν κατηγοριοποιήσει με επιτυχία διαφορετικές κατηγορίες καιρού που σχετίζονται με φαινόμενα όπως ανεμοστρόβιλοι (Lee 2012) και κύματα καύσωνα (Sheridan et al. 2012a), ακόμα και με γεγονότα φαινομενικά τόσο ασύνδετα, όπως η διασπορά αερομεταφερόμενων παθογόνων οργανισμών (Frank et al. 2008), η ποιότητα του αέρα (Davis et al. 2010), η ανθρώπινη υγεία (Jamason et al. 1997, Sheridan et al. 2012b) και πολλά άλλα (Yarnal 2001, Huth et al. 2008, Sheridan and Lee 2010, Sheridan and Lee 2011).

Επιπλέον, οι συνοπτικές ταξινομήσεις έχουν αξιοποιηθεί κατά κόρον σε μελέτες που σχετίζονται με την κλιματική αλλαγή των τελευταίων ετών, λόγω των ικανοτήτων τους να εκμεταλλεύονται τον πλούτο των μετεωρολογικών δεδομένων που παράγονται από τα παγκόσμια κλιματικά μοντέλα (Global Climate Models-GCMs), καταλήγοντας στην κατηγοριοποίηση τύπων καιρού που μπορούν να παρουσιάζουν σημαντικές μελλοντικές αλλαγές, περιφερειακής έως τοπικής κλίμακας (Sheridan and Lee 2010, Lee and Sheridan 2011). Εκτεταμένη πρόσφατη βιβλιογραφία επικεντρώνεται στην ανάπτυξη, αξιολόγηση και εφαρμογή ταξινομήσεων χαρτών καιρού (Huth 2010), που αποτελεί μια κατηγοριοποίηση ατμοσφαιρικής κυκλοφορίας σε έναν ευρύ χωρικό τομέα. Η ανασύνθεση (reanalysis) πλεγματικών κλιματολογικών δεδομένων, με βελτιωμένη χωρική ανάλυση (τόσο οριζόντια όσο και κατακόρυφη), σε συνδυασμό με την προαναφερθείσα έρευνα για την κλιματική αλλαγή που βασίζεται σε συνοπτικές μεθόδους, δικαιολογεί τη σημαντικότητα των ταξινομήσεων αυτών.

3.1 Θεωρητικό υπόβαθρο

Σύμφωνα με τον Yarnal (1993), κατά τη διάρκεια των τελευταίων ετών, έχουν αναπτυχθεί και περιγράφει διαφορετικοί τύποι συνοπτικών ταξινομήσεων. Οι βασικοί περιλαμβάνουν:

1. την ταξινόμηση χαρτών καιρού (map-pattern classification),
2. την ταξινόμηση τύπων καιρού (weather-typing classification) και



3. τις περιφερειοποιήσεις (regionalizations).

Παρόλο που και οι τρεις μεθοδολογίες είναι εξαιρετικά σημαντικές, η πιο πρόσφατη έρευνα έχει επικεντρωθεί στις δύο πρώτες. Οι ταξινομήσεις χαρτών καιρού, εστιάζονται συχνά στην ατμοσφαιρική ροή σε μια ευρεία χωρική κλίμακα, εξετάζοντας συνήθως μία ή δύο μεταβλητές (συχνά την πίεση στο επίπεδο της θάλασσας, θερμοκρασία ή το γεωδυναμικό ύψος) και πώς η καθεμία αλλάζει στο χώρο σε καθημερινή βάση. Η ταξινόμηση τύπων καιρού (αναφέρεται και ως ταξινόμηση αερίων μαζών) από την άλλη, επικεντρώνεται συχνότερα στην ταξινόμηση των ημερήσιων μετεωρολογικών συνθηκών σε μεμονωμένες τοποθεσίες, εξετάζοντας έναν αριθμό μετεωρολογικών μεταβλητών προκειμένου να ταξινομηθεί κάθε μέρα σε έναν από τους διαφορετικούς τύπους καιρού. Τέτοιες ταξινομήσεις έχουν ειδική εφαρμογή σε πλήθος βιομετεωρολογικών μελετών (Kalkstein et al. 1996), αν και μπορούν να εφαρμοστούν σε ένα ευρύ φάσμα άλλων αναλύσεων.

Κάθε μία από αυτές τις μεθόδους συνοπτικής ταξινόμησης μπορεί να πραγματοποιηθεί είτε με την προσέγγιση κυκλοφορίας προς περιβάλλον (circulation-to-environment), όπου τα ατμοσφαιρικά δεδομένα αξιολογούνται ως προς τις συνοπτικές κατηγορίες, είτε με την προσέγγιση περιβάλλοντος προς κυκλοφορία (environment-to-circulation), όπου οι συνοπτικές κατηγορίες καθορίζουν τα κριτήρια που βασίζονται σε μια περιβαλλοντική μεταβλητή (Yarnal 1993). Ενώ η υιοθέτηση της δεύτερης προσέγγισης εστιάζεται περισσότερο σε ένα συγκεκριμένο ερευνητικό ερώτημα, οι συνοπτικές μελέτες που χρησιμοποιούν την πρώτη προσέγγιση συνήθως καταλήγουν στη διαπίστωση ότι τα συμπεράσματά τους, παρουσιάζουν χρηστικότητα σε ένα ευρύτερο φάσμα εφαρμογών, ακόμη και μετά την ολοκλήρωση της έρευνας για την οποία προοριζόταν αρχικά η ταξινόμηση. Επιπλέον οι συνοπτικές ταξινομήσεις μπορούν να διακριθούν σε δύο ακόμα κατηγορίες, τις εμπειρικές και τις αυτόματες ταξινομήσεις. Στις εμπειρικές ταξινομήσεις, κάθε στοιχείο δεδομένων χειρίζεται και αποδίδεται σε μια συνοπτική κατηγορία από κάποιον ερευνητή, ο οποίος χρησιμοποιεί μια ταξινόμηση που αναπτύχθηκε από κάποιον άλλο επιστήμονα ή αναπτύσσοντας ο ίδιος κάποια νέα ταξινόμηση. Αντίθετα, οι αυτόματες προσεγγίσεις αναφέρονται σε μεθόδους που βασίζονται σε ηλεκτρονικούς υπολογιστές (H/Y) ή υποβοηθούνται από αυτούς, επεξεργαζόμενοι πραγματικά δεδομένα. Ο συνδυασμός ανθρώπινου δυναμικού με τις δυνατότητες ενός H/Y καθορίζει τις κλάσεις και αναθέτει τα δεδομένα σε αυτές τις κατηγορίες.



Λόγω της εύκολης χρήσης και κατανόησης των ταξινομήσεων προτύπων χαρτών (map – patterns) στο να εφαρμόζουν την ίδια ταξινόμηση σε ευρεία χωρική κλίμακα ή σε ένα μόνο σημείο, η συντριπτική πλειονότητα των ταξινομήσεων κυκλοφορίας προς περιβάλλον είναι ταξινομήσεις προτύπων χαρτών και όχι ταξινομήσεις τύπων καιρού. Αυτό οφείλεται επίσης σε μεγάλο βαθμό στο γεγονός ότι οι περισσότερες χρήσεις των τύπων καιρού αφορούν την εξέταση ενός συγκεκριμένου φαινομένου σε μια συγκεκριμένη τοποθεσία, απαιτώντας τη χρήση μιας ταξινόμησης με ένα συγκεκριμένο σύνολο μεταβλητών. Ωστόσο, οι λίγες ταξινομήσεις τύπων καιρού που έχουν αναπτυχθεί σε ευρεία χωρική κλίμακα έχουν αποδειχθεί ιδιαίτερα χρήσιμες.

3.2 Αξιοσημείωτες ταξινομήσεις τύπων καιρού

Ο δείκτης TSI (Temporal Synoptic Index) (Kalkstein and Corrigan 1986), αποτελεί μια από τις πρώτες αυτοματοποιημένες συνοπτικές διαδικασίες ταξινόμησης. Μάλιστα, όταν εισήχθη για πρώτη φορά, ήταν η πρώτη ταξινόμηση με βάση τη μάζα του αέρα και υπήρξε μια μεθοδολογία η οποία χρησιμοποιήθηκε για τη ταξινόμηση του ημερήσιου τύπου καιρού σε ένα συγκεκριμένο σταθμό. Για το δείκτη TSI εφαρμόστηκαν μεθοδολογίες που εξακολουθούν να είναι κοινές σε πολλές συνοπτικές ταξινομήσεις σήμερα, συμπεριλαμβανομένης της ανάλυσης των κυρίων συνιστωσών (PCA, Principal Components Analysis) και της ανάλυσης συστάδων (CA, Cluster Analysis). Οι δύο αυτές μεθοδολογίες αναλύονται λεπτομερώς παρακάτω, μιας και αποτελούν βασική μεθοδολογία της παρούσας διατριβής. Ο συγκεκριμένος δείκτης, χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά στο Wilmington του Delaware των ΗΠΑ, για τη μελέτη της ποιότητας του αέρα και συγκεκριμένα για τη διακύμανση της συγκέντρωσης του διοξειδίου του θείου (Kalkstein and Corrigan 1986), ενώ από εκεί και έπειτα έχει βρει εφαρμογή σε έναν μεγάλο αριθμό μελετών, που σχετίζονται με την ποιότητα του αέρα σε πολλές πόλεις των Η.Π.Α. (Davis 1991, Greene et al. 1999), έως τις εισαγωγές σε νοσοκομεία λόγω άσθματος (Jamason et al. 1997) καθώς και μια ποικιλία άλλων εφαρμογών (Kalkstein et al. 1996, Davis and Rogers 1992).

Η διαδικασία ωστόσο του δείκτη TSI, παρουσίαζε μερικούς περιορισμούς, κυρίως λόγω του ότι αναφέρεται συγκεκριμένα για ένα τόπο μιας και τα μετεωρολογικά δεδομένα συλλέγονται από ένα και μοναδικό σταθμό για τη δημιουργία ενός συστήματος ταξινόμησης και έτσι οι αέριες μάζες καθορίζονται χωρίς να λαμβάνονται υπόψη άλλες περιοχές. Έτσι παρουσιάζεται μια ασυνέπεια των καιρικών τύπων στο χώρο, μιας και τόσο ο αριθμός όσο και η φύση των καιρικών τύπων σε κάθε τοποθεσία



είναι συχνά διαφορετική (Sheridan 2000). Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα τη μείωση της χρηστικότητας της ταξινόμησης, καθώς ένας τύπος καιρού σε μια τοποθεσία μπορεί να είναι εντελώς διαφορετικός ως προς τα χαρακτηριστικά του από τον ίδιο τύπο καιρού σε μια άλλη τοποθεσία. Μετά την εισαγωγή του, οι επακόλουθες χρήσεις του TSI αφορούν κυρίως τις στατιστικές μεθόδους (PCA και CA) του σε διάφορες διαδικασίες ταξινόμησης.

Η μεθοδολογία του δείκτη TSI τροποποιήθηκε αργότερα από τους Davis και Kalkstein (1990), με αποτέλεσμα να προκύψει ο καινούργιος δείκτης SSI (Spatial Synoptic Index), που είχε ως πρωταρχικό στόχο την βελτίωση της συμβατότητας μεταξύ των σταθμών (Lee 2015). Κατά τη διαδικασία της εξέλιξης του παραπάνω δείκτη, χρησιμοποιήθηκε ένας συνδυασμός των στατιστικών εργαλείων PCA και CA, με σκοπό τον ημερήσιο γεωγραφικό διαχωρισμό (day-by-day regionalization) ενός έτους (1984), όπου καθένας από τους 141 σταθμούς στον τομέα τους κατηγοριοποιείται σε μια περιοχή, με βάση 24 μετεωρολογικές μεταβλητές. Κάθε μία από αυτές τις περιοχές αντιπροσωπεύει μια περιοχή με σχετικά ομοιογενή καιρικά χαρακτηριστικά, δηλαδή μια αέρια μάζα. Με το πέρας της ολοκλήρωσης της παραπάνω διαδικασίας, οι 2400 περιοχές (365 ημέρες με πολλαπλές αέριες μάζες σε όλη την ήπειρο για κάθε μέρα) ομαδοποιήθηκαν σε 90 τελικούς τύπους καιρού. Οι χάρτες που παρήχθησαν από το SSI αποτέλεσαν ένα εξαιρετικά χρήσιμο εργαλείο για την απεικόνιση της εξέλιξης των κυκλωνικών συστημάτων για όλη την Βόρεια Αμερική ωστόσο, η μεθοδολογία παρουσίαζε περιορισμούς κυρίως λόγω του περιορισμού στη μελλοντική τους χρήση, μιας και απαιτείται να επαναληφθεί ο γεωγραφικός διαχωρισμός για κάθε μέρα, για μια χρονοσειρά.

Μετά την ανάπτυξη δεικτών TSI και του SSI, ο Schwartz (1991) ανέπτυξε μια ταξινόμηση τύπων καιρού στο επίπεδο των 850hPa για 15 σταθμούς των βόρειο-κεντρικών Ηνωμένων Πολιτειών, αξιοποιώντας μια πρωτότυπη «υβριδική» προσέγγιση, που περιλαμβάνει το συνδυασμό χειροκίνητης/υποκειμενικής ανάλυσης τροχιών (trajectory analysis) και τη χρήση τεχνικών που σχετίζονται με τις κατανομές συχνοτήτων κάθε τύπου καιρού. Αυτή η μεθοδολογία έχει χρησιμοποιηθεί ελάχιστα από τότε ωστόσο, πιθανότατα λόγω της σχετικά χρονοβόρας διαδικασίας (σε σύγκριση με την TSI και ιδίως λαμβάνοντας υπόψη την ικανότητα των σύγχρονων στατιστικών λογισμικών να ολοκληρώνουν ταχύτατα τις αναλύσεις PCA και CA και της αναγκαιότητας χωρικά ομοιογενών περιοχών για την ταξινόμηση.



Η βασική όμως ταξινόμηση τύπων καιρού, που βασίζεται στην προσέγγιση κυκλοφορίας προς περιβάλλον (circulation-to-environment) και έχει αποδειχθεί ιδιαίτερα χρήσιμη σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών τις τελευταίες δεκαετίες (και σε ευρεία χωρική κλίμακα), είναι η χωρική συνοπτική ταξινόμηση (Spatial Synoptic Classification, SSC) (Kalkstein et al. 1996, Sheridan 2002). Η κύρια ιδέα της SSC βασίστηκε στον ορθό προσδιορισμό του χαρακτήρα κάθε τύπου καιρού για μια συγκεκριμένη τοποθεσία. Δημιουργήθηκε αρχικά από τους Kalkstein et al. (1996), εφαρμόζοντας μια υβριδική τεχνική ταξινόμησης που προσδιόριζε χειροκίνητα τον τύπο καιρού (ημέρες σπόρου-seed days) σε κάθε τοποθεσία και εν συνεχεία με την εφαρμογή μιας αυτοματοποιημένης διαδικασίας για την ταξινόμηση όλων των ημερών της χειμερινής περιόδου. Η βασική ημέρα ή ημέρα σπόρου είναι στην πραγματικότητα μια ημέρα που περιέχει τα τυπικά μετεωρολογικά χαρακτηριστικά ενός συγκεκριμένου τύπου καιρού στη συγκεκριμένη τοποθεσία. Προκειμένου να προσδιοριστούν οι βασικές ημέρες για κάθε τοποθεσία και για κάθε εποχή, πρώτα θα πρέπει να προσδιοριστούν τα τυπικά μετεωρολογικά χαρακτηριστικά (Sheridan 2002).

Αν και η ταξινόμηση SSC βρίσκει εφαρμογή σε έναν μεγάλο αριθμό ερευνών (Greene and Kalkstein 1996, Kalkstein and Greene 1997, Kalkstein et al. 1998), η αρχική μορφή της SSC υπόκειται σε δύο σημαντικούς περιορισμούς. Συγκεκριμένα, στην αρχική της μορφή η SSC ήταν διαθέσιμη μόνο για τη χειμερινή και (τελικά) καλοκαιρινή περίοδο και το ποσοστό αντιστοιχίας μεταξύ γειτονικών σταθμών ήταν λιγότερο από το επιθυμητό (Sheridan 2000). Και οι δύο αυτές αδυναμίες ξεπεράστηκαν με την ανακατασκευή της ταξινόμησης SSC στις αρχές της δεκαετίας του 2000 (Sheridan 2002). Οι sliding seed days εισήχθησαν, ώστε να επιτραπεί στην SSC η ταξινόμηση των ημερών στις μεταβατικές περιόδους (άνοιξη και φθινόπωρο), καθώς και η μεταφορά των πραγματικών seed days σε γειτονικούς σταθμούς, βελτιώνοντας έτσι σημαντικά το ποσοστό της χωρικής αντιστοίχισης.

Η ανανεωμένη μορφή της SSC χρησιμοποιεί τις παρακάτω 6 μετεωρολογικές μεταβλητές προκειμένου να ταξινομηθεί κάθε τύπος καιρού για μια συγκεκριμένη τοποθεσία, σε ημερήσια βάση. Αυτές είναι οι:

- Θερμοκρασία αέρα στα 2 m πάνω από την επιφάνεια του εδάφους (°C)
- Θερμοκρασία σημείου δρόσου στα 2 m πάνω από την επιφάνεια του εδάφους (°C)
- Ατμοσφαιρική πίεση στη στάθμη της θάλασσας (hPa)



- Συνιστώσες ταχύτητας ανέμου στα 10 m από την επιφάνεια του εδάφους (u και v) (knots)
- Διεύθυνση ανέμου (°)
- Ολική Νεφοκάλυψη (%).

Με βάση τις παραπάνω 6 μεταβλητές πραγματοποιήθηκε η ταξινόμηση κάθε ημέρας στους αντίστοιχους τύπους καιρού. Η ταξινόμηση της κάθε ημέρας επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από τα χαρακτηριστικά της θερμοκρασίας και της υγρασίας και έτσι προέκυψαν οι 7 ακόλουθοι τύποι καιρού (Lee 2015):

1. Ξηρός πολικός (Dry Polar DP)
2. Ξηρός μέτριος (Dry Moderate DM)
3. Ξηρός τροπικός (Dry Tropical DT)
4. Υγρός πολικός (Moist Polar MP)
5. Υγρός μέτριος (Moist Moderate MM)
6. Υγρός τροπικός (Moist Tropical MT)
7. Μεταβατικός (Transitional TR)

Ο μεταβατικός τύπος καιρού αντιπροσωπεύει μια κατάσταση κατά τη διάρκεια της ημέρας όπου μπορεί να υπάρξει συγχώνευση των καιρικών χαρακτηριστικών και όχι καλή διάκριση. Γενικά, οι παραπάνω τύποι καιρού σχετίζονται με την εποχή του έτους και με την τοποθεσία του σταθμού. Ως εκ τούτου, ένας ξηρός τροπικός τύπος πρόκειται να αντιπροσωπεύει υψηλότερες θερμοκρασίες για μια τοποθεσία σε ένα σχετικά θερμό κλίμα σε σύγκριση με μια άλλη τοποθεσία σε ένα ψυχρότερο κλίμα. Ομοίως, ένας τροπικός τύπος καιρού θα παρουσιάζει υψηλότερες θερμοκρασίες το καλοκαίρι από ό,τι το χειμώνα για την ίδια τοποθεσία. Αυτή η σχετικότητα του τύπου καιρού με την εποχή του έτους και την τοποθεσία παρουσιάζεται για όλες τις μεταβλητές που λαμβάνονται υπόψη στην ταξινόμηση. Επιπλέον, για την ταξινόμηση έχουν αξιοποιηθεί πολλές ημέρες από εκατοντάδες σταθμούς σε έναν ευρύ χωρικό τομέα, τόσο στις Ηνωμένες Πολιτείες όσο και διεθνώς (Hondula and Davis 2011).

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, πολλές συνοπτικές κλιματολογικές ταξινομήσεις παρουσιάζουν διάφορα μειονεκτήματα ως προς την εκτέλεση των λειτουργιών τους κατά τη διαδικασία της ταξινόμησης. Το βασικότερο είναι ότι πρέπει να εφαρμοστούν ξεχωριστές ταξινομήσεις για διαφορετικές εποχές του έτους ή για διαφορετικές τοποθεσίες, με αποτέλεσμα η καθεμία να αποδίδει είτε διαφορετικό αριθμό τύπων καιρού, είτε τύπους με διαφορετικό χαρακτήρα (και διαφορετικά ονόματα ή



περιγραφές) από εποχή σε εποχή και από τόπο σε τόπο. Όταν εφαρμοστούν αυτές οι ταξινομήσεις για τη μελέτη ενός συγκεκριμένου συμβάντος, αυτό μπορεί να προκαλέσει σύγχυση όσον αφορά την ερμηνεία των αποτελεσμάτων περιπλέκοντας τις συγκρίσεις μεταξύ αποτελεσμάτων από διαφορετικές τοποθεσίες και διαφορετικές εποχές. Εξαιτίας αυτού, ίσως το πιο σημαντικό χαρακτηριστικό της SSC είναι η καθολικότητα των κατηγοριών που προκύπτουν. Δηλαδή, καθώς μετακινείται κανείς από σταθμό σε σταθμό, το πλήρες σύνολο των τύπων καιρού (που αναφέρθηκαν παραπάνω) και τα ονόματα των τύπων παραμένουν σταθερά. Για παράδειγμα, ένας υγρός πολικός (MP) τύπος καιρού αντιπροσωπεύει ένα σχετικά δροσερό και υγρό σύνολο συνθηκών για μια συγκεκριμένη τοποθεσία. Ως εκ τούτου, οι συνθήκες που παρουσιάζονται είναι πάντα πιο δροσερές από τις μέτριες υγρές (MM) και πάντα πιο υγρές από τις ξηρές πολικές (DP) που μπορούν να παρατηρηθούν στον πλανήτη. Έτσι, ενώ η μεθοδολογία του TSI χρησιμοποιείται σε μια σειρά από συνοπτικές αναλύσεις, η SSC βρίσκει συχνά εφαρμογή ως σύνολο δεδομένων (ημερολόγιο ημερήσιων καιρικών τύπων) και επομένως είναι πολύ πιο εύκολο να χρησιμοποιηθεί από ερευνητές από ποικίλα διαφορετικά υπόβαθρα. Η δωρεάν προσφορά της ανανεωμένης κατασκευής της SSC και η εύληπτη ερμηνεία της, έχει ως αποτέλεσμα την επέκτασή της στην Ευρώπη (Bower et al. 2007) και στην εφαρμογή της σε μια μεγάλη ποικιλία εφαρμογών (Ashley et al. 2012, Hanna et al. 2011, Lee et al. 2012), ειδικά στην έρευνα των κυμάτων καύσωνα και τη θνησιμότητα που σχετίζεται με τη θερμότητα (Sheridan and Dolney 2003, Knight et al. 2008, Sheridan and Kalkstein 2009).

Το σύστημα ταξινόμησης SSC εξελίχθηκε πρόσφατα. Ειδικότερα, αναπτύχθηκε η ταξινόμηση Gridded Weather Typing Classification (GWTC), ως προέκταση του συστήματος SSC. Το συγκεκριμένο σύστημα ταξινόμησης, σχεδιάστηκε ώστε να ενσωματώνει μερικά από τα πιο επιτυχημένα γνωρίσματα της SSC αλλά ταυτόχρονα να ξεπερνά και μερικούς από τους περιορισμούς της (Lee 2015). Σχεδιάστηκε με τέτοιο τρόπο ώστε να ενσωματώνει μια σειρά από νέα χαρακτηριστικά με βάση τους παρακάτω στόχους:

- Δημιουργία μιας δομημένης ταξινόμησης τύπων καιρού, με βάση το πλέγμα σημείων (grid points)
- Βελτίωση της χωρικής ανάλυσης των υπαρχουσών ταξινομήσεων



- Δημιουργία μιας πιο αυτοματοποιημένης μεθοδολογίας ταξινόμησης εξαλείφοντας μεγάλο κομμάτι χρόνου που καταναλώνονταν στις προηγούμενες ταξινομήσεις, ώστε να δημιουργηθούν οι εκάστοτε τύποι καιρού και επιπρόσθετα να μπορεί εύκολα να επαναληφθεί η διαδικασία από άλλους ερευνητές
- Η ταξινόμηση να σχετίζεται καθαρά με την εποχή του έτους και την τοποθεσία
- Η ταξινόμηση να προσδιορίζει τη φύση των μεταβατικών τύπων καιρού
- Η ταξινόμηση να παρέχει επαρκή συχνότητα για κάθε βασικό τύπο καιρού σε όλες τις τοποθεσίες και ημέρες του έτους, διασφαλίζοντας ότι οι βασικοί τύποι καιρού μπορούν να εμφανίζονται σε κάθε ημερολογιακό μήνα σε όλες τις τοποθεσίες.

Ο αρχικός σχεδιασμός και εφαρμογή της ταξινόμησης GWTC (ταξινομεί κάθε μέρα από το 1979 σε έναν από τους 11 διαφορετικούς τύπους καιρού σε περισσότερες από 9000 τοποθεσίες), περιοριζόταν στην περιοχή των Ηνωμένων Πολιτειών της Αμερικής, στη συνέχεια στην ευρύτερη περιοχή της Βόρειας Αμερικής και πλέον, μέσω της αναβαθμισμένης ταξινόμησης GWTC2 (Lee 2020) απευθύνεται σε παγκόσμια κλίμακα (με χωρική ανάλυση $0,5^\circ \times 0,5^\circ$). Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, από τους κύριους στόχους της ταξινόμησης GWTC, ήταν η καλύτερη δυνατή χωρική ανάλυση σε σχέση με τα προηγούμενα συστήματα που χρησιμοποιήθηκαν για την ταξινόμηση, γεγονός που δικαιολογεί τη χρήση κλιματικών δεδομένων από το National Center for Environmental Prediction (NCEP) του North American Regional Reanalysis (NARR) (Mesinger et al. 2006) κατά το σχεδιασμό της. Το NARR αποτελείται από ένα σύνολο πλέγματος μετεωρολογικών δεδομένων ενσωματωμένων από διάφορες πηγές παρατήρησης, όπως επιφανειακοί μετεωρολογικοί σταθμοί, βροχόμετρα κτλ. Τα δεδομένα που επιλέχθηκαν προέκυψαν με βάση τις παρακάτω 6 μεταβλητές (όπως αυτές του SSC), οι οποίες ελήφθησαν 8 φορές ημερησίως (Lee 2015):

- Θερμοκρασία αέρα στα 2 m πάνω από την επιφάνεια του εδάφους ($^\circ\text{C}$)
- Θερμοκρασία σημείου δρόσου στα 2 m πάνω από την επιφάνεια του εδάφους ($^\circ\text{C}$)
- Ατμοσφαιρική πίεση στη στάθμη της θάλασσας (hPa)
- Συνιστώσες ταχύτητας ανέμου στα 10 m από την επιφάνεια του εδάφους (u και v) (knots)



- Διεύθυνση ανέμου (°)
- Νεφοκάλυψη (%).

Η μεθοδολογία και η επεξεργασία των παραπάνω παρατηρήσεων βασίστηκε στην προηγούμενη διαδικασία του συστήματος SSC, με μικρές όμως διαφοροποιήσεις. Εκτός από τη χώρο-χρονική σχετικότητα του κάθε τύπου καιρού, ο υψηλός βαθμός χωρικής ανάλυσης και η πλήρως αυτοματοποιημένη διαδικασία είναι αυτό που κάνει την ταξινόμηση GWTC να διαφέρει από άλλες παρόμοιες ταξινομήσεις, όπως η SSC (Sheridan 2002). Έτσι, η συχνότητα του κάθε τύπου καιρού που προέκυψε είναι πιο ισορροπημένη για κάθε μία τοποθεσία και για κάθε χρονική στιγμή του έτους. Τα ονόματα των τύπων καιρού που προκύπτουν δεν περιλαμβάνουν γεωγραφικά γνωρίσματα (ηπειρωτικό, θαλάσσιο, τροπικό, πολικό) αλλά βασίζονται αυστηρά στα χαρακτηριστικά της θερμοκρασίας και της υγρασίας και ως εκ τούτου αναφέρονται πάντα στις σχετικές καιρικές μεσοποιημένες συνθήκες της τοποθεσίας και της ημέρας (Lee 2015).

Κατά τη δημιουργία της ταξινόμησης, πλήθος στατιστικών μεθόδων εφαρμόστηκαν (PCA, CA, DFA- Discriminant Function Analysis) και η μεθοδολογία υποβλήθηκε σε πολλά στάδια δοκιμών και σφαλμάτων ώστε να βελτιωθεί. Με αυτόν τον τρόπο, ορισμένες ημέρες ταξινομήθηκαν στην κατηγορία "μεσαία/μέτρια", δηλαδή ανήκουν σε κατάσταση μέσης-μετριασμένης υγρασίας ή/και σε μέτρια θερμοκρασία.

Οι τύποι καιρού που προέκυψαν γι' αυτή την κατηγορία ήταν 5 και πιο συγκεκριμένα ονοματίζονται παρακάτω:

- 1) Average cool as Cool (**C**): Μέσος ψυχρός ως ψυχρός
- 2) Average warm as Warm (**W**): Μέσος θερμός ως θερμός
- 3) Humid moderate as Humid (**H**): Υγρός μέτριος ως υγρός
- 4) Dry moderate as Dry (**D**): Ξηρός μέτριος ως ξηρός
- 5) Average moderate as Seasonal (**S**): Μέσος μέτριος ως εποχικός

Ο τύπος καιρού Seasonal (S) χαρακτηρίζεται τόσο από θερμοκρασία όσο και από υγρασία που είναι φυσιολογικές οι τιμές τους για την εκάστοτε τοποθεσία και την εκάστοτε χρονική στιγμή (ημέρα) του έτους. Όσες ημέρες όμως δεν χαρακτηρίζονταν ούτε από τιμές θερμοκρασίας ούτε από τιμές υγρασίας που ταξινομήθηκαν στη παραπάνω κατηγορία, ανήκουν στην "ακραία" κατηγορία που αναφέρεται σε εντονότερες (είτε πιο θερμές, είτε πιο ψυχρές από το μέσο) συνθήκες θερμοκρασίας ή υγρασίας από τα συνηθισμένα για τη περιοχή και το εκάστοτε έτος (Lee 2015). Οι τύποι



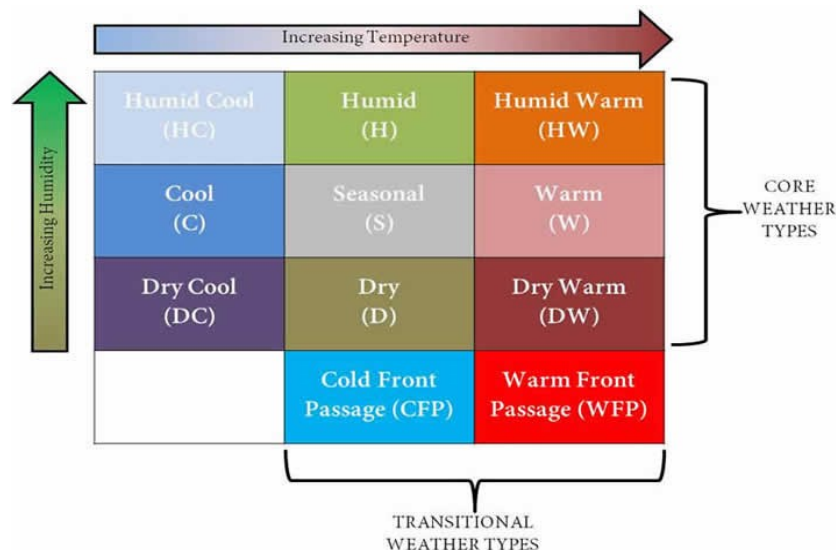
καιρού που προέκυψαν γι' αυτή τη κατηγορία ήταν 4 και πιο συγκεκριμένα ονομάζονται παρακάτω :

- 6) Humid Cool (**HC**): Υγρός ψυχρός
- 7) Humid Warm (**HW**): Υγρός θερμός
- 8) Dry Cool (**DC**): Ξηρός ψυχρός
- 9) Dry Warm (**DW**): Ξηρός θερμός

Οι παραπάνω τέσσερις "ακραίοι" τύποι καιρού (HC, HW, DC, DW), μαζί με τους πέντε "μεσαίους/μέτριους" (C, W, H, D, S), σχηματίζουν τους 9 βασικούς τύπους καιρού (Core Weather Types) του συστήματος ταξινόμησης GWTC (Lee 2015). Όμως, υπάρχουν και μεταβατικές ημέρες (ημέρες όπου ο καιρός μεταβαίνει γρήγορα σε διαφορετικές συνθήκες), που ουσιαστικά παρουσιάζουν αρκετές αυξομειώσεις όσον αφορά τις καιρικές μεταβλητές και μπορεί να περιλαμβάνουν παραπάνω από έναν τύπο καιρού. Στο πλαίσιο αυτό, δημιουργήθηκαν λοιπόν 2 μεταβατικοί τύποι καιρού (Transitional Weather Types) και ονομάστηκαν:

- 10) Cold Front Passage (**CFP**): Διέλευση ψυχρού μετώπου
- 11) Warm Front Passage (**WFP**): Διέλευση θερμού μετώπου

Στο Σχήμα 3.1, παρουσιάζονται συνολικά και οι 11 τύποι καιρού (Core Weather Types and Transitional Weather Types) του συστήματος ταξινόμησης Gridded Weather Typing Classification (GWTC) καθώς και η σχέση τους με τη θερμοκρασία και την υγρασία.



Σχήμα 3.1. Οι 11 τύποι καιρού του συστήματος ταξινόμησης GWTC (Πηγή: <https://www.personal.kent.edu/~cclee/gwtc.html>)



4. Μεταβολές στην συχνότητα τύπων καιρού στην Ευρώπη

Στο Κεφάλαιο 3 αναδείχθηκε η σημαντικότητα των ταξινομήσεων τύπων καιρού (WTs), καθώς έχουν αποδειχθεί εξαιρετικά χρήσιμα εργαλεία σε ένα μεγάλο εύρος εφαρμοσμένων κλιματολογικών ερευνών που εξετάζουν τη μεταβλητότητα των επιπτώσεων που σχετίζονται με το κλίμα (Lee 2017), όπως εκείνες που αφορούν την ανθρώπινη θνησιμότητα και νοσηρότητα, καθώς η ανθρώπινη ευημερία και υγεία επηρεάζονται περισσότερο από συνδυασμούς μετεωρολογικών παραμέτρων στις οποίες εκτίθενται τα άτομα παρά από μεμονωμένα μετεωρολογικά στοιχεία. Το μεγαλύτερο μέρος που αφορά στην έρευνα για την κλιματική αλλαγή επικεντρώνεται στη μελέτη των τάσεων (μέσα, μέγιστα, ακραίες τιμές κ.λπ.) μεμονωμένων μετεωρολογικών μεταβλητών, όπως η θερμοκρασία, η βροχόπτωση, η απόλυτη υγρασία της ατμόσφαιρας (Santer et al. 2007), η σχετική υγρασία (Willett et al. 2007), η πίεση στη στάθμη της θάλασσας (Gillett and Stott 2009) και η ταχύτητα του ανέμου (McVicar and Roderick 2010). Οι ατμοσφαιρικές αυτές μεταβλητές παρουσιάζουν σημαντικές και συχνές αλλαγές στα μεγέθη τους τις τελευταίες δεκαετίες. Ενώ οι αλλαγές αυτές έχουν μελετηθεί εκτενώς, οι τάσεις των WTs συνοπτικής κλίμακας παραμένουν σε μεγάλο βαθμό ανεξερεύνητες.

Επιπλέον, έχει αποδειχθεί ότι η ανάπτυξη και η εξέλιξη του φαινομένου της UHI επηρεάζεται σημαντικά από τις συνοπτικές καιρικές συνθήκες μιας περιοχής, γεγονός που καθιστά τις ταξινομήσεις WTs βασικό εργαλείο στην παρούσα διατριβή. Πριν όμως μελετήσουμε τη συσχέτιση WTs με το φαινόμενο της UHI και πιο συγκεκριμένα με την αστική υπερθέρμανση σε μεγάλα Ευρωπαϊκά αστικά κέντρα, θεωρούμε σκόπιμο να ερευνήσουμε για αρχή τις μεταβολές στη συχνότητα WTs στην ευρύτερη περιοχή της Ευρώπης χρησιμοποιώντας το πρόσφατα αναπτυγμένο σύστημα ταξινόμησης τύπων καιρού GWTC2 που περιγράψαμε και παραπάνω. Με αυτό τον τρόπο επιχειρούμε να δημιουργήσουμε τον "καμβά", πάνω στον οποίο θα επικεντρωθεί το μεγαλύτερο μέρος της μελέτης. Είναι σημαντικό δε να γνωρίζουμε την εξέλιξη διαφορετικών WTs στο πλαίσιο της κλιματικής αλλαγής και της έντονης αστικοποίησης, ώστε κατά τη διάρκεια της συσχέτισης των WTs με το φαινόμενο της UHI να υπάρχει το ανάλογο υπόβαθρο.

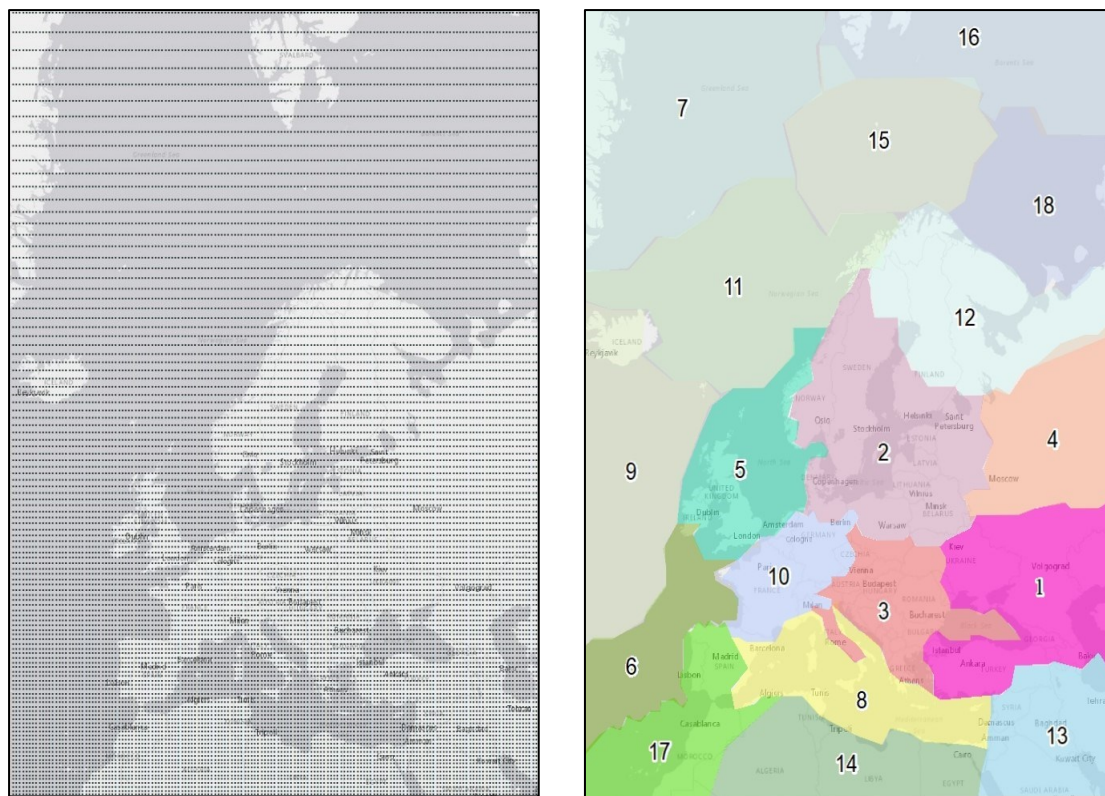


4.1 Δεδομένα και Μεθοδολογία

Για το σκοπό της συγκεκριμένης μελέτης, ημερήσια δεδομένα τύπων καιρού ταξινομήσης πλέγματος (GWTC2) ελήφθησαν για κάθε ημέρα από την 1^η Ιανουαρίου του 1979 έως τις 30 Δεκεμβρίου του 2019 για κάθε σημείο πλέγματος (με χωρική ανάλυση $0,5^\circ \times 0,5^\circ$) της περιοχής μελέτης που περιλαμβάνει την ηπειρωτική Ευρώπη, μέρος της Βόρειας Αφρικής, μέρος της Δυτικής Ασίας, καθώς και τις θαλάσσιες περιοχές της Μεσογείου, της Βόρειας Θάλασσας, της Νορβηγικής Θάλασσας, της Βαλτικής Θάλασσας, της Γροιλανδικής Θάλασσας, της Θάλασσας Μπάρεντς και του Βόρειου Ατλαντικού Ωκεανού (Σχήμα 4.1). Η ανάπτυξη και η περιγραφή της ταξινομήσης GWTC2 πραγματοποιήθηκε από τον Lee (2020), ενώ τα δεδομένα είναι δημόσια διαθέσιμα στον ισότοπο www.personal.kent.edu/~cclee/gwtcdata.html. Για την ανάπτυξη της ταξινομήσης GWTC2, εφαρμόστηκε το μοντέλο Climate Forecast System (CFS, Saha et al. 2014) από την US National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), προκειμένου να συμπεριλάβει ολόκληρη την υδρόγειο, καθώς το σύνολο δεδομένων NARR (που χρησιμοποιήθηκε στην πρώτη εκδοχή της GWTC) δεν είναι διαθέσιμο σε παγκόσμιο κλίμακα. Όπως αναφέρθηκε και στο Κεφάλαιο 3, σε αντίθεση με τις υπόλοιπες ταξινομήσεις τύπων καιρού, στο πλαίσιο της GWTC προσδιορίζονται οι καιρικές συνθήκες οι οποίες είναι σχετικές με τις «κανονικές» για μια δεδομένη εποχή σε μια συγκεκριμένη περιοχή. Έτσι για παράδειγμα, ένας τύπος καιρού Dry Cool (DC) σημαίνει απλώς ότι ο καιρός είναι πιο ξηρός και πιο δροσερός από τον ετήσιο μέσο όρο για αυτή την τοποθεσία (Lee and Sheridan 2018).

Προκειμένου να συνοψίσουμε χωρικά τα αποτελέσματά μας, πραγματοποιήθηκε η κατανομή της περιοχής μελέτης σε 18 διακριτές περιοχές. Για το σκοπό αυτόν, η μέση μηνιαία συχνότητα για καθέναν από τους 11 τύπους καιρού και για κάθε έναν από τους 12 μήνες υπολογίστηκε για κάθε σημείο πλέγματος για την περίοδο 1979-2019. Εν συνεχεία, οι συχνότητες αυτές υποβλήθηκαν σε ανάλυση κύριων συνιστωσών (Principle Components Analysis-PCA) και σε ανάλυση κατά συστάδες (TwoStep Clustering component Analysis-CA), με τη βοήθεια του SPSS Statistical Software (2001). Οι δύο στατιστικές μέθοδοι περιγράφονται αναλυτικά στη συνέχεια. Οι 18 στατιστικά κατανεμημένες περιοχές χρησιμοποιήθηκαν ως περιοχές αναφοράς και σχεδιάστηκαν με τη βοήθεια του ArcMap (Σχήμα 4.1).





Σχήμα 4.1. Η περιοχή μελέτης, με τα σημεία πλέγματος στα οποία αντιστοιχεί κάθε τύπος καιρού (αριστερά) και οι 18 περιοχές κατανομής, όπως προέκυψαν από τη στατιστική ανάλυση (δεξιά).

Για κάθε περιοχή ξεχωριστά, υπολογίστηκε η ποσοστιαία (%) συχνότητα εμφάνισης κάθε τύπου καιρού για κάθε χρόνο (1979-2019). Για τα ποσοστά συχνοτήτων, στη συνέχεια εφαρμόστηκε ο μη παραμετρικός στατιστικός έλεγχος Mann-Kendall για την εύρεση τάσεων καθώς και η μέθοδος Sen για την εκτίμηση των κλίσεων των τάσεων. Στα αποτελέσματα που συζητούνται παρακάτω, όλα τα ποσοστά αναφέρονται σε ποσοστιαίες μεταβολές της μέσης συχνότητας για κάθε σημείο πλέγματος για ολόκληρη την περίοδο μελέτης. Τα ποσοστά αυτά υπολογίστηκαν πολλαπλασιάζοντας τις κλίσεις με 40 (περίοδος μελέτης, μείον 1). Η απεικόνιση των ποσοστιαίων μεταβολών για κάθε σημείο πλέγματος σε χάρτες, όπου με μαύρες τελείες παρουσιάζονται τα σημεία με στατιστικά σημαντικές μεταβολές (p -value < 0,05) φαίνονται παρακάτω. Επιπλέον, πολλαπλασιάζοντας τα παραπάνω ποσοστά με 365, υπολογίσαμε τη μεταβολή (από την αρχή της περιόδου μελέτης ως το τέλος αυτής) των ημερών εμφάνισης ανά έτος για κάθε τύπο καιρού.

Για την απεικόνιση των μη γραμμικών τάσεων, ραβδογράμματα των συχνοτήτων για κάθε τύπου καιρού σχεδιάστηκαν με την εφαρμογή μιας πολυωνυμικής τάσης τρίτης σειράς στα υποκείμενα δεδομένα. Ωστόσο, κανένα αριθμητικό αποτέλεσμα που



παρουσιάζεται παρακάτω δεν βασίζεται σε αυτό το πολυώνυμο. Τέλος, δεδομένα μηνιαίων μέσων τιμών θερμοκρασίας αέρα (στα 2m), σημείου δρόσου (στα 2m) και θερμοκρασίας στην επιφάνεια της θάλασσας ελήφθησαν από τη βάση δεδομένων ERA5 reanalysis (Hersbach et al. 2018) του European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF), με στόχο τη μελέτη των παραγόντων που οφείλονται στις τάσεις των συχνοτήτων κάθε τύπου καιρού. Οι τάσεις των παραπάνω μετεωρολογικών παραμέτρων αναλύθηκαν και συγκρίθηκαν με αυτές των τύπων καιρού με ανάλυση συσχέτισης, με τη χρήση του συντελεστή Pearson (Pearson-based pattern correlations).

4.2 Ανάλυση κύριων συνιστωσών (Principal Component Analysis – PCA)

Λόγω του μεγάλου πλήθους των δεδομένων μας (ημερήσιοι WTs για κάθε πλεγματικό σημείο), η ομαδοποίηση τους και η ανάλυση των χαρακτηριστικών τους αποτελεί ένα ιδιαίτερο δύσκολο πρόβλημα. Απαιτείται λοιπόν η μείωση του πλήθους των μεταβλητών και για το σκοπό αυτό στην παρούσα μελέτη εφαρμόστηκε η στατιστική μέθοδος της ανάλυσης κύριων συνιστωσών (Manly 1986).

Η ανάλυση κύριων συνιστωσών (Principal Component Analysis - PCA) είναι μια στατιστική μέθοδος η οποία χρησιμοποιείται ευρέως με κύριο στόχο τη μείωση της διαστατικότητας μιας μεγάλης σειράς δεδομένων. Αυτό επιτυγχάνεται με την αντικατάσταση των συσχετιζόμενων μεταβλητών X_1, X_2, \dots, X_p από άλλες ασυσχέτιστες μεταξύ τους μεταβλητές PC_1, PC_2, \dots, PC_m (πλήθους $m < p$), οι οποίες ονομάζονται κύριες συνιστώσες (Principal Components, PCs). Στην παρούσα διατριβή, εφαρμόστηκε το μοντέλο της παραγοντικής ανάλυσης (Factor Analysis), μια παραλλαγή της ανάλυσης κύριων συνιστωσών. Πρακτικά και η PCA και η Factor Analysis είναι σχεδόν ίδιες μέθοδοι, παρουσιάζοντας ωστόσο λεπτές διαφορές τόσο στο μαθηματικό υπόβαθρο όσο και στον τρόπο εφαρμογής. Από τις κύριες συνιστώσες προκύπτουν οι παράγοντες (factors) ενώ οι τιμές των παραγόντων που προκύπτουν ονομάζονται τιμές επίδοσης (factor scores). Η μέση τιμή των επιδόσεων για κάθε παράγοντα είναι μηδενική, ενώ η τυπική απόκλιση έχει τιμή ίση με τη μονάδα. Αν και το πλήθος των παραγόντων F_j είναι σημαντικά μικρότερο από το πλήθος των αρχικών μεταβλητών X_i ($m < p$), ερμηνεύουν πολύ μεγάλο ποσοστό της αρχικής διακύμανσης. Σύμφωνα με την εξίσωση 4.1, οι αρχικές μεταβλητές εκφράζονται ως γραμμικός συνδυασμός των ανεξάρτητων παραγόντων ως εξής:



$$X_i = g_{i1}F_1 + g_{i2}F_2 + \dots + g_{im}F_m + e_i \quad (4.1)$$

Στην εξίσωση 4.1, οι συντελεστές $g_{i1}, g_{i2}, \dots, g_{im}$ καλούνται φορτία των παραγόντων (factor loadings) και εκφράζουν τη συσχέτιση της X_i μεταβλητής με κάθε έναν από τους παράγοντες.

Κατά την παραγοντική ανάλυση λαμβάνουν χώρα οι παρακάτω μαθηματικές μέθοδοι και υπολογισμοί.

i. Εφαρμογή ανάλυσης σε κύριες συνιστώσες

- Τυποποίηση των αρχικών μεταβλητών X_1, X_2, \dots, X_p , ώστε να έχουν μέση όρο μηδέν και διακύμανση ίση με 1.
- Υπολογισμός της μήτρας των συνδιακυμάνσεων, η οποία πλέον έχει την έννοια της μήτρας των συσχετίσεων.
- Εκτίμηση των χαρακτηριστικών ριζών $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_p$, και των συντελεστών στάθμισης b_{ij} ή καλύτερα των διανυσμάτων b_1, b_2, \dots, b_p . Οι συντελεστές της i κύριας συνιστώσας εμφανίζονται με το διάνυσμα b_i και η διακύμανση αυτής με τη χαρακτηριστική ρίζα λ_j , όπως φαίνεται στην παρακάτω εξίσωση (4.2):

$$PC_j = b_{j1}X_1 + b_{j2}X_2 + \dots + b_{jp}X_p \quad (4.2)$$

ii. Υπολογισμός των X_i ως γραμμικούς συνδυασμούς των κυρίων συνιστωσών, όπως φαίνεται στην παρακάτω εξίσωση (4.3):

$$X_i = b_{1i}PC_1 + b_{2i}PC_2 + \dots + b_{pi}PC_p \quad (4.3)$$

iii. Διατήρηση m κυρίων συνιστωσών (εξίσωση 4.4):

$$X_i = b_{1i}PC_1 + b_{2i}PC_2 + \dots + b_{mi}PC_m + e_i \quad (4.4)$$

όπου το e_i αποτελεί γραμμικό συνδυασμό των υπολοίπων κυρίων συνιστωσών $PC_{m+1}, PC_{m+2}, \dots, PC_p$

iv. Μετατροπή των κυρίων συνιστωσών PC_j σε παράγοντες, διαιρώντας με την τυπική απόκλισή τους, η οποία είναι $\sqrt{\lambda_j}$, ώστε να έχουν μέση τιμή ίση με το μηδέν και διακύμανση ίση με τη μονάδα. Έτσι η εξίσωση 4.1 μετασχηματίζεται στην εξίσωση 4.5:

$$X_i = a_{i1}F_1 + a_{i2}F_2 + \dots + a_{im}F_m + e_i \quad (4.5)$$



Στην τελευταία εξίσωση είναι $a_{ij} = \sqrt{\lambda_j} b_{ji}$ και $F_j = PC_j \sqrt{\lambda_j}$, οι οποίες μεταβλητές καλούνται προσωρινοί παράγοντες (provisional factors).

- v. Ορθογώνια "varimax" περιστροφή των προσωρινών παραγόντων F_j , με σκοπό την εύρεση νέων παραγόντων F_j^* , των οποίων τα φορτία θα είναι μεγαλύτερα κατ' απόλυτη τιμή από τα προηγούμενα, ώστε η κατάταξη των αρχικών μεταβλητών σε κάποιον παράγοντα να είναι βέλτιστη. Αυτό γίνεται εφικτό με τη μεγιστοποίηση του αθροίσματος των τετραγώνων των φορτίων του κάθε παράγοντα $F_j \sum_i = 1, a_{ij}^2$, καθώς αυτό είναι ένα μέτρο της ολικής διακύμανσης των αρχικών μεταβλητών που ερμηνεύει ο κάθε j παράγοντας (Richman 1986). Προκύπτει έτσι μία νέα εξίσωση (4.6):

$$X_i = g_{i1}F_1^* + g_{i2}F_2^* + \dots + g_{im}F_m^* + e_i \quad (4.6)$$

στην οποία οι νέοι παράγοντες F_j^* καλούνται περιστραμμένοι παράγοντες (rotated factors). Χάριν απλότητας, οι περιστραμμένοι παράγοντες αναφέρονται ως παράγοντες και συμβολίζονται με F_j .

Ένα πολύ σημαντικό βήμα στην PCA είναι η επιλογή του κατάλληλου αριθμού m των παραγόντων που θα διατηρηθούν. Γι' αυτόν τον λόγο, έχουν αναπτυχθεί διάφορα κριτήρια όπως το Kaiser-Guttman, το κριτήριο της παράλληλης ανάλυσης καθώς και το κριτήριο SCREE, το οποίο και χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα μελέτη. Σύμφωνα με το κριτήριο SCREE, θα πρέπει να διατηρηθούν τόσο παράγοντες όσα είναι και τα σημεία που αποκλίνουν από την ευθεία γραμμή σε ένα διάγραμμα όπου παρατίθενται οι ιδιοτιμές του πίνακα συσχετίσεων διατεταγμένες σε φθίνουσα σειρά (Jolliffe 1986).

4.3 Ανάλυση κατά συστάδες (Cluster Analysis – CA)

Η ανάλυση κατά συστάδες αποτελεί μια διαδομένη στατιστική μέθοδο που έχει σκοπό να κατατάξει σε ομάδες τις υπάρχουσες παρατηρήσεις, χρησιμοποιώντας την πληροφορία που υπάρχει σε κάποιες μεταβλητές. Με άλλα λόγια, αυτή η μέθοδος εξετάζει πόσο όμοιες είναι οι παρατηρήσεις ως προς κάποιον αριθμό μεταβλητών, με σκοπό να δημιουργήσει ομάδες από παρατηρήσεις που μοιάζουν μεταξύ τους. Μια επιτυχημένη ταξινόμηση θα πρέπει να καταλήξει σε ομάδες για τις οποίες οι παρατηρήσεις μέσα σε κάθε ομάδα είναι όσο το δυνατόν πιο ομοιογενείς, αλλά ταυτόχρονα παρατηρήσεις διαφορετικών ομάδων να διαφέρουν στο μέγιστο βαθμό. Δύο βασικές έννοιες για την ανάλυση κατά συστάδες είναι οι έννοιες της απόστασης και της ομοιότητας, που είναι αντίθετες μεταξύ τους, αφού παρατηρήσεις που είναι



όμοιες έχουν μικρή απόσταση (Sharma 1995). Έτσι, στην ανάλυση κατά συστάδες ο στόχος είναι να δημιουργηθούν ομάδες μέσα στις οποίες οι παρατηρήσεις απέχουν ελάχιστα, ενώ παρατηρήσεις διαφορετικών ομάδων απέχουν μεταξύ τους τα μέγιστα.

Γενικά, υπάρχουν αρκετές διαφορετικές προσεγγίσεις για το πώς μπορούν να ομαδοποιηθούν τα δεδομένα. Οι βασικότερες και πιο διαδομένες προσεγγίσεις είναι:

- Ιεραρχικές μέθοδοι: Στο πρώτο βήμα, κάθε παρατήρηση αποτελεί από μόνη της μια ομάδα. Στο επόμενο βήμα, ομαδοποιούνται οι δύο παρατηρήσεις που έχουν την ελάχιστη απόσταση μεταξύ τους κ.ο.κ.
- K-means: Ο αριθμός των ομάδων είναι γνωστός από πριν. Με έναν επαναληπτικό αλγόριθμο μοιράζονται οι παρατηρήσεις σε ομάδες, ανάλογα με το ποια ομάδα είναι πιο κοντά στην παρατήρηση (Davis and Walker 1992).
- Στατιστικές μέθοδοι: Σε αντίθεση με τις προηγούμενες μεθόδους που στηρίζονται καθαρά σε αλγοριθμικές λύσεις και δεν προϋποθέτουν κάποιο μοντέλο, στις στατιστικές μεθόδους οι παρατηρήσεις κατατάσσονται με βάση κάποια αρχική υπόθεση. Οι μέθοδοι αυτές έχουν αρκετά υπολογιστικά προβλήματα και για αυτό δεν προσφέρονται σε πολλά στατιστικά πακέτα.

4.4 Μη ιεραρχική μέθοδος ανάλυσης κατά συστάδες K-means

Η μέθοδος δουλεύει επαναληπτικά. Χρησιμοποιεί την έννοια του κέντρου (centroid) της ομάδας και στη συνέχεια κατατάσσει τις παρατηρήσεις ανάλογα με την απόστασή τους από τα κέντρα όλων των ομάδων (Kalkstein et al. 1996). Το κέντρο κάθε ομάδας δεν είναι τίποτα άλλο από τη μέση τιμή όλων των παρατηρήσεων της ομάδας για κάθε μεταβλητή, δηλαδή αντιστοιχεί στο διάνυσμα των μέσων. Στην συνέχεια, για κάθε παρατήρηση υπολογίζεται η ευκλείδεια απόστασή της από τα κέντρα των διαθέσιμων ομάδων και κάθε παρατήρηση κατατάσσεται στην ομάδα που είναι πιο κοντά. Η ευκλείδεια απόσταση d_{ij} μεταξύ της i και της j παρατήρησης δίνεται στην εξίσωση 4.7:

$$d_{ij} = \sqrt{\sum_{n=1}^p (x_{in} - x_{jn})^2} \quad (4.7)$$

όπου x_{in} είναι η τιμή της n μεταβλητής για την i παρατήρηση, x_{jn} η τιμή της n μεταβλητής για την j παρατήρηση και p ο αριθμός των μεταβλητών μιας παρατήρησης.

Αφού καταταχθούν όλες οι παρατηρήσεις, υπολογίζονται από την αρχή τα κέντρα, ως διάνυσμα των μέσων για τις παρατηρήσεις που ανήκουν στην κάθε ομάδα. Η



διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρις ότου δεν υπάρχουν διαφορές ανάμεσα σε δύο διαδοχικές επαναλήψεις.

Ο παραπάνω αλγόριθμος ουσιαστικά ελαχιστοποιεί το άθροισμα των τετραγώνων των αποστάσεων των παρατηρήσεων από τα κέντρα των ομάδων που ανήκουν. Συνήθως, η λύση περιέχει ομάδες με περίπου όμοιο αριθμό παρατηρήσεων. Το μεγάλο μειονέκτημα του αλγορίθμου είναι ότι εξαρτάται από τις αρχικές τιμές, οι οποίες, αν περιέχουν σφάλματα, μπορεί να οδηγήσουν σε πολύ διαφορετική ομαδοποίηση. Ένα άλλο πρόβλημα έχει να κάνει με τον αριθμό των ομάδων που θα επιλεγούν. Μια τακτική είναι η εφαρμογή δοκιμών ομαδοποίησης με διαφορετικό κάθε φορά αριθμό ομάδων και επιλογή της βέλτιστης λύσης.

Αν και η μέθοδος K-means βασίζεται στην ευκλείδεια απόσταση, μπορεί να χρησιμοποιηθεί κάθε είδους απόσταση (city-block, απόσταση Minkowski κ.ά.). Για μη συνεχή δεδομένα, υπάρχει το πρόβλημα ότι δεν μπορούν να υπολογιστούν οι μέσοι των ομάδων. Τότε χρησιμοποιείται κάποιο άλλο μέτρο, π.χ. για κατηγορικά δεδομένα με κατάταξη μπορεί να χρησιμοποιηθεί το διάνυσμα των διαμέσων, ενώ για ονομαστικά δεδομένα προτιμάται συνήθως η επικρατούσα τιμή (mode).

4.5 Έλεγχος Mann – Kendall

Ο μη παραμετρικός έλεγχος Mann-Kendall βρίσκει εφαρμογή στις περιπτώσεις που υπάρχει η πεποίθηση ότι τα δεδομένα που χρήζουν επεξεργασία, μπορεί να αποτελούν χρονολογική σειρά με τάση αύξουσα ή φθίνουσα (Kendall 1975). Χρησιμοποιείται συνήθως για την ανίχνευση μονοτονικών τάσεων σε σειρά περιβαλλοντικών δεδομένων, κλιματικών δεδομένων ή υδρολογικών δεδομένων. Η διαδικασία δεν επηρεάζεται από τυχόν ακραίες τιμές και λανθασμένα δεδομένα και δεν υπάρχει η ανάγκη κανονικής κατανομής των δεδομένων.

Ο έλεγχος γίνεται μεταξύ της ισχύς της μηδενικής υπόθεσης H_0 και της εναλλακτικής υπόθεσης H_1 . Για την περιγραφή του ελέγχου, στη βάση της μηδενικής υπόθεσης H_0 ισχύει ότι η σειρά x_1, x_2, \dots, x_n , προέρχεται από έναν πληθυσμό όπου οι μεταβλητές είναι ανεξάρτητες και με παρόμοιο τρόπο κατανομημένες, ενώ με βάση την εναλλακτική υπόθεση H_1 υπάρχει τάση στα δεδομένα (αύξουσα ή φθίνουσα). Η στατιστική συνάρτηση που χρησιμοποιείται για τον έλεγχο υποθέσεων εξαρτάται από το πλήθος των δεδομένων και από την τυχόν έντονη αλληλεξάρτηση τους (δηλαδή πολύ κοντινές



τιμές), και παρουσιάζεται ως το άθροισμα της διαφοράς μεταξύ των παρατηρούμενων τιμών (Gilbert, 1987).

Για πλήθος δεδομένων $n < 10$ το άθροισμα υπολογίζεται σύμφωνα με την ακόλουθη εξίσωση 4.8:

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sgn}(x_j - x_k) \quad (4.8)$$

όπου, το x_j είναι η παρατηρούμενη τιμή της χρονική στιγμή j , και το x_k είναι η παρατηρούμενη τιμή την χρονική στιγμή k . Χρονικά η στιγμή j έπεται της k και η τιμή n αντιστοιχεί στο μήκος του συνόλου των δεδομένων. Η τελική τιμή S , είναι ίση με το καθαρό αποτέλεσμα αυτών των αυξήσεων και μειώσεων. Εάν είναι θετικός αριθμός, οι παρατηρήσεις που λαμβάνονται αργότερα στο χρόνο τείνουν να είναι μεγαλύτερες από τις παρατηρήσεις που έγιναν νωρίτερα. Αν είναι αρνητικός αριθμός, τότε οι παρατηρήσεις που γίνονται αργότερα με τη πάροδο του χρόνου τείνουν να είναι μικρότερες από αυτές που έγιναν νωρίτερα. Ο όρος εντός του διπλού αθροίσματος προσδιορίζει το πρόσημο του αθροίσματος ως εξής:

$$\text{sgn}(x_j - x_k) = \begin{cases} 1 & \text{εάν } (x_j - x_k) > 0 \\ 0 & \text{εάν } (x_j - x_k) = 0 \\ -1 & \text{εάν } (x_j - x_k) < 0 \end{cases} \quad (4.9)$$

Οι τιμές που προκύπτουν από την εξίσωση 4.9 συγκρίνονται με την τιμή της θεωρητικής κατανομής S που αντιστοιχεί σε επίπεδο σημαντικότητας α . Η στατιστική σημαντικότητα είναι θεμελιώδης για την δοκιμή στατιστικής υπόθεσης. Σε κάθε πείραμα ή παρατήρηση που περιλαμβάνει τη σύνταξη ενός δείγματος από έναν πληθυσμό, υπάρχει πάντα η πιθανότητα το παρατηρούμενο αποτέλεσμα να προέκυψε καθαρά από σφάλμα δειγματοληψίας. Όταν όμως η τιμή σημαντικότητας είναι μικρότερη του επιπέδου σημαντικότητας, τότε προκύπτει το αποτέλεσμα ότι η παρατηρούμενη επίδραση αντανακλά στην πραγματικότητα τα χαρακτηριστικά του πληθυσμού και όχι μόνο δειγματοληπτικό σφάλμα. Θετικές τιμές της στατιστικής συνάρτησης S υποδηλώνουν την ύπαρξη αύξουσας τάσης ενώ αρνητικές τιμές την ύπαρξη φθίνουσας τάσης. Όσο πιο μεγάλο είναι το πλήθος των παρατηρήσεων n τόσο πιο ακριβής μπορεί να είναι ο έλεγχος.

Για πλήθος δεδομένων $n > 10$ χρησιμοποιείται η παρακάτω στατιστική συνάρτηση:



$$Z = \begin{cases} (S - 1/[VAR(S)]^{1/2}) & \text{εάν } S > 0 \\ 0 & \text{εάν } S = 0 \\ (S + 1/[VAR(S)]^{1/2}) & \text{εάν } S < 0 \end{cases} \quad (4.10)$$

όπου η διακύμανση της S υπολογίζεται από τον παρακάτω τύπο (εξίσωση 4.11):

$$VAR(S) = \frac{1}{18} [N(N-1)(2N+5) - \sum_{i=1}^m t_i(t_i-1)(2t_i+5)] \quad (4.11)$$

Όπου το m είναι ο αριθμός των ομάδων ties (δηλαδή ίσες τιμές στα x δεδομένα) μέσα στο σύνολο τιμών και t_i είναι ο αριθμός των τιμών στο i -οστό γκρουπ των ties.

Οι τιμές που προκύπτουν από την εξίσωση (4.11) συγκρίνονται με την τιμή της τυποποιημένης κανονικής κατανομής Z που αντιστοιχεί σε επίπεδο σημαντικότητας α . Θετικές τιμές της στατιστικής συνάρτησης Z υποδηλώνουν την ύπαρξη αύξουσας τάσης ενώ αρνητικές τιμές την ύπαρξη φθίνουσας τάσης.

4.6 Μέθοδος Sen's Estimate of Slope

Η μέθοδος του Sen (ή απλά Sen's Slope) εφαρμόζεται στις περιπτώσεις δεδομένων που μπορεί να γίνει η υπόθεση της ύπαρξης γραμμικής τάσης και είναι αρκετά εύχρηστη και χρήσιμη σε περιπτώσεις που παρατηρούνται ελλείπουσες τιμές ή ακόμη και κενά στα δεδομένα καθώς δεν επηρεάζεται από ακραίες τιμές αλλά και μεγάλες αποκλίσεις αυτών (Sen 1968). Ουσιαστικά σε μια τέτοια περίπτωση τα δεδομένα θα πρέπει να ακολουθούν την παρακάτω εξίσωση της συνάρτησης f , η οποία σχετίζεται με τον χρόνο:

$$f(t) = Q(t) + B \quad (4.12)$$

Η μεταβλητή Q εκφράζει την κλίση της τάσης και η B είναι η σταθερά της εξίσωσης. Η εκτίμηση της κλίσης της τάσης προκύπτει από τη διάμεσο των N κλίσεων Q_i των ζευγαριών των n παρατηρήσεων των δεδομένων, δηλαδή:

$$Q_i = \frac{(x_j - x_k)}{(j - k)} \quad (4.13)$$

όπου για τα j και k ισχύει $j > k$. Αξίζει να σημειωθεί ότι αν υπάρχουν n τιμές στην χρονοσειρά, τότε αντίστοιχα θα υπολογιστεί ο αριθμός $N = n(n-1)/2$ κλίσεων Q_i . Η εκτιμήτρια της κλίσης της τάσης του Sen ορίζεται ως η διάμεσος των Q_i , που τίθενται σε διάταξη από τη μικρότερη στη μεγαλύτερη:



$$Q = \begin{cases} Q \left(\frac{N+1}{2} \right), & \text{εάν } N \text{ περιττός αριθμός} \\ \frac{[Q \left(\frac{N}{2} \right) + Q \left(\frac{N+2}{2} \right)]}{2}, & \text{εάν } N \text{ άρτιος αριθμός} \end{cases} \quad (4.14)$$

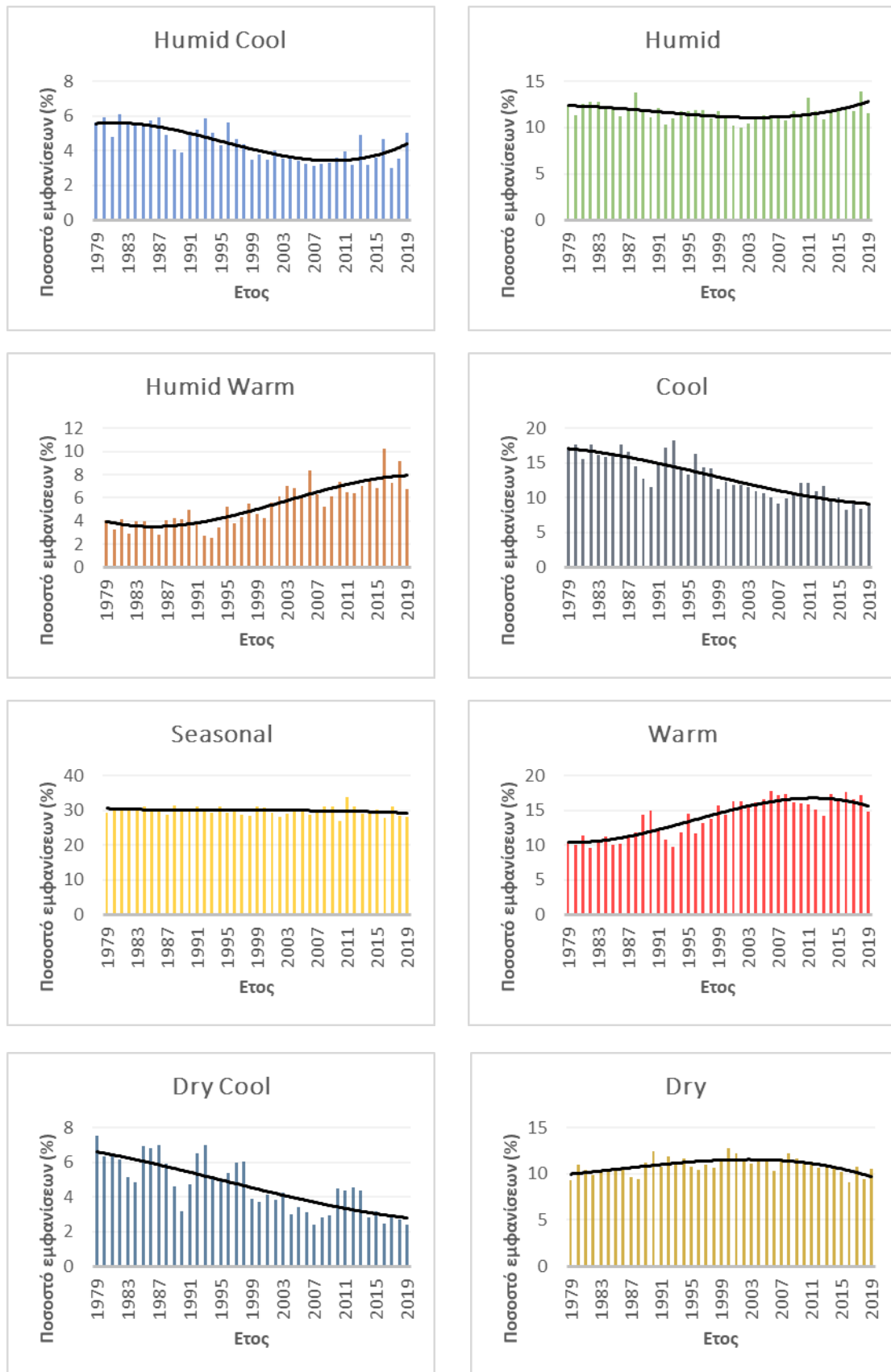
Έτσι λοιπόν, η κλίση υπολογίζεται έπειτα από τη σύγκριση και την αποτίμηση των τιμών Q_m με τις αντίστοιχες τιμές του δίπλευρου ελέγχου για $100(1 - \alpha)\%$ του διαστήματος εμπιστοσύνης.

4.7 Αποτελέσματα και συζήτηση

Οι ποσοστιαίες μεταβολές των τύπων καιρού (από το 1979 έως το 2019) υπολογίστηκαν για κάθε σημείο πλέγματος της περιοχής μελέτης, όπως και ο αριθμός των εμφανίσεων κάθε τύπου καιρού ανά έτος (ημέρες/έτος). Όπως είδαμε, προκειμένου να οργανωθούν χωρικά και να απλοποιηθούν τα αποτελέσματα, ολόκληρος ο τομέας της ευρύτερης Ευρώπης χωρίστηκε σε 18 περιοχές (Σχήμα 4.1) με βάση την ομοιότητα των μέσων μηνιαίων συχνοτήτων. Τα αποτελέσματα συνοψίζονται για κάθε περιοχή ξεχωριστά και συζητούνται παρακάτω.

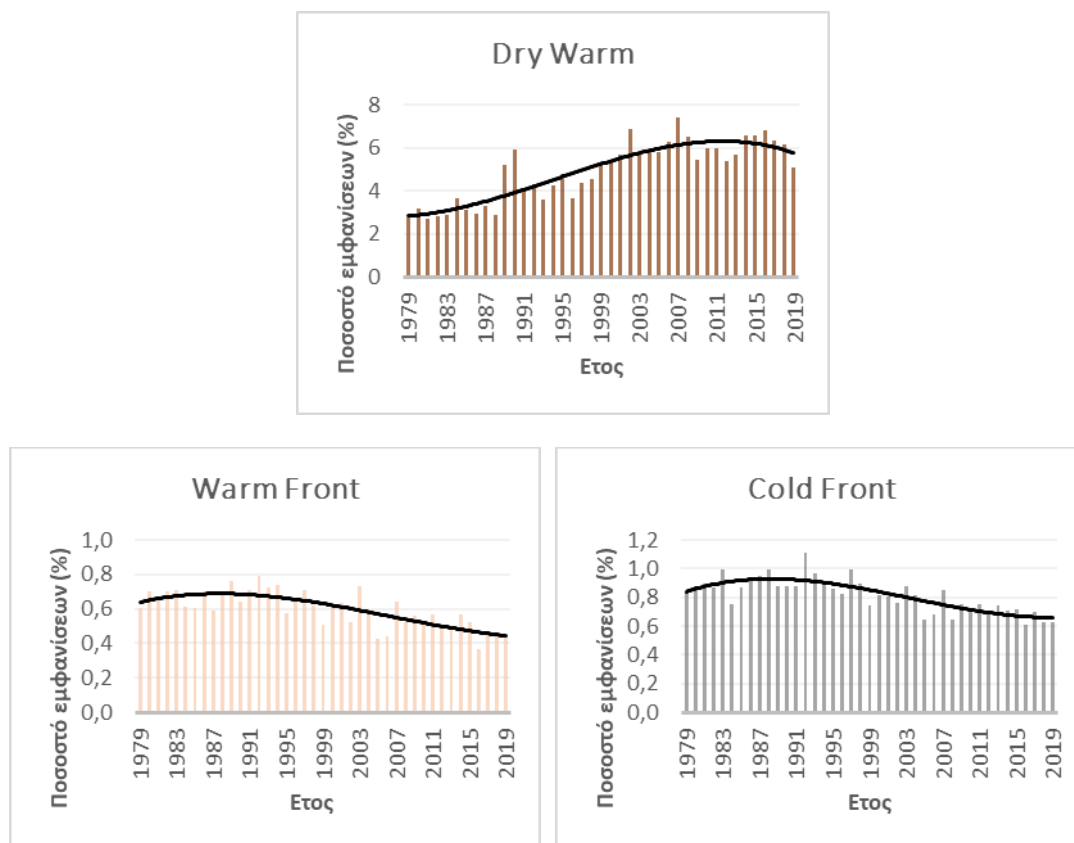
Γενικά, όλοι οι ψυχροί τύποι καιρού [Cool (C), Dry Cool (DC) και Humid Cool (HC)] σημειώνουν μείωση, ενώ όλοι οι θερμοί τύποι [Warm (W), Dry Warm (DW) και Humid Warm (HW)] εμφανίζουν σημαντική αύξηση κατά την περίοδο της μελέτης. Όσον αφορά τη συχνότητα των μετώπων [Cold Front Passage (CFP) και Warm Front Passage (WFP)], υπάρχει μια ελαφρά μείωση κατά μέσο όρο σε ολόκληρο τον τομέα (Σχήμα 4.2). Συγκεκριμένα, όσον αφορά τις μεταβολές στις εμφανίσεις, οι τύποι καιρού C και DC παρουσιάζουν τη σημαντικότερη μείωση (9% και 3,8% αντίστοιχα), ενώ οι τύποι καιρού W και HW παρουσιάζουν τη σημαντικότερη αύξηση (7,4 % και 4,9% αντίστοιχα) κατά μέσο όρο. Αυτές οι τάσεις είναι ισοδύναμες με -33 C ημέρες / έτος (από 1979 έως 2019) και -14 Dry Cool ημέρες / έτος, σε αντίθεση με +27 Warm ημέρες / έτος και +18 Humid Warm ημέρες / έτος, κατά μέσο όρο. Επιπλέον, κατά τη διάρκεια της περιόδου των 41 ετών, οι τύποι καιρού HC, S και H μειώθηκαν κατά 2,7% (-10 ημέρες / έτος), 0,8% (-3 ημέρες / έτος) και 0,5% (-2 ημέρες / έτος) κατά μέσο όρο αντίστοιχα, ενώ οι τύποι καιρού DW και D αυξήθηκαν κατά 3,8% (+14 ημέρες / έτος) και 0,3% (1 ημέρα / έτος) αντίστοιχα (Πίνακας 4.1). Πολλές από τις παρακάτω μεταβολές δεν είναι γραμμικές όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.2.





Σχήμα 4.2. Διαγράμματα των ποσοστών (%) εμφανίσεων κάθε τύπου καιρού, για την περίοδο 1979-2019. Η μαύρη καμπύλη σε κάθε γραφική παράσταση είναι η πολυωνυμική τάση τρίτης σειράς που ταιριάζει με τα υποκείμενα δεδομένα στα ραβδογράμματα





Σχήμα 4.2. (συνέχεια από την προηγούμενη σελίδα)

Όσον αφορά τη χωρική κατανομή, οι πιο αξιοσημείωτες μεταβολές σημειώνονται στις περιοχές 7, 11, 15, 16 και 18, που αντιστοιχούν στα τμήματα της Βόρειας Θάλασσας, της Νορβηγικής Θάλασσας, της Θάλασσας της Γροιλανδίας και της Θάλασσας του Μπάρεντς, κυρίως για τους τύπους καιρού HW, W, DW, DC και C (Σχήμα 4.3). Συγκεκριμένα, στις παραπάνω περιοχές, οι τύποι καιρού HW, W και DW δείχνουν σημαντική αύξηση, με +38, +40, +38, +26 και +27 HW ημέρες / έτος, +28, +42, +36, +38 και +34 W ημέρες / έτος και +15, +20, +22, +29 και 24 DW ημέρες/έτος αντίστοιχα. Στις ίδιες περιοχές, οι τύποι καιρού DC και C εμφανίζουν σημαντική μείωση με -39, -39, -49, -69 (η μεγαλύτερη αλλαγή οποιουδήποτε WT σε οποιαδήποτε περιοχή) και -57 C ημέρες / έτος και -17, -23, -29, -27 και -22 DC ημέρες / έτος αντίστοιχα (Πίνακας 4.1).

Εκτός από αυτές τις περιοχές, ένας άλλος τομέας αξιοσημείωτων αλλαγών, κυρίως στη συχνότητα τύπων καιρού W και C, είναι ο τομέας που περιλαμβάνει τη Νότια, την Κεντρική Ευρώπη (περιοχές 8, 3 και 10) και τη Βόρεια Ευρώπη (περιοχές 5 και 2). Πιο συγκεκριμένα, στη Βόρεια Ευρώπη ο τύπος καιρού W εμφανίζει αύξηση 33 W ημέρες / έτος κατά μέσο όρο, ενώ ο τύπος καιρού C μειώθηκε κατά 31 ημέρες / έτος κατά μέσο



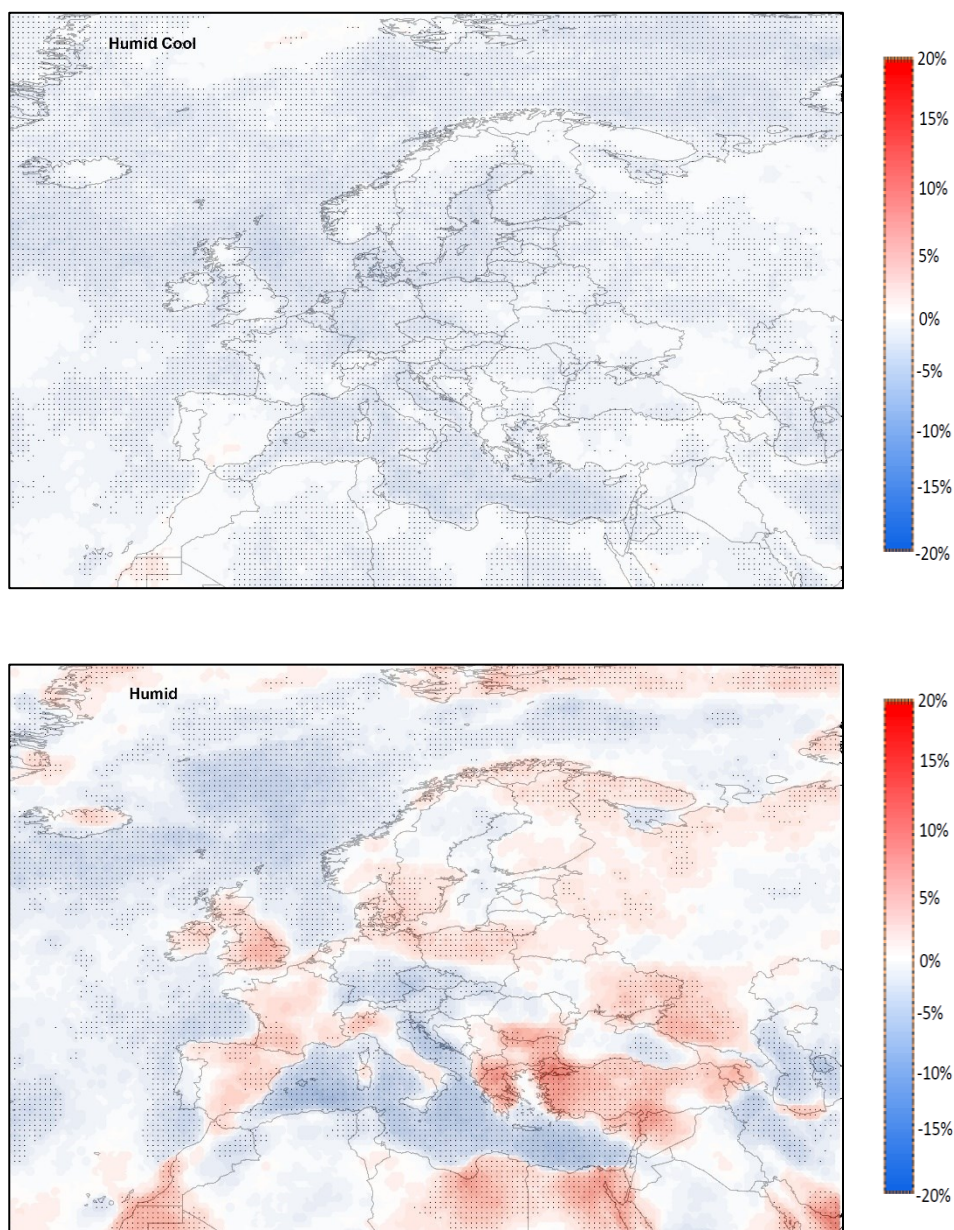
όρο. Επιπλέον, στη Νότια και Κεντρική Ευρώπη ο τύπος καιρού W αυξήθηκε κατά μέσο όρο 30 W ημέρες / έτος, σε αντίθεση με τον τύπο καιρού C που έχει μειωθεί κατά 33 C ημέρες / έτος κατά μέσο όρο. Σε αντίθεση με τις πολικές περιοχές, οι παραπάνω τομείς παρουσιάζουν μικρότερη, αλλά αξιοσημείωτη αύξηση της θερμοκρασίας (2-3°C κατά μέσο όρο) σε συνδυασμό με ακόμη μικρότερες αυξήσεις του σημείου δρόσου. Ωστόσο, αυτές οι περιοχές περιλαμβάνουν τη συντριπτική πλειονότητα των πιο πυκνοκατοικημένων πόλεων της Ευρώπης (Αθήνα, Παρίσι, Λονδίνο κ.λπ.), καθώς και μεγάλες αστικές και βιομηχανικές περιοχές. Επομένως, τάσεις όπως αυτές πιθανότατα παρουσιάζουν αρνητικό αντίκτυπο στην ανθρώπινη υγεία, ειδικά στις πιο ευάλωτες ομάδες πληθυσμού (παιδιά και γηραιός πληθυσμός).

Πίνακας 4.1. Ετήσια μεταβολή στον αριθμό εμφανίσεων (ανά έτος) για κάθε WT σε κάθε περιοχή, από το 1979 έως το 2019. Τα πιο σκούρα κόκκινα/μπλε χρώματα υποδηλώνουν μεγαλύτερες θετικές/αρνητικές μεταβολές

Regions	HC	H	HW	C	S	W	DC	D	DW	CFP	WFP
1	-7	10	11	-24	-10	15	-7	-1	7	-3	0
2	-12	5	12	-24	-13	29	-12	2	10	-1	0
3	-9	0	13	-36	-14	32	-11	8	14	-2	0
4	-8	0	1	-14	-5	15	-11	8	10	-1	0
5	-16	-5	20	-38	-6	37	-16	7	17	0	0
6	-11	-12	15	-24	-2	18	-7	10	12	0	0
7	-6	-6	38	-39	-3	28	-17	-14	15	-1	-2
8	-12	-12	13	-32	-6	33	-11	7	16	0	0
9	-13	-12	25	-27	-7	23	-14	6	14	0	0
10	-12	3	10	-32	-3	24	-7	9	10	-1	0
11	-12	-19	40	-39	-16	42	-23	0	20	-1	-2
12	-6	7	10	-22	7	17	-16	-5	9	0	0
13	-7	1	7	-33	-8	33	-6	-2	9	-2	-1
14	-8	8	8	-26	3	21	-9	-8	7	0	0
15	-14	-10	38	-49	6	36	-29	0	22	0	-2
16	-15	4	27	-69	14	38	-27	-7	29	-1	-2
17	-3	4	6	-17	-2	16	-9	-5	8	0	0
18	-15	-4	27	-57	12	34	-22	1	24	-1	-1
AVG	-10	-2	18	-33	-3	27	-14	1	14	-1	-1

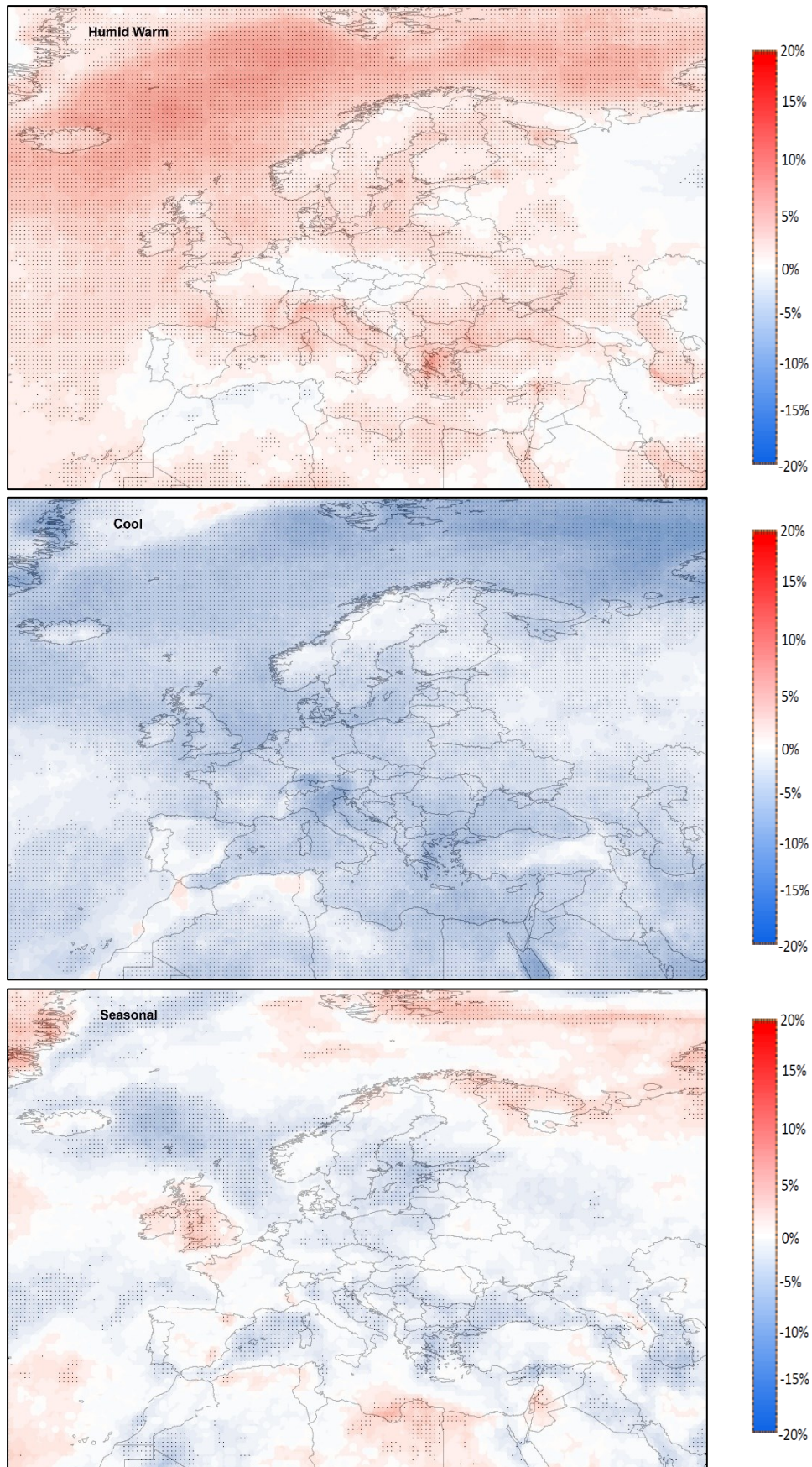


Αντίθετα με τις παραπάνω μεταβολές, οι περιοχές 1, 12 και 14 παρουσιάζουν αυξητική τάση στη συχνότητα των τύπων καιρού H και HW (8 έως 10 ημέρες / έτος κατά μέσο όρο αντίστοιχα), με ταυτόχρονη μειωτική τάση των ξηρότερων τύπου καιρού DC και D (10 έως 5 ημέρες / έτος κατά μέσο όρο αντίστοιχα). Οι παραπάνω τάσεις συνδέονται με μικρές αυξήσεις της θερμοκρασίας (1-2°C κατά μέσο όρο) και του σημείου δρόσου (Σχήμα 4.4). Τα προηγούμενο μοτίβο (αύξηση υγρών - μείωση ξηρών WTs) εμφανίζεται ελαφρώς και στην περιοχή 17, με την αξιοσημείωτη διαφορά ότι η συγκεκριμένη περιοχή παρουσιάζει μικρή μείωση του σημείου δρόσου, με ταυτόχρονη αύξηση της θερμοκρασίας.



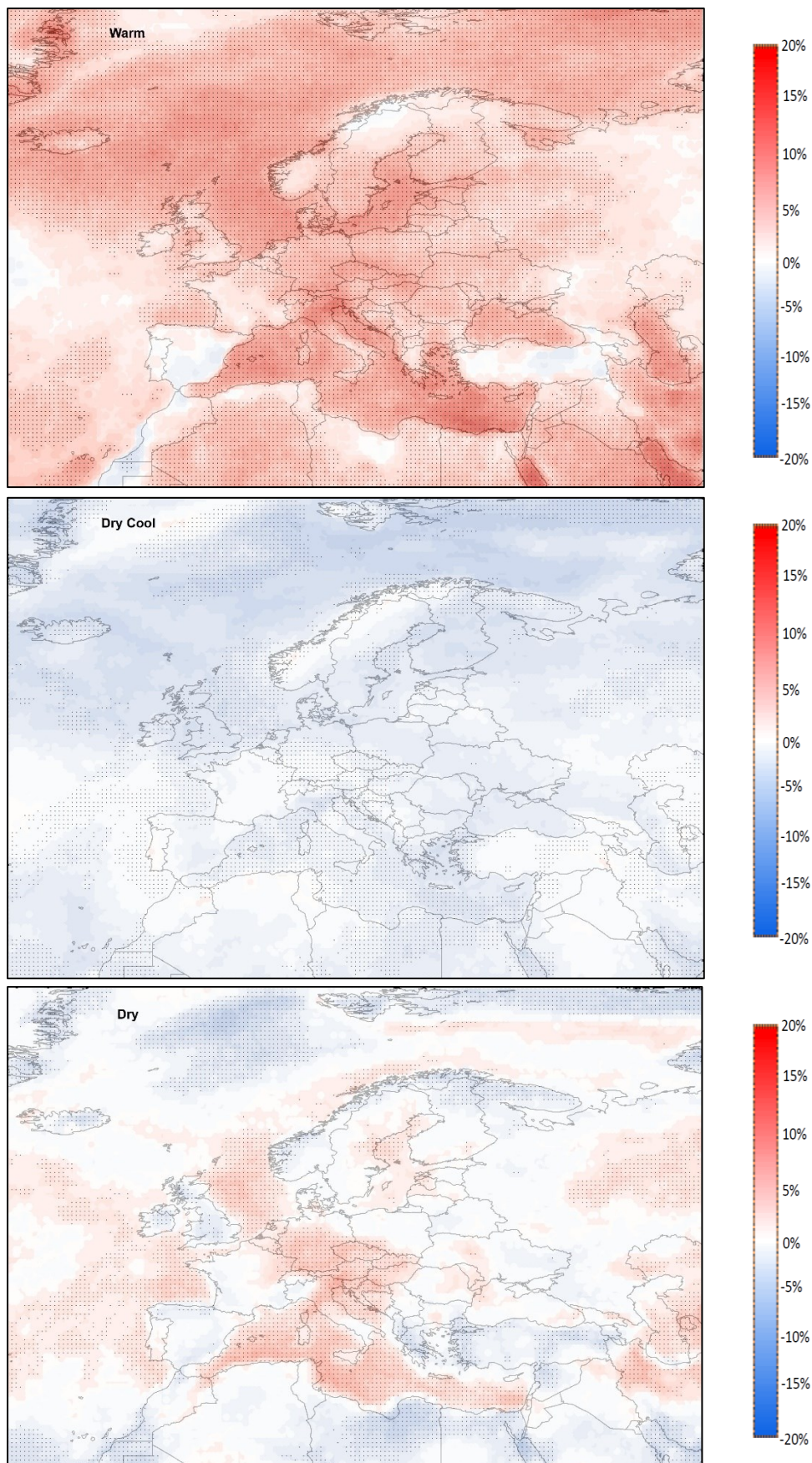
Σχήμα 4.3. Η ποσοστιαία μεταβολή στην ετήσια συχνότητα εμφάνισης κάθε WT κατά την περίοδο 1979-2019. Οι λευκές περιοχές δείχνουν περιοχές σχεδόν μηδενικής αλλαγής. Οι μαύρες κουκκίδες δείχνουν τοποθεσίες στατιστικής σημασίας ($p < 0,05$).





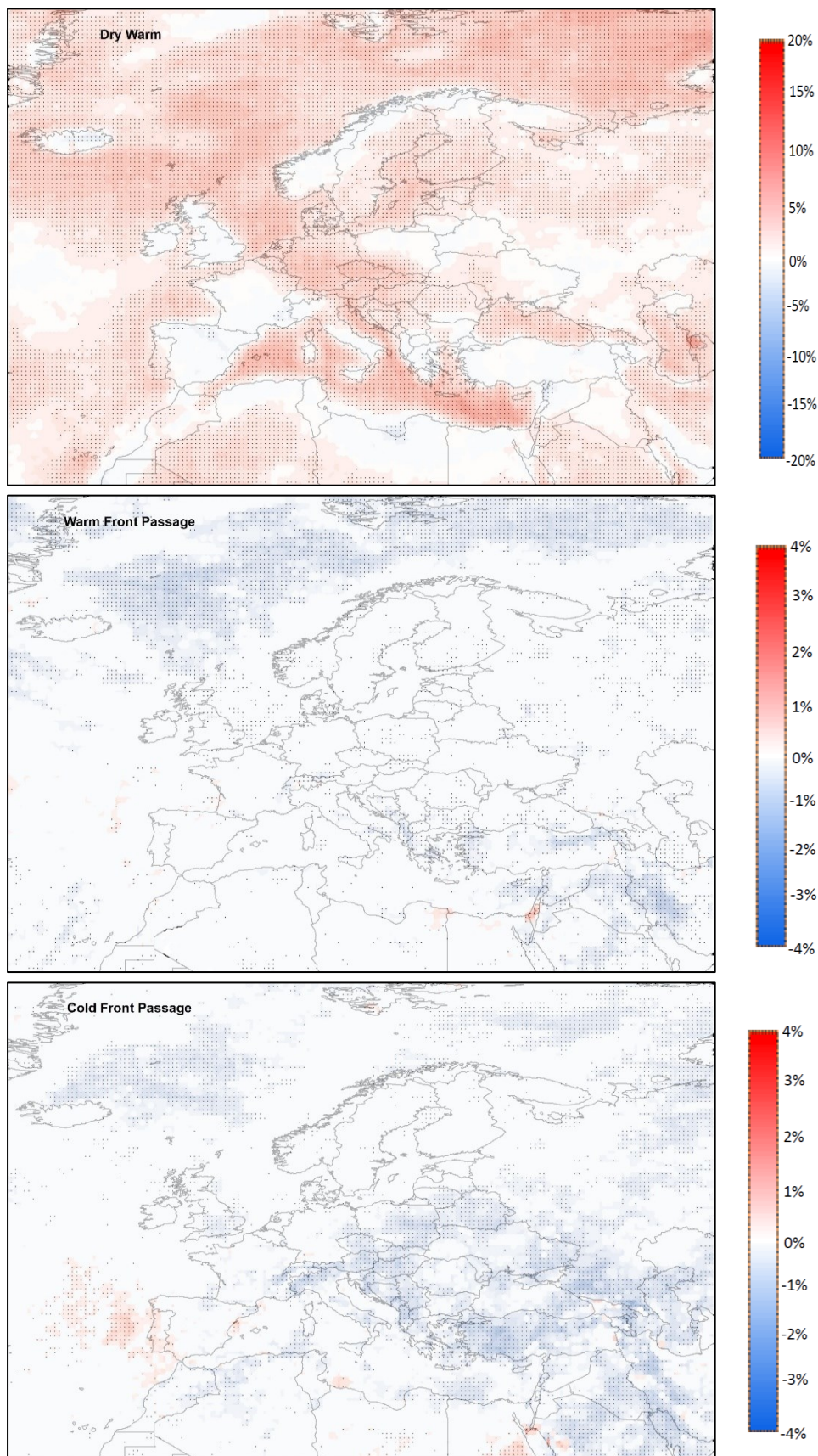
Σχήμα 4.3. (συνέχεια από την προηγούμενη σελίδα)





Σχήμα 4.3. (συνέχεια από την προηγούμενη σελίδα)





Σχήμα 4.3. (συνέχεια από την προηγούμενη σελίδα)



Τα παραπάνω αποτελέσματα ενισχύουν τις ήδη γνωστές παρατηρήσεις σχετικά με το φαινόμενο της Αρκτικής ενίσχυσης (αύξηση της θερμοκρασίας στις πολικές περιοχές η οποία είναι μεγαλύτερη σε σύγκριση με την αύξηση της θερμοκρασίας σε χαμηλότερα γεωγραφικά πλάτη) (Screen 2014). Οι θαλάσσιες πολικές περιοχές (Νορβηγική Θάλασσα, Θάλασσα Μπάρεντς, Γροιλανδική Θάλασσα) παρουσιάζουν αύξηση θερμοκρασίας 3-4 °C κατά μέσο όρο για την περίοδο μελέτης, σε συνδυασμό με μια ταυτόχρονη σχεδόν αύξηση του σημείου δρόσου, καθώς και της θερμοκρασίας της επιφάνειας της θάλασσας (Σχήμα 4.4), οδηγώντας πιθανότατα σε αύξηση της μεταφοράς θερμότητας προς τα κατώτερα επίπεδα της τροπόσφαιρας. Η ροή θερμότητας ανατροφοδοτείται, μειώνοντας το ρυθμό ανάπτυξης θαλάσσιου πάγου και αλλάζοντας την επιφανειακή ανακλαστικότητα (albedo) των περιοχών αυτών. Η διαδικασία αυτή συνεπάγεται αύξηση των διαδικασιών εξάτμισης, καθώς και αυξημένα επίπεδα ατμοσφαιρικής υγρασίας, που πιθανότητα συμβάλλουν στην αύξηση εμφάνισης των W, HW και DW, καθώς και στη μείωση εμφάνισης των D και DC τύπων.

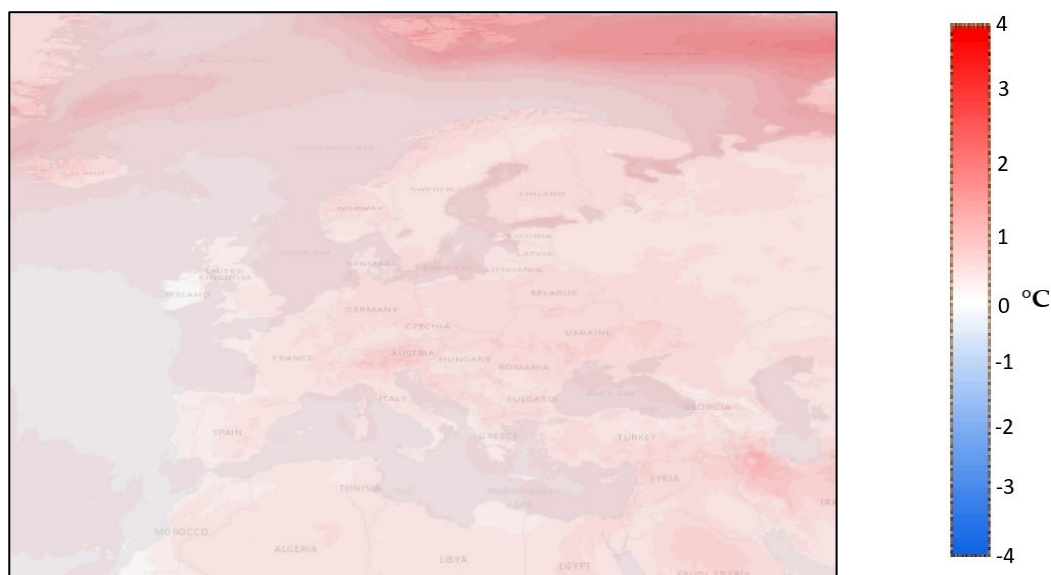
Όπως αναμενόταν, πολλά από τα παραπάνω αποτελέσματα συμφωνούν και σε μεγάλο βαθμό με τις γενικές αλλαγές στη θερμοκρασία ή στο σημείο δρόσου κατά τη διάρκεια της συγκεκριμένης χρονικής περιόδου (π.χ. όπου τα σημεία δρόσου και οι θερμοκρασίες αυξάνονται ταυτόχρονα, παρατηρούμε γενικά αυξήσεις των HW και μειώσεις των DC τύπων καιρού). Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της συσχέτισης με τη χρήση του συντελεστή Pearson, πολλές συσχετίσεις μεταξύ της συχνότητας WT και των δύο μεταβλητών θερμοκρασίας και σημείου δρόσου παρουσιάζουν ικανοποιητική γραμμική συσχέτιση (δειγματικός συντελεστής γραμμικής συσχέτισης του Pearson $r > |0,5|$). Ωστόσο, υπάρχουν συσχετίσεις που παρουσιάζουν ασθενή έως μέτρια γραμμική συσχέτιση ($r < |0,5|$). Για παράδειγμα, οι μεταβολές των τύπων καιρού WFP και CFP παρουσιάζουν ασθενή συσχέτιση με τις θερμοκρασιακές μεταβολές και τις μεταβολές του σημείου δρόσου (Πίνακας 4.2).

Πίνακας 4.2. Χωρικές συσχετίσεις μεταξύ των κλίσεων της θερμοκρασίας (ST), των κλίσεων της θερμοκρασίας του σημείου δρόσου (SD) και των κλίσεων από κάθε WT. Τα πιο σκούρα κόκκινα (μπλε) υποδηλώνουν προοδευτικά πιο θετικές (αρνητικές) αλλαγές.

	HC	H	HW	C	S	W	DC	D	DW	CFP	WFP
ST	- 0.209	0.146	0.514	- 0.592	0.311	0.523	- 0.510	0.217	0.443	- 0.154	- 0.301
SD	0.107	0.326	0.414	- 0.614	0.284	0.329	- 0.559	- 0.307	0.217	- 0.071	- 0.309

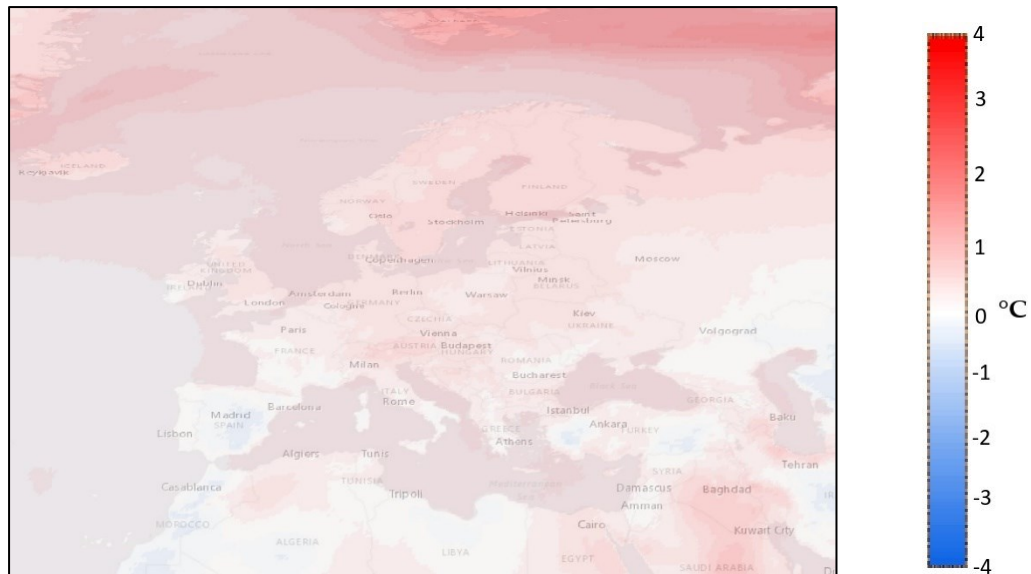


Όσον αφορά τις θερμοκρασίες των θαλάσσιων περιοχών (Σχήμα 4.4a-4.4c), όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, σημαντικές αυξήσεις φαίνονται στις περιοχές της Γροιλανδικής Θάλασσας και της Θάλασσας του Μπάρεντς (3-4°C για την περίοδο 1979-2019). Σύμφωνα με προηγούμενες έρευνες (Rignot et al. 2012), η ταχεία διάδοση θερμών υδάτων στις θαλάσσιες περιοχές γύρω από τη Γροιλανδία αυξάνουν τον ρυθμό τήξης των πάγων, συμβάλλοντας ενδεχομένως στην αύξηση εμφάνισης θερμών τύπων καιρού, καθώς και στην αύξηση της θερμοκρασίας του αέρα και στην αύξηση του σημείου δρόσου. Επιπλέον, σημαντικές μεταβολές (αύξηση 2-3°C για την περίοδο 1979-2019) παρατηρούνται στις θαλάσσιες περιοχές γύρω από την Ισλανδία. Οι κλιματικές συνθήκες στην περιοχή του Βόρειου Ατλαντικού είναι γνωστό ότι αλλάζουν σημαντικά, καθώς η χρονική εξέλιξη των αλλαγών περιγράφεται συνήθως από το δείκτη Atlantic Multidecadal Variability Index (AMV - μια χρονική σειρά ετήσιων μέσων τιμών SST στο Βόρειο Ατλαντικό). Συνθήκες όπως οι παραπάνω ενδεχομένως να έχουν αρνητικό αντίκτυπο στην κυκλοφορία του ρεύματος του Βόρειου Ατλαντικού. Το υποθαλάσσιο αυτό ρεύμα μεταφέρει θερμά ύδατα από τον Ισημερινό ως τα ανοιχτά της Βόρειας Ευρώπης, μέσα από ένα σύστημα ανακύκλωσης των υδάτων. Αυξήσεις στη θερμοκρασία των υδάτων του Βόρειου Ατλαντικού και των Αρκτικών περιοχών συμβάλλουν στην απορρύθμιση των μηχανισμών κυκλοφορίας, με αποτέλεσμα να «φθίνει» η ανακύκλωση των υδάτων, οδηγώντας σε πιθανή παύση της κυκλοφορίας.

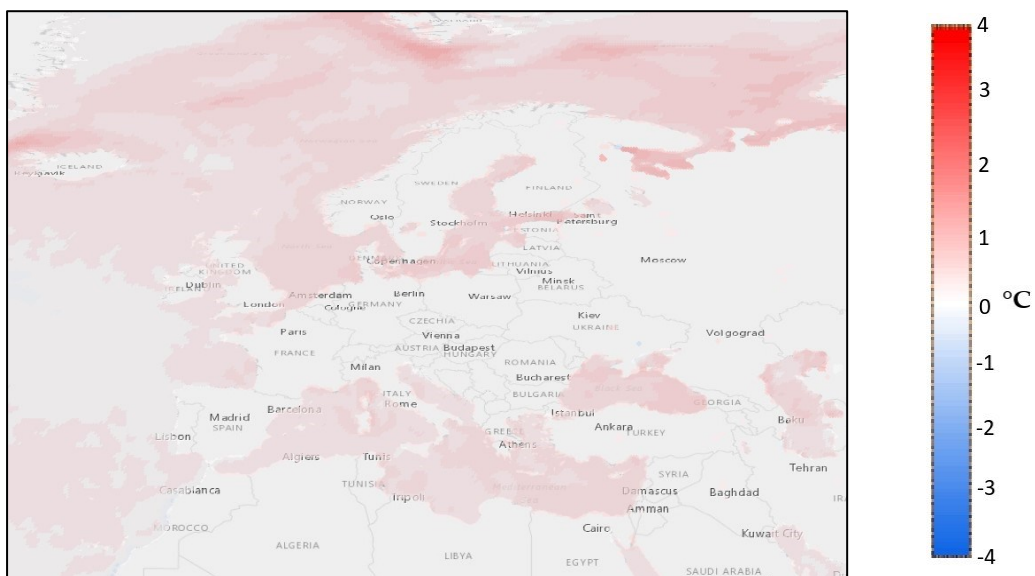


Σχήμα 4.4.a. Μεταβολές της μέσης ετήσιας θερμοκρασίας αέρα, σε °C κατά την περίοδο 1979-2019.





Σχήμα 4.4.b. Μεταβολές του μέσου ετήσιου σημείου δρόσου, σε °C κατά την περίοδο 1979-2019.



Σχήμα 4.4.c. Μεταβολές της μέσης ετήσιας θερμοκρασίας στην επιφάνεια της θάλασσας, σε °C κατά την περίοδο 1979-2019.

Σε συμφωνία με τα παραπάνω αποτελέσματα, οι Lee and Sheridan (2018), μελετώντας την περιοχή της ηπειρωτικής Βόρειας Αμερικής για την περίοδο 1979-2017 με την ταξινόμηση GWTC, ανίχνευσαν σημαντικές αυξήσεις στους θερμούς τύπους καιρού (κυρίως των HW και W στην ευρύτερη περιοχή του Καναδικού Αρκτικού Αρχιπελάγους και του DW στην περιοχή του βόρειου Μεξικού). Επίσης, σημαντικές είναι και οι μειώσεις που ανιχνεύθηκαν στους ψυχρούς τύπου καιρού (D και DC) στις ίδιες περιοχές. Η ταξινόμηση SCC έχει, επίσης, εφαρμοστεί σε αρκετές μελέτες για τη διερεύνηση μεταβολών στη συχνότητα τύπων καιρού, κυρίως στη Βόρεια Αμερική



(Sheridan et al. 2012), με παρόμοια αποτελέσματα όπως τα παραπάνω. Όλες αυτές οι αναλύσεις αποκαλύπτουν ότι ανάλογα με την τοποθεσία και τον κάθε WT, υπάρχει σημαντική μεταβλητότητα στη σχέση μεταξύ της υπερθέρμανσης του περιβάλλοντος και των τάσεων των συγκεκριμένων WTs.

4.8 Συμπεράσματα

Χρησιμοποιώντας την πρόσφατη ταξινόμηση τύπων καιρού GWTC2, η παρούσα μελέτη στοχεύει στη διερεύνηση των αλλαγών στις πολυμεταβλητές ατμοσφαιρικές συνθήκες στην ευρύτερη περιοχή της Ευρώπης από το 1979 έως το 2019. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα, στις περισσότερες περιοχές μελέτης, οι θερμοί WTs δείχνουν σημαντική αύξηση στη συχνότητά τους από το 1979, ιδίως οι W, HW και DW στις πολικές περιοχές και ο W στην κεντρική Ευρώπη. Ταυτόχρονα, οι περισσότεροι ψυχροί WTs παρουσιάζουν σημαντική μείωση στις παραπάνω περιοχές. Σχετικά με τους μεταβατικούς WTs, μικρές μεταβολές παρατηρούνται με αξιοσημείωτες μειώσεις των θερμών μετώπων στις πολικές περιοχές και σε περιοχές της νοτιοανατολικής Ευρώπης, ενώ σημειώνεται αύξηση των ψυχρών μετώπων κυρίως στην περιοχή του Βόρειου Ατλαντικού. Είναι σημαντικό να σημειωθεί εδώ ότι παρόλο που η χρονική περίοδος μελέτης (41 έτη) που εφαρμόστηκε υποδεικνύει σημαντικές τάσεις, το χρονικό διάστημα είναι σχετικά μικρό για την ανάδειξη ενός αδιαμφισβήτητου κλιματικού σήματος.

Τα παραπάνω αποτελέσματα, σε συμφωνία με προηγούμενες έρευνες (Lee and Sheridan 2018, Lee 2017), συμβάλλουν στη συζήτηση της Αρκτικής ενίσχυσης (Francis and Vavrus 2012, Screen 2014) και της υπερθέρμανσης των αστικών Ευρωπαϊκών περιοχών. Υπάρχουν πολλοί γνωστοί και πιθανοί λόγοι για το φαινόμενο της Αρκτικής ενίσχυσης. Η ανακλαστικότητα (albedo feedback) αναφέρεται συνήθως ως κύριος παράγοντας. Η ανακλαστικότητα έχει άμεσες επιδράσεις τόσο στη θερμοκρασία κατά τη διάρκεια των ηλιόλουστων ημερών, όσο και σε εποχιακά φαινόμενα που σχετίζονται με το καλοκαιρινό λιώσιμο του θαλάσσιου πάγου και την αύξηση της θερμότητας στο στρώμα ανάμιξης του ωκεανού καθώς σκοτεινές ανοιχτές περιοχές νερού εκτίθενται όλο και περισσότερο (Serreze and Barry 2011). Οι αλλαγές στη ροή θερμότητας μπορεί επίσης να οδηγήσουν σε αλλαγές στους ατμοσφαιρικούς υδρατμούς και τη νεφοκάλυψη, συμβάλλοντας πιθανώς σε αυξήσεις (ή μειώσεις) των θερμών και υγρών θερμών (ξηρών και ξηρών ψυχρών) WTs στις πολικές περιοχές.



Οι Lee and Sheridan (2018) μελετώντας την περιοχή της Βόρειας Αμερικής για την περίοδο 1979-2017 με την ταξινόμηση GWTC, εντόπισαν παρόμοιες σημαντικές αυξήσεις για τους θερμούς WTs (κυρίως για τους HW και W στο Καναδικό Αρκτικό Αρχιπέλαγος και για τον DW στο βόρειο Μεξικό). Επίσης, σημαντικές ήταν οι μειώσεις που σημειώθηκαν για τους ψυχρούς WTs (κυρίως C και DC) στις ίδιες περιοχές. Η ταξινόμηση SSC έχει επίσης εφαρμοστεί σε αρκετές μελέτες, προκειμένου να διερευνηθούν οι αλλαγές στη συχνότητα των WTs, κυρίως στη Βόρεια Αμερική (Sheridan et al. 2012a), με παρόμοια αποτελέσματα όπως παραπάνω. Σύμφωνα με τις αναλύσεις που παρουσιάστηκαν παραπάνω, υπάρχει κάποια μεταβλητότητα στη σχέση μεταξύ της θέρμανσης του περιβάλλοντος και των ειδικών τάσεων των WTs. Αυτή η μεταβλητότητα εξαρτάται από την τοποθεσία και τον WT.

Η ισχυρή θέρμανση του Αρκτικού Ωκεανού, που σχετίζεται με τη μειωμένη έκταση του θαλάσσιου πάγου του καλοκαιριού (Deser et al. 2010) και τις συνθήκες θαλάσσιου πάγου σαφώς, έχει επιπτώσεις στην ατμοσφαιρική κυκλοφορία στον Βόρειο Ατλαντικό (Higgins and Cassano 2009, Seierstad and Bader 2008). Η μειωμένη δυναμική των πάγων της Αρκτικής Θάλασσας είναι επίσης γνωστό ότι επηρεάζει τον Αρκτικό βιότοπο (θαλάσσιο και χερσαίο), συμπεριλαμβανομένης της μετατροπής οικοτόπων (κατακερματισμό-αλλαγή κάλυψης γης), αλλαγές στη βιοποικιλότητα, τοξικότητα-ρύπανση και υπερεκμετάλλευση-υπερσυλλογή (Macias-Fauria and Post 2018). Για παράδειγμα, τα δάση προβλέπεται να επεκταθούν προς τις βόρειες ζώνες καλυμμένες από τούνδρα (Bhatt et al. 2010). Η αυξημένη ανάπτυξη της βλάστησης καλύπτει το χιόνι στο έδαφος, μειώνοντας ακόμη περισσότερο την επιφανειακή ανακλαστικότητα. Επίσης, περισσότερο διοξείδιο του άνθρακα αναμένεται να απορροφηθεί από την αυξημένη ανάπτυξη των δασών παρά από την υπάρχουσα βλάστηση. Επιπλέον, οι επιπτώσεις των πολικών υδάτινων μαζών πλησιάζουν περισσότερο σε αυτές που είναι τυπικές του μεσαίου γεωγραφικού πλάτους (Lind et al. 2018). Ο όρος "Atlantification" του Αρκτικού Ωκεανού, αναφέρεται ακριβώς σε αυτές τις πρόσφατες αλλαγές των υδάτινων περιοχών του Ατλαντικού στον Αρκτικό Ωκεανό, όπως μειωμένος θαλάσσιος πάγος, ασθενέστερη διαστρωμάτωση και την επέκταση της ροής θερμότερων υδάτων του Ατλαντικού, βαθύτερα στην βορειοανατολική Ευρασιατική Λεκάνη (Timmermans and Marshall 2020). Τέτοιου είδους διεργασίες, θα μπορούσαν ενδεχομένως να μεταβάλλουν τη θέρμανση και μπορούν να συμβάλουν σε αυξήσεις/μειώσεις των συχνοτήτων για κάθε WT, όπως παραπάνω.



Ωστόσο, εφαρμόζοντας την ταξινόμηση GWTC2 σε θαλάσσιες περιοχές, εμφανίστηκαν σημαντικές τάσεις ειδικά στις πολικές περιοχές. Διερευνήθηκαν επίσης οι αλλαγές στη συχνότητα των WTs, καθώς και η συσχέτιση μεταξύ των κλίσεων των WTs της GWTC2 και των κλίσεων των θερμοκρασιών, των κλίσεων των σημείων δρόσου και των κλίσεων στις θερμοκρασίες της επιφάνειας της θάλασσας. Το απόλυτο μέγεθος αυτών των συσχετίσεων ποικίλλει σημαντικά ανά WT και περιοχή, σύμφωνα με τα ευρήματα. Αυτές οι διαφορές μεταξύ των αλλαγών και των συσχετισμών υπογραμμίζουν ότι οι επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής σχετίζονται με την τοποθεσία, την εποχή του έτους και την κλιματική μεταβλητότητα κάθε περιοχής.



5. Ταξινόμηση τοπικών τύπων καιρού για τέσσερις Ευρωπαϊκές πόλεις

Στο Κεφάλαιο 5 παρουσιάζονται αρχικά, η βάση δεδομένων, η μεθοδολογία που χρησιμοποιήθηκε καθώς και τα αποτελέσματα σχετικά με τον προσδιορισμό των επικρατούντων WTs για 4 μεγάλες Ευρωπαϊκές πόλεις (Αθήνα, Βαρκελώνη, Ελσίνκι και Λουξεμβούργο). Για τους επικρατούντες WTs εξετάζονται τα χαρακτηριστικά τους, η συχνότητα εμφάνισης τους (μηνιαία και ετήσια) και εν συνεχεία η συσχέτιση τους με το φαινόμενο UHI, και πιο συγκεκριμένα με την ένταση της UO κατά τη θερινή περίοδο. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται ξεχωριστά για κάθε πόλη.

5.1 Η βάση δεδομένων NCEP/NCAR Reanalysis

Για την ταξινόμηση των WTs για κάθε πόλη, χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα που αποτελούνται από ημερήσιες τιμές πλεγματοειδών σημείων (daily grid point values) των δύο παρακάτω συνόλων μετεωρολογικών παραμέτρων για τη χρονική περίοδο 1950-2020:

1. Το πρώτο σύνολο δεδομένων αποτελείται από το γεωδυναμικό ύψος (γεωδυναμικά μέτρα, gpm) των ισοβαρικών επιφανειών των 500 hPa και 1000 hPa, από τη θερμοκρασία του αέρα ($^{\circ}\text{C}$) και την ειδική υγρασία (g/kg) στην ισοβαρική επιφάνεια των 850 hPa, με χωρική ανάλυση πλέγματος $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$, για την ευρύτερη περιοχή (wider domain) κάθε πόλης.
2. Το δεύτερο σύνολο δεδομένων περιλαμβάνει ημερήσια δεδομένα θερμοκρασίας του αέρα ($^{\circ}\text{C}$) σε ύψος 2 m από την επιφάνεια του εδάφους, ειδικής υγρασίας σε ύψος 2 m από την επιφάνεια του εδάφους (g/kg), ζωνικής και μεσημβρινής συνιστώσας (u και v) της ταχύτητας του ανέμου σε ύψος 10 m από την επιφάνεια του εδάφους (m/s), ολικής νεφοκάλυψης (%) καθώς και του ρυθμού υετού και του ρυθμού ανωμεταφορικού υετού (mm/day), με χωρική ανάλυση πλέγματος $1^{\circ} \times 1^{\circ}$, για την υπό-περιοχή (sub-domain) κάθε πόλης.

Η χρήση και η επιλογή των παραπάνω μετεωρολογικών παραμέτρων βασίστηκε στο γεγονός ότι στο σύνολό τους αντιπροσωπεύουν τα κλιματικά χαρακτηριστικά της εκάστοτε περιοχής και πόλης, η χρήση δε των γεωδυναμικών υψών πραγματοποιήθηκε, λαμβάνοντας υπόψη ότι οι διακυμάνσεις τους καθορίζονται από τα χαρακτηριστικά της ατμοσφαιρικής κυκλοφορίας της ευρύτερης περιοχής για κάθε πόλη.



Και τα δύο σύνολα δεδομένων ελήφθησαν από τη βάση δεδομένων NCEP/NCAR (<https://iridl.ldeo.columbia.edu/SOURCES/.NOAA/.NCEP-CAR/.CDAS-/.DAILY/>), και επρόκειτο για τη μεγαλύτερη βάση δεδομένων αναδρομικής ανάλυσης (Re-analysis data) που χρησιμοποιεί το πλήρες σύνολο των διαθέσιμων παρατηρήσεων, γεγονός που δικαιολογεί και την επιλογή της στην παρούσα διατριβή. Όσον αφορά τη διαδικασία αναδρομικής ανάλυσης των δεδομένων, το Εθνικό Κέντρο Περιβαλλοντικών Προβλέψεων (National Center for Environmental Prediction - NCEP) σε συνεργασία με το Εθνικό Κέντρο Ατμοσφαιρικής Έρευνας (National Center for Atmospheric Research - NCAR) των Ηνωμένων Πολιτειών, στο πλαίσιο του έργου Reanalysis, δημιούργησαν ένα αρχείο δεδομένων με παγκόσμιες αναλύσεις διάφορων ατμοσφαιρικών πεδίων πολλών ετών, με σκοπό την υποστήριξη των ομάδων που δραστηριοποιούνται σε κλιματικές έρευνες και στην παρακολούθηση και αξιολόγηση του κλίματος. Η διαδικασία αυτή περιλαμβάνει την ανάκτηση επίγειων μετεωρολογικών δεδομένων αλλά και δεδομένων από πλοία, ραδιοβολίδες, αεροσκάφη, δορυφόρους κ.ά. Τα εξαγόμενα δεδομένα αποτελούνται από τιμές πλέγματος (gridded variables) όλων των προγνωστικών μεταβλητών και πολλών διαγνωστικών πεδίων, καθώς και μέσους όρους μακροπρόθεσμων προβλέψεων (Kalnay et al. 1996, Kistler et al. 2001).

5.2 Προσδιορισμός τύπων καιρού (WTs)

Για το προσδιορισμό των WTs για κάθε πόλη, η μεθοδολογία βασίστηκε στη συνδυαστική εφαρμογή των στατιστικών μεθόδων PCA και k-means CA. Και οι δύο στατιστικές μέθοδοι περιγράφονται αναλυτικά στο Κεφάλαιο 2.

Αρχικά, η μέθοδος PCA εφαρμόστηκε στον πίνακα που περιλαμβάνει τις ημερήσιες τιμές των μετεωρολογικών παραμέτρων του πρώτου συνόλου (γεωδυναμικό ύψος των ισοβαρικών επιφανειών των 500 hPa και 1000 hPa, θερμοκρασία του αέρα και την ειδική υγρασία (g/kg) στην ισοβαρική επιφάνεια των 850 hPa) και ταυτόχρονα στον πίνακα που περιλαμβάνει τις ημερήσιες τιμές των μετεωρολογικών παραμέτρων του δεύτερου συνόλου (θερμοκρασίας του αέρα σε ύψος 2 m από την επιφάνεια του εδάφους, ειδικής υγρασίας σε ύψος 2 m από την επιφάνεια του εδάφους, της ζωνικής και μεσημβρινής συνιστώσας (u και v) της ταχύτητας του ανέμου σε ύψος 10 m από την επιφάνεια του εδάφους (m/s), ολικής νεφοκάλυψης (%) και του ρυθμού υετού και του ρυθμού ανωμεταφορικού υετού), για την περίοδο 1950-2020 και για κάθε πόλη ξεχωριστά. Οι γραμμές του πίνακα αντιστοιχούν στο χρόνο, δηλαδή σε κάθε ημέρα για



την παραπάνω περίοδο, ενώ οι στήλες του πίνακα αντιστοιχούν στα σημεία πλέγματος. Με την παραπάνω διαδικασία μειώνεται η διαστατικότητα του όγκου των παραμέτρων των δύο συνόλων, ενώ σύμφωνα με το διάγραμμα Scree για κάθε εκτέλεση της PCA (με βάση τον αριθμό των σημείων που αποκλίνουν από τα υπόλοιπα σε ένα διάγραμμα διάταξης των ιδιοτιμών του πίνακα συσχέτισης από τη μεγαλύτερη προς τη μικρότερη) και τη φυσική υπόσταση των αποτελεσμάτων, καθορίζεται ο βέλτιστος αριθμός των PCs (Bartzokas and Metaxas 1993).

Σε δεύτερη φάση, στις χρονοσειρές των scores των PCs εφαρμόζεται η k-means CA, με σκοπό την ομαδοποίηση των ημερών εντός του έτους που παρουσιάζουν ομοιογενή κλιματικά χαρακτηριστικά σύμφωνα με τις τιμές και τις χωρικές κατανομές των παραπάνω μετεωρολογικών παραμέτρων. Στη φάση αυτή, για την επιλογή του βέλτιστου αριθμού των ομάδων (clusters) που θα διατηρηθούν, χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος του άλματος (Sugar and James 2003), η οποία βασίζεται στον υπολογισμό της στρέβλωσης (distortion) των παρατηρήσεων σε κάθε ομάδα. Αξίζει να σημειωθεί στο σημείο αυτό, πως σε συνδυασμό με τη μέθοδο του άλματος λαμβάνεται πάντα υπόψη και η φυσική υπόσταση και ερμηνεία των αποτελεσμάτων. Η μέθοδος του άλματος θα λέγαμε στην περίπτωση μας πως συμβάλλει στην εκτίμηση του βέλτιστου αριθμού των ομάδων, χωρίς να αποτελεί το μοναδικό κριτήριο επιλογής. Τέλος, τα αποτελέσματα τόσο των διαγραμμάτων Scree όσο και των διαγραμμάτων της μεθόδου του άλματος παρουσιάζονται στο Παράρτημα 1, στο τέλος της παρούσας διατριβής.

5.3 Αποτελέσματα

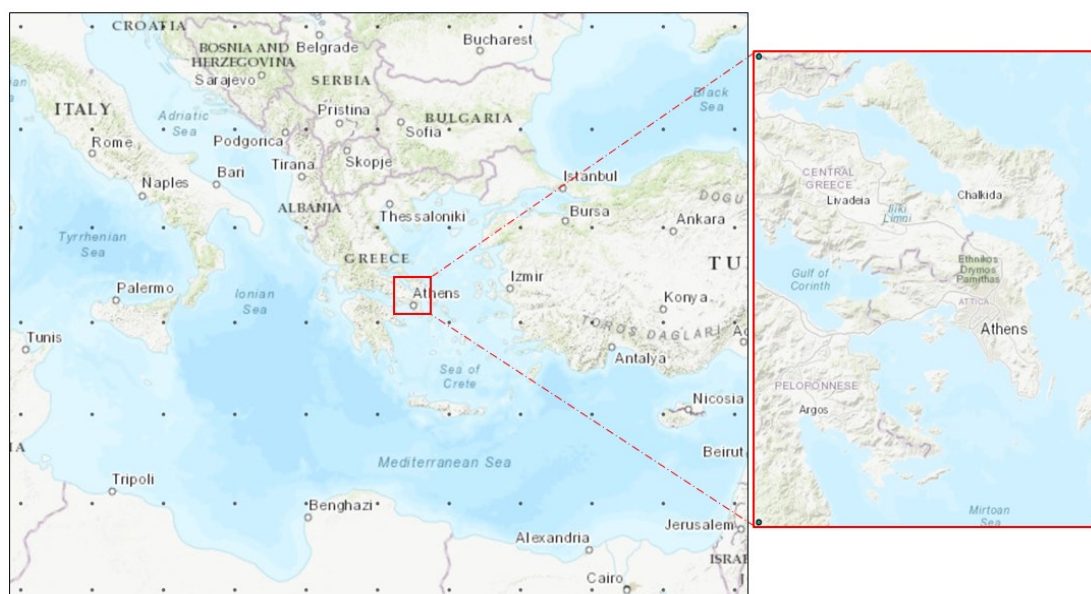
Στις παραγράφους που ακολουθούν παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από τη συνδυαστική εφαρμογή των PCA και k-means CA στις ημερήσιες τιμές των μετεωρολογικών παραμέτρων για κάθε γεωγραφική περιοχή της κάθε πόλης, από το 1950 έως το 2020. Με τον τρόπο προσδιορίζονται οι κυρίαρχοι τοπικοί WTs για κάθε περιοχή, οι οποίοι περιγράφουν τις συνοπτικές συνθήκες που επικρατούν κατά τη διάρκεια του έτους για κάθε πόλη. Επιπλέον, μελετώνται και παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά του κάθε WT, η ενδο-ετήσια διακύμανση στη συχνότητα εμφάνισής του (από το 1950 έως το 2020), καθώς και οι διαχρονικές διακυμάνσεις των συχνοτήτων των WTs οι οποίες εκφράζονται με όρους εμφάνισης ανά έτος κατά τη διάρκεια της χρονικής περιόδου 1990-2020. Να σημειωθεί τέλος, ότι στην περίπτωση των διαχρονικών διακυμάνσεων των συχνοτήτων των WTs, εξετάζεται και η πιθανή



ύπαρξη στατιστικά σημαντικών (95% επίπεδο εμπιστοσύνης) γραμμικών τάσεων με την εφαρμογή του στατιστικού ελέγχου Mann-Kendall (Kendall 1975).

5.3.1 Η περίπτωση της Αθήνας

Στην περίπτωση της Αθήνας, το πρώτο σύνολο δεδομένων (γεωδυναμικό ύψος των ισοβαρικών επιφανειών των 500 hPa και 1000 hPa, θερμοκρασία του αέρα και την ειδική υγρασία στην ισοβαρική επιφάνεια των 850 hPa) αφορά τον κύριο γεωγραφικό τομέα της ευρύτερης περιοχής της Μεσογείου, που εκτείνεται μεταξύ 50°B – 45°B και 10°A – 35°A (Σχήμα 5.1), ενώ το δεύτερο σύνολο δεδομένων (θερμοκρασίας του αέρα σε ύψος 2 m από την επιφάνεια του εδάφους, ειδικής υγρασίας σε ύψος 2 m από την επιφάνεια του εδάφους, της ζωνικής και μεσημβρινής συνιστώσας της ταχύτητας του ανέμου σε ύψος 10 m από την επιφάνεια του εδάφους, της ολικής νεφοκάλυψης, του ρυθμού νετού και του ρυθμού ανωμεταφορικού νετού) επικεντρώνεται στην υπό-περιοχή της Αττικής, η οποία περιλαμβάνει την πόλη της Αθήνας, και εκτείνεται μεταξύ 37°B – 39°B και $22,5^{\circ}\text{A}$ – $24,375^{\circ}\text{A}$ (Σχήμα 5.1).



Σχήμα 5.1. Χάρτες ευρύτερης γεωγραφικής περιοχής (αριστερά) και μικρής γεωγραφικής περιοχής (δεξιά) για την Αθήνα.

Η γεωγραφική περιοχή της Αττικής στην Ελλάδα παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον, καλύπτοντας ολόκληρη τη Μητροπολιτική περιοχή της Αθήνας, την πρωτεύουσα και μεγαλύτερη πόλη της χώρας. Το λεκανοπέδιο της Αθήνας και του Πειραιά είναι μια ιδιαίτερος πυκνό-κατοικημένη περιοχή που στερείται χώρων πρασίνου και καλύπτει περίπου 3.808 km^2 . Ο μόνιμος πληθυσμός αυξήθηκε σε 3,8 εκατομμύρια κατοίκους το 2011 με πυκνότητα $1.250 \text{ κατοίκους/km}^2$, ενώ πάνω από το 95% είναι κάτοικοι της



μητροπολιτικής περιοχής της Αθήνας (Ελληνική Στατιστική Αρχή, <https://www.statistics.gr/statistics/pop>). Η Αθήνα συγκεντρώνει πάνω από το 1/3 του πληθυσμού της Ελλάδας καθώς και την πλειοψηφία των οικονομικών, πολιτικών και πολιτιστικών δραστηριοτήτων της χώρας. Επιπλέον, η περιοχή της Αττικής είναι μια τριγωνική χερσόνησος που προεξέχει στο Αιγαίο Πέλαγος και βρέχεται από κόλπους του Αιγαίου Πελάγους. Στο κέντρο της χερσονήσου, υπάρχει μια μεγάλη λεκάνη όπου έχει κατασκευαστεί όλο το πολεοδομικό συγκρότημα της Αθήνας και του Πειραιά. Η λεκάνη αυτή περιβάλλεται από τέσσερα βουνά: τον Υμηττό, την Πάρνηθα (το ψηλότερο βουνό της Αττικής), το Αιγάλεω και την Πεντέλη, που αποτελούν τους φυσικούς «φρουρούς» της και περιλαμβάνουν μερικούς από τους εναπομείναντες χώρους πρασίνου. Σύμφωνα με την Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία (EMY), η Αττική είναι μια από τις θερμότερες περιοχές της Ελλάδας όπου οι μέσες μηνιαίες θερμοκρασίες και τα ύψη βροχής κυμαίνονται από 8,8 °C έως 28,3 °C και από 1,6 mm έως 12,5 mm, αντίστοιχα (<http://www.emy.gr/emv/en/climatology/climatology>).

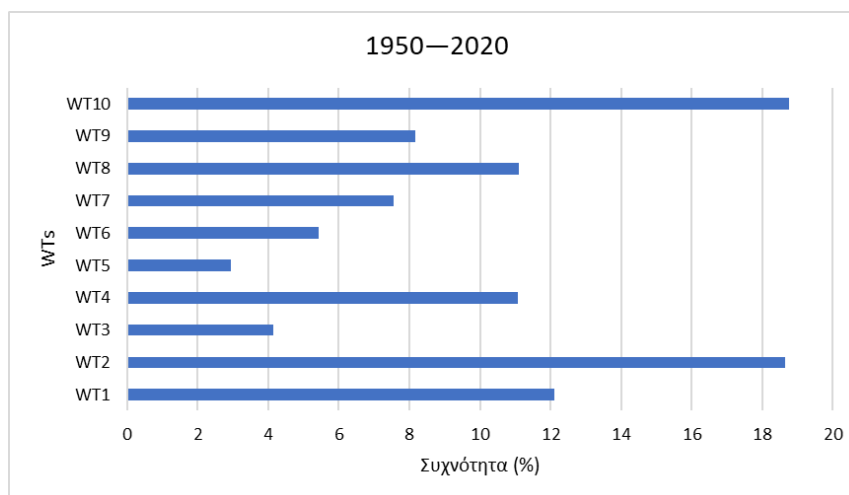
Η εφαρμογή της PCA στα δύο σύνολα δεδομένων του ευρύτερου τομέα της Μεσογείου και της υπό-περιοχή της Αττικής και για ολόκληρη τη χρονική περίοδο των 70 ετών (1950-2020), είχε ως αποτέλεσμα τη διατήρηση 5 PCs σε κάθε περίπτωση, που αντιπροσωπεύουν το 88,1% και το 77,3% της συνολικής διακύμανσης, αντίστοιχα. Ο αριθμός των PCs βασίστηκε στα αποτελέσματα των διαγραμμάτων Scree (Σχήμα Π5.2), όπως έχει ήδη αναφερθεί παραπάνω. Η εφαρμογή της μεθόδου k-means CA στις χρονοσειρές των 10 επικρατούντων PCs μαζί, οδηγεί σε 10 διακριτές και ομοιογενείς ομάδες (clusters) σύμφωνα και με τη μέθοδο άλματος (Σχήμα Π5.3), λαμβάνοντας υπόψη ότι κάθε μια από τις 10 ομάδες, ορίζουν ένα συγκεκριμένο WT, που χαρακτηρίζεται από χαρακτηριστικές καιρικές και συνοπτικές συνθήκες. Στον Πίνακα 5.1 παρουσιάζονται οι μέσες τιμές των μετεωρολογικών μεταβλητών για κάθε έναν από τους 10 WTs. Η συχνότητα των WTs διερευνήθηκε επίσης για την ευρύτερη περιοχή της Αθήνας από το 1950 έως το 2020 (Σχήμα 5.4).

Αρχικά, σύμφωνα με τα αποτελέσματα (Σχήμα 5.4), οι πιο συχνοί WT σε όλες τις εποχές για την ευρύτερη περιοχή της Αθήνας είναι οι WT2 και WT10 (κατά μέσο όρο περίπου 19% του χρόνου), ακολουθούμενοι από τους WT1 (12%), WT8 (11%), WT4 (11%), WT9 (8%), WT7 (7,2%), WT6 (5,3%), WT3 (4,1%) και WT5 (3%).



Πίνακας 5.1. Οι μέσες τιμές των μετεωρολογικών μεταβλητών για κάθε έναν από τους 10 WTs, για την περίπτωση της Αθήνας.

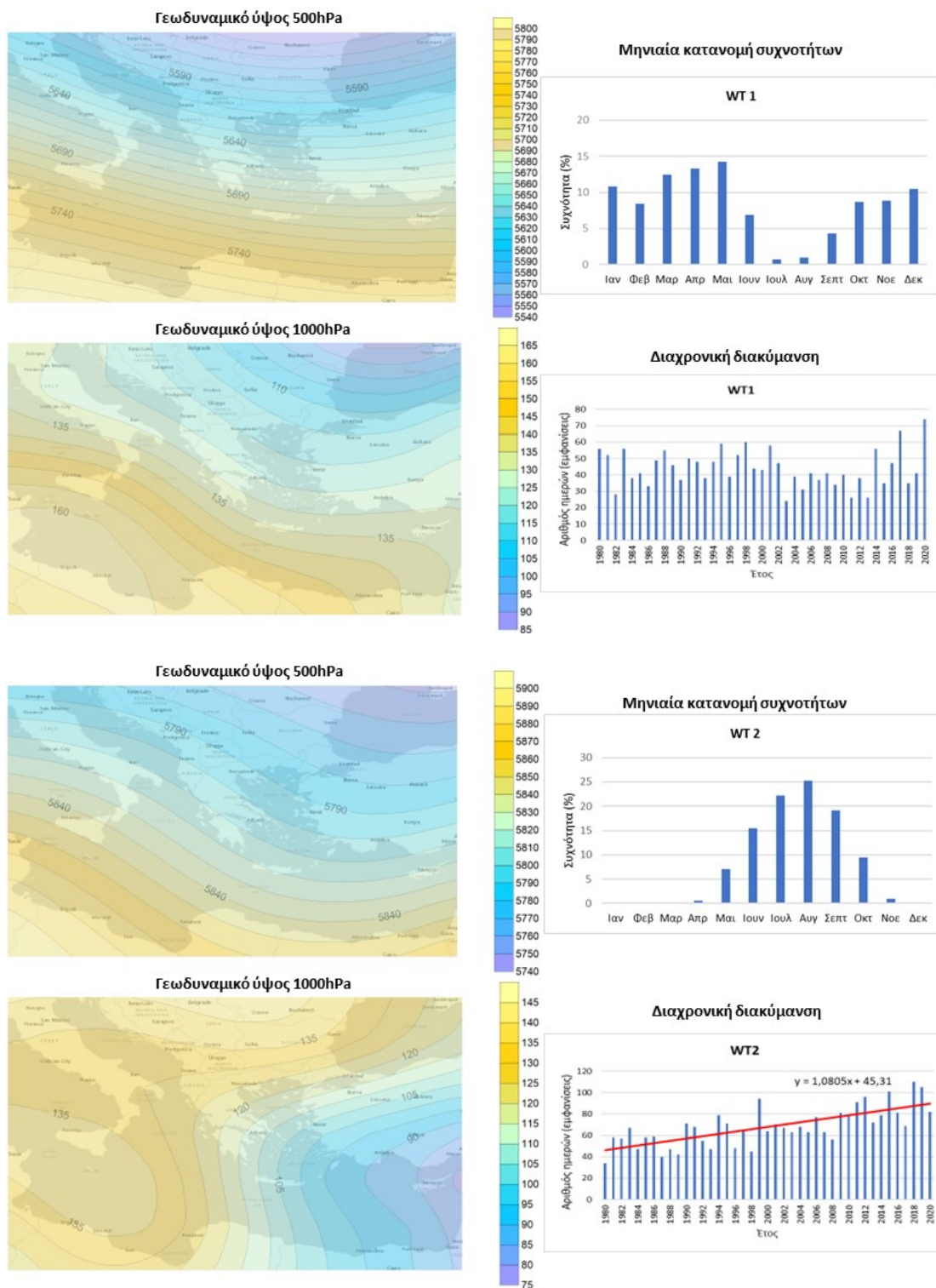
WTs	Ειδική υγρασία (g/kg)	Θερμοκρασία (°C)	Ζωνική συνιστώσα ανέμου (m/sec)	Μεσημβρινή συνιστώσα ανέμου (m/sec)	Ολική νεφοκάλυψη (%)	Διεύθυνση ανέμου
WT1	8,3	15,0	3,3	-0,2	32,9	Δ
WT2	11,9	23,8	-0,4	-2,3	20,4	B
WT3	7,5	10,8	-1,9	-5,2	58,1	BBA
WT4	6,6	11,1	-1,3	-2,3	24,9	BBA
WT5	10,6	15,9	-0,2	3,2	69,0	N
WT6	8,2	12,7	3,4	2,9	51,1	NΔ
WT7	7,8	12,7	-4,1	-1,5	56,0	ABA
WT8	9,3	16,4	0,0	3,1	54,4	N
WT9	5,8	8,9	-0,7	-4,1	24,9	B
WT10	11,3	23,9	0,3	-1,6	16,4	B



Σχήμα 5.4. Η επί τοις (%) συχνότητα εμφάνισης των WTs στην ολική χρονοσειρά 1950-2020, για την περίπτωση της Αθήνας.

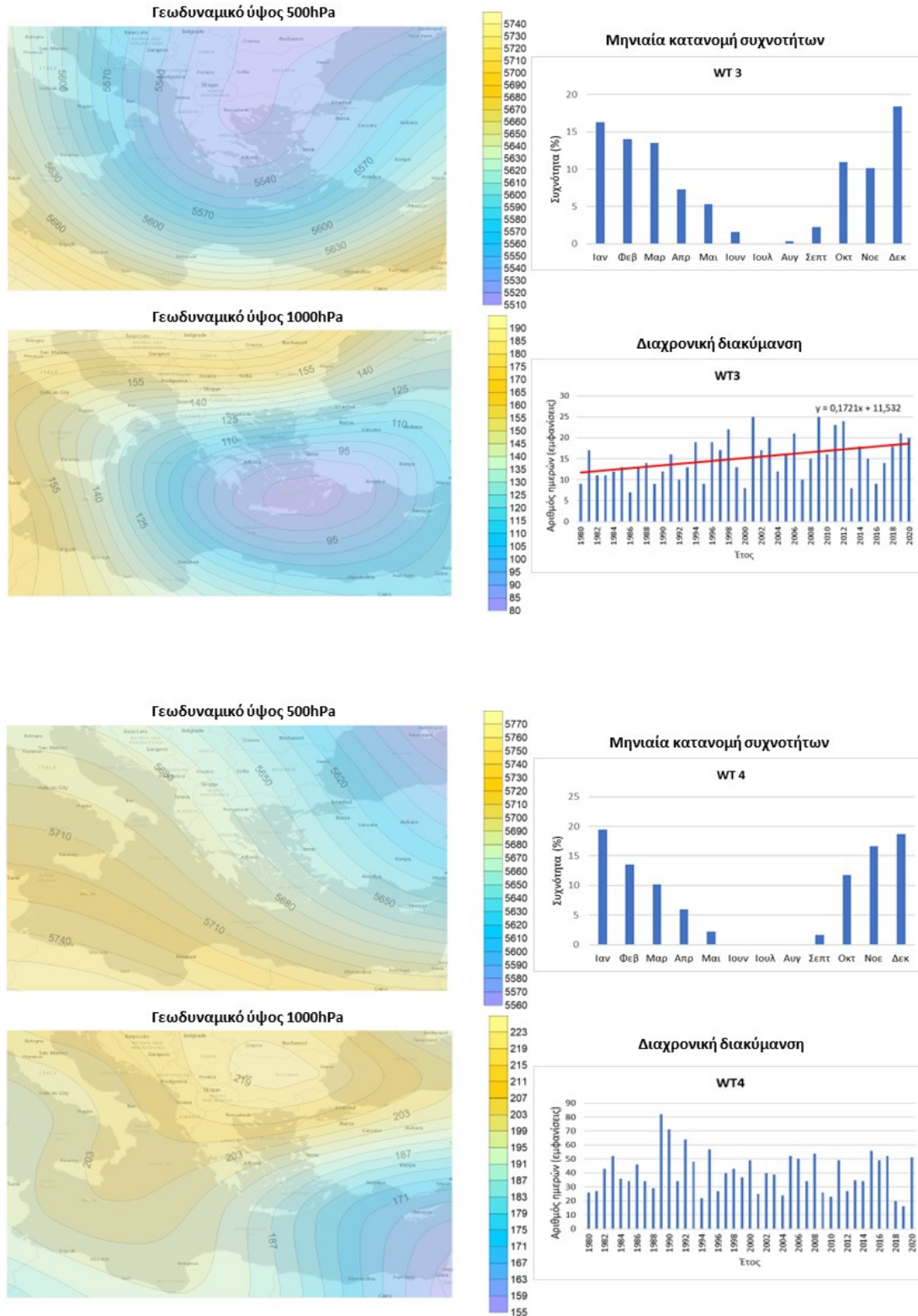
Οι μέσοι χάρτες των γεωδυναμικών υψών των ισοβαρικών επιφανειών 500hPa και 1000hPa για κάθε WT καθώς και οι διαχρονικές διακυμάνσεις των συχνοτήτων των WTs, παρουσιάζονται στο παρακάτω Σχήμα (Σχήμα 5.5).





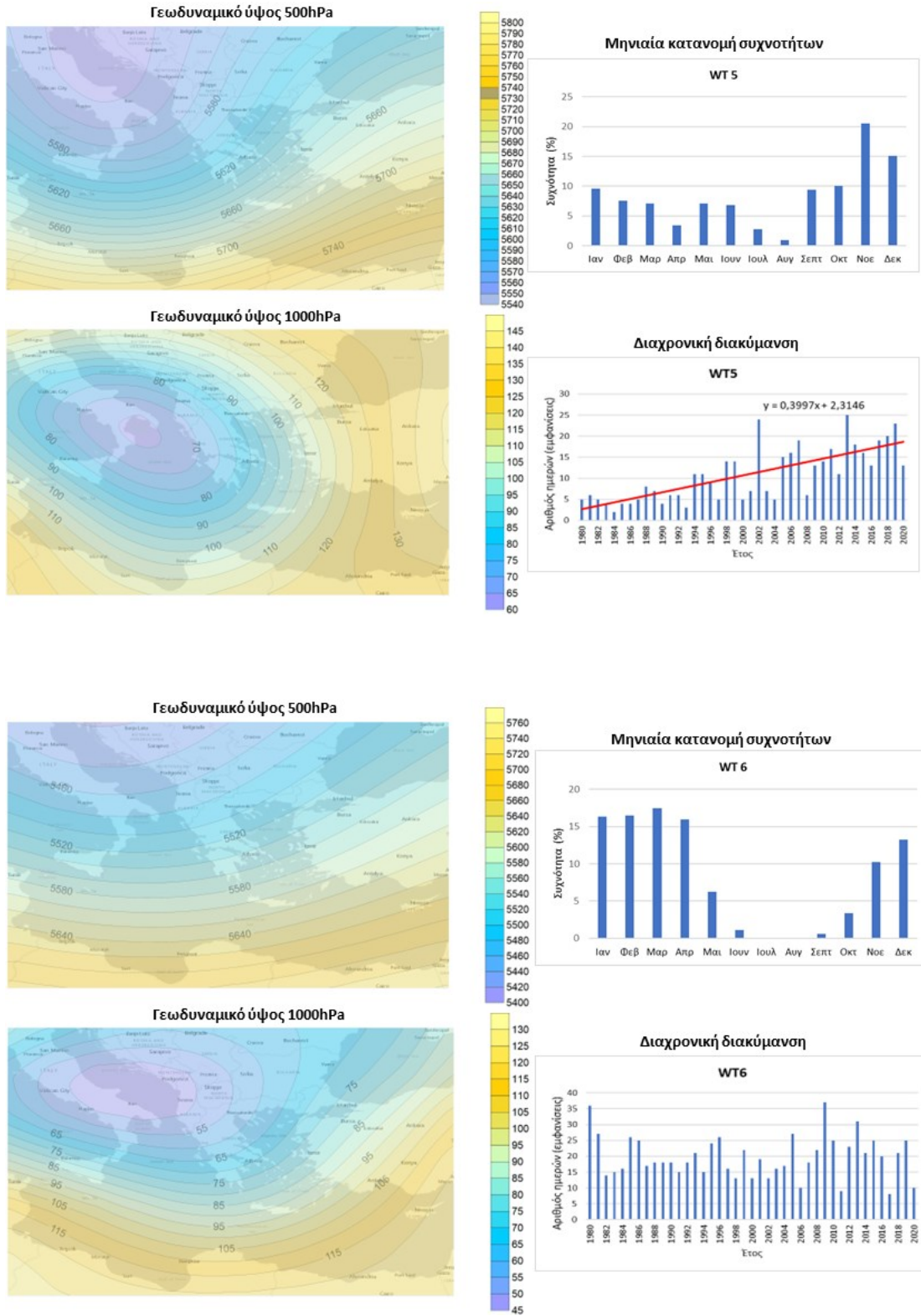
Σχήμα 5.5. Χάρτες των μέσων χωρικών κατανομών του γεωδυναμικού ύψους (gpm) των 500hPa και 1000hPa και οι μηνιαίες (1950-2020) και διαχρονικές διακυμάνσεις (1990-2020) της συχνότητας εμφάνισης (με κόκκινη γραμμή εμφανίζεται η στατιστικά γραμμική τάση).





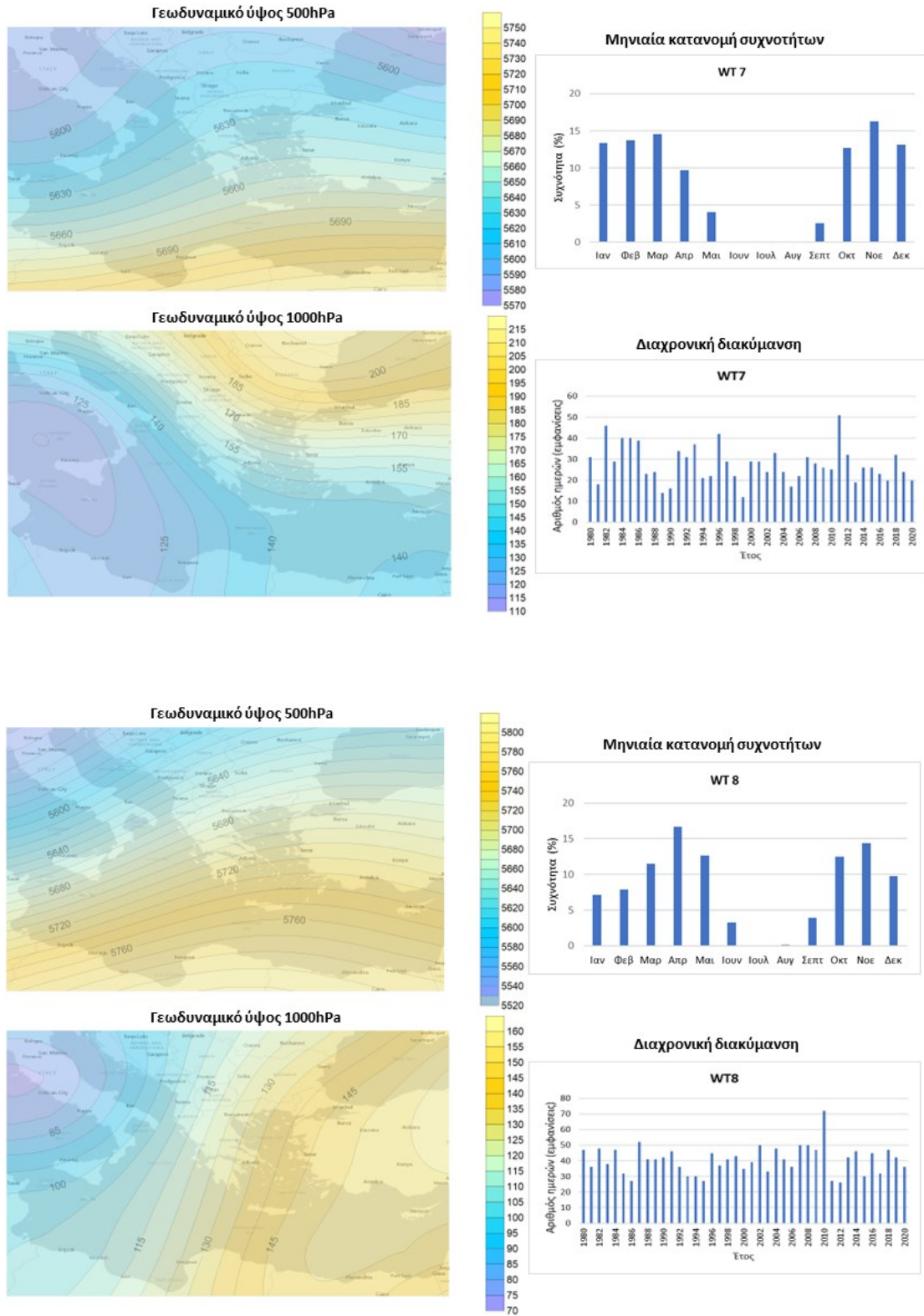
Σχήμα 5.5. (συνέχεια από την προηγούμενη σελίδα)





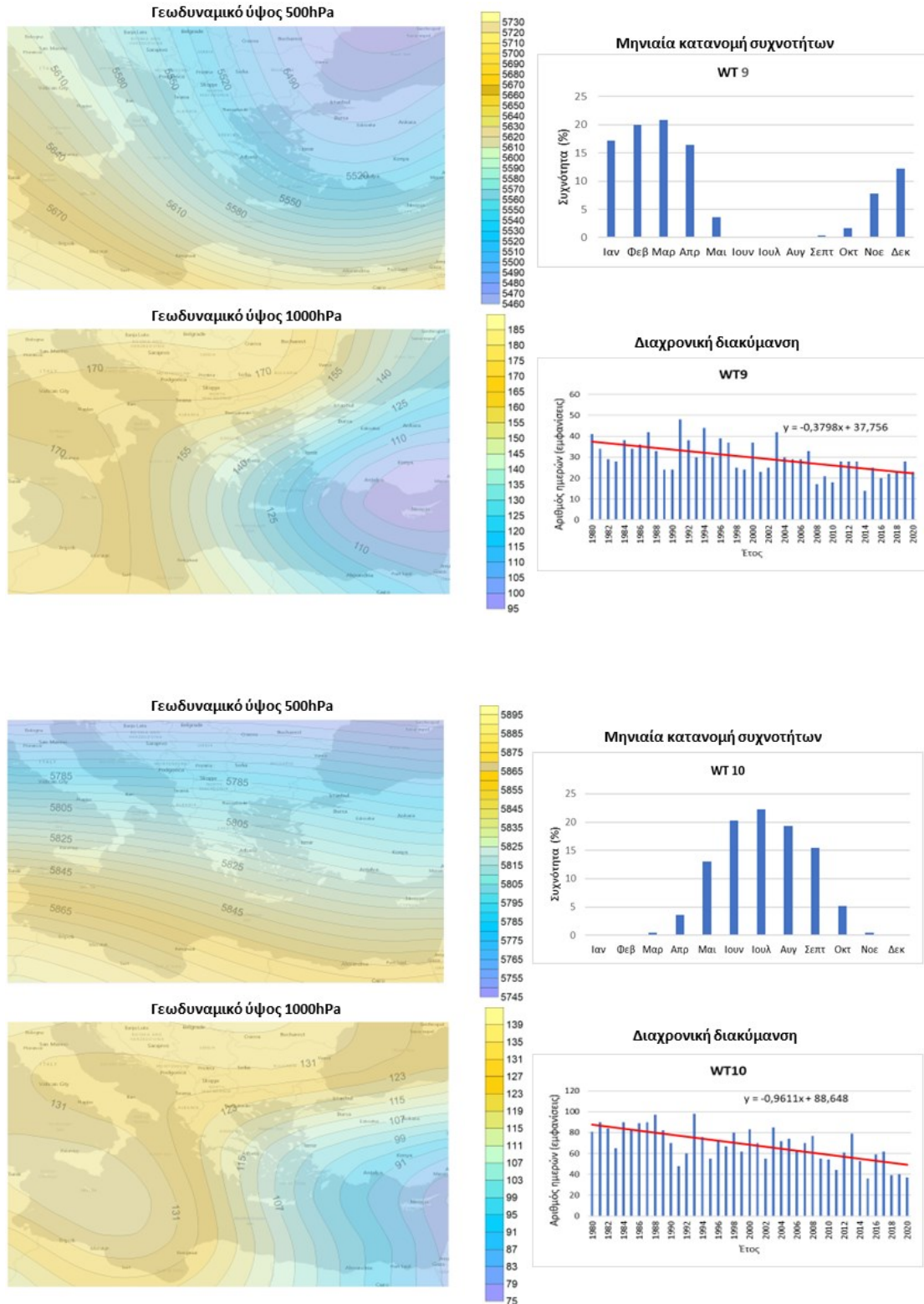
Σχήμα 5.5. (συνέχεια από την προηγούμενη σελίδα).





Σχήμα 5.5. (συνέχεια από την προηγούμενη σελίδα).





Σχήμα 5.5. (συνέχεια από την προηγούμενη σελίδα).

Σύμφωνα με τα παραπάνω αποτελέσματα, οι τύποι καιρού WT2 και WT10 είναι οι τυπικοί WTs θερμής περιόδου, λόγω του γεγονότος ότι επικρατούν κυρίως μεταξύ Μαΐου και Σεπτεμβρίου, με μέγιστο συχνότητας εμφάνισης τον Αύγουστο και τον Ιούλιο αντίστοιχα (Σχήμα 5.5). Ο WT2 παρουσιάζει μια θετική στατιστικά σημαντική



γραμμική τάση (95% επίπεδο εμπιστοσύνης) στη διαχρονική διακύμανση της συχνότητας του στις δεκαετίες μεταξύ 1990-2020, ενώ για τον WT10 εντοπίζεται μια αρνητική στατιστικά σημαντική γραμμική τάση στην παραπάνω περίοδο. Και οι δύο WTs, χαρακτηρίζονται από αντικυκλωνικές συνθήκες στην κεντρική Μεσόγειο (νότια της Ιταλίας) σε συνδυασμό με ένα χαμηλό βαρομετρικό ανατολικά της Μεσογείου και νοτιοδυτικά της Ασίας. Οι χαρακτηριστικές αυτές καλοκαιρινές κυκλοφορίες είναι επίσης υπεύθυνες για το σχηματισμό μέτριων έως ισχυρών βόρειων-βορειανατολικών ανέμων (ετησίες άνεμοι) στην περιοχή του Αιγαίου (Anagnostopoulou et al. 2014, Paschalidou and Kassomenos 2016). Πιο συγκεκριμένα, ο WT10 παρουσιάζει τη μέγιστη συχνότητά του τον Ιούλιο και σχετίζεται με υψηλές θερμοκρασίες, μερικώς νεφελώδεις συνθήκες και περιορισμένη βροχόπτωση, καθώς και με ανέμους μέτριας έντασης κυρίως βόρειων διευθύνσεων. Σύμφωνα με τους Kassomenos and Katsoulis (2006), τέτοια ατμοσφαιρική συνθήκη ευνοεί το σχηματισμό τοπικών κυκλοφοριών όπως οι θαλάσσιες αύρες, οι οποίες μεταφέρουν υγρές αέριες μάζες από τη θάλασσα. Όσον αφορά το δεύτερο WT θερμής περιόδου (WT2), το μέγιστο της συχνότητας του εμφανίζεται τον Αύγουστο, όπου η εμφάνιση των ετησίων ανέμων είναι πιο συχνή (Tyrlis and Lelieveld 2013) και συνδέεται με ισχυρότερες βόρειες ροές. Ο WT2 επιπλέον σχετίζεται με υψηλές θερμοκρασίες, περιορισμένη νεφοκάλυψη και χαμηλές τιμές βροχόπτωσης, γεγονός που επιβεβαιώνει το χαρακτηρισμό του ως ξηρού WT (Lolis και Kotsias 2020).

Οι WT3, WT4 και WT9 είναι WTs ψυχρής περιόδου, παρουσιάζοντας υψηλές συχνότητες εμφάνισης μεταξύ Οκτωβρίου και Μαΐου. Για τον WT3 βρέθηκε μια θετική στατιστικά σημαντική γραμμική τάση στη διαχρονική διακύμανση της συχνότητας του από το 1990-2020, ενώ για τον WT9 μια αρνητική στατιστικά σημαντική γραμμική τάση. Για τον WT4 υπολογίστηκε μια αρνητική γραμμική τάση αλλά όχι στατιστικά σημαντική. Και οι τρεις WTs χαρακτηρίζονται από συστήματα χαμηλής πίεσης σε όλη τη νοτιοανατολική Μεσόγειο, με κέντρο το νοτιοανατολικό Αιγαίο, και την Κύπρο (Σχήμα 5.5). Κατά τη διάρκεια του χειμώνα, τέτοια μοτίβα ατμοσφαιρικής κυκλοφορίας ευθύνονται για τη μεταφορά ψυχρών αέριων μαζών από βορειότερα γεωγραφικά πλάτη, προκαλώντας έτσι χαμηλές θερμοκρασίες στις ηπειρωτικές περιοχές, έντονη νεφοκάλυψη (Πίνακας 5.1) και βροχοπτώσεις κυρίως στην περιοχή της ανατολικής Μεσογείου (Houssos et al. 2008, Michailidou et al. 2009).



Οι WT5, WT6 και WT7 είναι επίσης WTs της ψυχρής περιόδου, που επικρατούν από τον Οκτώβριο έως το Μάιο, με μέγιστο εμφάνιση κυρίως το Νοέμβριο. Για τον WT5 βρέθηκε μια θετική στατιστικά σημαντική γραμμική τάση στη διαχρονική διακύμανση της συχνότητας του, ενώ για άλλους δύο WTs υπολογίστηκαν γραμμικές τάσεις αλλά όχι στατιστικά σημαντικές. Χαρακτηρίζονται από ένα ισχυρό σύστημα χαμηλής πίεσης πάνω από τη νότια Ιταλία σε συνδυασμό με την παρουσία αντικυκλωνικών συνθηκών στα βορειοανατολικά Βαλκάνια (Σχήμα 5.5). Σχετίζονται κυρίως με N-ΝΔ αλλά και Α-ΒΑ ροές, χαμηλές θερμοκρασίες, ενώ τέτοιες συνθήκες ευνοούν την ανάπτυξη εκτεταμένων νεφώσεων και υψηλών ποσών υετού (Maheras and Anagnostopoulou 2003) ειδικά στο δυτικό τμήμα της Ελλάδας (Lolis 2012).

Ο τύπος καιρού WT8, χαρακτηρίζεται από ένα ισχυρό σύστημα χαμηλής πίεσης δυτικά της Ιταλίας, προκαλώντας τη νότια ροή θερμών και ξηρών αερίων μαζών από τη Σαχάρα στην ανατολική Μεσόγειο. Για τον WT8 υπολογίστηκε μια θετική γραμμική τάση αλλά όχι στατιστικά σημαντική. Ο WT8, επικρατεί κυρίως την ψυχρή περίοδο αλλά και στις αρχές της θερμής περιόδου με μεγαλύτερη συχνότητα τον Απρίλιο, συνδέοντας την παρουσία του, με μέτριες θερμοκρασίες, αυξημένες νεφώσεις και υψηλά ποσά υετού.

Ο WT1 θα μπορούσε επίσης να θεωρηθεί ως WT της ψυχρής περιόδου, μιας και επικρατεί κυρίως από το Νοέμβριο έως το Μάιο, ενώ βρέθηκε μια αρνητική γραμμική τάση αλλά όχι στατιστικά σημαντική. Χαρακτηρίζεται από ένα σύστημα χαμηλών πιέσεων πάνω από τα Βαλκάνια και την επικράτηση αντικυκλωνικών συνθηκών δυτικά της Μεσογείου (Σχήμα 5.5). Επιπλέον, ο WT1 σχετίζεται σημαντικά με μια ισχυρή δυτική ροή πάνω από τη Μεσόγειο, η οποία μπορεί να ευθύνεται για νεφώσεις και βροχοπτώσεις στα δυτικά κυρίως τμήματα της Ελλάδας.

Συνοψίζοντας, για την ευρύτερη περιοχή της Μεσογείου, υπολογίστηκαν 10 επικρατούντες WTs, εκ των οποίων δύο WTs χαρακτηρίζονται ως τυπικοί WTs της θερμής περιόδου, ενώ 8 WTs εμφανίζονται κυρίως την ψυχρή περίοδο του έτους. Από αυτούς, και οι δύο WTs της θερμής περιόδου, παρουσιάζουν μεγαλύτερη συχνότητα εμφάνισης για την περίοδο από το 1950 έως 2020, σε σχέση με τους WTs της ψυχρής περιόδου. Επιπλέον για τους WT2, WT3 και WT5 υπολογίστηκαν θετικές στατιστικά σημαντικές γραμμικές τάσεις στις διαχρονικές διακυμάνσεις των συχνοτήτων τους (για την περίοδο 1990-2020), υποδηλώνοντας αύξηση στην εμφάνιση τους κατά τη διάρκεια



των τελευταίων ετών, ενώ για τους WT10 και WT9 βρέθηκαν αρνητικές στατιστικά σημαντικές γραμμικές τάσεις, υποδηλώνοντας μείωση της εμφάνισής τους.

5.3.2 Η Περίπτωση της Βαρκελώνης

Για την πόλη της Βαρκελώνης το πρώτο σύνολο δεδομένων (γεωδυναμικό ύψος των ισοβαρικών επιφανειών των 500 hPa και 1000 hPa, θερμοκρασία του αέρα και ειδική υγρασία στην ισοβαρική επιφάνεια των 850 hPa) αφορά τον κύριο γεωγραφικό τομέα της δυτικής Μεσογείου και μέρος του θαλάσσιου τμήματος ανατολικά του Ατλαντικού Ωκεανού, που εκτείνεται μεταξύ 30°B – 50°B και $20^{\circ}\Delta$ – 30°A (Σχήμα 5.6), ενώ το δεύτερο σύνολο δεδομένων (θερμοκρασία του αέρα σε ύψος 2 m από την επιφάνεια του εδάφους, ειδική υγρασία σε ύψος 2 m από την επιφάνεια του εδάφους, ζωνική/μεσημβρινή συνιστώσα της ταχύτητας του ανέμου σε ύψος 10 m από την επιφάνεια του εδάφους, ολική νεφοκάλυψη και ρυθμό υετού και ρυθμό ανωμεταφορικού υετού) τοποθετείται στην υπό-περιοχή που περικλείει σχεδόν όλη την περιφέρεια της Καταλονίας, η οποία περιλαμβάνει και την πρωτεύουσά της, Βαρκελώνη, και εκτείνεται μεταξύ $40,95^{\circ}\text{B}$ – $42,85^{\circ}\text{B}$ και $0^{\circ}\Delta$ – $3,75^{\circ}\text{A}$ (Σχήμα 5.6).



Σχήμα 5.6. Χάρτες ευρύτερης γεωγραφικής περιοχής (αριστερά) και μικρής γεωγραφικής περιοχής (δεξιά) για τη Βαρκελώνη.

Η πόλη της Βαρκελώνης βρίσκεται και ανήκει στην Αυτόνομη Κοινότητα της Καταλονίας, ενώ αποτελεί και πρωτεύουσα της. Η Βαρκελώνη είναι η δεύτερη μεγαλύτερη πόλη της Ισπανίας σε πληθυσμό ακολουθώντας τη Μαδρίτη, με τον πληθυσμό της να ανέρχεται στους 1.604.555 κατοίκους και την έκτασή της να φτάνει τα 101.4 km^2 , ενώ η μητροπολιτικής της περιοχή (που αποτελείται από την πόλη της Βαρκελώνης και 35 άλλους δήμους που συνορεύουν με την πόλη) έχει πληθυσμό που ανέρχεται στους 4.891.249 κατοίκους και έκταση 636 km^2 . Ο πληθυσμός αυτός



αποτελεί πάνω από το 42,8% του συνολικού πληθυσμού της Αυτόνομης Κοινότητας της Καταλονίας γεγονός που την καθιστά ως την 6^η πιο πυκνοκατοικημένη αστική περιοχή της Ευρωπαϊκής Ένωσης και την 1^η πιο πυκνοκατοικημένη στην Μεσόγειο. Η οικονομία της Βαρκελώνης προηγείται κατά πολύ των άλλων ισπανικών πόλεων. Οι τομείς που βοηθάνε στη συνεχώς αναδύομενη οικονομία της Βαρκελώνης είναι ο τουρισμός, τα τρόφιμα, οι πηγές ενέργειας και ο χώρος της μόδας. Σημαντικό ρόλο στην οικονομία έχουν διαδραματίσει και οι διοργανώσεις διεθνούς φήμης που έχουν λάβει κατά καιρούς χώρα στην πόλη, όπως οι Ολυμπιακοί Αγώνες του 1992.

Η Βαρκελώνη βρίσκεται βορειοανατολικά της Ιβηρικής Χερσονήσου και διαθέτει μια ακτογραμμή μήκους 4 km προς τη Μεσογειακή θάλασσα. Το μεσογειακό της κλίμα δικαιολογεί τη μεγάλη βιοποικιλότητα της. Η πόλη εκτείνεται σε μια πεδιάδα που περιορίζεται γενικά από τον ποταμό Besós (βόρεια), τον ποταμό Llobregat (νότια), τη βραχώδη προεξοχή του Montjuich (173 m ύψος) και την ημικύκλια ορεινή περιοχή, από την οποία το Tibidabo (512 m) είναι το υψηλότερο σημείο. Τα τοπογραφικά αυτά χαρακτηριστικά, εμποδίζουν τις βόρειες και δυτικές ψυχρές ροές, ενώ η μέση ετήσια θερμοκρασία είναι 16 °C. Ο Ιανουάριος είναι ο πιο κρύος μήνας, με μέση θερμοκρασία 9 °C και ο Αύγουστος είναι ο πιο θερμός, με μέση θερμοκρασία 24 °C. Η βροχόπτωση ανέρχεται σε περίπου 600 mm ετησίως.

Τέλος, η πόλη της Βαρκελώνης είναι πλούσια σε ανοιχτούς πράσινους χώρους, διαθέτοντας 60 περίπου δημοτικά πάρκα και κήπους διαφόρων εκτάσεων από πολύ μικρά έως και μεγάλα πάρκα αναψυχής, τα οποία εκτείνονται στην πόλη. Οι δημόσιοι χώροι πρασίνου εμφανίζονται μετά τη Βιομηχανική Επανάσταση και κυρίως μετά την κατεδάφιση των τειχών της πόλης (1854), ενώ κατά καιρούς σε πολλά άρθρα διαφόρων περιοδικών επαινείται η ιστορική αρχιτεκτονική και οι πρωτοτυπίες του αστικού τοπίου της.

Η εφαρμογή της PCA στα δύο σύνολα δεδομένων του ευρύτερου τομέα της Ανατολικής Μεσογείου και της υπό-περιοχή της Καταλονίας και για ολόκληρη τη χρονική περίοδο των 70 ετών (1950-2020), είχε ως αποτέλεσμα τον υπολογισμό 7 PCs σε κάθε περίπτωση, που αντιπροσωπεύουν το 72,8% και το 90% της συνολικής διακύμανσης, αντίστοιχα. Ο αριθμός των PCs βασίστηκε στα αποτελέσματα των διαγραμμάτων Scree (Σχήμα Π5.7) και στην περίπτωση αυτή. Επιπλέον, η εφαρμογή της μεθόδου k-means CA στις χρονοσειρές των 14 επικρατούντων PCs μαζί, είχε ως αποτέλεσμα τον υπολογισμό 7 ομάδων (WTs) σύμφωνα πάντα και με τη μέθοδο

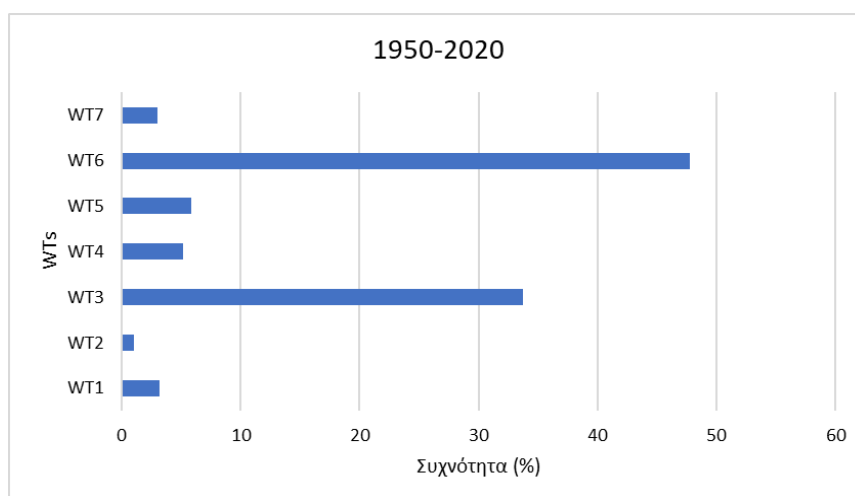


άλματος (Σχήμα Π5.8), με παρόμοιες καιρικές και συνοπτικές συνθήκες. Στον Πίνακα 5.2 παρουσιάζονται οι μέσες τιμές των μετεωρολογικών μεταβλητών για κάθε έναν από τους 7 WTs. Η συχνότητα των WTs διερευνήθηκε επίσης για την ευρύτερη περιοχή της Βαρκελώνης από το 1950 έως το 2020 (Σχήμα 5.9).

Πίνακας 5.2. Οι μέσες τιμές των μετεωρολογικών μεταβλητών για κάθε έναν από τους 7 WTs, για την περίπτωση της Βαρκελώνης.

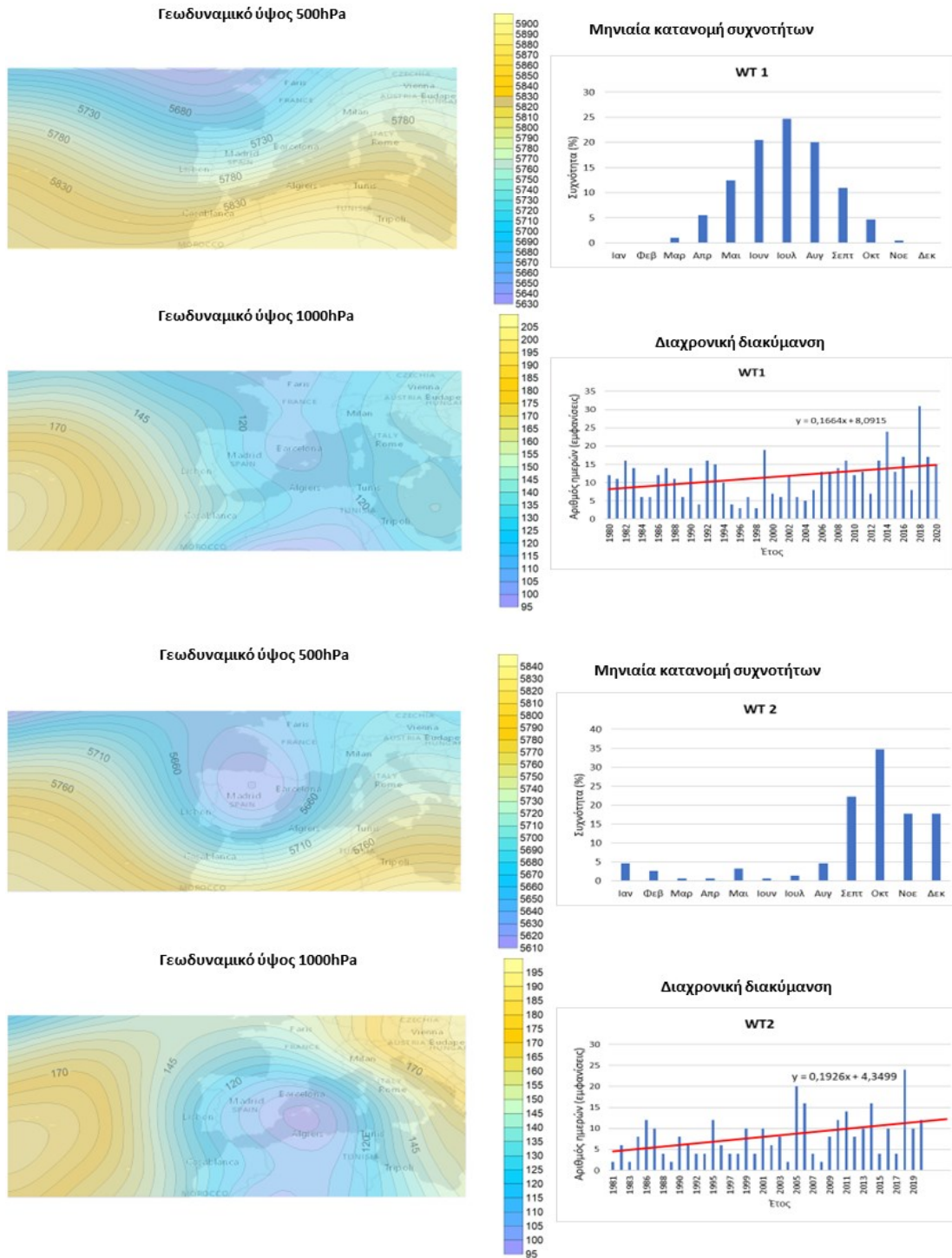
WTs	Ειδική υγρασία (g/kg)	Θερμοκρασία (°C)	Ζωνική συνιστώσα ανέμου (m/sec)	Μεσημβρινή συνιστώσα ανέμου (m/sec)	Ολική νεφοκάλυψη (%)	Διεύθυνση ανέμου
WT1	12,7	19,0	0,2	0,8	52,2	NNΔ
WT2	10,0	14,9	-2,6	-0,5	69,9	A
WT3	6,9	10,5	1,4	0,5	43,8	ΔΝΔ
WT4	7,5	10,7	2,3	-1,1	57,2	ΔΒΔ
WT5	9,4	14,0	-1,2	0,1	59,8	A
WT6	9,3	16,3	0,4	-2,3	31,2	B
WT7	12,0	18,6	-1,1	-0,4	54,8	ΑΒΑ

Σύμφωνα με τα πρώτα αποτελέσματα (Σχήμα 5.9), οι πιο συχνοί WT σε όλες τις εποχές για την ευρύτερη περιοχή της Βαρκελώνης είναι οι WT6 και WT3 (με κατά μέσο όρο περίπου 47% και 34% του χρόνου, αντιστοίχως), ακολουθούμενοι από τους WT5 (7%), WT4 (6%), WT1 (4%), WT7 (3,5%) και WT2 (3%). Οι μέσοι χάρτες των γεωδυναμικών υψών των ισοβαρικών επιφανειών 500hPa και 1000hPa για κάθε WT καθώς και οι διαχρονικές διακυμάνσεις των συχνοτήτων τους, παρουσιάζονται παρακάτω (Σχήμα 5.10).



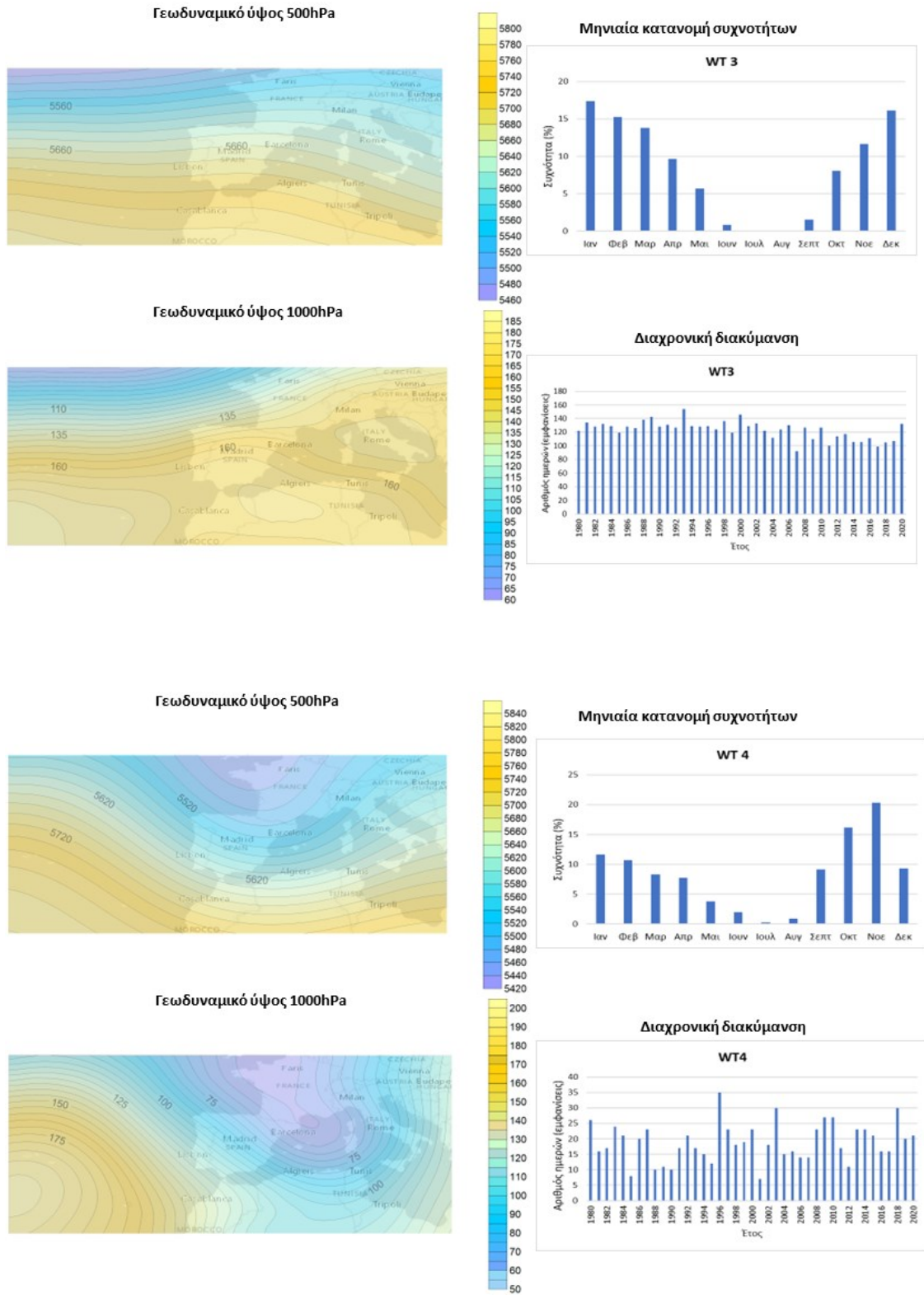
Σχήμα 5.9. Η επί τοις (%) συχνότητα εμφάνισης των WTs στην ολική χρονοσειρά 1950-2020, για την περίπτωση της Βαρκελώνης.





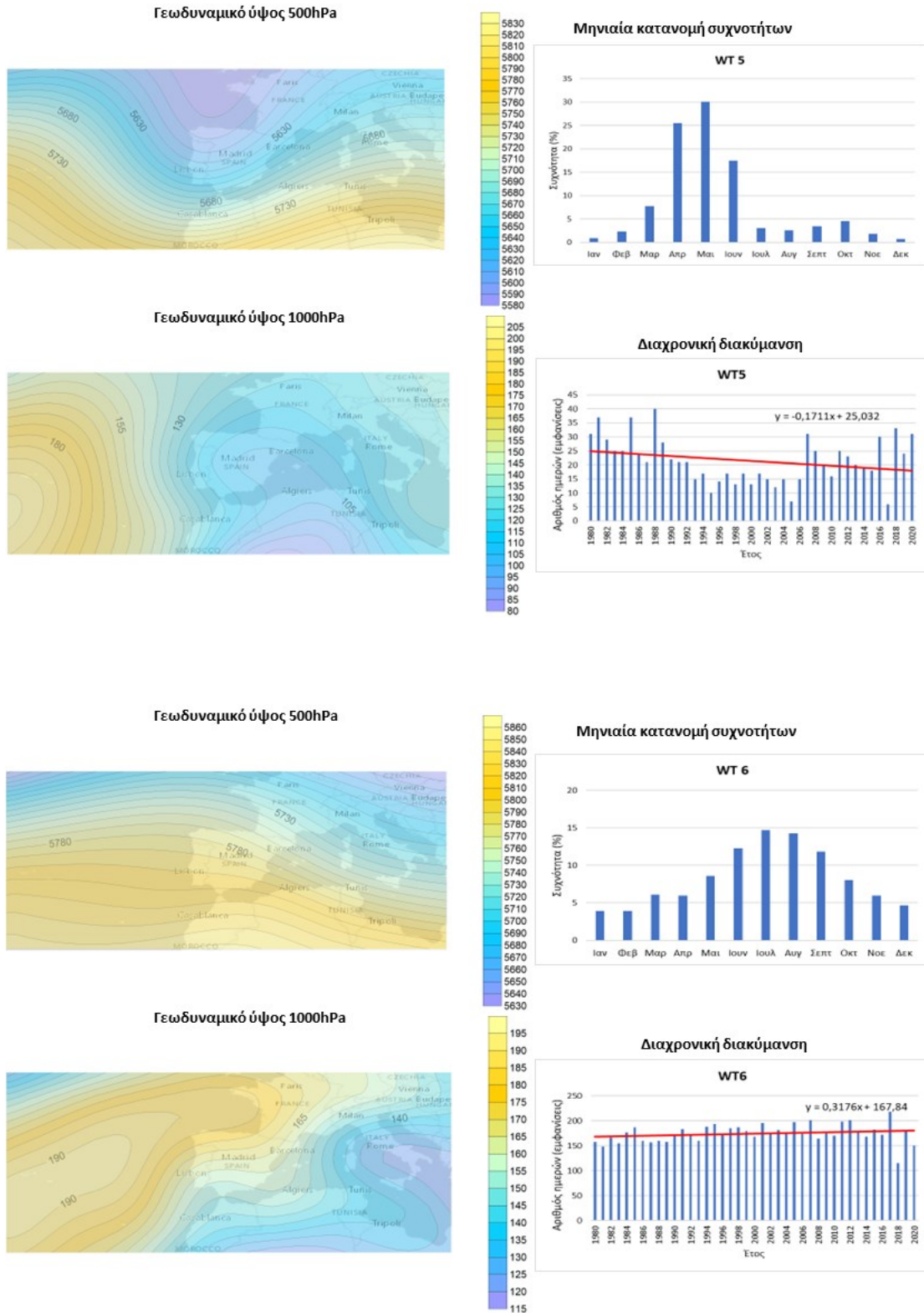
Σχήμα 5.10. Χάρτες των μέσων χωρικών κατανομών του γεωδυναμικού ύψους (gpm) των 500hPa και 1000hPa και οι μηνιαίες (1950-2020) και διαχρονικές διακυμάνσεις (1990-2020) της συχνότητας εμφάνισης (με κόκκινη γραμμή εμφανίζεται η στατιστικά γραμμική τάση).





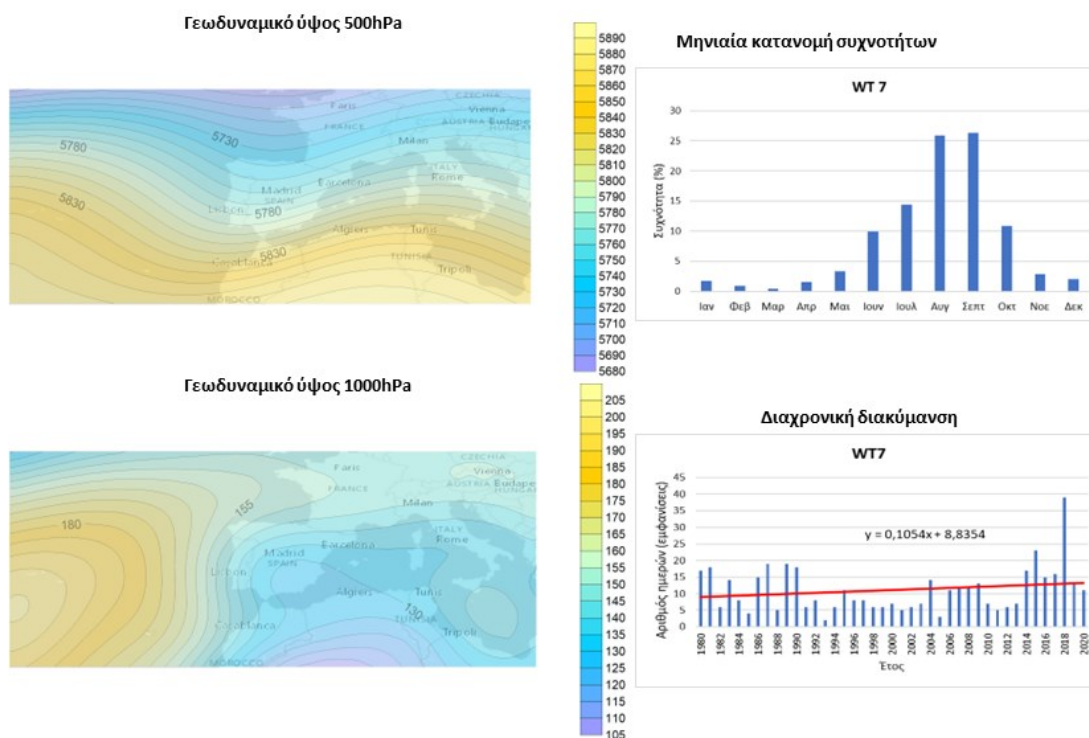
Σχήμα 5.10. (συνέχεια από την προηγούμενη σελίδα).





Σχήμα 5.10. (συνέχεια από την προηγούμενη σελίδα).





Σχήμα 5.10. (συνέχεια από την προηγούμενη σελίδα).

Σύμφωνα με τα παραπάνω αποτελέσματα, οι WT1, WT6 και WT7 είναι οι WTs της θερμής περιόδου του έτους, σύμφωνα και με τις ενδο-ετήσιες διακυμάνσεις των συχνοτήτων τους. Συγκεκριμένα, οι WT1 και WT7 παρουσιάζονται πιο συχνά κυρίως κατά τους τρεις καλοκαιρινούς μήνες (Ιούνιος-Ιούλιος-Αύγουστος), με μέγιστη συχνότητα εμφάνισης τον Ιούλιο για τον WT1 και τον Αύγουστο-Σεπτέμβριο για τον WT7. Επιπλέον, οι WT1 και WT7 παρουσιάζουν μια θετική στατιστικά σημαντική γραμμική τάση στη διαχρονική διακύμανση της συχνότητας τους, για την περίοδο 1990-2020. Οι συγκεκριμένοι τύποι καιρού (Σχήμα 5.10) σχετίζονται με μια σφήνα χαμηλών πιέσεων (trough) στην ισοβαρική επιφάνεια των 500hPa βόρεια της Ιβηρικής χερσονήσου ενώ στην επιφάνεια υπάρχει ένα σύστημα χαμηλών πιέσεων νότια και νοτιοανατολικά αυτής. Ακόμη, στην επιφάνεια ο μόνιμος αντικυκλώνας των Αζορών εμφανίζεται αρκετά εκτεταμένος και αρκετά κοντά στις ακτές της Πορτογαλίας-Μαρόκου. Σύμφωνα με τους Romero et al. (1999), τέτοιος συνδυασμός, συνδέεται με επιφανειακές ανατολικές ροές πλούσιες σε υγρασία στο βορειοανατολικό τμήμα της Ισπανίας (που προκαλείται από την κυκλωνική κυκλοφορία στο νότο), ευνοώντας την ανάπτυξη βροχοπτώσεων. Επιπλέον, για την ευρύτερη περιοχή της Βαρκελώνης και οι δύο WTs σχετίζονται με σχετικά υψηλές θερμοκρασίες, μερικώς νεφελώδεις συνθήκες,



καθώς και με ανέμους μέτριας έντασης κυρίως νοτιοδυτικών διευθύνσεων για τον WT1 και βορειοανατολικών για τον WT7 (Πίνακας 5.2).

Ο τρίτος θερινός WT (WT6), παρουσιάζει τη μέγιστη εμφάνισή του το μήνα Ιούλιο, ενώ υπολογίστηκε μια θετική στατιστικά σημαντική γραμμική τάση στη διαχρονική διακύμανση της συχνότητας του. Χαρακτηρίζεται από την εκτεταμένη παρουσία του αντικυκλώνα των Αζορών πάνω από τη δυτική Ευρώπη και μίας σκάφης υψηλών πιέσεων στην επιφάνεια της Ιβηρικής χερσονήσου (Σχήμα 5.10). Σύμφωνα με τους Jorba et al. (2004), τέτοιες κυκλοφορίες ευνοούν την ανάπτυξη φαινομένων μέσης κλίμακας, σε συνδυασμό με την ιδιαίτερη τοπογραφία της περιοχής της Βαρκελώνης όπως, θαλάσσιες αύρες, ανέμων πλαγιάς (αύρα βουνών και κοιλάδων) και ανέμων καναλισμού. Σχετίζεται επίσης κυρίως με βόρειες ροές, υψηλές θερμοκρασίες και χαμηλή νεφοκάλυψη.

Ο WT2 είναι γενικά ένας WT της ψυχρής περιόδου του έτους με τη μέγιστη συχνότητά του να εμφανίζεται το φθινόπωρο και πιο συγκεκριμένα τον Οκτώβριο. Παρουσιάζει μια θετική στατιστικά σημαντική γραμμική τάση στη διαχρονική διακύμανση της συχνότητας του, για την περίοδο 1990-2020. Οι συνοπτικές συνθήκες (Σχήμα 5.10) που αντιστοιχούν σε αυτόν τον WT, χαρακτηρίζονται από την επικράτηση ενός χαμηλού βαρομετρικού νοτιοανατολικά της Ιβηρικής χερσονήσου, όμως στην ισοβαρική επιφάνεια των 500hPa το χαμηλό βαρομετρικό εντοπίζεται βορειότερα στην ηπειρωτική Ιβηρική χερσόνησο. Χαρακτηρίζεται από μέτριες θερμοκρασίες, αυξημένη νεφοκάλυψη καθώς και από ανατολικές ροές στην ευρύτερη περιοχή της Βαρκελώνης.

Ο WT3 είναι WT της ψυχρής περιόδου όπου σύμφωνα με τα αποτελέσματα εμφανίζεται από τον Οκτώβριο έως τον Μάιο με μέγιστη συχνότητα κατά το δίμηνο Δεκεμβρίου-Ιανουαρίου (Σχήμα 5.10). Παρουσιάζει μια αρνητική γραμμική τάση στη διαχρονική διακύμανση της συχνότητας του, αλλά όχι στατιστικά σημαντική. Σχετίζεται με την ύπαρξη δύο ισχυρών υψηλών αντικυκλώνων στην επιφάνεια, ενός πάνω από την Ιταλία και ενός πάνω από την Αλγερία. Κατά τη διάρκεια εμφάνισής του, επικρατούν κυρίως νοτιοδυτικές ροές, μέτρια νεφοκάλυψη και σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες.

Ο WT4 είναι ένας ακόμα ένας WT της ψυχρής περιόδου, ο οποίος παρουσιάζει μέγιστη συχνότητα εμφάνισης το δίμηνο Οκτωβρίου-Νοεμβρίου (Σχήμα 5.10). Υπολογίστηκε μια θετική γραμμική τάση στη διαχρονική διακύμανση της συχνότητας του, όμως όχι



στατιστικά σημαντική. Μια σφήνα χαμηλών πιέσεων (trough) εμφανίζεται στην ισοβαρική επιφάνεια των 1000hPa πάνω τη δυτική Μεσόγειο η οποία στην ισοβαρική επιφάνεια των 500hPa μετατοπίζεται βορειοδυτικότερα πάνω από τη Γαλλία. Σχετίζεται με σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες, βορειοδυτικές ροές και μερικώς νεφελώδεις συνθήκες.

Ο WT5 σύμφωνα με την ενδοετήσια διακύμανση της συχνότητάς του, είναι και αυτός ένας WT της ψυχρής περιόδου του έτους καθώς έχει υψηλή συχνότητα εμφάνισης κυρίως την άνοιξη και συγκεκριμένα το δίμηνο Απριλίου-Μαΐου. Παρουσιάζει μια αρνητική στατιστικά σημαντική γραμμική τάση στη διαχρονική διακύμανση της συχνότητας του. Οι συνοπτικές συνθήκες που χαρακτηρίζουν τον WT5 περιλαμβάνουν ένα σύστημα χαμηλών πιέσεων στην επιφάνεια πάνω από την Ανατολική Μεσόγειο και μια σφήνα χαμηλών πιέσεων πάνω από τον Βискаϊκό κόλπο (Σχήμα 5.10). Σχετίζεται με ανατολικές ροές, μερικώς νεφελώδεις συνθήκες και σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες.

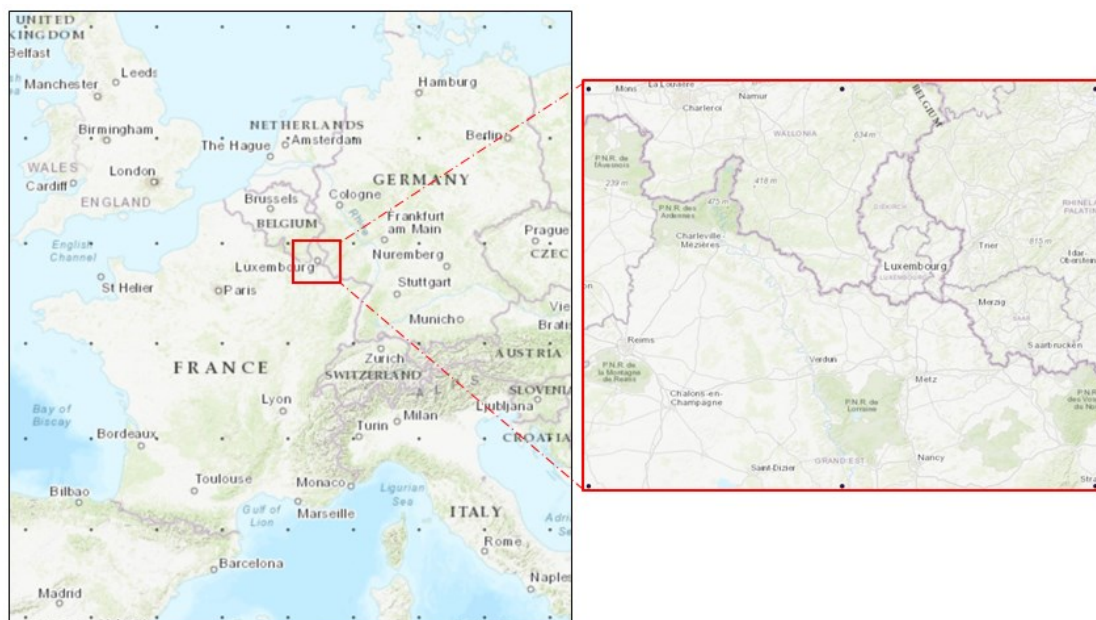
Συνοψίζοντας, για την ευρύτερη στην περιοχή της Βαρκελώνης, υπολογίστηκαν 7 επικρατούντες WTs, εκ των οποίων 3 WTs χαρακτηρίζονται ως τυπικοί WTs της θερμής περιόδου, ενώ 4 WTs εμφανίζονται κυρίως την ψυχρή περίοδο του έτους. Από αυτούς, ο WT6 της θερμής περιόδου, παρουσιάζει τη μεγαλύτερη συχνότητα εμφάνισης για την περίοδο από το 1950 έως 2020, σε σχέση με τους υπόλοιπους WTs. Επιπλέον για τους WT1, WT2, WT6 και WT7 υπολογίστηκαν θετικές στατιστικά σημαντικές γραμμικές τάσεις στις διαχρονικές διακυμάνσεις των συχνοτήτων τους (1990-2020), υποδηλώνοντας αύξηση στην εμφάνιση του κατά τη διάρκεια των τελευταίων ετών, ενώ για τον WT5 υπολογίστηκε αρνητική στατιστικά σημαντική γραμμική τάση, υποδηλώνοντας μείωση της εμφάνισής του.

5.3.3 Η Περίπτωση του Λουξεμβούργου

Για την περίπτωση της πόλης του Λουξεμβούργου, το πρώτο σύνολο δεδομένων (γεωδυναμικό ύψος των ισοβαρικών επιφανειών των 500 hPa και 1000 hPa, θερμοκρασία του αέρα και την ειδική υγρασία στην ισοβαρική επιφάνεια των 850 hPa) αφορά τον κύριο γεωγραφικό τομέα της κεντρικής Ευρώπης, που εκτείνεται μεταξύ 40°B–55°B και 15°Δ–5°Α (Σχήμα 5.11), ενώ το δεύτερο σύνολο δεδομένων (θερμοκρασία του αέρα σε ύψος 2 m από την επιφάνεια του εδάφους, ειδική υγρασία σε ύψος 2 m από την επιφάνεια του εδάφους, ζωνική/μεσημβρινή συνιστώσα της ταχύτητας του ανέμου σε ύψος 10 m από την επιφάνεια του εδάφους, ολική



νεφοκάλυψη και ρυθμό υετού και ρυθμό ανωμεταφορικού υετού) επικεντρώνεται στην υπό-περιοχή που περιλαμβάνει τμήματα της βόρειας Γαλλίας και νότια του Βελγίου, η οποία περιλαμβάνει το κράτος του Λουξεμβούργου, και εκτείνεται μεταξύ $48,57^{\circ}\text{B}$ – $50,47^{\circ}\text{B}$ και $3,75^{\circ}\Delta$ – $7,5^{\circ}\Delta$ (Σχήμα 5.11).



Σχήμα 5.11. Χάρτες ευρύτερης γεωγραφικής περιοχής (αριστερά) και μικρής γεωγραφικής περιοχής (δεξιά) για το Λουξεμβούργο.

Το Μεγάλο Δουκάτο του Λουξεμβούργου, γνωστό ως Λουξεμβούργο, είναι κράτος της Δυτικής Ευρώπης που βρίσκεται ανάμεσα στο Βέλγιο, τη Γερμανία και τη Γαλλία, με πληθυσμός περίπου 600.000 κατοίκων. Η πρωτεύουσά του, η Πόλη του Λουξεμβούργου (με περίπου 100.000 κατοίκους), συνορεύει ανατολικά με τη Γερμανία, νότια με τη Γαλλία, δυτικά και βόρεια με το Βέλγιο και βρίσκεται στη συμβολή των ποταμών Αλζέτ και Πετριζ. Γενικά, το έδαφος του Δουκάτου του Λουξεμβούργου διαιρείται σε δύο περιοχές: στο βόρειο τομέα (Εσλιγκ), που διασχίζεται από ένα τμήμα της οροσειράς των Αρδενών και χαρακτηρίζεται από βαθιές κοιλάδες και οροπέδια, και το νότιο (Γκούτλαντ), όπου βρίσκονται μεγάλες και γόνιμες εκτάσεις και κατοικεί το μεγαλύτερο μέρος του πληθυσμού. Το 55% του Λουξεμβούργου είναι καλλιεργήσιμη γη και το 25% καλύπτεται από δασικές εκτάσεις. Μεγαλύτερος ποταμός είναι ο Μοζέλα, ο οποίος βρίσκεται στα νοτιοανατολικά σύνορα του Λουξεμβούργου με τη Γερμανία. Αξίζουν να αναφερθούν και ο ποταμός Σάουερ (Σιρ) με τους παραποτάμους του Αλζέτ και Ουρ. Περίπου το ένα τρίτο των κατοίκων είναι σε μεγάλο ποσοστό ιταλικής και πορτογαλικής καταγωγής που σε δεύτερη γενεά



απέκτησαν τη Λουξεμβουργική υπηκοότητα. Στην χώρα ζουν κάτοικοι 45 διαφορετικών εθνικοτήτων (το 15-20 % των μόνιμων κατοίκων) που εξακολουθούν να διατηρούν την αρχική τους υπηκοότητα αλλά ζουν και εργάζονται στην χώρα αυτή.

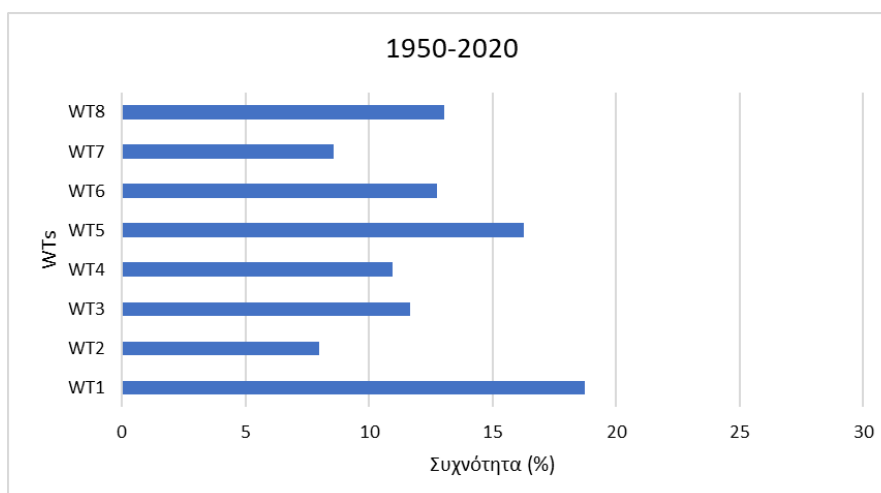
Το κλίμα της χώρας είναι καθαρά ηπειρωτικό με αρκετές βροχοπτώσεις. Οι ετήσιες θερμοκρασίες κυμαίνονται από -15°C έως 32°C , με μέση ετήσια θερμοκρασία 9°C . Οι καλοκαιρινές θερμοκρασίες είναι κατά μέσο όρο 15°C και οι χειμώνες είναι ήπιοι με μέση ελάχιστη θερμοκρασία $-1,7^{\circ}\text{C}$. Ο Ιούλιος και ο Αύγουστος είναι οι θερμότεροι μήνες. Ο Μάιος και ο Ιούνιος είναι οι πιο ηλιόλουστοι, ενώ ο Ιανουάριος και ο Φεβρουάριος είναι οι πιο ψυχροί μήνες. Το Λουξεμβούργο έχει ένα κλίμα που μοιάζει πολύ με αυτό του Βορειοδυτικού Ειρηνικού των ΗΠΑ: δροσερό, εύκρατο και βροχερό. Οι βορειοδυτικοί άνεμοι που διασχίζουν το δυτικό, χαμηλότερο τμήμα των βελγικών Αρδεννών συνδέονται με εκτεταμένες νεφώσεις, ομίχλη και βροχοπτώσεις. Η εφαρμογή της PCA στις ημερήσιες τιμές στα δύο σύνολα μετεωρολογικών παραμέτρων οδηγεί σε 6 PCs που ερμηνεύουν το 91% της συνολικής διακύμανσης για το κύριο γεωγραφικό τομέα της κεντρικής Ευρώπης και 7 PCs που ερμηνεύουν το 87% της συνολικής διακύμανσης για την υπό-περιοχή που περιλαμβάνει το κράτος του Λουξεμβούργου. Έπειτα από την εφαρμογή της CA στις χρονοσειρές των 13 PCs (6+7) καταλήγουμε σε 8 ομοιογενείς συστάδες (Σχήμα Π5.12). Για την επιλογή του αριθμού των συστάδων, εκτός από τη μέθοδο άλματος (Jump method) λαμβάνεται υπόψιν και η φυσική υπόσταση και ερμηνεία των αποτελεσμάτων (Σχήμα Π5.13). Για αυτό αν και το άλμα είναι μεγαλύτερο στις 4 και 5 συστάδες, προτιμήθηκαν οι 8 συστάδες. Κάθε μία από τις 8 συστάδες αποτελείται από ημερομηνίες οι οποίες χαρακτηρίζονται από παρόμοιες καιρικές/συνοπτικές συνθήκες και επομένως ορίζουν έναν συγκεκριμένο WT. Στον Πίνακα 5.3 παρουσιάζονται οι μέσες τιμές των μετεωρολογικών μεταβλητών για κάθε έναν από τους 8 WTs. Η συχνότητα των WTs διερευνήθηκε επίσης για την ευρύτερη περιοχή του Λουξεμβούργου από το 1950 έως το 2020 (Σχήμα 5.14).



Πίνακας 5.3. Οι μέσες τιμές των μετεωρολογικών μεταβλητών για κάθε έναν από τους 8 WTs, για την περίπτωση του Λουξεμβούργου.

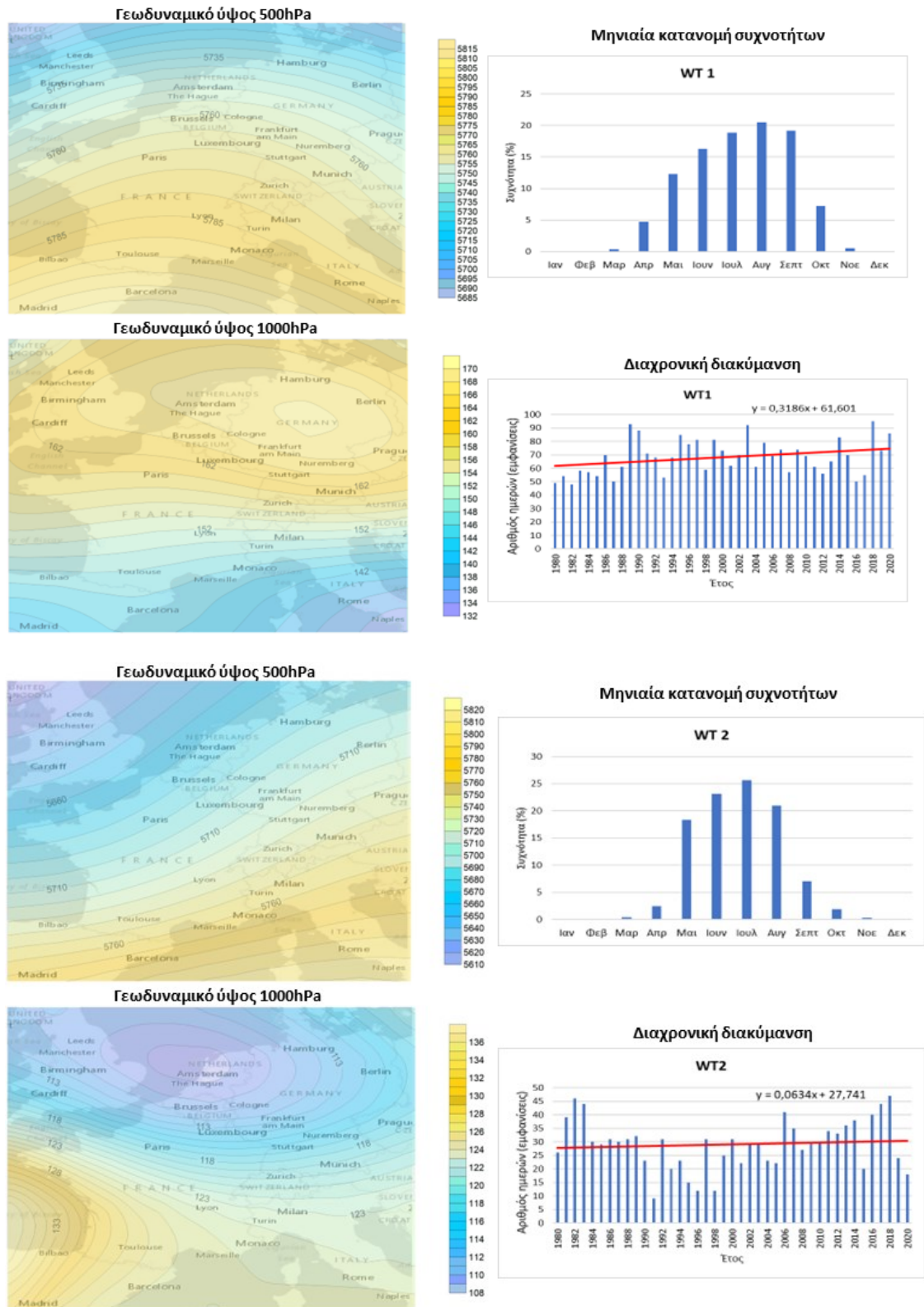
WTs	Ειδική υγρασία (g/kg)	Θερμοκρασία (°C)	Ζωνική συνιστώσα ανέμου (m/sec)	Μεσημβρινή συνιστώσα ανέμου (m/sec)	Ολική νεφοκάλυψη (%)	Διεύθυνση ανέμου
WT1	18,3	9,3	-0,6	-0,5	36,1	BA
WT2	18,2	11,2	0,6	0,1	60,6	Δ
WT3	5,2	5,2	2,8	-0,6	52,3	ΔΒΔ
WT4	10,3	7,0	-0,3	3,4	60,3	N
WT5	14,6	8,4	2,4	1,0	51,0	ΔΝΔ
WT6	5,9	6,2	3,5	4,5	60,6	ΝΔ
WT7	4,2	1,6	-1,5	-1,3	39,4	BA
WT8	4,2	1,6	-0,8	0,9	20,5	NA

Σύμφωνα με τα αρχικά αποτελέσματα (Σχήμα 5.14), οι πιο συχνοί WT σε όλες τις εποχές για την ευρύτερη περιοχή του Λουξεμβούργου είναι οι WT1 και WT5 (με κατά μέσο όρο περίπου 18,7% και 16,2% του χρόνου, αντιστοίχως), ακολουθούμενοι από τους WT8 (13%), WT6 (12,7%), WT3 (11,6%), WT4 (10,9%), WT4 (8,6%) και WT2 (8%). Οι μέσοι χάρτες των γεωδυναμικών υψών των ισοβαρικών επιφανειών 500hPa και 1000hPa για κάθε WT καθώς και οι διαχρονικές διακυμάνσεις των συχνοτήτων τους, παρουσιάζονται στα παρακάτω Σχήμα (Σχήμα 5.15).



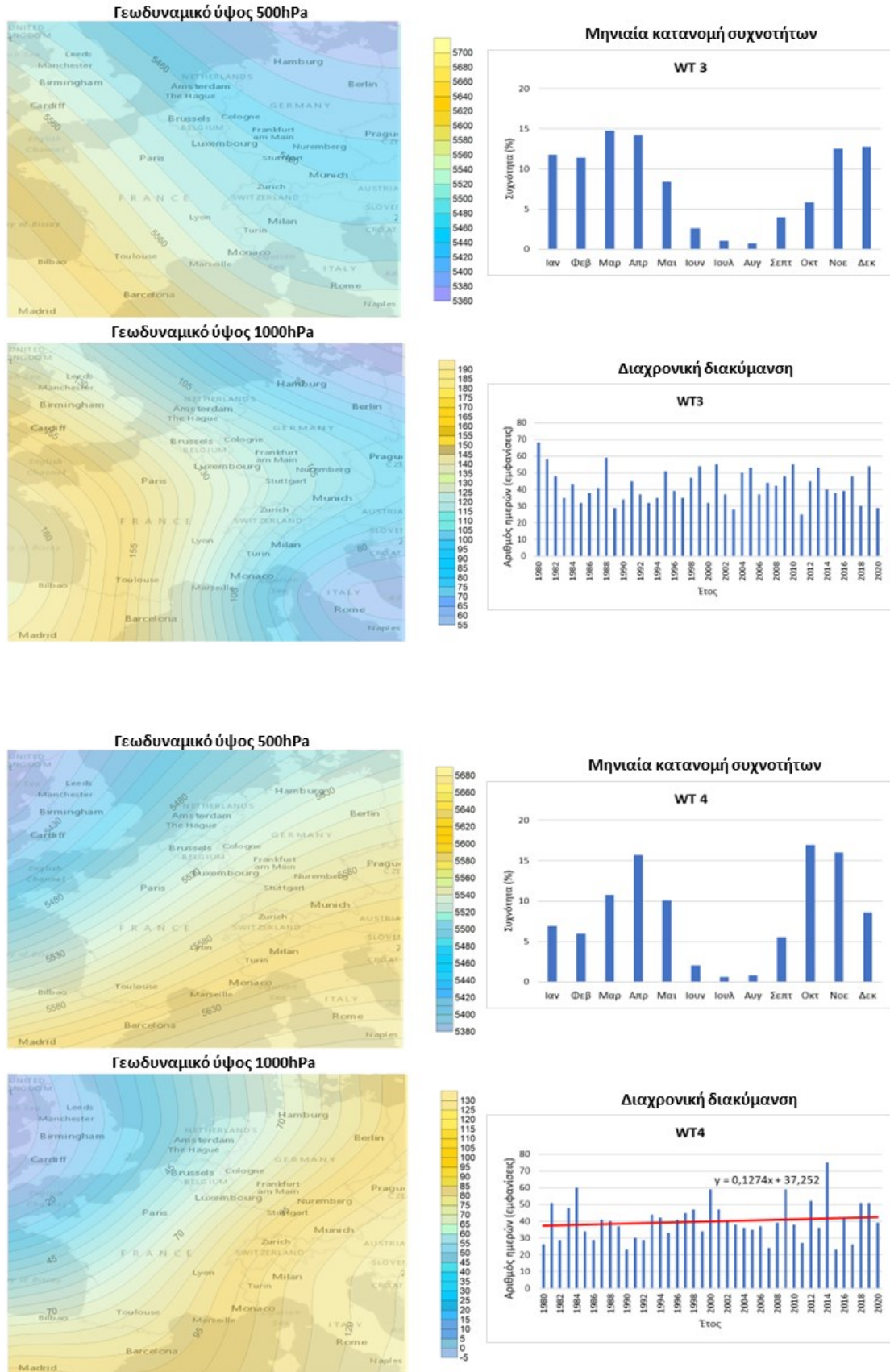
Σχήμα 5.14. Η επί τοις (%) συχνότητα εμφάνισης των WTs στην ολική χρονοσειρά 1950-2020, για την περίπτωση του Λουξεμβούργου.





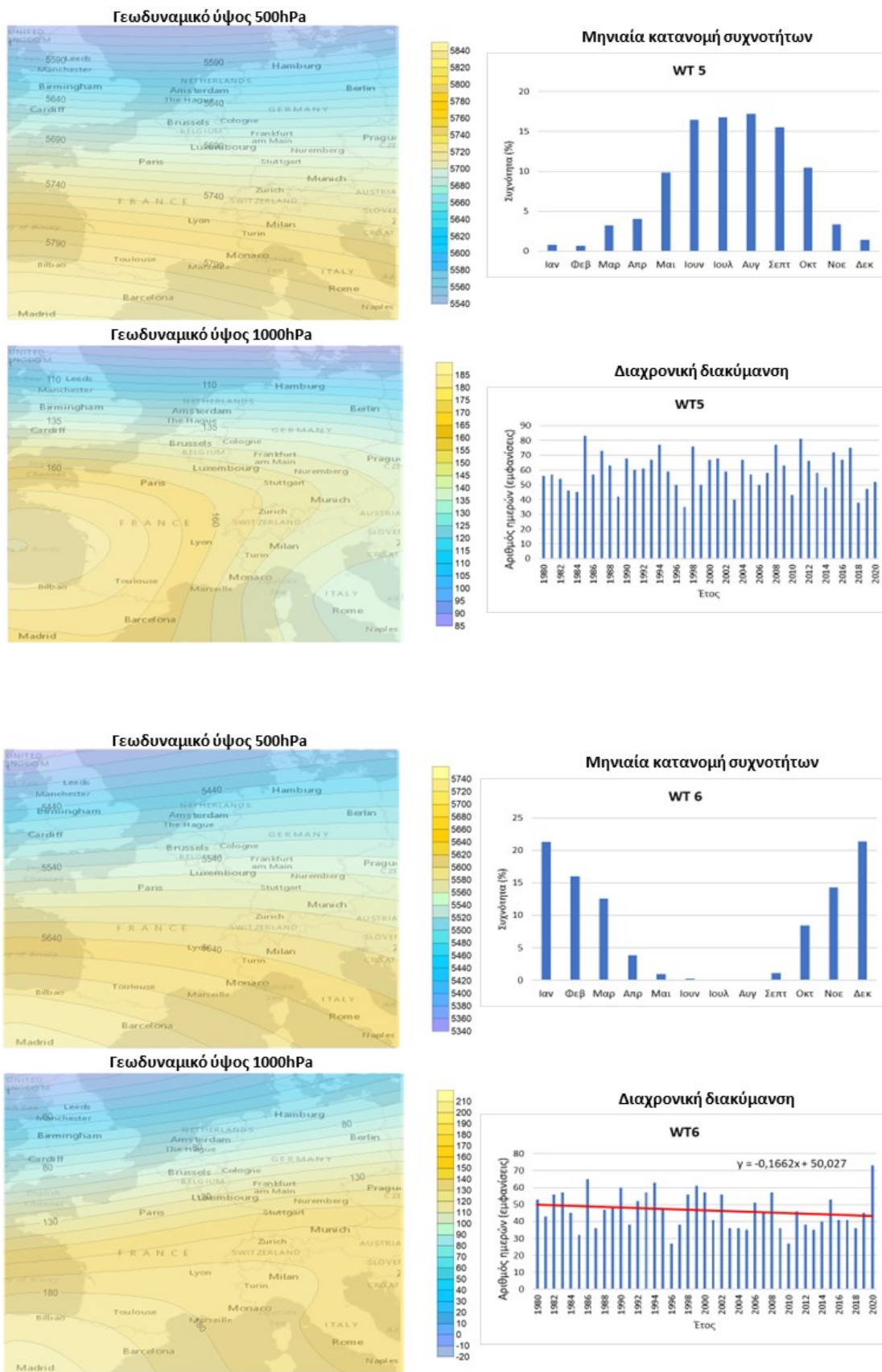
Σχήμα 5.15. Χάρτες των μέσων χωρικών κατανομών του γεωδυναμικού ύψους (gpm) των 500hPa και 1000hPa και οι μηνιαίες (1950-2020) και διαχρονικές διακυμάνσεις (1990-2020) της συχνότητας εμφάνισης (με κόκκινη γραμμή εμφανίζεται η στατιστικά γραμμική τάση).





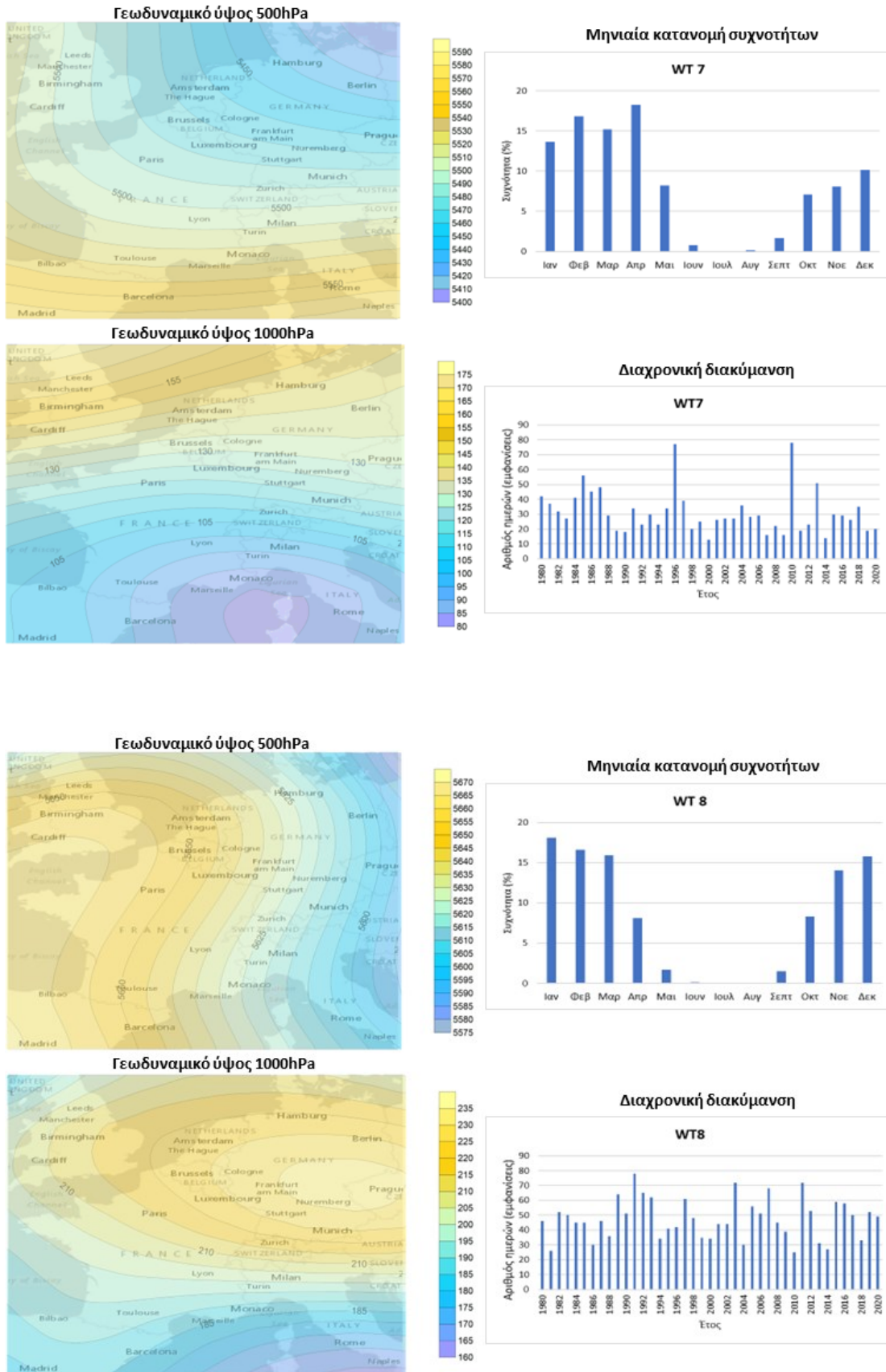
Σχήμα 5.15. (συνέχεια από την προηγούμενη σελίδα).





Σχήμα 5.15. (συνέχεια από την προηγούμενη σελίδα).





Σχήμα 5.15. (συνέχεια από την προηγούμενη σελίδα).



Σύμφωνα με τα παραπάνω αποτελέσματα, από όλους τους WTs που ορίστηκαν, οι WT1, WT2 και WT5 είναι οι WTs της θερμής περιόδου του έτους, σύμφωνα πάντα και με τις ενδο-ετήσιες διακυμάνσεις των συχνότητων τους. Συγκεκριμένα, ο WT1 (Σχήμα 5.15) επικρατεί από τον Απρίλιο έως και τον Οκτώβριο με μέγιστη συχνότητα εμφάνισης τον Αύγουστο. Μια θετική στατιστικά σημαντική γραμμική τάση εντοπίζεται στη διαχρονική διακύμανση της συχνότητας του WT1, που σημαίνει ότι ο WT1 εμφανίζεται συχνότερα τις τελευταίες δεκαετίες (1990-2020). Κατά τη διάρκεια της επικράτησης του WT1 στην ισοβαρική επιφάνεια των 1000hPa, κυριαρχούν αντικυκλωνικές συνθήκες στην κεντρική Ευρώπη και κυκλωνικές νοτιοδυτικά της Ευρώπης (Σχήμα 5.15). Επιπλέον, σχετίζεται με βορειοανατολικές ροές στην ευρύτερη περιοχή του Λουξεμβούργου, υψηλές για την περιοχή θερμοκρασίες και χαμηλή νεφοκάλυψη (Πίνακας 5.3).

Ο WT2, είναι ο δεύτερος WT που εμφανίζεται κυρίως τη θερμή περίοδο του έτους και παρουσιάζει υψηλή συχνότητα εμφάνισης τον Ιούλιο. Επίσης, και για αυτόν τον WT μια θετική στατιστικά σημαντική γραμμική τάση εντοπίζεται στη διαχρονική διακύμανση της συχνότητας του. Χαρακτηρίζεται κυρίως από κυκλωνικές συνθήκες πάνω από την κεντρική Ευρώπη, ενώ στη Δυτική Ευρώπη κυριαρχούν αντικυκλωνικές συνθήκες. Για την ευρύτερη περιοχή του Λουξεμβούργου, συνδέονται με υψηλές για την περιοχή θερμοκρασίες, δυτικές ροές και νεφελώδης συνθήκες.

Ο τρίτος WT της θερμής περιόδου είναι ο WT5, ο οποίος εμφανίζεται από το Μάρτιο έως το Δεκέμβριο με μέγιστη συχνότητα κατά το δίμηνο Ιούλιος-Αύγουστος. Η αυξητική τάση για την εμφάνιση του που υπολογίστηκε δεν είναι στατιστικά σημαντική. Κατά την επικράτηση του ένα υψηλό βαρομετρικό σύστημα είναι εμφανές στο χάρτη επιφανείας πάνω από την Ιβηρική χερσόνησο που προκαλεί μια νοτιοδυτική ροή στην περιοχή του Λουξεμβούργου (Σχήμα 5.15). Κυκλωνικές συνθήκες επικρατούν στη Βόρεια Ευρώπη. Η παραπάνω ροή σχετίζεται με μέτριες προς υψηλές για την περιοχή θερμοκρασίες και με μερικώς νεφελώδεις συνθήκες.

Ο WT3 σχετίζεται με την ύπαρξη ενός επιφανειακού ανέμου βορειοδυτικής διεύθυνσης στην κεντρική Ευρώπη που είναι απόρροια της συνύπαρξης μίας σκάφης υψηλών πιέσεων (ridge) πάνω από τη Γαλλία και ενός χαμηλού βαρομετρικού στην Αδριατική θάλασσα (Σχήμα 5.15). Ο WT3 μπορεί να χαρακτηριστεί ως ένας WT της ψυχρής περιόδου καθώς σύμφωνα με την ενδοετήσια διακύμανση της συχνότητάς του εμφανίζεται κυρίως κατά την περίοδο Οκτωβρίου-Μαΐου, με παρόμοια ποσοστά



εμφάνισης ανά μήνα και σχετίζεται με χαμηλές θερμοκρασίες και με μερικώς νεφελώδεις συνθήκες. Η μείωση στην συχνότητα εμφάνισής του που υπολογίστηκε δεν είναι στατιστικά σημαντική.

Ο WT4, όπως και ο WT3, είναι γενικά ένας WT της ψυχρής περιόδου, ο οποίος παρουσιάζει υψηλή συχνότητα εμφάνισης από το Σεπτέμβριο έως και το Μάιο. Ωστόσο, οι μεγαλύτερες συχνότητες εμφάνισης υπολογίζονται κατά τις μεταβατικές εποχές τους έτους (άνοιξη-φθινόπωρο) (Σχήμα 5.15). Ένα σύστημα χαμηλών πιέσεων είναι ορατό στην ισοβαρική επιφάνεια 500hPa στη Μεγάλη Βρετανία, ενώ στην επιφάνεια ο συνδυασμός ενός συστήματος υψηλής πίεσης στην Ανατολική Μεσόγειο και ενός συστήματος χαμηλής πίεσης στη βορειοδυτική Ευρώπη οδηγεί στην επικράτηση μιας νότιας ροής στην περιοχή του Λουξεμβούργου. Η παραπάνω νότια ροή σχετίζεται με μέτριες θερμοκρασίες στην περιοχή και με νεφελώδεις συνθήκες. Μια θετική στατιστικά σημαντική γραμμική τάση εντοπίζεται στη διαχρονική διακύμανση της συχνότητας του WT4.

Ο WT6, σύμφωνα με την ενδοετήσια διακύμανση της συχνότητάς του, είναι γενικά ένας WT της ψυχρής περιόδου του έτους που επικρατεί κυρίως από τον Οκτώβριο έως το Μάιο, με τις ακραίες τιμές εμφάνισης του το δίμηνο Δεκεμβρίου-Ιανουαρίου (Σχήμα 5.15). Από τους χάρτες των γεωδυναμικών υψών των ισοβαρικών επιφανειών φαίνεται ένας αντικυκλώνας πάνω από την Ιβηρική χερσόνησο στα 500hPa ο οποίος μετατοπίζεται ανατολικότερα στην επιφάνεια (Σχήμα 5.15). Σχετίζεται με νοτιοδυτικές ροές, μέτριες θερμοκρασίες στην περιοχή του Λουξεμβούργου και με νεφελώδεις συνθήκες. Μια αρνητική στατιστικά σημαντική γραμμική τάση εντοπίζεται στη διαχρονική διακύμανση της συχνότητας του WT6.

Οι τύποι καιρού WT7 και WT8 επικρατούν κυρίως την ψυχρή περίοδο του έτους και σχετίζονται με πολύ χαμηλές θερμοκρασίες και χαμηλές τιμές νεφοκάλυψης (Πίνακας 5.3). Πιο συγκεκριμένα ο WT7 επικρατεί την ψυχρή περίοδο Οκτώβριο έως Μάιο και οριακά στις αρχές της θερμής περιόδου με μεγαλύτερη συχνότητα τον Απρίλιο. Χαρακτηρίζεται από την κυριαρχία ενός συστήματος χαμηλής πίεσης δυτικά της Ιταλίας και με την επικράτηση βορειοανατολικών ροών στην περιοχή του Λουξεμβούργου (Σχήμα 5.15). Ο WT8 θεωρείται επίσης ένας WT της ψυχρής περιόδου, ο οποίος εμφανίζει μέγιστο συχνότητας τον Ιανουάριο. Χαρακτηρίζεται από την παρουσία ενός ισχυρού αντικυκλώνα πάνω από την κεντρική Ευρώπη και μιας ύφεσης πάνω από τη νότια Ιταλία. Ως αποτέλεσμα, μια νοτιοανατολική ροή επικρατεί



στην ευρύτερη περιοχή του Λουξεμβούργου (Σχήμα 5.15). Και για τους δύο τύπους καιρού δεν υπολογίστηκαν στατιστικά σημαντικές τάσεις.

Συνοψίζοντας, για την ευρύτερη στην περιοχή του Λουξεμβούργου, υπολογίστηκαν 8 επικρατούντες WTs, εκ των οποίων 3 WTs χαρακτηρίζονται ως τυπικοί WTs της θερμής περιόδου, ενώ 5 WTs της ψυχρής περιόδου. Από αυτούς, ο WT1 τη θερμής περιόδου, παρουσιάζει τη μεγαλύτερη συχνότητα εμφάνισης για την περίοδο από το 1950 έως 2020, σε σχέση με τους υπόλοιπους WTs. Επιπλέον για τους WT1, WT2, WT4 υπολογίστηκαν θετικές στατιστικά σημαντικές γραμμικές τάσεις στις διαχρονικές διακυμάνσεις των συχνοτήτων τους για την περίοδο 1990-2020, υποδηλώνοντας αύξηση στην εμφάνιση τους κατά τη διάρκεια των τελευταίων ετών, ενώ για τον WT6 υπολογίστηκε αρνητική στατιστικά σημαντική γραμμική τάση, υποδηλώνοντας μείωση της εμφάνισής του.

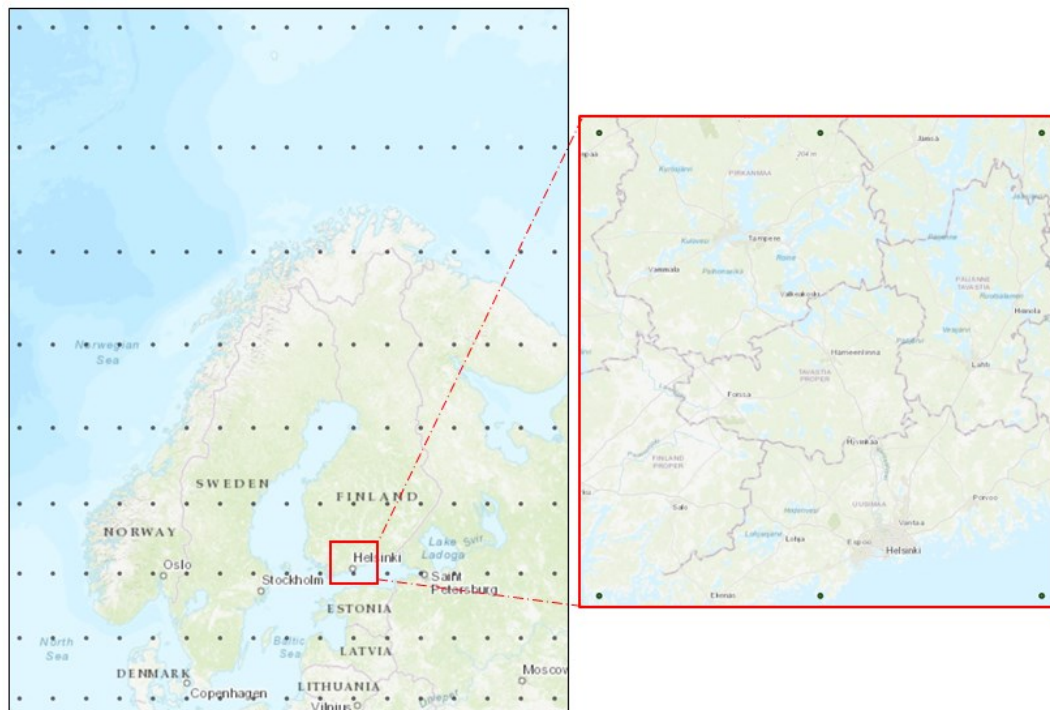
5.3.4 Η Περίπτωση του Ελσίνκι

Για την περίπτωση της πόλης του Ελσίνκι, το πρώτο σύνολο δεδομένων (γεωδυναμικό ύψος των ισοβαρικών επιφανειών των 500 hPa και 1000 hPa, θερμοκρασία του αέρα και ειδική υγρασία στην ισοβαρική επιφάνεια των 850 hPa) αφορά τον κύριο γεωγραφικό τομέα της βόρειας Ευρώπης, που εκτείνεται μεταξύ $55^{\circ}\text{B}-75^{\circ}\text{B}$ και $0^{\circ}\Delta-40^{\circ}\text{A}$ (Σχήμα 5.16) και περιλαμβάνει τη Σκανδιναβική Χερσόνησο, ενώ το δεύτερο σύνολο δεδομένων (θερμοκρασία του αέρα σε ύψος 2 m από την επιφάνεια του εδάφους, ειδική υγρασία σε ύψος 2 m από την επιφάνεια του εδάφους, ζωνική/μεσημβρινή συνιστώσα της ταχύτητας του ανέμου σε ύψος 10 m από την επιφάνεια του εδάφους, ολική νεφοκάλυψη και ρυθμό υετού και ρυθμό ανωμεταφορικού υετού) επικεντρώνεται στην υπό-περιοχή που περιλαμβάνει την ευρύτερη περιοχή του Ελσίνκι και εκτείνεται μεταξύ $59,99^{\circ}\text{B}-61,9^{\circ}\text{B}$ και $22,5^{\circ}\Delta-4^{\circ}\text{A}$ (Σχήμα 5.16).

Η Φινλανδία βρίσκεται στη Βόρεια Ευρώπη κατά μήκος της Βαλτικής Θάλασσας, του Βοθνικού Κόλπου και του Φινλανδικού Κόλπου. Μοιράζεται σύνορα με τη Νορβηγία, τη Σουηδία και τη Ρωσία και έχει ακτογραμμή 776 μίλια (1.250 km). Το Ελσίνκι είναι η πρωτεύουσα της Φινλανδίας. Βρίσκεται στο νότιο τμήμα της Φινλανδίας στις ακτές του Κόλπου της Φινλανδίας. Το Ελσίνκι σχηματίζει μαζί με τα Έσποο, Βάνταα και Καουνιάινεν μια ευρύτατη αστική περιοχή, που αποκαλείται περιοχή της πρωτεύουσας. Στην περιοχή αυτή κατοικούν περίπου 975.000 κάτοικοι. Η ευρύτερη περιοχή του Ελσίνκι εμπεριέχει πολλούς άλλους δήμους και διαθέτει συνολικό πληθυσμό 1.249.820 κατοίκων. Ο εξαιρετικός πολεοδομικός σχεδιασμός του Ελσίνκι



σημαίνει ότι κάθε τμήμα της πόλης έχει τουλάχιστον ένα πάρκο ή μια πράσινη περιοχή, εξασφαλίζοντας αυξημένη ποιότητα του αέρα στους κατοίκους.



Σχήμα 5.16. Χάρτες ευρύτερης γεωγραφικής περιοχής (αριστερά) και μικρής γεωγραφικής περιοχής (δεξιά) για το Ελσίνκι.

Γενικά, η τοπογραφία της Φινλανδίας είναι σχετικά ήπια με χαμηλές, επίπεδες ή κυλιόμενες πεδιάδες και χαμηλούς λόφους. Η γη είναι επίσης διακεκομμένη με πολλές λίμνες (πάνω από 60.000) και το υψηλότερο σημείο της χώρας είναι το Haltiatunturi στα 1.328 m. Επιπλέον, το Ελσίνκι είναι θερμότερο από το βόρειο τμήμα της Φινλανδίας αλλά και πιο θερμό και από άλλες τοποθεσίες του ίδιου γεωγραφικού πλάτους. Οι τεράστιες χερσαίες μάζες στα βόρεια και στα ανατολικά της χώρας, το σχετικά υψηλό βόρειο γεωγραφικό πλάτος της πόλης και οι επιπτώσεις του Κόλπου της Φινλανδίας, της Βαλτικής Θάλασσας και του θερμού Ρεύματος του Κόλπου δυτικά της Σκανδιναβίας, μαζί με κυρίως δυτικούς ανέμους, παίζουν ρόλο στη διαμόρφωση του κλίματος του Ελσίνκι. Ως αποτέλεσμα, η πόλη βιώνει ένα υγρό ηπειρωτικό κλίμα, που οδηγεί σε ένα κλίμα με μεγάλες εποχιακές διαφορές. Τα καλοκαίρια είναι ζεστά, ενώ οι χειμώνες κρύοι, με σχετικά υψηλή υγρασία όλο το χρόνο. Το μεγαλύτερο μέρος της βροχόπτωσης είναι στα τέλη του καλοκαιριού και όλο το φθινόπωρο. Η ετήσια μέση ημερήσια μέγιστη θερμοκρασία είναι 9,6 °C. Ο Ιούλιος είναι ο θερμότερος μήνας, με μέση ημερήσια μέγιστη θερμοκρασία 21,9°C, ενώ ο Φεβρουάριος είναι ο πιο κρύος, με μέση ημερήσια μέγιστη θερμοκρασία -1,3°C και μέση ημερήσια ελάχιστη



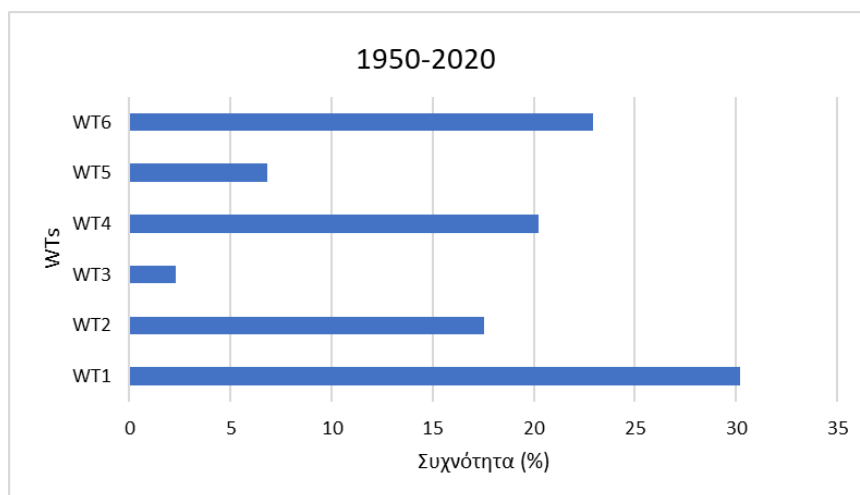
θερμοκρασία $-6,3^{\circ}\text{C}$. Οι θερμοκρασίες πέφτουν κάτω από το μηδέν περίπου 118 ημέρες το χρόνο, με πιθανό παγετό από τον Οκτώβριο έως τον Μάιο. Οι ημέρες ολικού παγετού, είναι κατά μέσο όρο περίπου 48 ημέρες ετησίως. Παρόλο που οι θερμοκρασίες μπορεί περιστασιακά να πέφτουν στους -20°C , τέτοιες ακραίες τιμές συνήθως περιορίζονται σε λίγες ημέρες κάθε χειμώνα. Οι ζεστές μέρες, με μέγιστες θερμοκρασίες άνω των 20°C (κατά μέσο όρο 54 ημέρες το χρόνο), εμφανίζονται κυρίως μεταξύ Μαΐου και αρχές Σεπτεμβρίου. Τις θερμότερες μέρες στα τέλη της άνοιξης και στις αρχές του καλοκαιριού, σύνηθες είναι η εμφάνιση της απογευματινής θαλάσσιας αύρας.

Η εφαρμογή της PCA στις ημερήσιες τιμές των δύο συνόλων μετεωρολογικών παραμέτρων οδηγεί σε 7 PCs που ερμηνεύουν το 90% της συνολικής διακύμανσης για το κύριο γεωγραφικό τομέα της βόρειας Ευρώπης και 6 PCs που ερμηνεύουν το 85,6% της συνολικής διακύμανσης για την υπό-περιοχή που περιλαμβάνει την ευρύτερη περιοχή του Ελσίνκι. Έπειτα από την εφαρμογή της CA στις χρονοσειρές των 13 PCs (7+6) καταλήγουμε σε 6 ομοιογενείς ομάδες (Σχήμα Π5.17). Η επιλογή του κατάλληλου αριθμού των συστάδων λαμβάνεται από τη μέθοδο άλματος (Jump method) (Σχήμα Π5.18) όπου φαίνεται το μέγιστο άλμα στις 6 ομάδες. Κάθε μία από τις 6 ομάδες αποτελείται από ημερομηνίες οι οποίες χαρακτηρίζονται από παρόμοιες καιρικές/συνοπτικές συνθήκες και επομένως ορίζουν έναν συγκεκριμένο WT. Στον Πίνακα 5.4 παρουσιάζονται οι μέσες τιμές των μετεωρολογικών μεταβλητών για κάθε έναν από τους 6 WTs. Η συχνότητα των WTs διερευνήθηκε επίσης για την ευρύτερη περιοχή του Ελσίνκι από το 1950 έως το 2020 (Σχήμα 5.19).

Πίνακας 5.4. Οι μέσες τιμές των μετεωρολογικών μεταβλητών για κάθε έναν από τους 6 WTs, για την περίπτωση του Ελσίνκι.

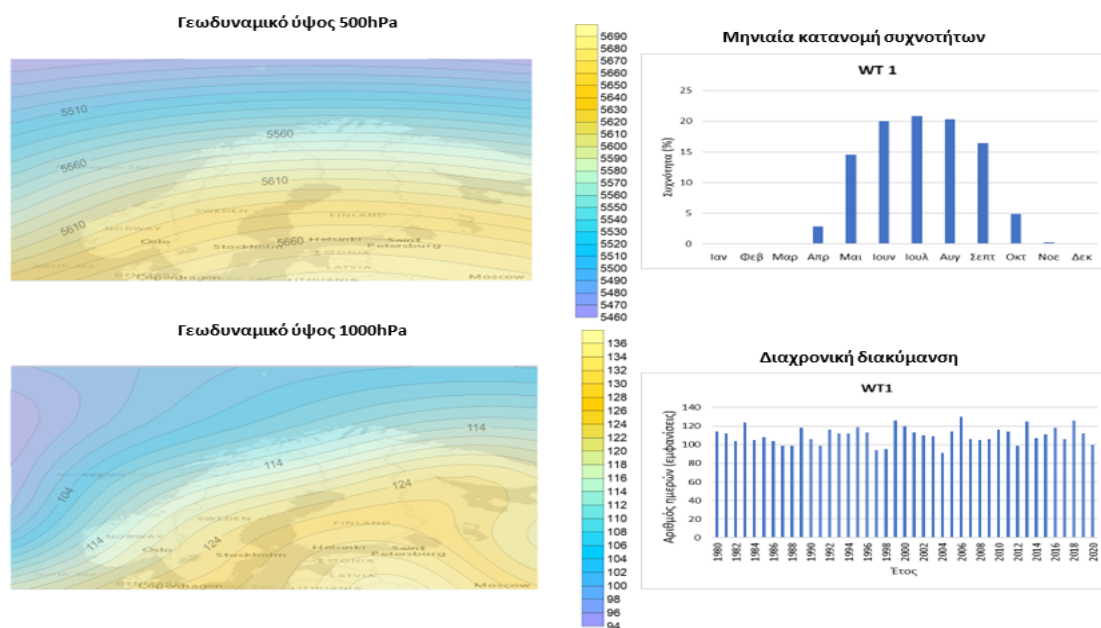
WTs	Ειδική υγρασία (g/kg)	Θερμοκρασία ($^{\circ}\text{C}$)	Ζωνική συνιστώσα ανέμου (m/sec)	Μεσημβρινή συνιστώσα ανέμου (m/sec)	Ολική νεφοκάλυψη (%)	Διεύθυνση ανέμου
WT1	8,1	13,3	0,4	0,4	41,6	NΔ
WT2	5,0	4,0	1,0	3,9	62,6	NNΔ
WT3	5,9	5,9	1,0	2,2	78,5	NNΔ
WT4	3,3	-1,8	-1,5	0,3	32,1	ANA
WT5	9,3	13,8	1,2	1,0	61,6	NΔ
WT6	3,7	-0,4	2,5	-1,4	42,4	ΔΒΔ





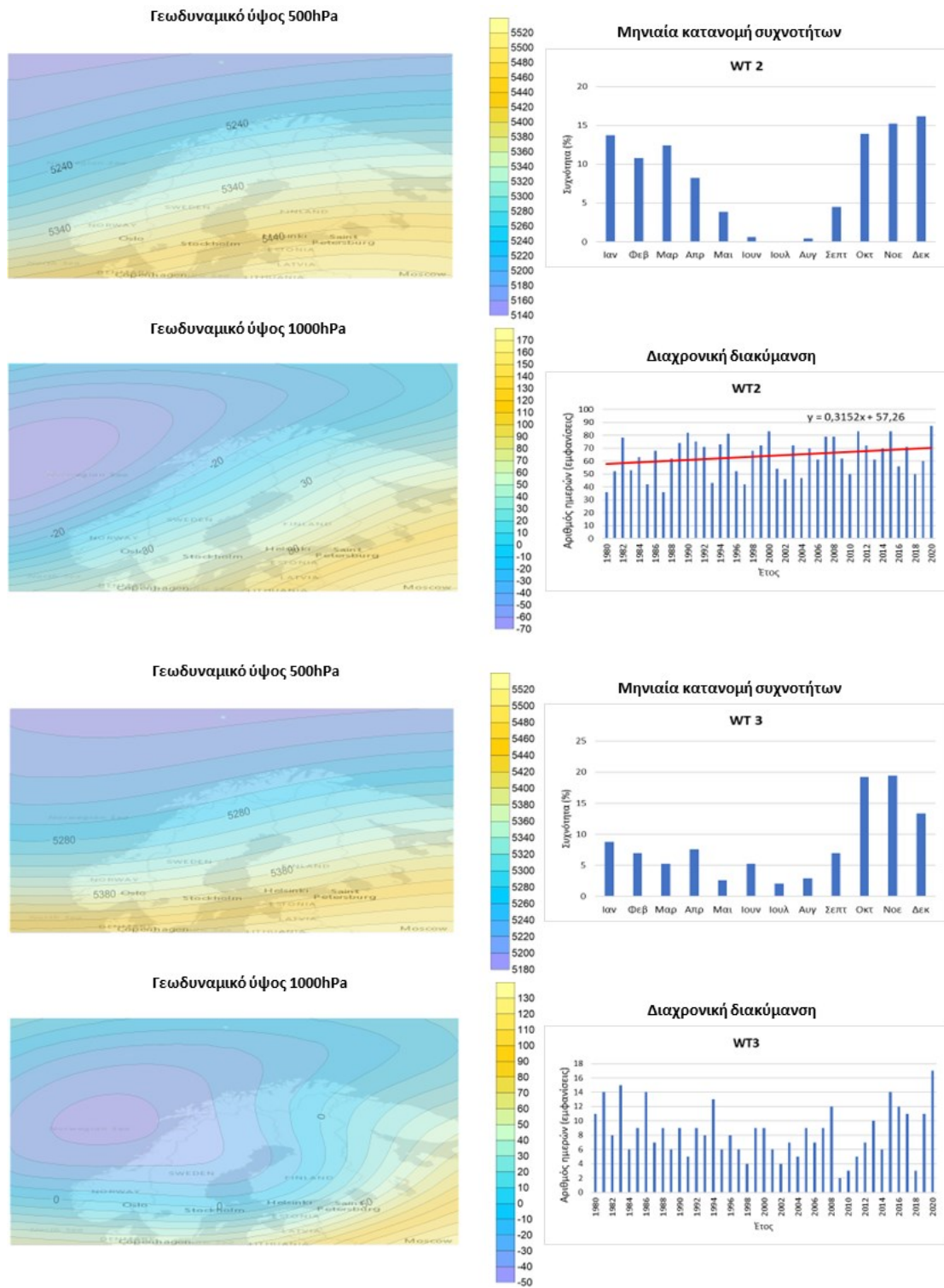
Σχήμα 5.19. Η επί τοις (%) συχνότητα εμφάνισης των WTs στην ολική χρονοσειρά 1950-2020, για την περίπτωση του Ελσίνκι.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα, όσον αφορά τη συχνότητα εμφάνισης των WTs ολόκληρης της χρονοσειράς (overall) από το έτος 1950-2020, για την περίπτωση του Ελσίνκι, ο WT1 είναι ο πιο συχνός τύπος καιρού σε όλη τη διάρκεια της χρονοσειράς με ποσοστό 30,2% και ακολουθούν οι WT6 με 22,9% και WT 4 με 20,2%, WT 2 με 17,53%, WT 5 με 6,8% και τέλος ο WT 3 με 2,3% (Σχήμα 5.19). Οι μέσοι χάρτες των γεωδυναμικών υψών των ισοβαρικών επιφανειών 500hPa και 1000hPa για κάθε WT καθώς και οι διαχρονικές διακυμάνσεις των συχνοτήτων τους, παρουσιάζονται στα παρακάτω Σχήματα (Σχήμα 5.20).



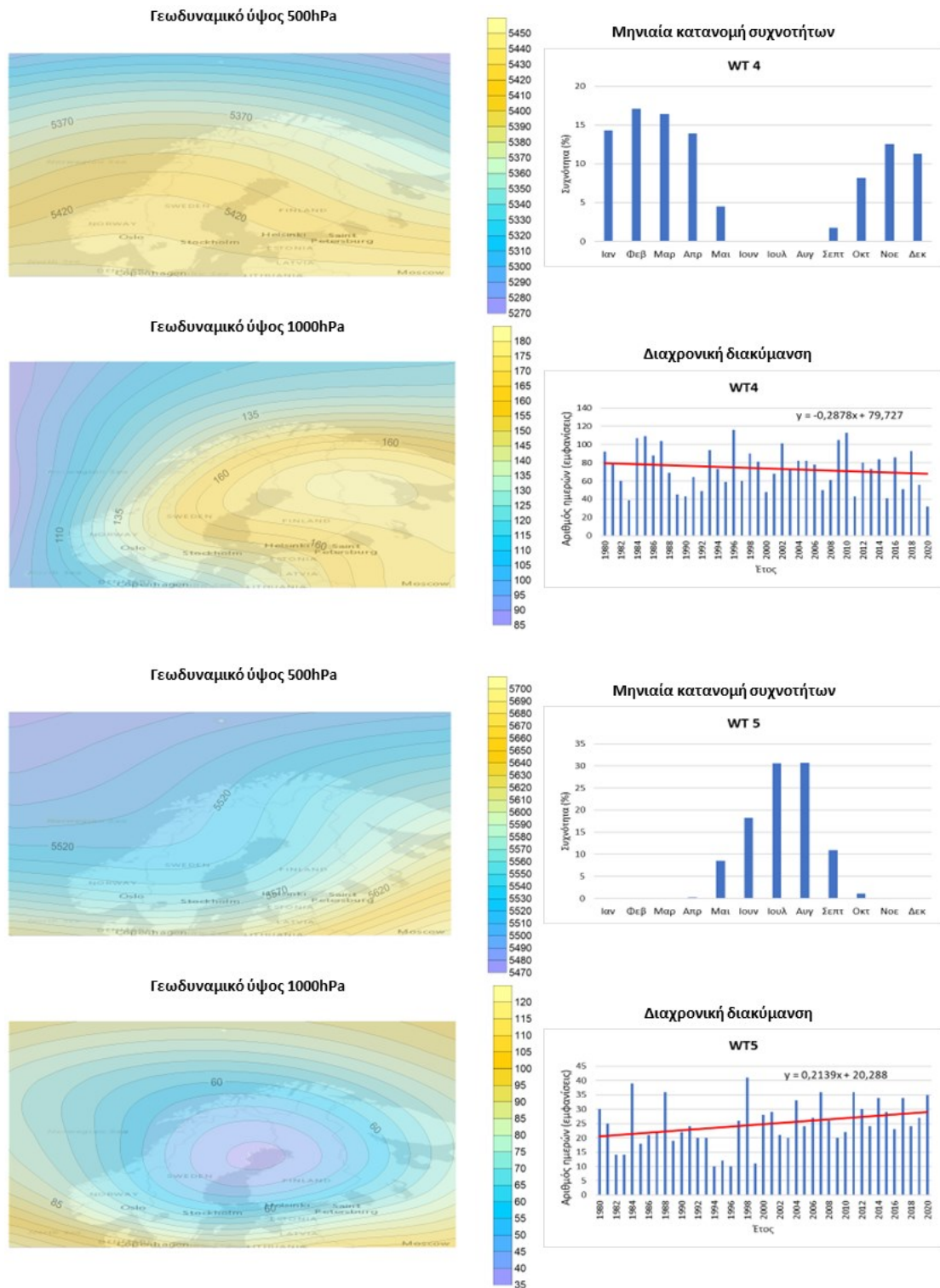
Σχήμα 5.20. Χάρτες των μέσων χωρικών κατανομών του γεωδυναμικού ύψους (gpm) των 500hPa και 1000hPa και οι μηνιαίες (1950-2020) και διαχρονικές διακυμάνσεις (1990-2020) της συχνότητας εμφάνισης (με κόκκινη γραμμή εμφανίζεται η στατιστικά γραμμική τάση).





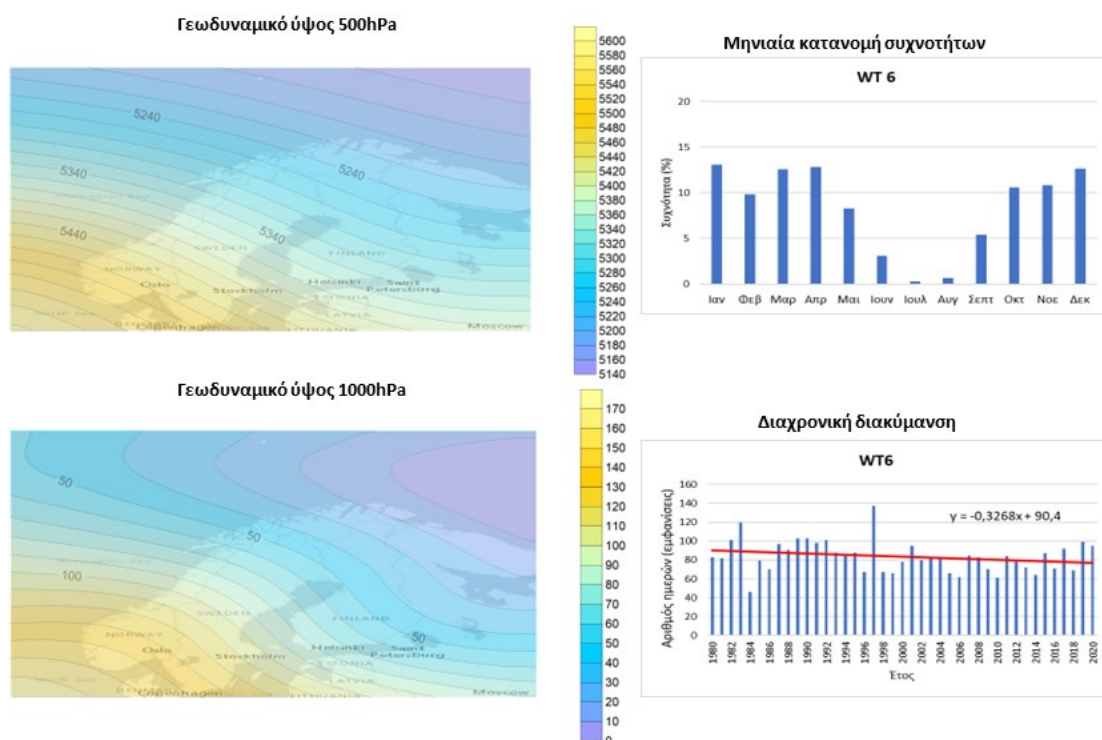
Σχήμα 5.20. (συνέχεια από την προηγούμενη σελίδα).





Σχήμα 5.20. (συνέχεια από την προηγούμενη σελίδα).





Σχήμα 5.20. (συνέχεια από την προηγούμενη σελίδα).

Σύμφωνα με τα παραπάνω αποτελέσματα, ο WT1 είναι ένας WT της θερμής περιόδου του έτους, καθώς επικρατεί από το Μάιο έως τον Οκτώβριο με μέγιστη συχνότητα εμφάνισης κυρίως κατά τους μήνες Ιούλιο και Αύγουστο. Κατά τη διάρκεια της επικράτησης του WT1, κυριαρχούν αντικυκλωνικές συνθήκες πάνω από τη βορειοανατολική Ευρώπη, ενώ κυκλωνικές συνθήκες επικρατούν δυτικά των Σκανδιναβικών χωρών. Σχετίζεται με μια νοτιοδυτική ροή στην ευρύτερη περιοχή της πόλης του Ελσίνκι (Σχήμα 5.20), με σχετικά υψηλές για την περιοχή θερμοκρασίες καθώς και με μερικώς νεφελώδεις συνθήκες. Η αύξηση στην συχνότητα εμφάνισής του από το 1990-2020 δεν είναι στατιστικά σημαντική.

Ο WT2 είναι γενικά ένας τύπος καιρού της ψυχρής περιόδου του έτους, καθώς εμφανίζεται από το Σεπτέμβριο έως το Μάιο με μέγιστη συχνότητα κατά το δίμηνο Νοεμβρίου-Δεκεμβρίου (Σχήμα 5.20). Χαρακτηρίζεται από την κυριαρχία ενός ισχυρού χαμηλού στη Νορβηγική θάλασσα που οδηγεί στην επικράτηση μιας νοτιοδυτικής ροής στη Σκανδιναβική χερσόνησο (Σχήμα 5.20). Κατά την επικράτησή του κυριαρχούν χαμηλές θερμοκρασίες και νεφελώδης συνθήκες. Για τον WT2, υπολογίστηκε επιπλέον μια θετική στατιστικά σημαντική γραμμική τάση στη διαχρονική διακύμανση της συχνότητας του για τις δεκαετίες 1990-2020.



Όσον αφορά τον WT3, σχετίζεται με μια ζώνη ισχυρής δυτικής ροής πάνω από τη Σκανδιναβία και το Ελσίνκι. Οι συνοπτικές συνθήκες που χαρακτηρίζουν τον WT3 περιλαμβάνουν ένα σύστημα χαμηλών πιέσεων πάνω από τη Νορβηγική θάλασσα και μια σκάφη χαμηλών πιέσεων πάνω από τη Φινλανδία. Ο WT3 μπορεί να χαρακτηριστεί ως ένας WT της ψυχρής περιόδου καθώς εμφανίζεται κυρίως κατά την περίοδο Οκτωβρίου-Απριλίου αλλά μικρές τιμές εμφάνισης υπάρχουν και τους θερινούς μήνες (Σχήμα 5.20), ενώ η μείωση στην συχνότητα εμφάνισής του που υπολογίστηκε δεν είναι στατιστικά σημαντική. Συνδέεται επίσης με μέτριες για την περιοχή θερμοκρασίες και με υψηλές τιμές νεφοκάλυψης.

Ο WT4 είναι ένας WT αμιγώς της ψυχρής περιόδου καθώς παρουσιάζει υψηλή συχνότητα εμφάνισης από τον Οκτώβριο έως το Μάιο, με μέγιστη συχνότητα εμφάνισης κατά το μήνα Φεβρουάριο και μηδενική εμφάνιση κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού (Σχήμα 5.20). Στο επίπεδο της επιφάνειας, ένα σύστημα υψηλής πίεσης κυριαρχεί πάνω από τη Φινλανδία που οδηγεί στην επικράτηση μιας νοτιοανατολικής ροής στην περιοχή (Σχήμα 5.20). Σχετίζεται με αρκετά χαμηλές θερμοκρασίες και ασθενής νεφοκάλυψη, ενώ μια αρνητική στατιστικά σημαντική γραμμική τάση εντοπίζεται στη διαχρονική διακύμανση της συχνότητας του.

Ο WT5 είναι ο δεύτερος WT που εμφανίζεται τη θερμή περίοδο του έτους (ο άλλος είναι ο WT1) και παρουσιάζει υψηλή συχνότητα εμφάνισης από το Μάιο έως και το Σεπτέμβριο, με μέγιστο εμφάνισης το δίμηνο Ιούλιο-Αύγουστο (Σχήμα 5.20). Οι συνοπτικές συνθήκες που αντιστοιχούν σε αυτόν τον WT, χαρακτηρίζονται από την επικράτηση ενός χαμηλού βαρομετρικού βόρεια της Βαλτικής θάλασσας έχοντας σαν συνέπεια την επικράτηση μιας νοτιοδυτικής ροής στο Ελσίνκι, η οποία είναι πιο ισχυρή στο ανατολικό τμήμα (Σχήμα 5.20). Χαρακτηρίζεται επίσης από υψηλές θερμοκρασίες κατά την επικράτησή του και νεφελώδης συνθήκες, ενώ μια θετική στατιστικά σημαντική γραμμική τάση εντοπίζεται στη διαχρονική διακύμανση της συχνότητας του.

Ο WT6, σύμφωνα με την ενδοετήσια διακύμανση της συχνότητάς του, είναι γενικά ένας WT της ψυχρής περιόδου του έτους που επικρατεί κυρίως από τον Οκτώβριο έως το Μάιο (Σχήμα 5.20). Χαρακτηρίζεται από βορειοδυτικές ροές, χαμηλές θερμοκρασίες και μερικώς νεφελώδης συνθήκες, καθώς και από την παρουσία ενός αντικυκλώνα πάνω από τη Βόρεια θάλασσα και μιας ύφεσης πάνω από τη θάλασσα



του Μπάρεντς (Σχήμα 5.20). Η πτωτική τάση στην συχνότητα εμφάνισής του που υπολογίστηκε είναι στατιστικά σημαντική.

Συνοψίζοντας, στην ευρύτερη περιοχή του Ελσίνκι εντοπίζονται 6 επικρατούντες WTs. Από αυτούς, 2 WTs εμφανίζονται κατά τη θερμή περίοδο του έτους, ενώ 4 WTs εμφανίζονται κυρίως την ψυχρή περίοδο του έτους. Ο WT1 τη θερμής περιόδου, παρουσιάζει τη μεγαλύτερη συχνότητα εμφάνισης για την περίοδο από το 1950 έως 2020, σε σχέση με τους υπόλοιπους WTs. Επιπλέον για τους WT2 και WT5 υπολογίστηκαν θετικές στατιστικά σημαντικές γραμμικές τάσεις στις διαχρονικές διακυμάνσεις των συχνοτήτων τους για την περίοδο 1990-2020, υποδηλώνοντας αύξηση στην εμφάνιση του κατά τη διάρκεια των τελευταίων ετών, ενώ για τους WT4 και WT6 υπολογίστηκαν αρνητικές στατιστικά σημαντικές γραμμικές τάσεις, υποδηλώνοντας μείωση της εμφάνισής του.



6. Αξιολόγηση της ανάπτυξης και της έντασης της αστικής θερμικής νησίδας μέσω τύπων καιρού

6.1 Η βάση δεδομένων Copernicus urban climate

Με σκοπό την επίτευξη μιας λεπτομερούς χρονικής και χωρικής κατανομής της UHI σε κάθε πόλη, χρησιμοποιήθηκε ένα σύνολο δεδομένων, που είναι διαθέσιμο από την Υπηρεσία Κλιματικής Αλλαγής Copernicus. Επρόκειτο για ένα μεγάλο και νεοσύστατο σύνολο δεδομένων, το οποίο προσφέρει τιμές πλεγματικών σημείων θερμοκρασίας αέρα στην επιφάνεια του εδάφους, ειδικής και σχετικής υγρασίας στην επιφάνεια του εδάφους και ταχύτητας ανέμου για 100 ευρωπαϊκές πόλεις (από το 2008 έως το 2017), σε υψηλή χωρική ανάλυση (100m) και σε ωριαία χρονική ανάλυση (<https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/sis-urban-climate-cities?tab=overview>).

Η συγκεκριμένη βάση δεδομένων, δημιουργήθηκε ως αποτέλεσμα της χρήσης του μοντέλου αστικού κλίματος UrbClim, ένα μοντέλο που έχει σχεδιαστεί για την προσομοίωση και τη μελέτη του φαινομένου UHI και άλλων μεταβλητών του αστικού κλίματος (ταχύτητα ανέμου, υγρασία κτλ) στην κλίμακα γειτονιάς μιας πόλης (χωρική ανάλυση 100 m) (De Ridder et al. 2015). Απαιτεί δύο τύπους δεδομένων εισόδου: μετεωρολογικά δεδομένα μεγάλης κλίμακας (βάση δεδομένων αναδρομικής ανάλυσης ERA5) και δεδομένα εδάφους (χρήση γης, βλάστηση και σφράγιση του εδάφους) για κάθε πόλη. Επιπλέον, το UrbClim απαιτεί την εφαρμογή ενός ψηφιακού υψομετρικού μοντέλου (με σκοπό να ληφθούν υπόψη οι επιπτώσεις του υψομέτρου), και δεδομένα ανθρωπογενούς ροής θερμότητας (την ποσότητα θερμότητας που παράγεται από την πόλη και τους κατοίκους της). Το μοντέλο επίσης αναλύει τις καιρικές συνθήκες μεγάλης κλίμακας σε κλίμακα οικισμών και υπολογίζει τον αντίκτυπο της αστικής ανάπτυξης στις πιο σημαντικές καιρικές παραμέτρους, όπως η θερμοκρασία και η υγρασία. Το UrbClim αποτελείται από ένα σχήμα χερσαίων διεργασιών (land surface scheme), που περιγράφει τη φυσική της ανταλλαγής ενέργειας και νερού μεταξύ του εδάφους και της ατμόσφαιρας στην πόλη, σε συνδυασμό με ένα τρισδιάστατο μοντέλο ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος (3D atmospheric boundary layer module). Οι ατμοσφαιρικές συνθήκες μακριά από το κέντρο της πόλης καθορίζονται από μετεωρολογικά δεδομένα εισόδου, ενώ τα τοπικά δεδομένα εδάφους και επιφάνειας επηρεάζουν τις ροές θερμότητας και την εξάτμιση εντός των αστικών ορίων. Η κύρια



έξοδος αποτελείται από ωριαίους χάρτες θερμοκρασίας και υγρασίας αέρα με χωρική ανάλυση 100 m. Ο προσομοιωμένος τομέας εξαρτάται από την πόλη που ερευνάται, αλλά επιλέγεται πάντα έτσι ώστε να περιλαμβάνει την πόλη και το άμεσο περιβάλλον της. Το κύριο πλεονέκτημα του κλιματικού μοντέλου αστικού οριακού στρώματος είναι ότι είναι ταχύτερο από τα κλιματικά μοντέλα μέσης κλίμακας υψηλής ανάλυσης κατά τουλάχιστον δύο τάξεις μεγέθους, ενώ έχει παρόμοιο επίπεδο ακρίβειας. Εξαιτίας αυτού, το μοντέλο είναι κατάλληλο για μακροχρόνιες ενσωματώσεις, ιδιαίτερα για εφαρμογές αστικού κλίματος σε μεγάλο αριθμό πόλεων. Τα αποτελέσματα του μοντέλου έχουν αξιολογηθεί και συγκριθεί με ωριαίες μετρήσεις θερμοκρασίας σε διάφορες πόλεις όπως το Λονδίνο, το Μπιλμπάο, την Αθήνα, την Τουλούζη, το Βερολίνο, την Αμβέρσα, τη Γάνδη, τις Βρυξέλλες και το Παρίσι (De Ridder et al. 2013, 2015, Kourtidis et al. 2015, Lauwaet et al. 2016, Sarkar and De Ridder 2011, Verdonck et al. 2018, Zhou et al. 2016).

6.2 Υπολογισμός της έντασης της UHI για κάθε πόλη

Με βάση τα παραπάνω, στην παρούσα διατριβή ωριαίες τιμές πλεγματικών σημείων της θερμοκρασίας του αέρα στο επίπεδο του εδάφους (2m πάνω από την επιφάνεια), ελήφθησαν σε μορφή NetCDF-4 για τις πόλεις Αθήνα, Βαρκελώνη, Λουξεμβούργου και Ελσίνκι, μεταξύ 2008 και 2017 (Πίνακας 6.1). Επιλέχθηκαν μόνο οι μήνες Ιούνιος, Ιούλιος, Αύγουστος και Σεπτέμβριος, αντιπροσωπεύοντας τη θερινή περίοδο του έτους. Επιπλέον, τα δεδομένα θερμοκρασίας χωρίστηκαν σε ημερήσια (06:00–18:00 LT) και νυχτερινά (23:00–06:00 LT), ώστε να διερευνηθεί το φαινόμενο UHI την ημέρα (daytime) και τη νύχτα (nighttime) για κάθε μια από τις παραπάνω πόλεις. Επιπλέον, με σκοπό την απομόνωση των χερσαίων περιοχών από τις θαλάσσιες και το διαχωρισμό των αγροτικών από τις αστικές περιοχές (πλεγματικά σημεία), ελήφθησαν και εφαρμόστηκαν δεδομένα μάσκας ξηράς-θαλάσσης (Land-Sea mask) και μάσκας υπαίθριας-πόλης (Rural-Urban mask). Στην περίπτωση αυτή, η αγροτική περιοχή αντιπροσωπεύεται από τις αγροτικές τάξεις του Ευρωπαϊκού προγράμματος για τη συλλογή δεδομένων κάλυψης και χρήσης γης CORINE (COoRdination of INformation on the Environment), που καλύπτουν λιβάδια, καλλιέργειες, θαμνώδεις εκτάσεις, δασικές εκτάσεις, πλατύφυλλα και βελονοειδή δάση (<https://land.copernicus.eu/pan-ευρωπαϊκό/corine-land-cover>). Πιο συγκεκριμένα, σύμφωνα με τη μάσκα ξηράς-θαλάσσης, η χερσαία έκταση λαμβάνει την τιμή 1 και αντιπροσωπεύεται από τις τάξεις χερσαίας γης του CORINE, η θαλάσσια περιοχή λαμβάνει την τιμή που λείπει NaN και



αντιπροσωπεύεται από τις θαλάσσιες κατηγορίες του CORINE, ενώ σύμφωνα με τη μάσκα υπαίθριας-πόλης, η αγροτική περιοχή λαμβάνει την τιμή 1 και αντιπροσωπεύεται από τις αγροτικές τάξεις του CORINE, ενώ η αστική περιοχή λαμβάνει την τιμή που λείπει NaN και αντιπροσωπεύεται από τις αστικές τάξεις του CORINE.

Πίνακας 6.1. Ωριαία δεδομένα θερμοκρασίας από το Copernicus urban climate: Περιγραφή

Μεταβλητή	Θερμοκρασία του αέρα 2 m από την επιφάνεια του εδάφους
Μονάδα μέτρησης	Kelvin
Τύπος δεδομένων	Τιμές πλεγματικών σημείων (Gridded)
Χωρική ανάλυση	100 m * 100 m
Χρονική ανάλυση	Ωριαία
Χρονική περίοδος	2008-2017
Μορφή ώρας	UTC
Μορφή αρχείων	NetCDF-4

Όπως εξηγήθηκε και παραπάνω, η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ αστικών και αγροτικών περιοχών σε μια δεδομένη χρονική στιγμή, αναφέρεται στη διεθνή βιβλιογραφία ως ένταση του φαινομένου (UHI Intensity - UHI). Τα μη αστικά πλεγματικά σημεία πρέπει να βρίσκονται εκτός των κατοικημένων αστικών περιοχών ή εκτός οποιασδήποτε επιφάνειας που έχει αλλοιωθεί από αστικές κατασκευές (άσφαλτος, τσιμέντο κ.λπ.). Ως εκ τούτου, στην παρούσα διατριβή η UHI υπολογίστηκε για κάθε ώρα της ημέρας από το 2008 έως το 2017 και για κάθε πόλη σύμφωνα με την ακόλουθη εξίσωση 6.1:

$$\Delta T_i = T_{urb} - \overline{T_{rur}} \quad (6.1)$$

όπου το ΔT_i αντιπροσωπεύει την UHI σε κάθε πόλη σε °C, το T_{urb} αντιπροσωπεύει τη θερμοκρασία (°C) κοντά στην επιφάνεια του εδάφους (2m) για κάθε πλεγματικό σημείο του αστικού ιστού και για κάθε πόλη και ο όρος $\overline{T_{rur}}$ αποτελεί τη μέση θερμοκρασία (°C) κοντά στην επιφάνεια του εδάφους (2m) των αγροτικών/υπαίθριων πλεγματικών σημείων. Οι παραπάνω υπολογισμοί πραγματοποιήθηκαν και για διάρκεια της ημέρας



($\Delta T_{daytime}$) και για τη νύχτα ($\Delta T_{nighttime}$) από το 2007 έως το 2018. Επιπλέον, εξετάστηκε η συχνότητα των ΔT_i την ημέρα και τη νύχτα για κάθε μήνα της θερινής περιόδου σε κάθε πόλη. Ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στη συσχέτιση μεταξύ των τοπικών WTs και της αστικής υπερθέρμανσης (Urban Overheating - UO) η οποία οδηγεί στην αύξηση της έντασης της UHI. Για το σκοπό αυτό, υπολογίστηκε το ανώτερο 5% των ολικών μέγιστων διαφορών θερμοκρασίας (ΔT_{imax}) κατά τη διάρκεια της ημέρας και κατά τη διάρκεια της νύχτας, για τη χρονοσειρά των ετών 2007 έως 2018. Τέλος, ερευνήθηκε η χρονική διακύμανση και η χωρική κατανομή των μέσων τιμών της UO για κάθε μήνα κατά τη διάρκεια της θερινής περιόδου, για κάθε πόλη, ώστε να αποκαλυφθούν και να αξιολογηθούν οι θερμότερες περιοχές (hotspots) που συνδέονται με υψηλές τιμές της UO.

6.3 Αποτελέσματα

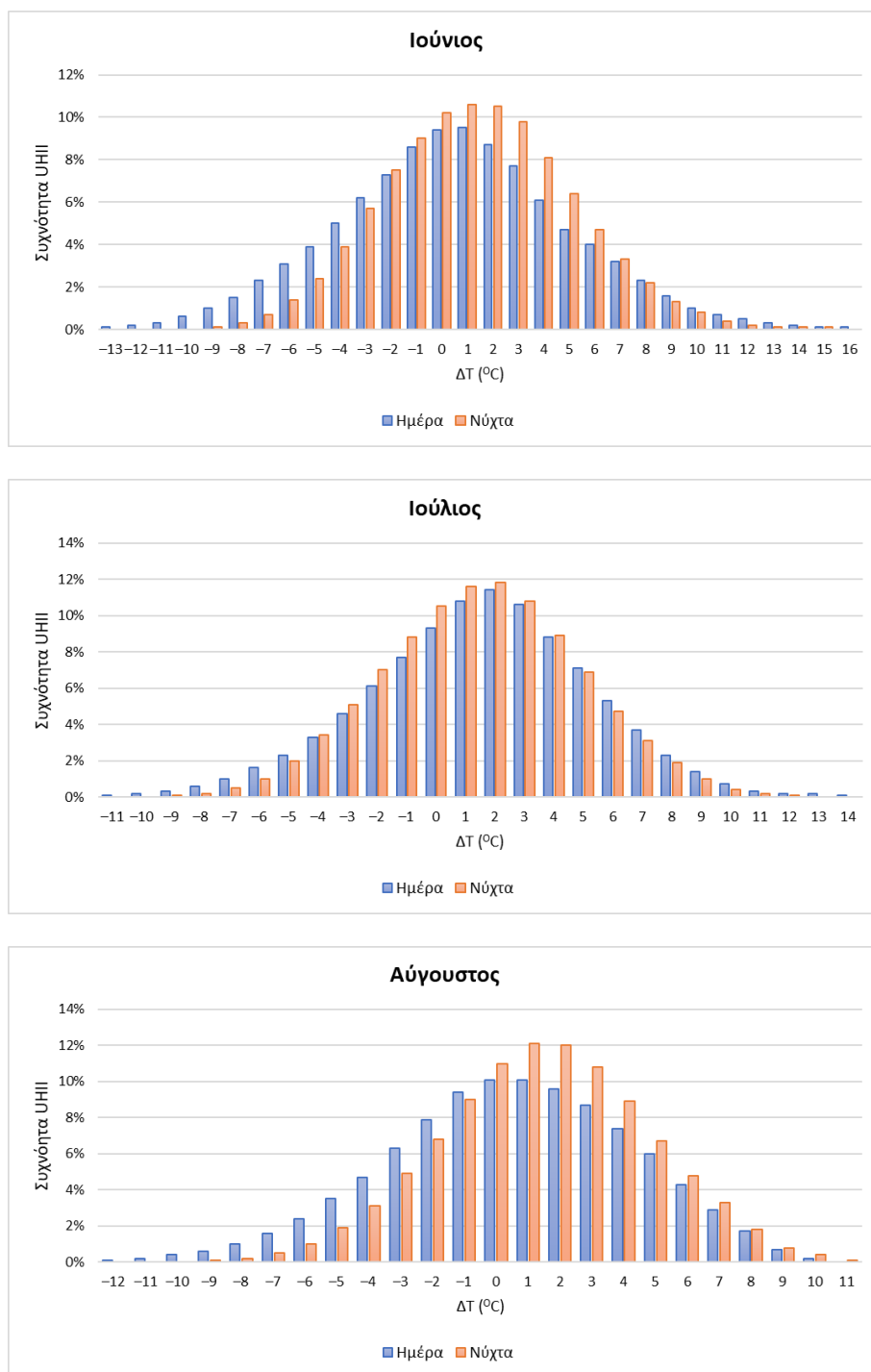
6.3.1 Η περίπτωση της Αθήνας

Κατανομή συχνοτήτων της έντασης της αστικής θερμικής νησίδας

Αρχικά, για την ευρύτερη περιοχή της Αθήνας, η κατανομή των συχνοτήτων της UHI (ΔT_i) κατά τη διάρκεια της ημέρας και της νύχτας εξετάστηκε για όλους τους μήνες κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού από το 2008 έως το 2017 (Σχήμα 6.1). Τον Ιούνιο, η ημερήσια ΔT_i ήταν θετική για το περίπου 53% και αρνητική για το 40% των ημερών. Όσον αφορά τη νύχτα του Ιουνίου, η ΔT_i εμφανίστηκε θετική για το 58% και αρνητική για το 31%. Τον Ιούλιο, η ΔT_i κατά τη διάρκεια της ημέρας και της νύχτας που υπολογίστηκε ήταν θετική για το περίπου 62%, σε αντίθεση με την αρνητική ΔT_i ημέρας και νύχτας, που έφτασε σε ποσοστό κοντά στο 28% των ημερών του μήνα. Τον Αύγουστο, η ημερήσια ΔT_i εμφανίζεται θετική για το 52% και αρνητική για το 32% των ημερών. Αντίθετα, το βράδυ του Αυγούστου, η ΔT_i βρέθηκε θετική στο 62% και αρνητική μόνο για το 27% των ημερών. Τέλος, για το μήνα Σεπτέμβριο, η ημερήσια ΔT_i ήταν θετική για το 46% και αρνητική για το 40%, ενώ η ΔT_i το βράδυ ήταν θετική για το 60% και αρνητική για το 31% των ημερών.

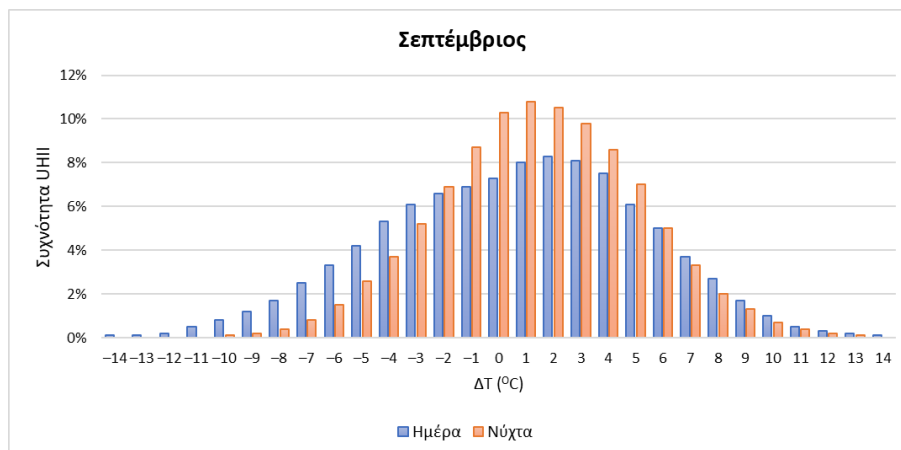
Συγκρίνοντας την κατανομή συχνοτήτων, οι υψηλότερες συχνότητες θετικής ΔT_i παρατηρήθηκαν κατά τη διάρκεια της νύχτας, ιδιαίτερα τον Ιούλιο και τον Αύγουστο (62%). Επιπλέον, σε όλες τις περιπτώσεις, οι θετικές τιμές της ΔT_i υπερτερούν των αρνητικών ΔT_i , ενώ τον Αύγουστο παρατηρήθηκε η μεγαλύτερη ποσοστιαία διαφορά μεταξύ θετικής και αρνητικής ΔT_i (62% έναντι 27% τη νύχτα).





Σχήμα 6.1. Κατανομή συχνότητας της έντασης της αστικής θερμικής νησίδας για κάθε μήνα στην περιοχή της Αθήνας κατά τη διάρκεια της ημέρας (μπλε μπάρες) και της νύχτας (πορτοκαλί μπάρες).





Σχήμα 6.1. (συνέχεια από την προηγούμενη σελίδα).

Από τα παραπάνω αποτελέσματα, είναι προφανές ότι το φαινόμενο της UHI είναι πιο έντονο κατά τη διάρκεια της νύχτας, ενισχύοντας τα αποτελέσματα και προηγούμενων μελετών, στις οποίες διαπιστώνεται η πεποίθηση ότι η UHI είναι πρωταρχικά ένα νυχτερινό φαινόμενο, κυρίως λόγω του γεγονότος ότι αργά το απόγευμα και το βράδυ στις αστικές περιοχές η διαδικασία την ψύξης καθυστερεί σε μεγάλο βαθμό σε αντίθεση με τις γύρω αγροτικές περιοχές. Για την περίπτωση της Αθήνας δε, προηγούμενες μελέτες της UHI αναφέρουν ότι οι υψηλότερες τιμές της έντασης του φαινομένου σχετίζονται κυρίως με τις νυχτερινές ώρες (Dandou et al. 2005, Martilli et al. 2003). Για παράδειγμα, οι Giannaros et al. (2013) οι οποίοι μελέτησαν τη UHI για την ευρύτερη περιοχή της Αθήνας χρησιμοποιώντας το μοντέλο Weather Research & Forecasting Model (WRF), ανίχνευσαν σημαντικά υψηλότερες νυχτερινές θερμοκρασίες για τη μητροπολιτική περιοχή της Αθήνας σε σύγκριση με τις κοντινές μη αστικές περιοχές. Η επιφάνεια της πόλης λειτουργεί ως αστική “ψήκτρα” καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας, ενώ κατά τη διάρκεια της νύχτας η επιφάνεια της πόλης φαίνεται να είναι πιο ζεστή από το περιβάλλον της, όπως σημειώνουν και οι Keramitsoglou et al. (2011).

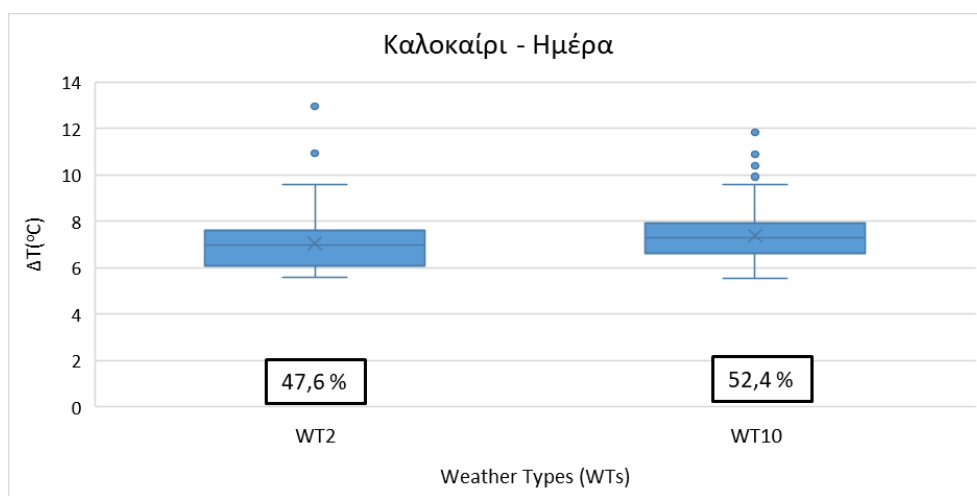
Συσχέτιση αστικής υπερθέρμανσης με τους κυριάρχους τύπους καιρού

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, προκειμένου να μελετηθεί η συσχέτιση μεταξύ των ημερήσιων τύπων καιρού και της αστικής υπερθέρμανσης υπολογίστηκε το 5% των υψηλότερων διαφορών θερμοκρασίας $5\% \Delta T_{imax}$ τόσο κατά τη διάρκεια της νύχτας (nighttime) όσο και κατά τη διάρκεια της ημέρας (daytime). Έπειτα, η ημερομηνία εμφάνισης κάθε τιμής αντιστοιχήθηκε με τον επικρατούντα τύπο καιρού την εκάστοτε



μέρα. Για την πόλη της Αθήνας παρουσιάζονται οι συσχετίσεις της UO με τους επικρατέστερους WTs τόσο κατά τη διάρκεια της νύχτας (nighttime) όσο και κατά τη διάρκεια της ημέρας (daytime) στα Σχήματα 6.2 και 6.3 αντίστοιχα.

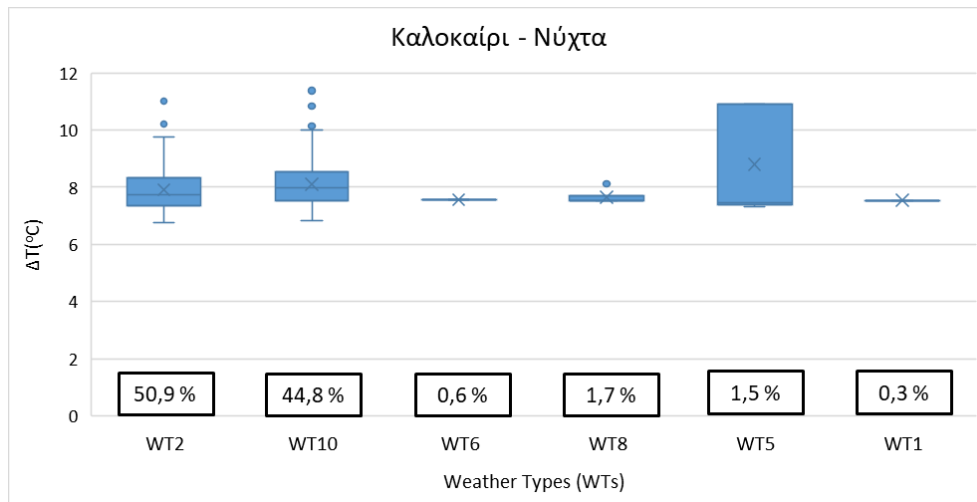
Είναι προφανές ότι οι καιρικές συνθήκες των WT2 και WT10 είναι οι μόνες κατά τη διάρκεια της ημέρας, που ενισχύουν την αστική υπερθέρμανση. Πιο συγκεκριμένα, ο WT10 συνεισέφερε περίπου το 52,4% και ο WT2 το 47,6% του χρόνου (Σχήμα 6.2). Η διάμεση τιμή του μεγέθους της UO κατά τη διάρκεια της ημέρας και κατά τη διάρκεια του WT10 εκτιμήθηκε ότι είναι ίση με 7,4 °C, συγκριτικά υψηλότερη κατά την παρουσία του WT2 (6,9 °C).



Σχήμα 6.2. Συσχέτιση του ανώτατου 5% των ημερήσιων τιμών ΔT (°C) με τους τύπους καιρού για την περιοχή της Αθήνας.

Κατά την εξέταση της συσχέτισης μεταξύ του μεγέθους της UO και των WTs τη νύχτα, παρατηρήθηκε ότι η αστική υπερθέρμανση συσχετίστηκε με περισσότερα από δύο WTs. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.3, οι WT2, WT10, WT8, WT6, WT5 και WT1 σχετίζονται με την UO κατά τη διάρκεια της νύχτας. Ωστόσο, ο WT2 και ο WT10 παρουσιάζονται ως οι πιο κυρίαρχοι. Πιο συγκεκριμένα, ο WT10 σχετίζεται με ποσοστό 44,8% και ο WT2 με ποσοστό 50,9% με την UO κατά τη διάρκεια του θέρους, ακολουθούμενοι από τον WT8 (1,7%), τον WT5 (1,5%), τον WT6 (0,6%) και τον WT1 (0,3%). Επιπλέον, οι εκτιμήσεις για τη διάμεση τιμή του μεγέθους της UO κατά τη διάρκεια της νύχτας ήταν 8 °C για τον WT2 και 8,1 °C για τον WT10, ελαφρώς υψηλότερες σε σύγκριση με εκείνες κατά τη διάρκεια της ημέρας. Συνοψίζοντας, παρατηρείται ότι τόσο κατά τη διάρκεια της ημέρας όσο και κατά τη διάρκεια της νύχτας, η UO ενισχύεται από τις τοπικές κυκλοφορίες των τύπων WT10 και WT2.





Σχήμα 6.3. Συσχέτιση του ανώτατου 5% των νυχτερινών τιμών ΔT ($^{\circ}\text{C}$) με τους τύπους καιρού για την περιοχή της Αθήνας.

Τα παραπάνω αποτελέσματα δεν αποτελούν έκπληξη, καθώς ο WT2 και ο WT10 αποτελούν τους κυρίαρχους τυπικούς θερινούς WTs για την περίπτωση της Αθήνας. Σύμφωνα με τους Kassomenos et al. (2022), οι θερμοί WTs, είναι εκείνοι που παρατηρούνται πιο συχνά στην Αθήνα ιδιαίτερα τα τελευταία χρόνια και κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού, καθώς επίσης σύμφωνα με τα αποτελέσματά τους, τα υψηλότερα επίπεδα UO συσχετίστηκαν με θερμές και υγρές συνθήκες κατά τη διάρκεια της ημέρας και με ξηρές θερμές συνθήκες τη νύχτα. Επιπλέον, οι Kassomenos and Katsoulis (2006) συμπέραναν ότι υψηλές τιμές της UO για την Αθήνα, σχετίζονται με παρόμοιες συνθήκες με αυτές των WT2 και WT10 (συνδυασμός του αντικυκλώνα των Αζορών και του θερμικού χαμηλού της ΝΔ Ασίας).

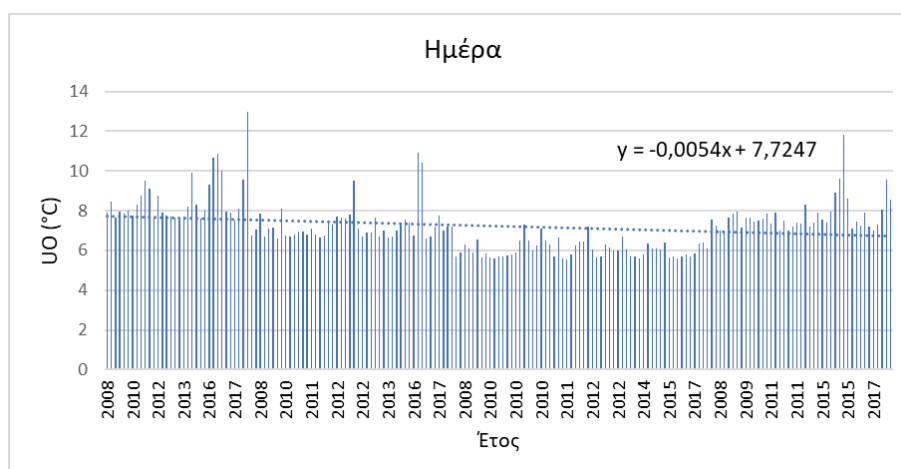
Χρονική και χωρική κατανομή αστικής υπερθέρμανσης

Η χρονική διακύμανση της UO για την περίοδο από το 2008 έως το 2017 παρουσιάζεται στο παρακάτω διαγράμματα κατά τη διάρκεια της ημέρας (Σχήμα 6.4) και κατά τη διάρκεια της νύχτας (Σχήμα 6.5). Και για τις δύο περιπτώσεις, εξετάστηκε η πιθανή ύπαρξη στατιστικά σημαντικών (95% επίπεδο εμπιστοσύνης) γραμμικών τάσεων χρησιμοποιώντας το τεστ Mann-Kendall (Kendall 1975).

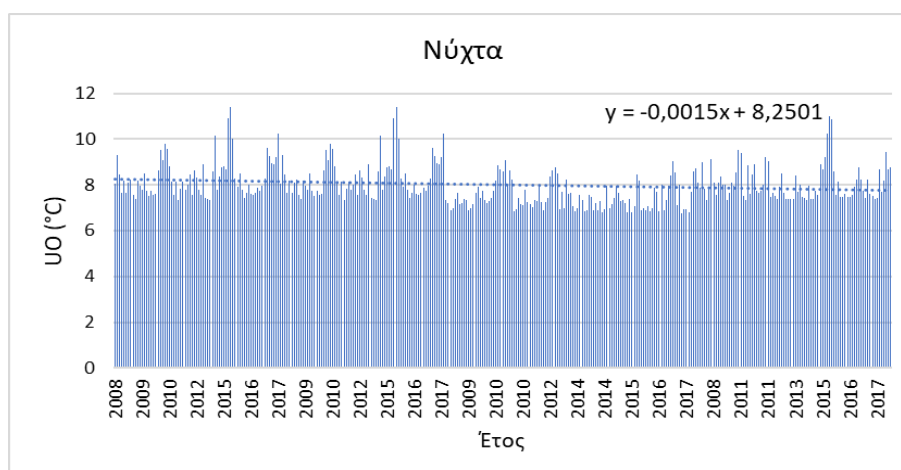
Και στις δύο περιπτώσεις, αρνητικές στατιστικά σημαντικές γραμμικές τάσεις εντοπίζονται στη διαχρονική διακύμανση της UO, για την περίοδο 2008-2018. Η μείωση αυτή ενδεχομένως να αντικατοπτρίζει την σημαντική οικονομική κρίση που βίωσε η Ελλάδα, ως συνέπεια της παγκόσμιας οικονομικής ύφεσης, κυρίως από το 2008 και έπειτα. Κατά την περίοδο αυτή, στην Ελλάδα και ιδιαίτερα στην Αθήνα, οι



ιδιωτικές συγκοινωνίες, η κατανάλωση ενέργειας και η οικοδομική δραστηριότητα περιορίστηκαν σημαντικά, παράγοντες που πιθανώς συνέβαλαν σημαντικά στην σταθεροποίηση και μείωση της UO.



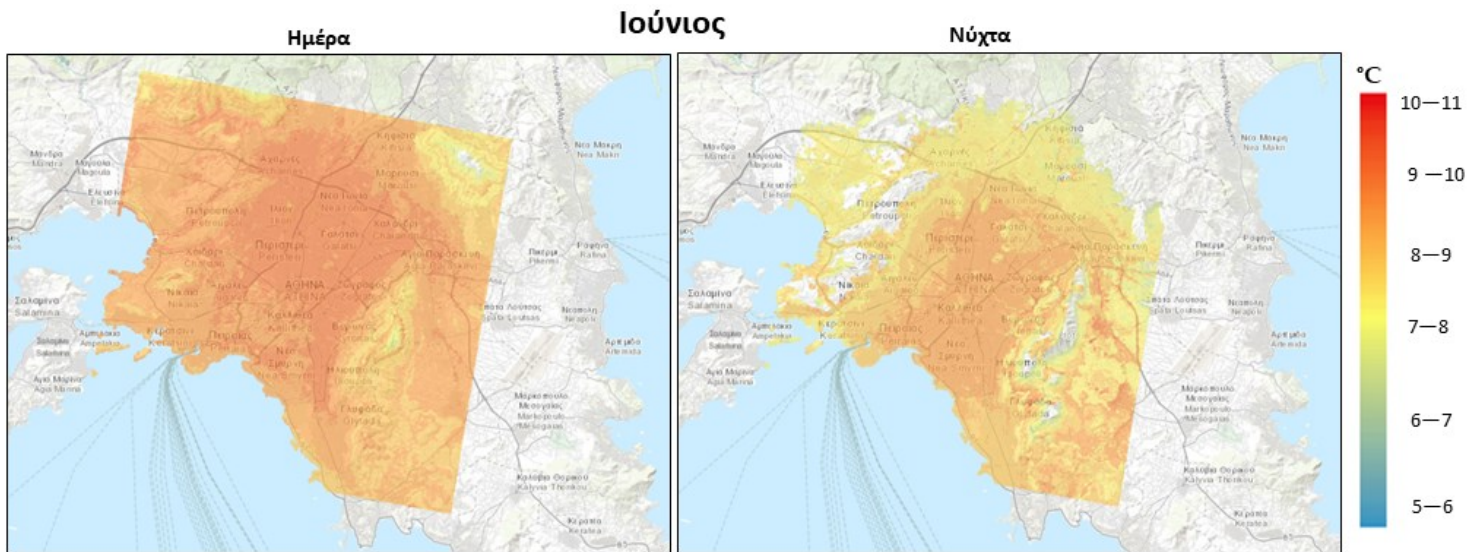
Σχήμα 6.4. Η χρονική διακύμανση της αστικής υπερθέρμανσης για την περίοδο από το 2008 έως το 2017 κατά τη διάρκεια της ημέρας για την περιοχή της Αθήνας.



Σχήμα 6.5. Η χρονική διακύμανση της αστικής υπερθέρμανσης για την περίοδο από το 2008 έως το 2017 κατά τη διάρκεια της νύχτας για την περιοχή της Αθήνας.

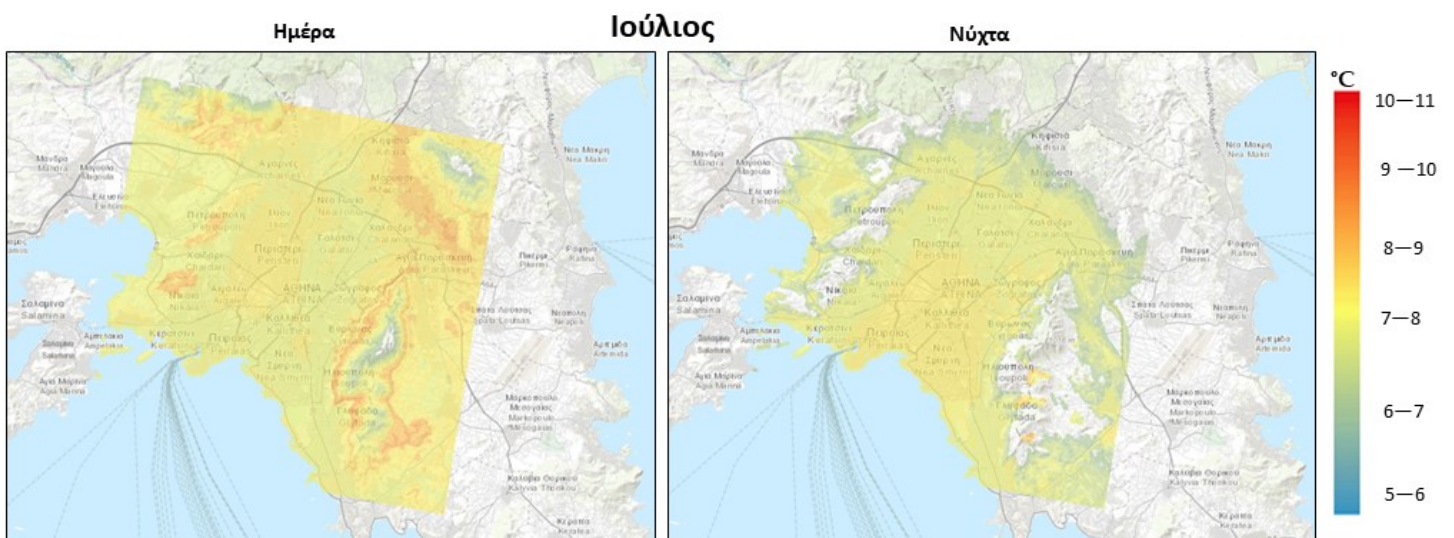
Όσον αφορά τα χωρικά χαρακτηριστικά (hot-spots) των μέσων τιμών της UO, αυτά απεικονίζονται στα παρακάτω σχήματα για κάθε μήνα κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού (ημέρα και νύχτα) από το 2008 έως το 2017, και για κάθε σημείο πλέγματος του αστικού ιστού που έχει τιμή που να ανήκει στο ανώτερο 5% ΔT_{imax} . Τα σημεία απουσίας τιμών, παρουσιάζονται λευκά δίχως κάποια χρωματική απόχρωση.





Σχήμα 6.5. Χωρική κατανομή της αστικής υπερθέρμανσης για την Αθήνα για το μήνα Ιούνιο κατά τη διάρκεια της ημέρας (αριστερά) και της νύχτας (δεξιά).

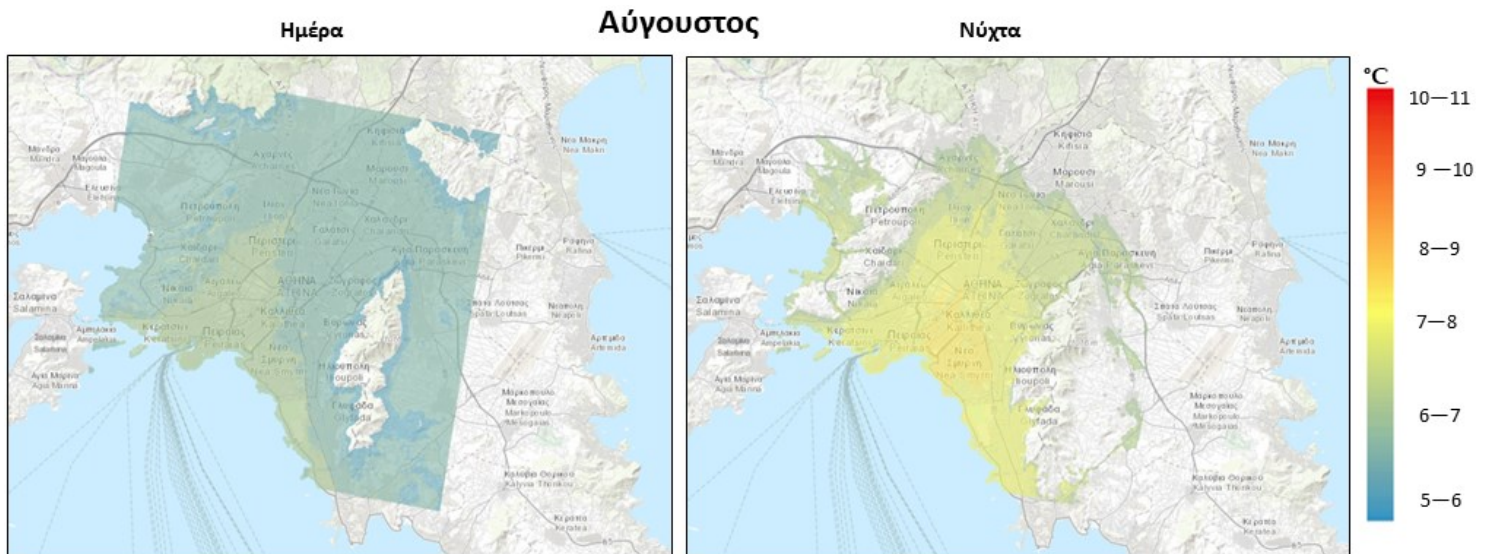
Είναι προφανές ότι τον Ιούνιο και κατά τη διάρκεια της ημέρας, η UO επεκτείνεται σε ολόκληρη τη μητροπολιτική περιοχή της Αθήνας, συμπεριλαμβανομένου του αστικού κέντρου της πόλης της, του Πειραιά, των βορειοδυτικών προαστιακών περιοχών και των μη αστικών περιοχών της Ανατολικής Αττικής. Το μέγεθος της UO σε αυτές τις τοποθεσίες κυμαίνεται μεταξύ 8 και 11 °C κατά μέσο όρο. Κατά τη διάρκεια της νύχτας του Ιουνίου, η UO περιορίζεται κυρίως στην αστική περιοχή της Αθήνας, τον Πειραιά και ορισμένες προαστιακές περιοχές στη νοτιοανατολική Αττική (Σχήμα 6.5).



Σχήμα 6.6. Χωρική κατανομή της αστικής υπερθέρμανσης για την Αθήνα για το μήνα Ιούλιο κατά τη διάρκεια της ημέρας (αριστερά) και της νύχτας (δεξιά).



Τον Ιούλιο, αστικά σημεία υπερθέρμανσης (hot-spots) εντοπίστηκαν κυρίως κοντά σε προαστιακές περιοχές όπως ο Υμηττός στην Ανατολική Αττική, βόρεια κοντά στο όρος Πεντέλη (Μεσόγεια) και δυτικά κοντά στην Πάρνηθα και στο όρος Αιγάλεω (Πετρούπολη και Νίκαια). Το μέγεθος της UO και σε αυτές τις τοποθεσίες κυμαίνεται μεταξύ 8 και 11 °C κατά μέσο όρο. Τις νυχτερινές ώρες του Ιουλίου, το υψηλότερο μέγεθος της UO παρουσιάζεται στους κεντρικούς δήμους της μητροπολιτικής περιοχής της Αθήνας (πόλη Αθηνών, Πειραιάς, Μοσχάτο, Καλλιθέα, Ν. Σμύρνη) (Σχήμα 6.6).

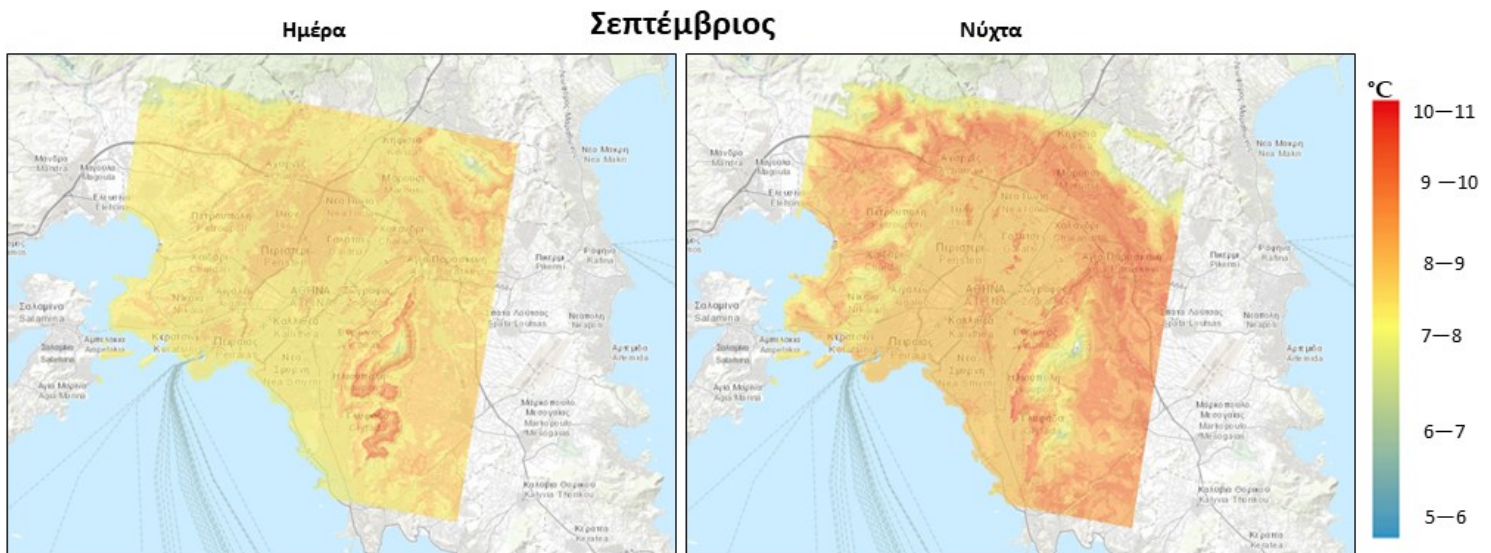


Σχήμα 6.7. Χωρική κατανομή της αστικής υπερθέρμανσης για την Αθήνα για το μήνα Αύγουστο κατά τη διάρκεια της ημέρας (αριστερά) και της νύχτας (δεξιά).

Αξιοσημείωτη είναι η μείωση, του μεγέθους της UO κατά τη διάρκεια της ημέρας του Αυγούστου. Hot-spots κατά τη διάρκεια της ημέρα εντοπίζονται κυρίως δυτικά της αστικής περιοχής της Αθήνας (Αιγάλεω), ενώ τα νυχτερινά hot-spots τον Αύγουστο εμφανίζονται στους κεντρικούς δήμους της ευρύτερης περιοχής της Αθήνας (Σχήμα 6.7).

Παρόμοιο μοτίβο παρατηρείται και για το μήνα Σεπτέμβριο, αν και κατά τη διάρκεια της νύχτας τα hot-spots επεκτείνονται κυρίως προς τα ανατολικά προάστια και στις αγροτικές περιοχές (Μεσόγεια), καθώς και το μέγεθος της UO σημειώνει σημαντική αύξηση, σε σύγκριση με τους μήνες Ιούλιο και Αύγουστο (Σχήμα 6.8).





Σχήμα 6.8. Χωρική κατανομή της αστικής υπερθέρμανσης για την Αθήνα για το μήνα Ιούνιο κατά τη διάρκεια της ημέρας (αριστερά) και της νύχτας (δεξιά).

Συνοψίζοντας, κατά τη διάρκεια της ημέρας, σε όλες τις περιπτώσεις hot-spots της UO εντοπίζονται κυρίως σε προάστια και αγροτικές περιοχές, όπως το Αιγάλεω και τα Μεσόγεια, ενώ οι μέγιστες τιμές της UO εμφανίζονται κυρίως τον Ιούνιο και το Σεπτέμβριο. Από την άλλη πλευρά, κατά τη διάρκεια της νύχτας, η παρουσία των hot-spots της UO σχετίζονται με αστικές κυρίως περιοχές, συμπεριλαμβανομένου του κέντρου της Αθήνας και τους κεντρικούς δήμους της ευρύτερης περιοχής της Αθήνας. Ως προς το μέγεθος των hot-spots, κατά τη διάρκεια της νύχτας παρουσιάζουν παρόμοια συμπεριφορά με τα ημερήσια hot-spots, φτάνοντας τις μέγιστες τιμές τους στις αρχές/τέλη του καλοκαιριού. Τα ευρήματα αυτά έρχονται σε πλήρη συμφωνία με εκείνα των Giannaros et al. (2013), οι οποίοι διαπίστωσαν την ύπαρξη τριών ημερήσια hot-spots στην περιοχή των Μεγάρων, στην Ελευσίνα και στα Μεσόγεια, ενώ κατά τη διάρκεια της νύχτας, συμπέραναν ότι το κέντρο της πόλης εμφανίζεται εμφανώς πιο θερμό από το αγροτικό περιβάλλον του. Σε παρόμοια συμπεράσματα καταλήγουν και οι Keramitsoglou et al. (2011). Ο συνδυασμός της τοπογραφίας και της επιφανειακής κάλυψης παίζει καθοριστικό ρόλο στην εμφάνιση και στην ένταση των hot-spots για την περιοχή της Αθήνας. Για παράδειγμα, το όρος Υμηττός, το οποίο βρίσκεται ανατολικά των Μεσογείων και συνορεύει βόρεια με τις πλαγιές του όρου Πεντέλης, περιλαμβάνει περιοχές με κυρίως αραιή και χαμηλή βλάστηση, όπως ελιές και αμπέλια, βιομηχανικές ζώνες, καθώς και περιοχές που καλύπτονται με γυμνό έδαφος, όπως η ευρύτερη περιοχή που καλύπτει τον Διεθνή Αερολιμένα Αθηνών «Ελ. Βενιζέλος». Τέτοιες ημι-αγροτικές εκτάσεις αρχίζουν να θερμαίνονται ταχύτατα κατά τη διάρκεια



της ημέρας και να ψύχονται γρήγορα μετά τη δύση του ηλίου λόγω της ανοιχτής έκθεσής τους και των υλικών χαμηλής θερμοχωρητικότητας, από τις οποίες αποτελούνται. Αντίστροφα, η μεγαλύτερη απελευθέρωση αποθηκευμένης θερμότητας από αστικές επιφάνειες όπως το σκυρόδεμα και η άσφαλτος προκαλεί σημαντική μείωση του ρυθμού ψύξης του πυκνοκατοικημένου αστικού περιβάλλοντος. Αξίζει να σημειωθεί ότι οι υψηλές επιφανειακές θερμοκρασίες κατά τη διάρκεια των κυμάτων καύσωνα ενδέχεται να μειώσουν τον εντοπισμό αυτών των hot-spots.

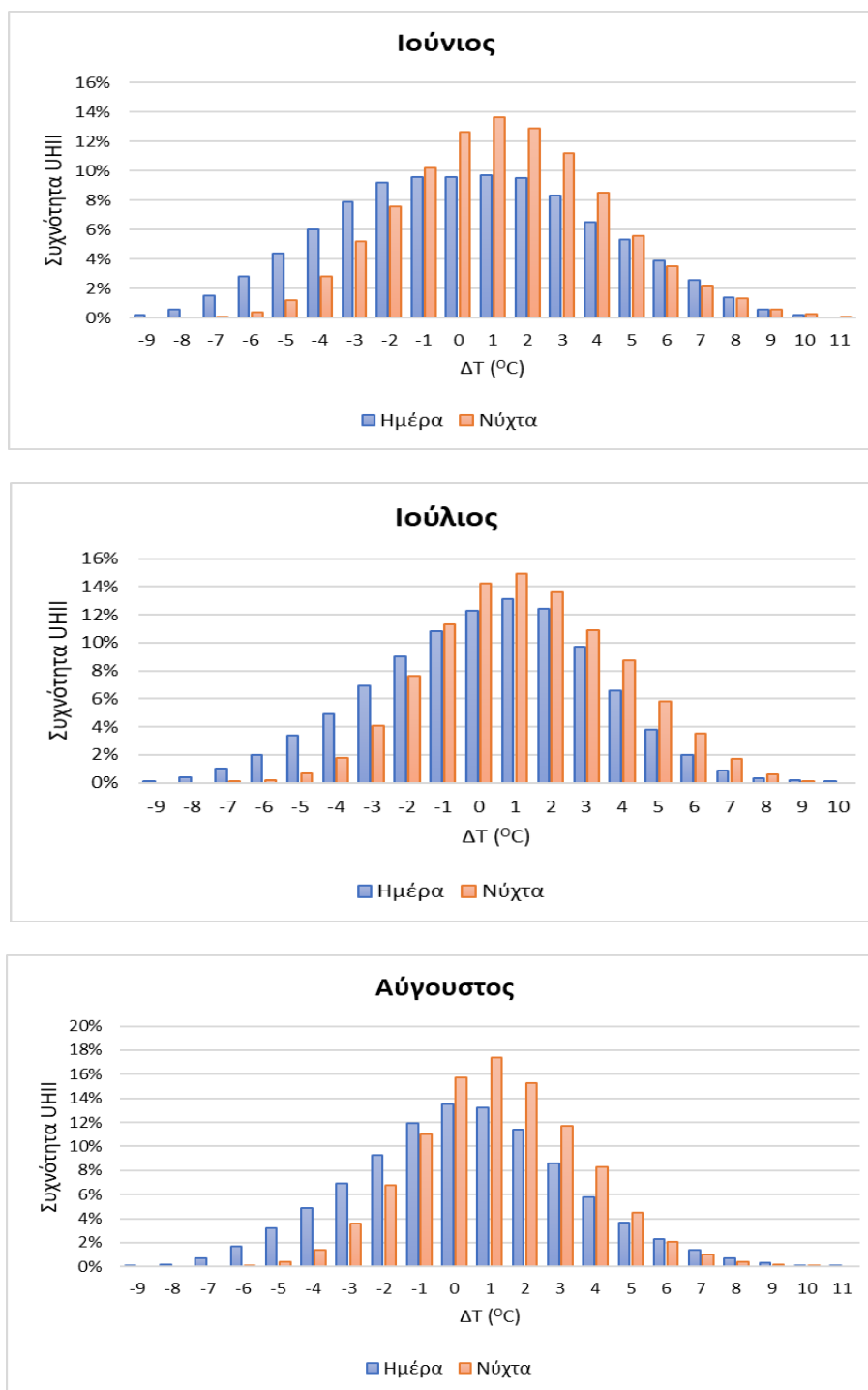
6.3.2 Η περίπτωση της Βαρκελώνης

Κατανομή συχνοτήτων της έντασης της αστικής θερμικής νησίδας

Και για την περίπτωση της πόλης της Βαρκελώνης, η κατανομή των συχνοτήτων του UHI (ΔT_i) κατά τη διάρκεια της ημέρας και της νύχτας εξετάστηκε για όλους τους μήνες κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού από το 2008 έως το 2017 (Σχήμα 6.9). Σύμφωνα με τα αποτελέσματα, προκύπτει ότι για το μήνα Ιούνιο, η ημερήσια ΔT_i ήταν θετική για το ακριβώς 48% και αρνητική για το περίπου 42% των ημερών του μήνα. Κατά τη διάρκεια της νύχτας του Ιουνίου, η ΔT_i εμφανίστηκε θετική για το 59,8% και αρνητική για μόλις το 27% των ημερών. Όσον αφορά τον Ιούλιο, η ΔT_i κατά τη διάρκεια της ημέρας που υπολογίστηκε ήταν θετική για το περίπου 49% και αρνητική για το 38,5% των ημερών. Πολύ διαφορετικά αποτελέσματα κατά τη διάρκεια της νύχτας του Ιουλίου, όπου η ΔT_i κατά τη διάρκεια της ημέρας υπολογίστηκε θετική για το περίπου 60% και αρνητική για το 25% των ημερών. Τον Αύγουστο, η ημερήσια ΔT_i εμφανίζεται θετική για το 47,6% και αρνητική για το 39% των ημερών. Αντίθετα, το βράδυ του Αυγούστου, η ΔT_i βρέθηκε θετική στο 61% και αρνητική μόνο για το 23%. Τέλος, για το μήνα Σεπτέμβριο, η ημερήσια ΔT_i ήταν θετική για το 50% και αρνητική για το 38%, ενώ η νυχτερινή ΔT_i ήταν θετική για το 59% και αρνητική για το 27,6% των ημερών.

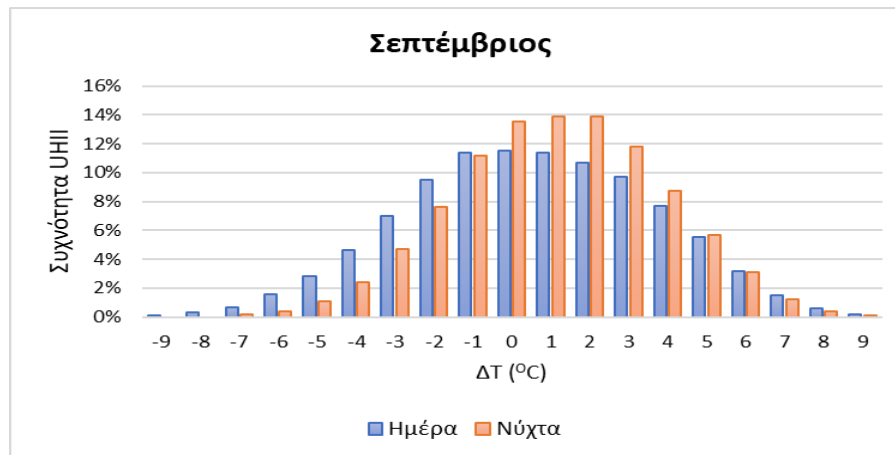
Συγκρίνοντας τις παραπάνω κατανομές συχνοτήτων, οι υψηλότερες συχνότητες θετικής ΔT_i υπολογίστηκαν κατά τη διάρκεια της νύχτας, ιδιαίτερα τον Ιούλιο και τον Αύγουστο (60 με 61%). Και στην περίπτωση την πόλης της Βαρκελώνης, οι θετικές τιμές της ΔT_i υπερτερούν των αρνητικών ΔT_i , ενώ τον Αύγουστο παρατηρήθηκε η μεγαλύτερη ποσοστιαία διαφορά μεταξύ θετικής και αρνητικής ΔT_i (61% έναντι 23%).





Σχήμα 6.8. Κατανομή συχνότητας της έντασης της αστικής θερμικής νησίδας για κάθε μήνα στην περιοχή της Βαρκελώνης κατά τη διάρκεια της ημέρας (μπλε μπάρες) και της νύχτας (πορτοκαλί μπάρες).





Σχήμα 6.8. (συνέχεια από την προηγούμενη σελίδα).

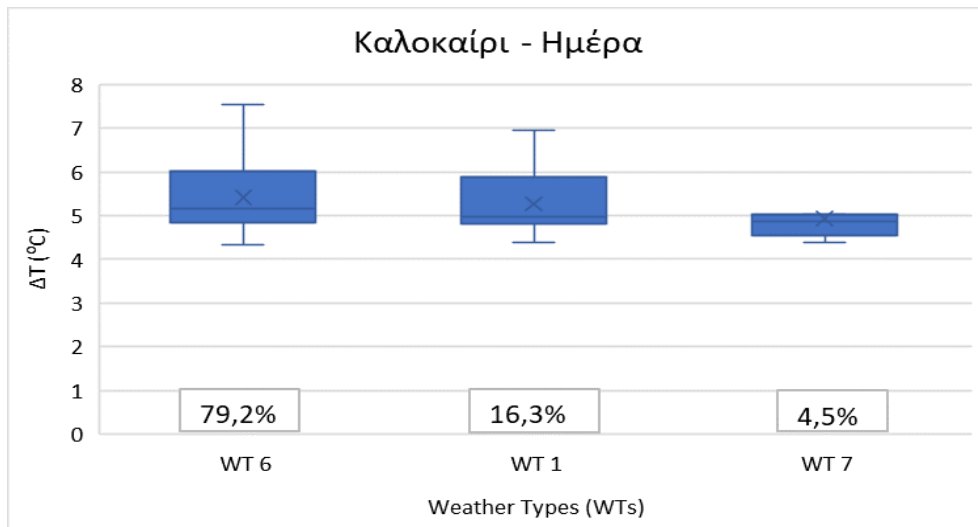
Τα παραπάνω αποτελέσματα, ενισχύουν περαιτέρω την αντίληψη ότι το φαινόμενο της UHI σε μεγάλες μητροπόλεις είναι κυρίως νυχτερινό. Για την πόλη της Βαρκελώνης δε, ο μετριασμός της έντασης της UHI ειδικά κατά τη διάρκεια της ημέρας και στο επίπεδο της οροφής των κτηρίων, μπορεί να αποδοθεί σύμφωνα με τους Salvati et al. (2017) στη θαλάσσια αύρα, η παρουσία της οποίας την ημέρα είναι ισχυρή. Επιπλέον, οι Arellano and Roca (2021) μελετώντας το φαινόμενο UHI για τη μητροπολιτική περιοχή της Βαρκελώνης (35 δήμοι, 636 km² και περίπου 3,3 εκατομμύρια κάτοικοι), καταλήγουν στο συμπέρασμα ότι, κατά τη διάρκεια της νύχτας η UHI γίνεται πιο εμφανής λόγω της μεγαλύτερης θερμικής αδράνειας των υλικών που χρησιμοποιούνται στον αστικό ιστό, ενώ η χαμηλή ψυκτική ικανότητα των αστικών δομικών υλικών επηρεάζει αρνητικά την άνεση και την υγεία των κατοίκων των πόλεων ειδικά σε περίπτωση καυσώνων.

Συσχέτιση αστικής υπερθέρμανσης με τους κυριάρχους τύπους καιρού

Με στόχο τη συσχέτιση ημερήσιων WTs και της UO για την πόλη της Βαρκελώνης, υπολογίστηκε το 5% των υψηλότερων διαφορών θερμοκρασίας 5% ΔT_{imax} τόσο κατά τη διάρκεια της νύχτας (nighttime) όσο και κατά τη διάρκεια της ημέρας (daytime). Έπειτα, η ημερομηνία εμφάνισης κάθε τιμής αντιστοιχήθηκε με τον επικρατούντα τύπο καιρού την εκάστοτε μέρα.

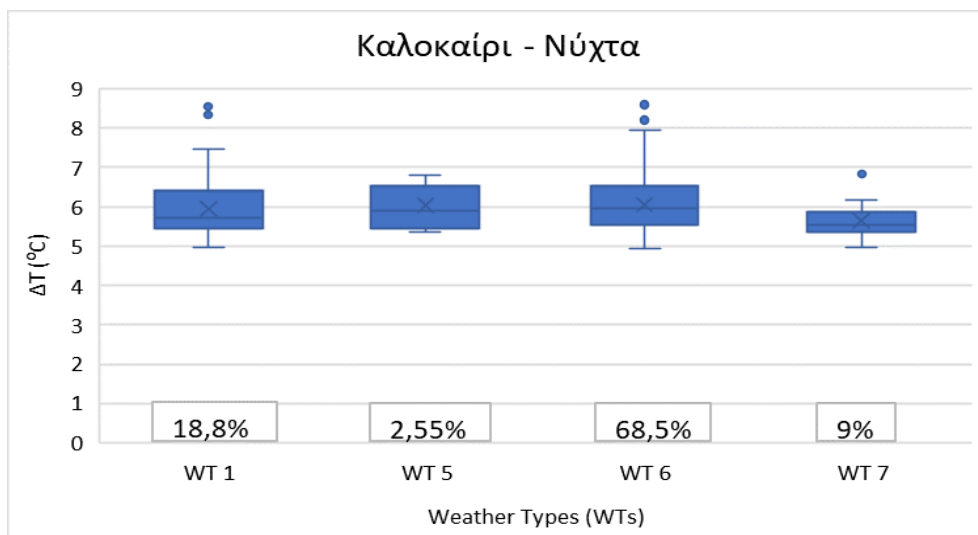
Κατά τη διάρκεια της ημέρας, τις ημερομηνίες εμφάνισης της UO, επικρατούν οι τύποι καιρού WT6, WT7 και WT1. Ο κυρίαρχος με τη μεγαλύτερη συχνότητα εμφάνισης 79,2% και τη μεγαλύτερη θερμοκρασιακή επίδραση είναι ο WT6 με μέση τιμή 5,5°C (Σχήμα 6.9).





Σχήμα 6.9. Συσχέτιση του ανώτατου 5% των ημερήσιων τιμών ΔT ($^{\circ}\text{C}$) με τους τύπους καιρού για την περιοχή της Βαρκελώνης.

Κατά τη διάρκεια της νύχτας, έχουμε την εμφάνιση των τύπων καιρού που επικρατούν την ημέρα WT6, WT1, WT7 με την προσθήκη του WT5. Ωστόσο, το ποσοστό εμφάνισης του WT6 μειώνεται από το 79,2% σε 68,5% ενώ των WT1 και WT7 αυξάνεται από 16,3% σε 18,8% και από 4,5% σε 9% αντιστοίχως. Επιπλέον, η επίδραση στην θερμοκρασία όλων των τύπων καιρού είναι μεγαλύτερη την νύχτα από την ημέρα. Πιο συγκεκριμένα, ο WT6 από 5,5 $^{\circ}\text{C}$ σε 6,1 $^{\circ}\text{C}$, ο WT1 από 5,4 $^{\circ}\text{C}$ σε 6 $^{\circ}\text{C}$ και ο WT7 από 4,9 $^{\circ}\text{C}$ σε 5,8 $^{\circ}\text{C}$ (Σχήμα 6.10).



Σχήμα 6.10. Συσχέτιση του ανώτατου 5% των νυχτερινών τιμών ΔT ($^{\circ}\text{C}$) με τους τύπους καιρού για την περιοχή της Βαρκελώνης.

Όπως αναδείχθηκε και παραπάνω, οι WT1, WT6 και WT7, αποτελούν τους κυρίαρχους τυπικούς θερινούς WTs για την ευρύτερη περιοχή της Βαρκελώνης. Και οι τρεις WTs

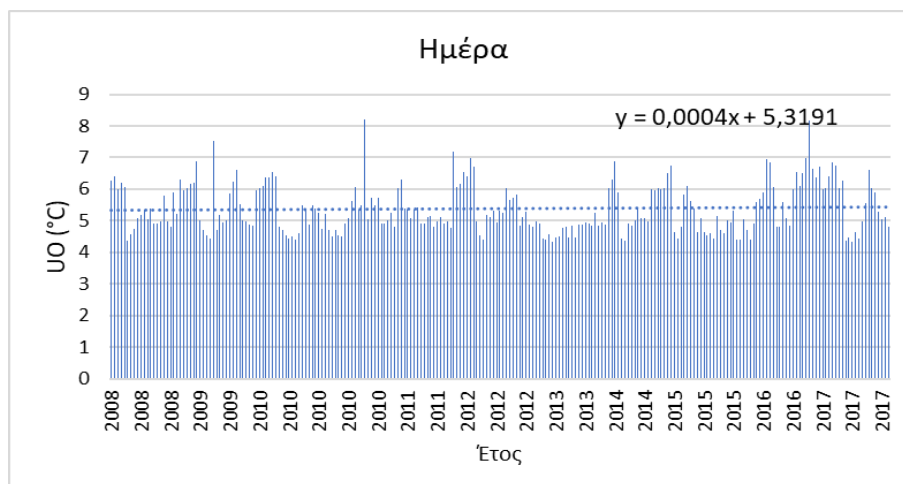


συνδέουν την παρουσία τους με υψηλές θερμοκρασίες, μέτριας έντασης ανέμους και μέτρια νεφοκάλυψη. Ο WT1 ταυτίζεται επίσης και με νοτιοδυτικές ροές ενώ ο WT6 με βόρειες ροές, οι οποίες ενδέχεται να ευθύνονται για το “μπλοκάρισμα” της θαλάσσιας αύρας κυρίως τις πρωινές ώρες, η οποία θαλάσσια αύρα όπως αναφέρθηκε και παραπάνω παίζει κρίσιμο ρόλο στο μετριασμό της UHI, κυρίως κατά τη διάρκεια πολύ θερμών ημερών (Lehoczky et al. 2017).

Χρονική και χωρική κατανομή αστικής υπερθέρμανσης

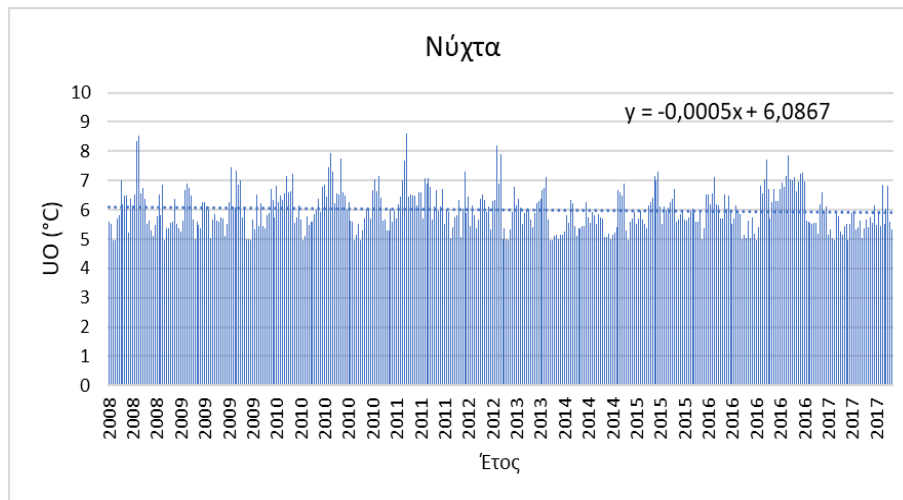
Η χρονική διακύμανση της UO για την περίοδο από το 2008 έως το 2017 παρουσιάζεται στο παρακάτω διαγράμμα κατά τη διάρκεια της ημέρας (Σχήμα 6.11) και κατά τη διάρκεια της νύχτας (Σχήμα 6.12) για την ευρύτερη περιοχή της Βαρκελώνης. Και για τις δύο περιπτώσεις, εξετάστηκε η πιθανή ύπαρξη στατιστικά σημαντικών (95% επίπεδο εμπιστοσύνης) γραμμικών τάσεων χρησιμοποιώντας το τεστ Mann-Kendall (Kendall 1975).

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα, στην περίπτωση της ημέρας υπολογίστηκε μια εξαιρετικά μικρή αύξηση, μη στατιστικά σημαντική (Σχήμα 6.11), ενώ για την περίπτωση της νύχτας διαπιστώθηκε μια αρνητικά στατιστικά σημαντική γραμμική τάση στη διαχρονική διακύμανση της UO, για την περίοδο 2008-2018 (Σχήμα 6.12). Η μείωση αυτή ενδεχομένως να οφείλεται στη στασιμότητα και στην πληθυσμιακή μείωση της πόλης και των γειτονικών δήμων της τα τελευταία χρόνια, σύμφωνα με τους Martin-Vide and Moreno-Garcia (2020).



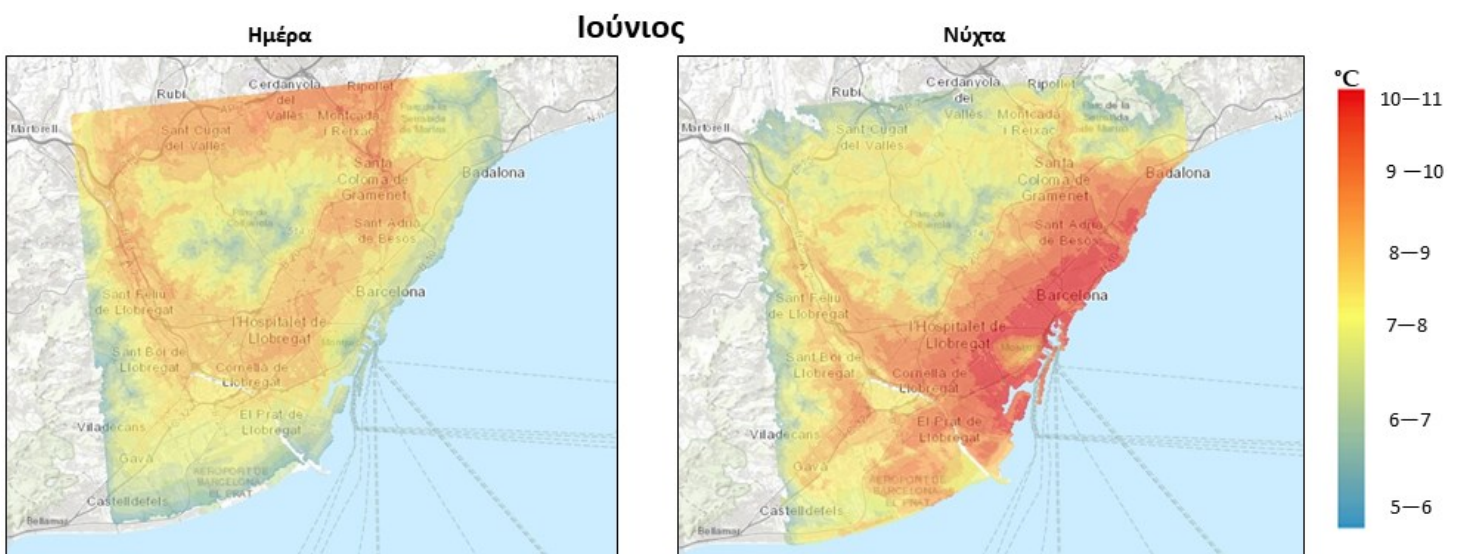
Σχήμα 6.11. Η χρονική διακύμανση της αστικής υπερθέρμανσης για την περίοδο από το 2008 έως το 2017 κατά τη διάρκεια της ημέρας για την περιοχή της Βαρκελώνης.





Σχήμα 6.12. Η χρονική διακύμανση της αστικής υπερθέρμανσης για την περίοδο από το 2008 έως το 2017 κατά τη διάρκεια της νύχτας για την περιοχή της Βαρκελώνης.

Εν συνεχεία, τα χωρικά χαρακτηριστικά (hot-spots) των μέσων τιμών της UO, απεικονίζονται στο Σχήμα 7 για κάθε μήνα κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού (ημέρα και νύχτα) από το 2008 έως το 2017, για κάθε σημείο πλέγματος του αστικού ιστού που έχει τιμή που να ανήκει στο ανώτερο 5% ΔT_{imax} . Τα σημεία που δεν είχαν τιμές παρουσιάζονται λευκά δίχως κάποια χρωματική απόχρωση.

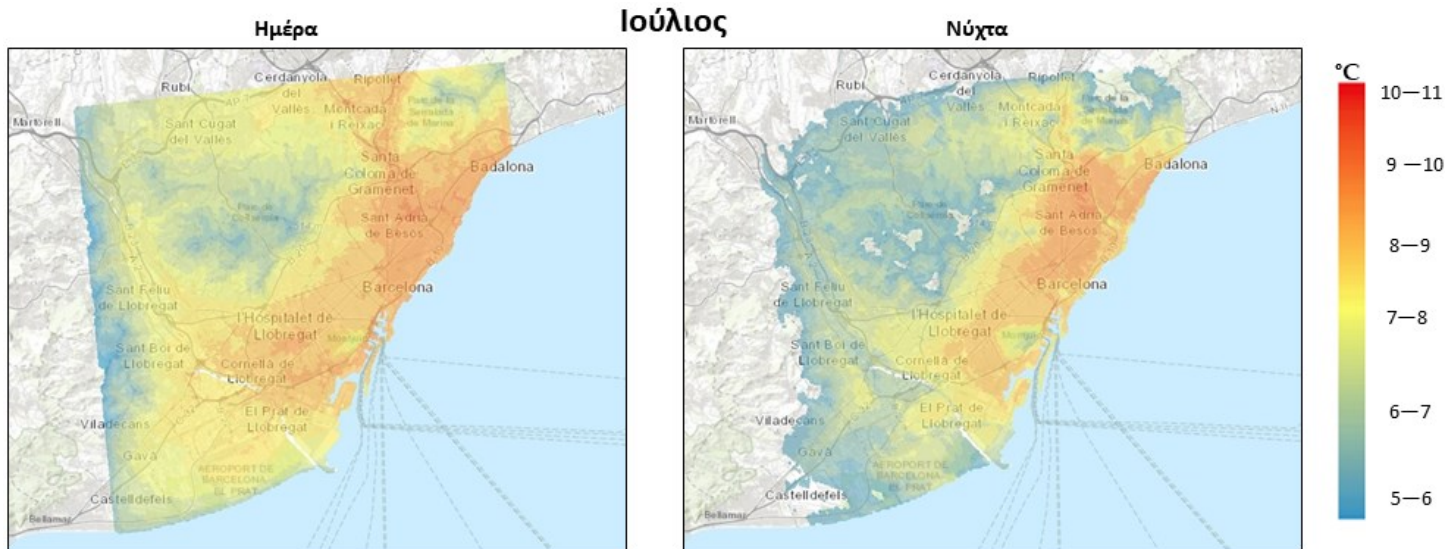


Σχήμα 6.13. Χωρική κατανομή της αστικής υπερθέρμανσης για την Βαρκελώνη για το μήνα Ιούνιο κατά τη διάρκεια της ημέρας (αριστερά) και της νύχτας (δεξιά).

Το μήνα Ιούνιο την ημέρα δεν υπάρχουν τιμές υπερθέρμανσης στις παράκτιες περιοχές νοτιοδυτικά του αστικού ιστού. Οι υψηλότερες τιμές εντοπίζονται κυρίως στις περιοχές περίξ του φυσικού πάρκου Serra de Collserola, που έχει έκταση 84,65 km² και αποτελεί ένα από τα μεγαλύτερα μητροπολιτικά πάρκα στον κόσμο. Περιλαμβάνουν κυρίως τις αστικές περιοχές βόρεια της πόλης, τις περιοχές Sant Adrià de Besòs, Santa

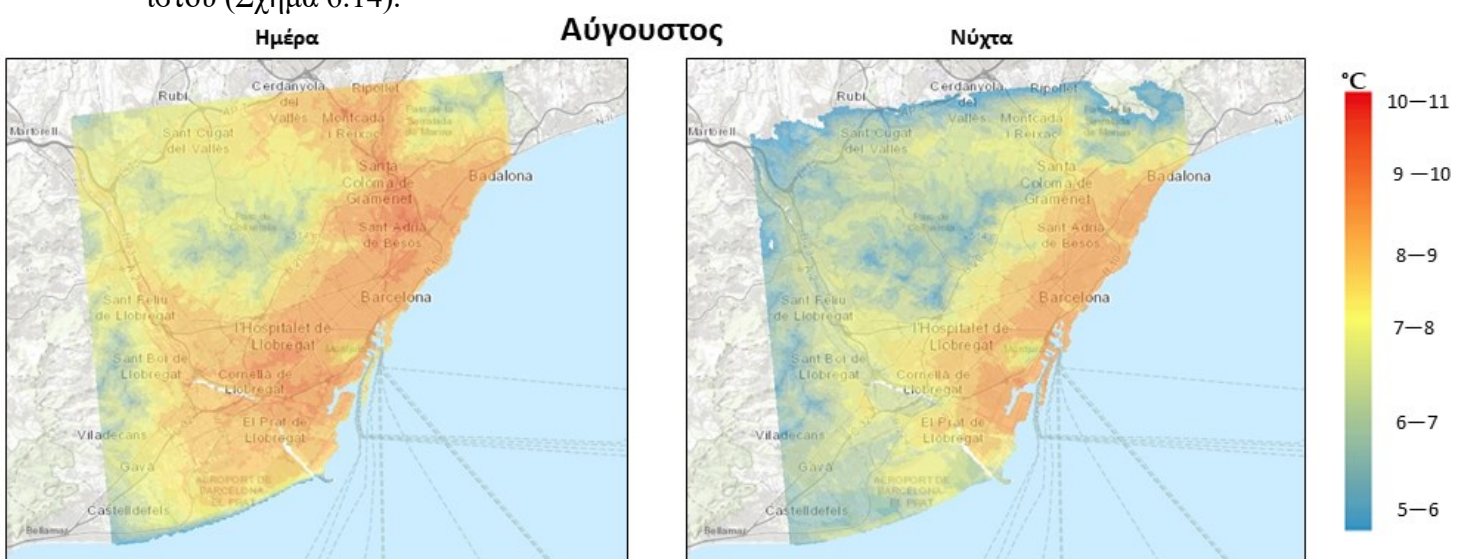


Coloma de Gramenet και τη βιομηχανική περιοχή Montcada i Reixac. Αντίθετα, κατά τη διάρκεια της νύχτας, οι μεγαλύτερες τιμές υπερθέρμανσης συγκεντρώνονται πλησίον του αεροδρομίου El Prat και στο κεντρικό αστικό κλοιό της Βαρκελώνης πλησίον της ακτογραμμής (Σχήμα 6.13).



Σχήμα 6.14. Χωρική κατανομή της αστικής υπερθέρμανσης για την Βαρκελώνη για το μήνα Ιούλιο κατά τη διάρκεια της ημέρας (αριστερά) και της νύχτας (δεξιά).

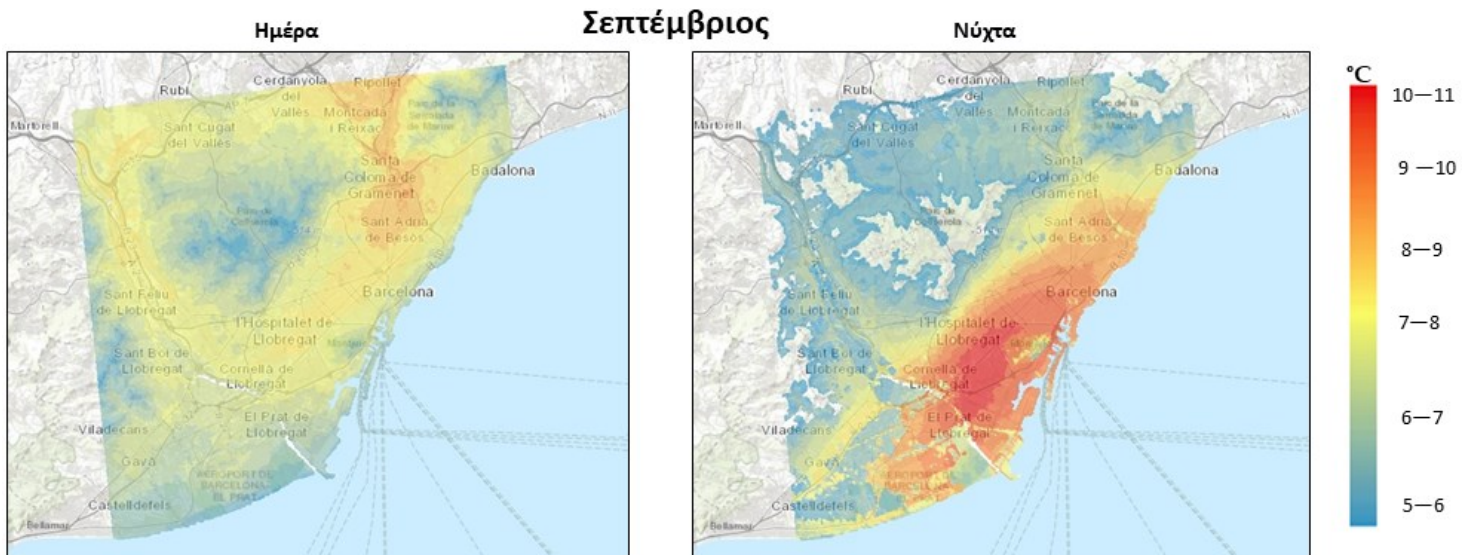
Για το μήνα Ιούλιο κατά τη διάρκεια της μέρας οι πιο μεγάλες τιμές διαφοράς θερμοκρασίας εντοπίζονται στις παράκτιες περιοχές κατά μήκος όλου του αστικού ιστού. Τη νύχτα δεν υπάρχουν τιμές αστικής υπερθέρμανσης δυτικά και βόρεια του αστικού ιστού καθώς και περιοχές εντός και πέριξ του πάρκου Serra de Collserola. Οι υψηλότερες τιμές τη νυχτερινή περίοδο συγκεντρώνονται πέριξ του πυκνού αστικού ιστού (Σχήμα 6.14).



Σχήμα 6.15. Χωρική κατανομή της αστικής υπερθέρμανσης για την Βαρκελώνη για το μήνα Αύγουστο κατά τη διάρκεια της ημέρας (αριστερά) και της νύχτας (δεξιά).



Παρόμοιο μοτίβο με το μήνα Ιούλιο παρατηρείται κατά τη διάρκεια της ημέρας για τον Αύγουστο. Οι πιο μεγάλες τιμές διαφοράς θερμοκρασίας εντοπίζονται σε όλο τον αστικό ιστό αλλά και στα περίξ του αεροδρομίου της πόλης. Όμως, κατά τη διάρκεια της νύχτας τα hot-spots της UO, περιορίζονται κυρίως στον αστικό κλοιό κοντά στην ακτογραμμή της πόλης (Σχήμα 6.15).



Σχήμα 6.16. Χωρική κατανομή της αστικής υπερθέρμανσης για την Βαρκελώνη για το μήνα Σεπτέμβριο κατά τη διάρκεια της ημέρας (αριστερά) και της νύχτας (δεξιά).

Τέλος, για το μήνα Σεπτέμβριο, κατά τη διάρκεια της ημέρας υπάρχουν τιμές υπερθέρμανσης σε όλο το πλέγμα με τις υψηλότερες να βρίσκονται περίξ του πάρκου Serra de Collserola. Τη νύχτα τα πράγματα διαφοροποιούνται, με τα πιο έντονα hot-spots να εντοπίζονται στην περιοχή γύρω από το αεροδρομίου El Prat και στις αστικές παραθαλάσσιες περιοχές (Σχήμα 6.16).

Συνοψίζοντας, κατά τη διάρκεια της ημέρας και για όλους τους μήνες, hot-spots της UO εντοπίζονται κυρίως σε προάστια, σε βιομηχανικές περιοχές και σε περιοχές αστικού ιστού περίξ του φυσικού πάρκου Serra de Collserola, σε συμφωνία και με προηγούμενες μελέτες (Lemus-Canovas et al. 2020). Από την άλλη πλευρά, κατά τη διάρκεια της νύχτας, η παρουσία των hot-spots της UO είναι πιο ξεκάθαρη και σχετίζεται με αστικές και βιομηχανικές κυρίως περιοχές κοντά στην ακτογραμμή, συμπεριλαμβανομένων και των περιοχών γύρω από το αεροδρόμιο της Βαρκελώνης, ακολουθώντας την κατανομή της κυκλοφορίας και της πυκνότητας του πληθυσμού (Jungman et al. 2021). Πρακτικά κατά τη διάρκεια την νύχτας ισχύει ότι όσο υψηλότερος είναι ο ρυθμός αστικοποίησης και κυκλοφορίας, τόσο περισσότερο τείνει να αυξάνεται το μέγεθος και ο αριθμός των hot-spots. Συγκρίνοντας τα ημερήσια από



τα νυχτερινά hot-spots της UO, θα μπορούσε να ειπωθεί πως τα νυχτερινά είναι πιο καλά εντοπισμένα και παρουσιάζουν μεγαλύτερη ένταση, κυρίως στις αρχές/τέλη του καλοκαιριού. Κατά τη διάρκεια της ημέρας τα hot-spots της UO είναι πιο έντονα στις αρχές/μέσα του καλοκαιριού. Τέλος, οι περιοχές στις οποίες εντοπίζονται τα πιο έντονα hot-spots, τόσο κατά τη διάρκεια της νύχτας όσο και της ημέρας, χαρακτηρίζονται από χαμηλή σχετική βλάστηση (παλιά πόλη της Βαρκελώνης, Γοτθική συνοικία κ.α.) και αδιαπέραστες επιφάνειες (αεροδρόμιο El prat, βιομηχανικές μονάδες).

6.3.3 Η περίπτωση του Λουξεμβούργου

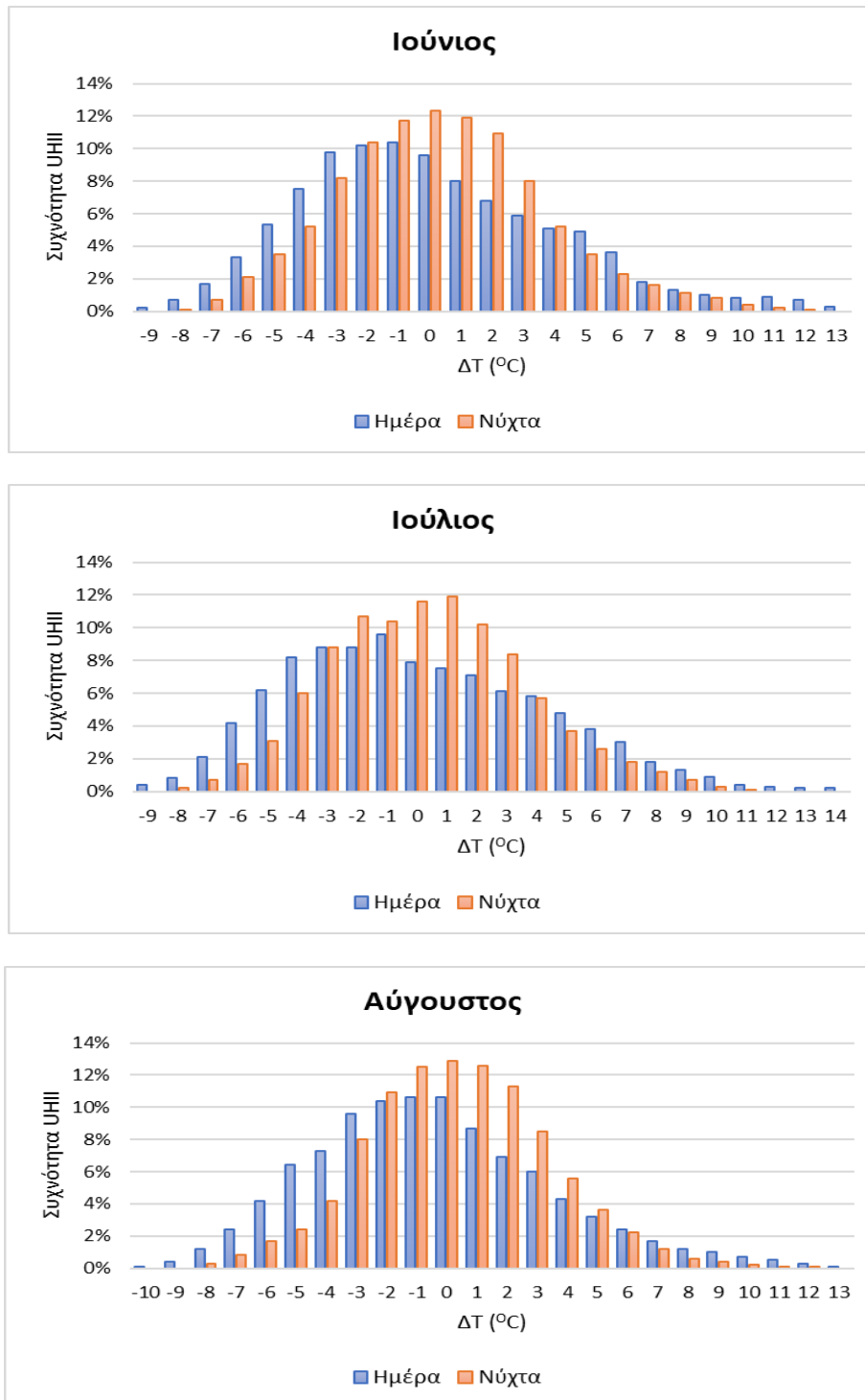
Κατανομή συχνοτήτων της έντασης της αστικής θερμικής νησίδας

Και στην περίπτωση του Λουξεμβούργου, η κατανομή των συχνοτήτων της UHI (ΔT_i) κατά τη διάρκεια της ημέρας και της νύχτας εξετάστηκε για όλους τους μήνες κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού από το 2008 έως το 2017 (Σχήμα 6.17). Σύμφωνα λοιπόν με τα παρακάτω αποτελέσματα, προκύπτει ότι για το μήνα Ιούνιο, η ημερήσια ΔT_i ήταν θετική για το ακριβώς 41% και αρνητική για το ακριβώς 49% των ημερών του μήνα. Κατά τη διάρκεια της νύχτας του Ιουνίου, η ΔT_i υπολογίστηκε θετική για το 46% και αρνητική για το 42%. Παρόμοια σχεδόν αποτελέσματα και για το μήνα Ιούλιο, όπου η ΔT_i κατά τη διάρκεια της ημέρας που υπολογίστηκε ήταν θετική για το περίπου 43% και αρνητική για το 49% των ημερών. Κατά τη διάρκεια της νύχτας του Ιουλίου, η ΔT_i υπολογίστηκε θετική για το περίπου 46,6% και αρνητική για το 41% των ημερών. Τον Αύγουστο, η ημερήσια ΔT_i εμφανίζεται θετική για το 37% και αρνητική για το 52,6%. Αντίθετα, το βράδυ του Αυγούστου, η ΔT_i βρέθηκε θετική στο 46% και αρνητική για το 40% των ημερών. Τέλος, για το μήνα Σεπτέμβριο, η ημερήσια ΔT_i ήταν θετική για το 42% και αρνητική για το 46,8%, ενώ αντιστρόφως η νυχτερινή ΔT_i ήταν θετική για το 46,3% και αρνητική για το 42% των ημερών.

Από τα παραπάνω αποτελέσματα, παρατηρούμε κάτι το οποίο δεν παρατηρήθηκε για τις πόλεις της Αθήνας και της Βαρκελώνης. Συγκεκριμένα, συγκρίνοντας τις παραπάνω κατανομές συχνοτήτων, διαπιστώνουμε ότι για όλους τους μήνες κατά τη διάρκεια της ημέρας οι αρνητικές συχνότητες της ΔT_i υπερτερούν αυτές των θετικών, ενώ το αντίστροφο συμβαίνει κατά τη διάρκεια της νύχτας. Η παρατήρηση αυτή έρχεται να ενισχύσει την πεποίθηση, ότι το φαινόμενο της UHI είναι κυρίως νυχτερινό, ακόμα και σε αραιοκατοικημένες πόλεις με μικρότερο πληθυσμό, όπως η πόλη του Λουξεμβούργου. Επιπλέον, και εδώ οι υψηλότερες συχνότητες θετικής ΔT_i υπολογίστηκαν κατά τη διάρκεια της νύχτας, ιδιαίτερα τον Ιούλιο και τον Αύγουστο

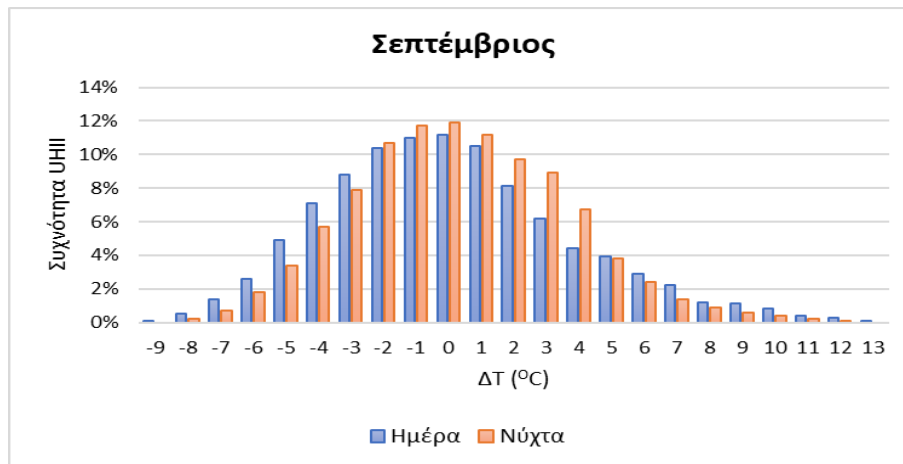


(46%), ενώ τον Αύγουστο παρατηρήθηκε η μεγαλύτερη ποσοστιαία διαφορά μεταξύ θετικής και αρνητικής ΔT_i (46% έναντι 40%).



Σχήμα 6.17. Κατανομή συχνότητας της έντασης της αστικής θερμικής νησίδας για κάθε μήνα στην περιοχή του Λουξεμβούργου κατά τη διάρκεια της ημέρας (μπλε μπάρες) και της νύχτας (πορτοκαλί μπάρες).

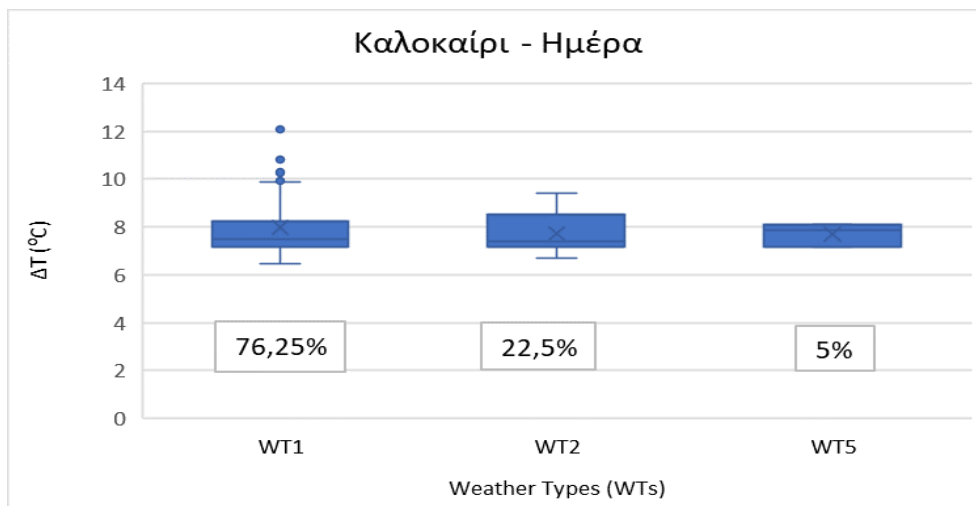




Σχήμα 6.17. (συνέχεια από την προηγούμενη σελίδα)

Συσχέτιση αστικής υπερθέρμανσης με τους κυρίαρχους τύπους καιρού

Στα παρακάτω διαγράμματα, για την πόλη του Λουξεμβούργου παρουσιάζονται οι συσχετίσεις της UO με τους επικρατέστερους WTs τόσο κατά τη διάρκεια της νύχτας (nighttime) όσο και κατά τη διάρκεια της ημέρας (daytime). Έτσι, κατά τη διάρκεια της ημέρας, τις ημερομηνίες που ενισχύεται η UO επικρατούν οι τύποι καιρού $WT1$, $WT2$ και $WT5$. Ο κυρίαρχος με την μεγαλύτερη συχνότητα εμφάνισης 76,25% καθώς και τη μεγαλύτερη θερμοκρασιακή επίδραση $8^{\circ}C$ είναι ο $WT1$ (Σχήμα 6.18).

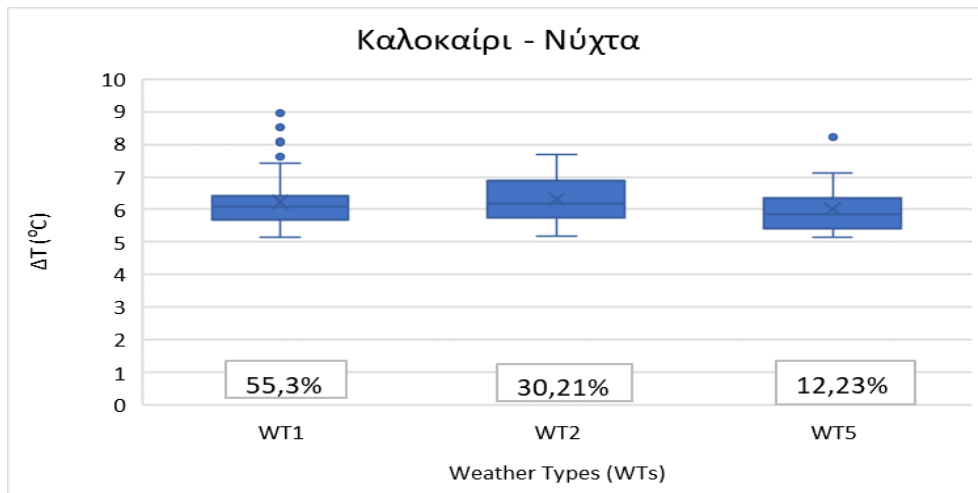


Σχήμα 6.18. Συσχέτιση του ανώτατου 5% των ημερήσιων τιμών ΔT ($^{\circ}C$) με τους τύπους καιρού για την περιοχή του Λουξεμβούργου.

Κατά τη διάρκεια της νύχτας έχουμε την εμφάνιση των τύπων καιρού που επικρατούν την ημέρα $WT1$, $WT2$ και $WT5$ όμως τα ποσοστά εμφάνισης επί των ημερών αστικής υπερθέρμανσης αλλάζουν. Το ποσοστό εμφάνισης του $WT1$ μειώνεται από το 79,25% σε 55,3% ενώ των $WT2$ και $WT5$ αυξάνονται από 22,5% σε 30,21% και από 5% σε



12,23% αντιστοίχως. Επιπλέον, η επίδραση στην θερμοκρασία όλων των παραπάνω WTs είναι μικρότερη κατά τη διάρκεια της νύχτας από την ημέρα (Σχήμα 6.19).



Σχήμα 6.19. Συσχέτιση του ανώτατου 5% των νυχτερινών τιμών ΔT ($^{\circ}\text{C}$) με τους τύπους καιρού για την περιοχή του Λουξεμβούργου.

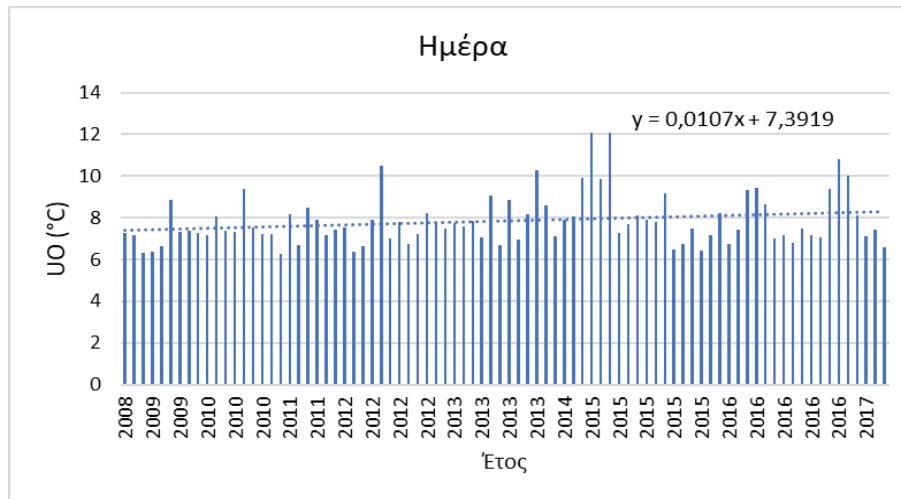
Σύμφωνα και με τα παραπάνω αποτελέσματα της παραγράφου 5.3.3, οι WT1, WT2 και WT5, αποτελούν τους κυρίαρχους τυπικούς θερινούς WTs για την ευρύτερη περιοχή του Λουξεμβούργου. Και οι τρεις WTs, εμφανίζουν υψηλά ποσοστά εμφάνισης κατά τη διάρκεια του έτους, καθώς επίσης συνδέουν την παρουσία τους με υψηλές θερμοκρασίες, μέτριας έντασης ανέμους και μέτρια νεφοκάλυψη. Η εικόνα της ατμοσφαιρικής κυκλοφορίας του θερινού WT1, δηλαδή η παρουσία ενός αντικυκλώνα στην κεντρική Ευρώπη και ενός χαμηλού νοτιοδυτικά της Ευρώπης στην στάθμη των 1000hPa, θα μπορούσε ενδεχομένως να διαθέτει τα χαρακτηριστικά ενός αντικυκλώνα εμπαισμού (οι τύπου «Ρεξ» ή «διπόλου» ή «high-over-low) διασπώντας την κανονική δυτική ροή σε δύο «ισοδύναμα» ρεύματα. Τέτοιες συνθήκες μπορεί να ευνοούν την εμφάνιση και την επιμονή καυσώνων κατά τη διάρκεια του θέρους, κυρίως στις περιοχές που εντοπίζεται ο αντικυκλώνας (Kautz et al. 2022). Στην περίπτωση μας η περιοχή αυτή είναι η κεντρική Ευρώπη και η ευρύτερη περιοχή του Λουξεμβούργου. Αξίζει να σημειωθεί δε, ότι τέτοιου είδους κυκλοφορίες, σύμφωνα και με τα παραπάνω αποτελέσματα, παρουσιάζουν στατιστικά σημαντικές αυξήσεις συχνότητας κατά τις τελευταίες δεκαετίες, ενώ ταυτόχρονα παρουσιάζουν υψηλά ποσοστά εμφάνισης κατά τη διάρκεια του έτους.

Χρονική και χωρική κατανομή αστικής υπερθέρμανσης

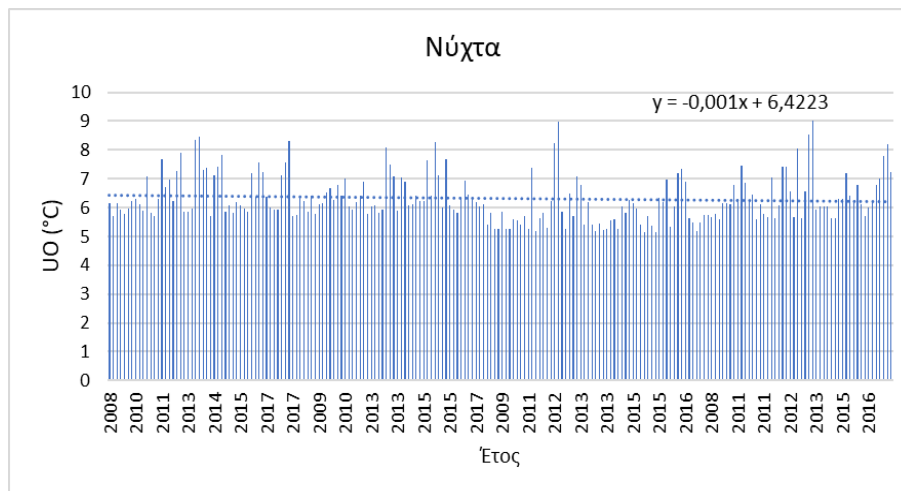
Η χρονική διακύμανση της UO για την περίοδο από το 2008 έως το 2017 παρουσιάζεται στο παρακάτω διαγράμμα τόσο κατά τη διάρκεια της ημέρας (Σχήμα 6.20) όσο και



κατά τη διάρκεια της νύχτας (Σχήμα 6.21) για την ευρύτερη περιοχή της πόλης του Λουξεμβούργου. Και στην περίπτωση αυτή, εξετάστηκε η πιθανή ύπαρξη στατιστικά σημαντικών (95% επίπεδο εμπιστοσύνης) γραμμικών τάσεων χρησιμοποιώντας το τεστ Mann-Kendall.



Σχήμα 6.20. Η χρονική διακύμανση της αστικής υπερθέρμανσης για την περίοδο από το 2008 έως το 2017 κατά τη διάρκεια της ημέρας για την περιοχή του Λουξεμβούργου.



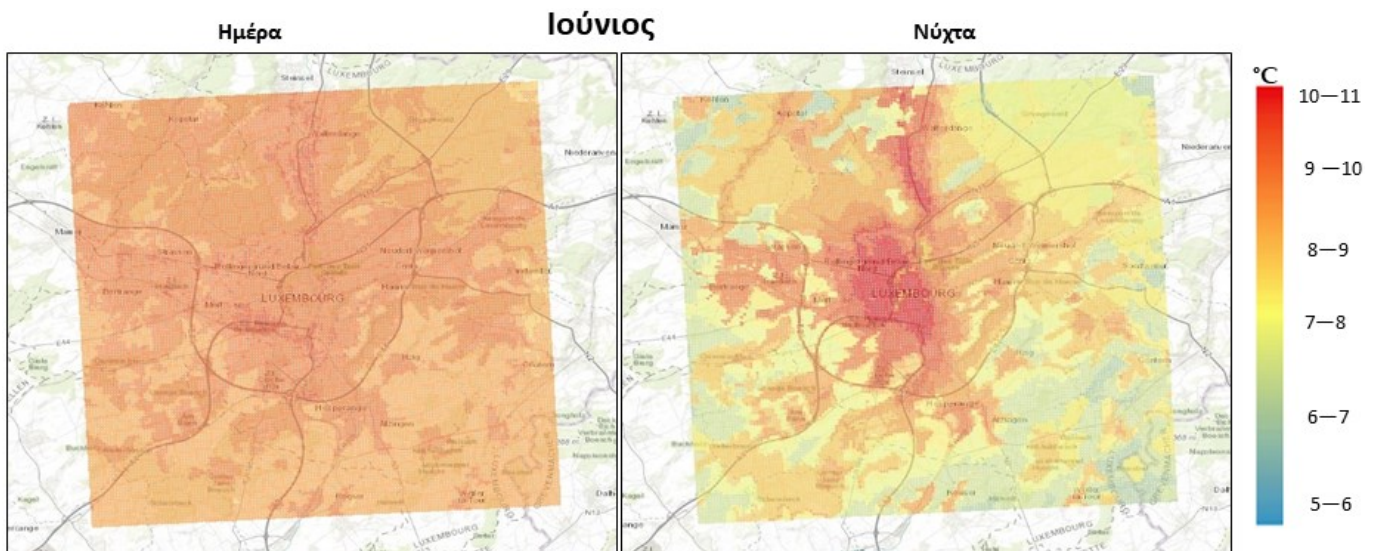
Σχήμα 6.21. Η χρονική διακύμανση της αστικής υπερθέρμανσης για την περίοδο από το 2008 έως το 2017 κατά τη διάρκεια της νύχτας για την περιοχή του Λουξεμβούργου.

Αρχικά, παρατηρείται σύμφωνα και με τα αποτελέσματα, μια θετική στατιστικά σημαντική γραμμική τάση στη διαχρονική διακύμανση της UO, για την περίοδο 2008-2018 και κατά τη διάρκεια της ημέρας. Για την περίπτωση της νύχτας διαπιστώθηκε μια πολύ μικρή αρνητική στατιστικά σημαντική γραμμική τάση στη διαχρονική διακύμανση της UO, για την περίοδο 2008-2018. Η αύξηση της UO κατά τη διάρκεια της ημέρας και η μικρή μείωσή της, στα όρια της σταθεροποίησης, κατά τη διάρκεια της νύχτας, μπορούν ενδεχομένως να δικαιολογηθούν από τη ραγδαία αύξηση του



πληθυσμού του Λουξεμβούργου, ειδικά την περίοδο 2010 έως 2017, όπου αυξήθηκε κατά περίπου 100.000 κατοίκους, σημειώνοντας το μεγαλύτερο ετήσιο ρυθμό ανάπτυξης στην Ευρώπη, 2,34% ((OECD (2023), Population (indicator). doi: 10.1787/d434f82b-en (Accessed on 25 July 2023)). Επιπλέον, για την ίδια περίοδο (2010-2017) στην πόλη του Λουξεμβούργου έχουν καταγραφεί αυξήσεις στις μηχανοκίνητες μεταφορές (αυξήθηκαν κατά 15% μεταξύ 2007 και 2015), σε ορισμένα τμήματα του οδικού δικτύου η κίνηση αυξάνεται κατά περισσότερο από 4,5% ετησίως, καθώς επίσης το μερίδιο των αδιαπέραστων επιφανειών (δομημένες περιοχές και οδικές/σιδηροδρομικές υποδομές) αυξήθηκε από 6% το 1972 σε 14% το 2016. Σε απόλυτες τιμές, η γη που καλύπτεται από κατοικημένες περιοχές έχει υπερτριπλασιαστεί από το 1972 έως το 2016, (Othoniel et al. 2019). Τα παραπάνω στοιχεία συνηγορούν στο γεγονός ότι η μελέτη του φαινομένου UHI και ειδικότερα της UO στην πόλη του Λουξεμβούργου χρήζει περαιτέρω ανάλυσης και διερεύνησης, μιας και η βιβλιογραφία στο θέμα αυτό είναι αρκετά περιορισμένη.

Όσον αφορά τα χωρικά χαρακτηριστικά (hot-spots) των μέσων τιμών της UO, αυτά απεικονίζονται παρακάτω για κάθε μήνα κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού (ημέρα και νύχτα) από το 2008 έως το 2017, για κάθε σημείο πλέγματος του αστικού ιστού που έχει τιμή που να ανήκει στο ανώτερο 5% ΔT_{imax} . Και στην περίπτωση αυτή, τα σημεία που δεν είχαν τιμές παρουσιάζονται λευκά δίχως κάποια χρωματική απόχρωση.

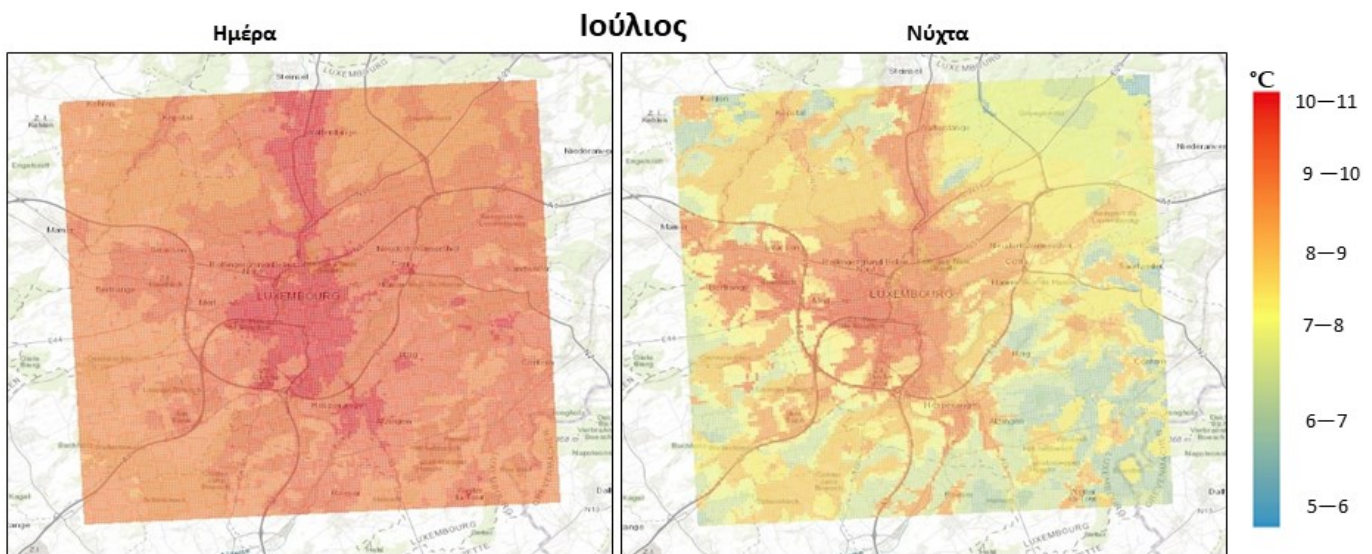


Σχήμα 6.22. Χωρική κατανομή της αστικής υπερθέρμανσης για το Λουξεμβούργο για το μήνα Ιούνιο κατά τη διάρκεια της ημέρας (αριστερά) και της νύχτας (δεξιά).

Για το μήνα Ιούνιο, το φαινόμενο της UO κατά τη διάρκεια της ημέρας εμφανίζεται διάσπαρτο σε σχεδόν όλη την υπό μελέτη περιοχή του Λουξεμβούργου,



καταλαμβάνοντας αστικές αλλά και αγροτικές περιοχές. Αντίθετα, κατά τη διάρκεια της νύχτας υψηλές τιμές του φαινομένου (υψηλότερες σε σχέση με την ημέρα) εντοπίζονται κυρίως σε αστικές περιοχές, περιλαμβάνοντας εξολοκλήρου την πόλη του Λουξεμβούργου, καθώς και τις κοινότητες Walferdange και Bertrange βόρεια και δυτικά αντίστοιχα της πόλης. Μικρότερης αλλά σημαντικής έντασης hot-spots εμφανίζονται διάσπαρτα σε ημι-αστικές περιοχές νότια και ανατολικά της πόλης (περιλαμβάνοντας την περιοχή του αεροδρομίου) του Λουξεμβούργου κατά τη διάρκεια της νύχτας (Σχήμα 6.22).



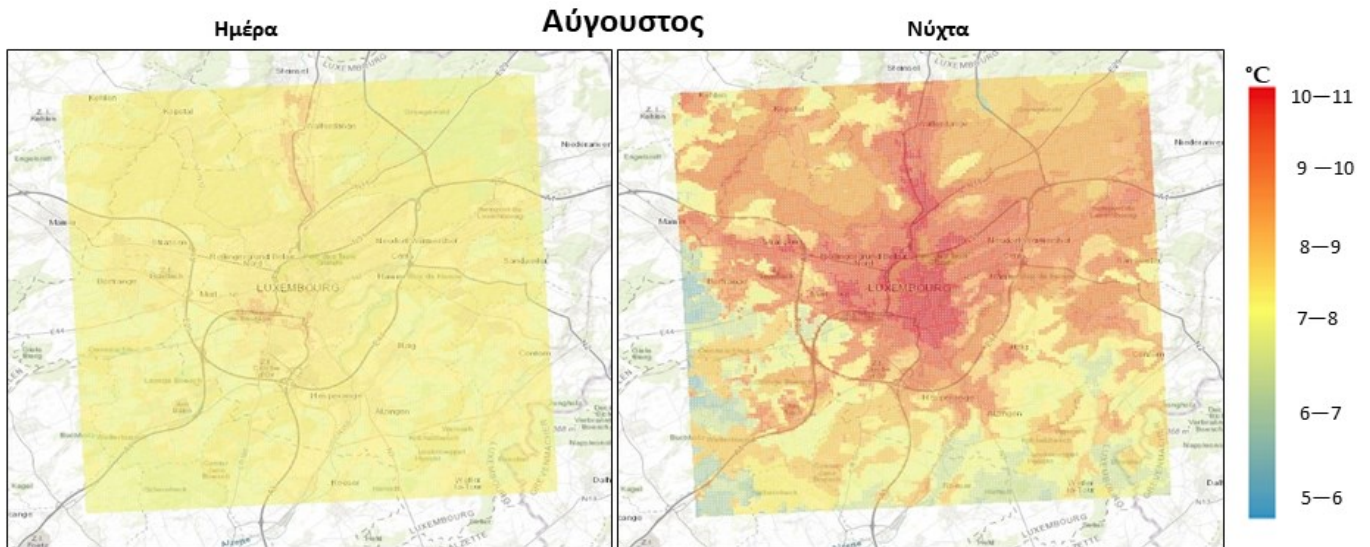
Σχήμα 6.23. Χωρική κατανομή της αστικής υπερθέρμανσης για το Λουξεμβούργο για το μήνα Ιούλιο κατά τη διάρκεια της ημέρας (αριστερά) και της νύχτας (δεξιά).

Παρόμοιο το σκηνικό και για τον Ιούλιο όσον αφορά τη χωρική κατανομή της UO. Πιο συγκεκριμένα, κατά τη διάρκεια της ημέρας υψηλές τιμές της UO εμφανίζονται σε όλη την περιοχή μελέτης, με τις υψηλότερες εξ αυτών να εντοπίζονται κυρίως στον αστικό ιστό της πόλης του Λουξεμβούργου και της κοινότητας Walferdange. Κατά τη διάρκεια της νύχτας, όπως και το μήνα Ιούνιο hot-spots της UO εντοπίζονται κυρίως σε αστικές περιοχές, περιλαμβάνοντας εξολοκλήρου την πόλη του Λουξεμβούργου, τις κοινότητες Walferdange και Bertrange, καθώς και σε ημι-αστικές περιοχές νότια και ανατολικά της πόλης του Λουξεμβούργου (Σχήμα 6.23).

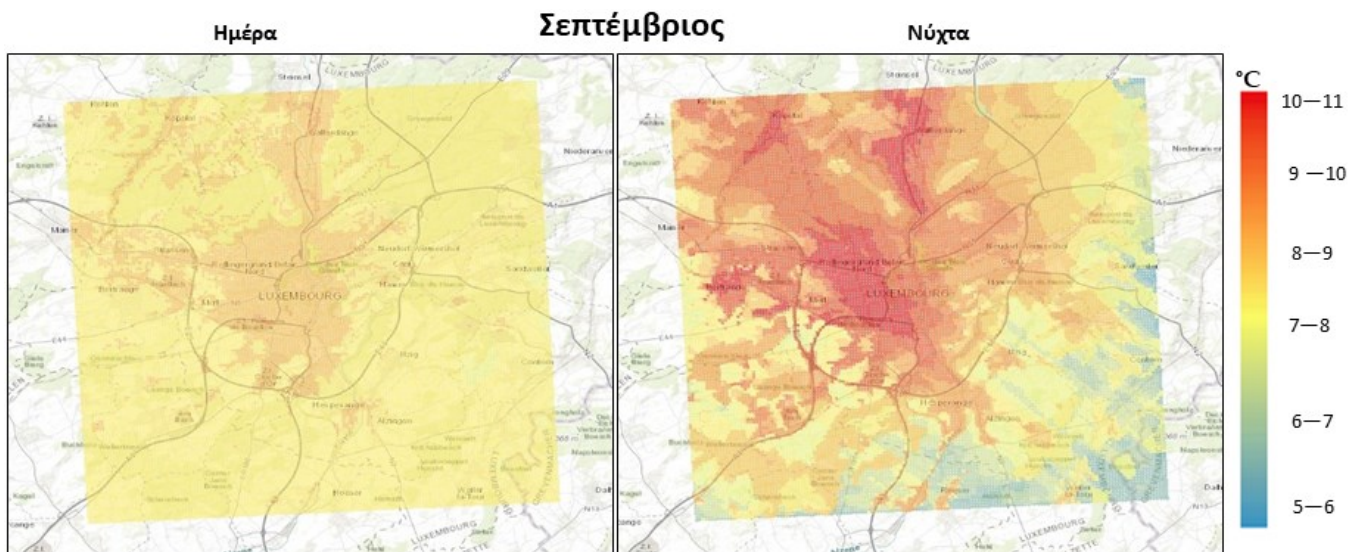
Για το μήνα Αύγουστο, κατά τη διάρκεια της ημέρας hot-spots της UO εμφανίζονται σε όλη την ευρύτερη περιοχή του Λουξεμβούργου, μικρότερης όμως έντασης συγκριτικά με το μήνα Ιούνιο και Ιούλιο. Επίσης, κατά τη διάρκεια της νύχτας, hot-



spots υψηλής έντασης εντοπίζονται κυρίως στις αστικές περιοχές, αλλά και σε αγροτικές περιοχές βόρεια της πόλης του Λουξεμβούργου (Σχήμα 6.24).



Σχήμα 6.24. Χωρική κατανομή της αστικής υπερθέρμανσης για το Λουξεμβούργο για το μήνα Αύγουστο κατά τη διάρκεια της ημέρας (αριστερά) και της νύχτας (δεξιά).



Σχήμα 6.25. Χωρική κατανομή της αστικής υπερθέρμανσης για το Λουξεμβούργο για το μήνα Σεπτέμβριο κατά τη διάρκεια της ημέρας (αριστερά) και της νύχτας (δεξιά).

Τέλος, το Σεπτέμβριο κατά τη διάρκεια της ημέρας, το φαινόμενο της UO εκτείνεται σε όλη την ευρύτερη περιοχή μελέτης, με μεγαλύτερης έντασης hot-spots να σημειώνονται στις αστικές περιοχές του Λουξεμβούργου. Από την άλλη, κατά τη διάρκεια της νύχτας, εντοπίζονται μεγάλης έκτασης και έντασης hot-spots, κυρίως στις αστικές περιοχές αλλά και σε αγροτικές περιοχές βόρεια και ανατολικά της πόλης του Λουξεμβούργου (Σχήμα 6.25).

Συνοψίζοντας, κατά τη διάρκεια της ημέρας και για όλους τους μήνες, hot-spots της UO εντοπίζονται εμφανίζονται σε όλη την ευρύτερη περιοχή του Λουξεμβούργου,



μεγαλύτερης έντασης κυρίως τον Ιούνιο και τον Ιούλιο και κυρίως πιο καλά εντοπιζόμενα σε περιοχές αστικού ιστού που περιλαμβάνουν τη πόλη του Λουξεμβούργου και τις κοινότητες Walferdange, Bertrange και Mamer. Από την άλλη πλευρά, κατά τη διάρκεια της νύχτας, η παρουσία των hot-spots της UO ως προς τη χωρική κατανομή είναι πιο ξεκάθαρη και αυτά σχετίζονται με αστικές (συμπεριλαμβανομένων και των παραπάνω κοινοτήτων) κυρίως περιοχές, ενώ ως προς την ένταση, είναι για όλους τους μήνες αισθητά πιο έντονα σε σύγκριση με τα hot-spots κατά τη διάρκεια της ημέρας. Το αστικό τοπίο χαρακτηρίζεται πολυεπίπεδο, με ογκώδη (κάστρα, ανάκτορα κ.α.) αλλά και χαμηλά κτήρια, με πολυάριθμα ελικοειδή δρομάκια ανάμεσα στα δύο ποτάμια (Αλζέτ και Πετρύς), βαθιά φαράγγια και μεγάλα πάρκα. Ανατολικά της πόλης και σε πολύ μικρή απόσταση βρίσκεται και το αεροδρόμιο καλύπτοντας σημαντική έκταση. Το Λουξεμβούργο γνωρίζει ταχεία οικονομική ανάπτυξη, παρουσιάζοντας συνεχώς ένα από τα υψηλότερα κατά κεφαλήν ΑΕΠ στον κόσμο. Οι ετήσιοι ρυθμοί οικονομικής ανάπτυξης της τάξης του 2-5% συνοδεύτηκαν από σωρευτική αύξηση του πληθυσμού άνω του 40% από το 2000 και από αύξηση άνω του 250% στον αριθμό των διασυνοριακών μετακινούμενων. Αν και αυτές οι τάσεις ασκούν τεράστιες πιέσεις στη διαμόρφωση του τοπίου και στη χρήση της γης, οι γεωργικές και δασικές εκτάσεις εξακολουθούν να καταλαμβάνουν περισσότερο από το 85% της συνολικής έκτασης της χώρας, με όχι περισσότερο από το 10% να καλύπτεται από οικισμούς και όχι περισσότερο από το 5% από τα δίκτυα υποδομής.

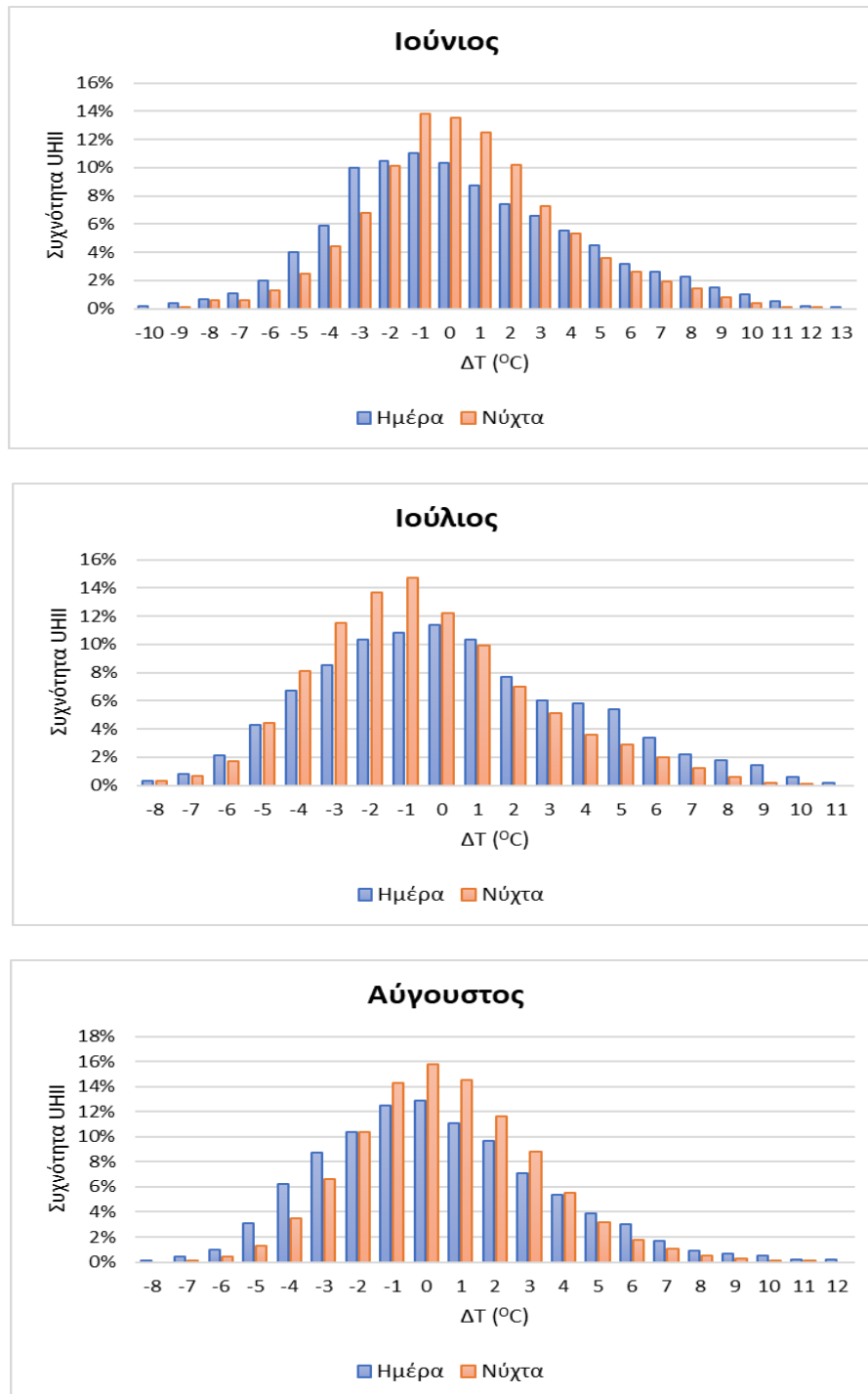
6.3.4 Η περίπτωση του Ελσίνκι

Κατανομή συχνοτήτων της έντασης της αστικής θερμικής νησίδας

Για την πόλη του Ελσίνκι, η κατανομή των συχνοτήτων της UHI (ΔT_i) κατά τη διάρκεια της ημέρας και της νύχτας, και για όλους τους μήνες κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού από το 2008 έως το 2017, φαίνονται στα παρακάτω σχήματα (Σχήμα 6.26). Σύμφωνα με αυτά τα αποτελέσματα, παρατηρούμε ότι για το μήνα Ιούνιο, η ημερήσια ΔT_i καταγράφεται θετική για το ακριβώς 44% και αρνητική για το περίπου 49% των ημερών του μήνα. Αντίθετα, κατά τη διάρκεια της νύχτας του Ιουνίου, η ΔT_i εμφανίστηκε θετική για το 46,4% και αρνητική για το 40% των ημερών. Όσον αφορά το μήνα Ιούλιο, η ΔT_i κατά τη διάρκεια της ημέρας εμφανίζεται θετική για το περίπου 44,8% και αρνητική για το 43,8% των ημερών. Διαφορετικά αποτελέσματα κατά τη διάρκεια της νύχτας του Ιουλίου, όπου η ΔT_i υπολογίστηκε θετική για το περίπου 32,6% και αρνητική για το 55% των ημερών. Τον Αύγουστο, η ημερήσια ΔT_i

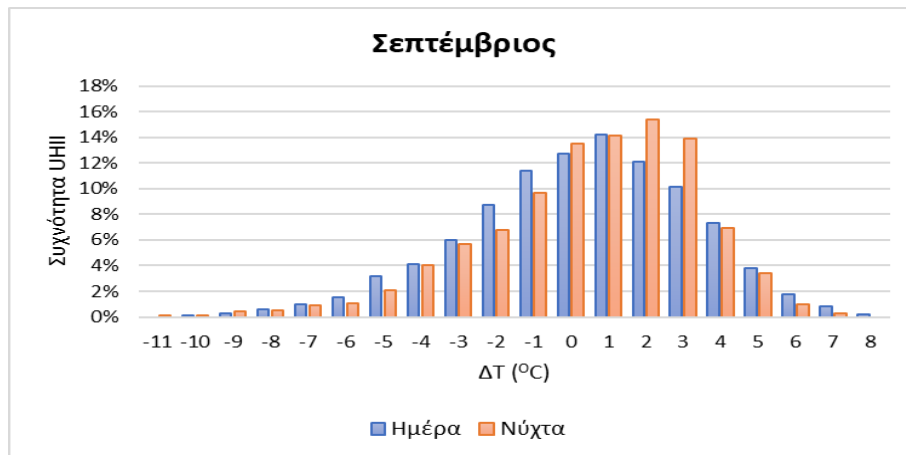


εμφανίζεται θετική για το 44,4% και αρνητική για το 42,4%. Το βράδυ του Αυγούστου, η ΔT_i βρέθηκε θετική στο 47,5% και αρνητική για το 36,6% των ημερών. Τέλος, για το μήνα Σεπτέμβριο, η ημερήσια ΔT_i ήταν θετική για το 50% και αρνητική για το 37%, ενώ η νυχτερινή ΔT_i ήταν θετική για το 55% και αρνητική για το 31,4% των ημερών.



Σχήμα 6.26. Κατανομή συχνότητας της έντασης της αστικής θερμικής νησίδας για κάθε μήνα στην περιοχή του Ελσίνκι κατά τη διάρκεια της ημέρας (μπλε μπάρες) και της νύχτας (πορτοκαλί μπάρες).





Σχήμα 6.26. (συνέχεια από την προηγούμενη σελίδα).

Συγκρίνοντας τις παραπάνω κατανομές συχνοτήτων, οι υψηλότερες συχνότητες θετικής ΔT_i υπολογίστηκαν κατά τη διάρκεια της νύχτας, ιδιαίτερα τον Αύγουστο το Σεπτέμβριο. Και στην περίπτωση την πόλης του Ελσίνκι, οι θετικές τιμές της ΔT_i υπερτερούν των αρνητικών ΔT_i , με αξιοσημείωτη διαφοροποίηση κατά τη διάρκεια της νύχτας του Ιουλίου, όπου οι αρνητικές ΔT_i υπερτερούν των θετικών.

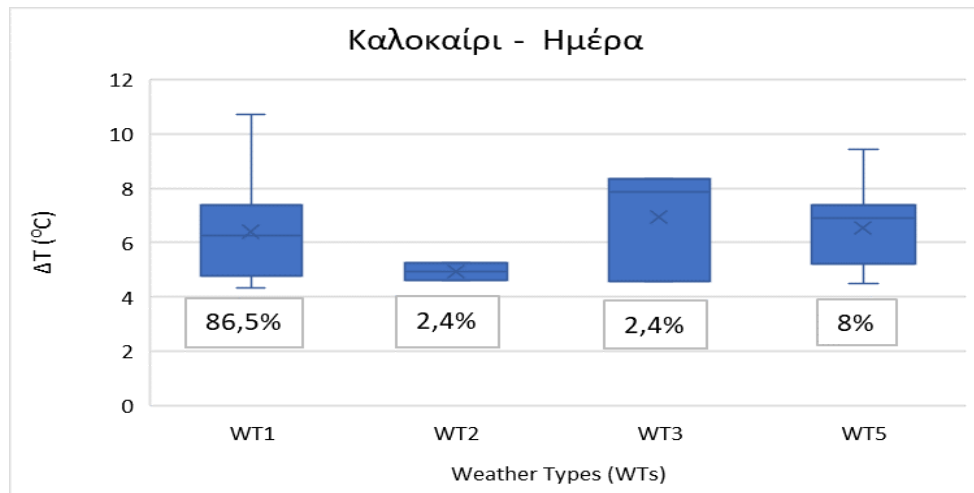
Τα παραπάνω αποτελέσματα, έρχονται σε συμφωνία με τα αποτελέσματα προηγούμενων ερευνών που έχουν διεξαχθεί για τη μελέτη των χαρακτηριστικών του φαινομένου UHI στο Ελσίνκι, όπου το φαινόμενο φαίνεται να είναι πιο ισχυρό κατά τη διάρκεια της νύχτας, ιδιαίτερα κατά τη διάρκεια νυχτών με άπνοια και χωρίς νεφοκάλυψη (Ekholm 1981). Παρόμοια αποτελέσματα έχουν εξαχθεί και για άλλες πόλεις της Φιλανδίας, όπως για την πόλη στην Hyvinkää βόρεια του Ελσίνκι (Laaksonen 1994) και για την πόλη Oulu στη βόρεια Φινλανδία.

Συσχέτιση αστικής υπερθέρμανσης με τους κυριάρχους τύπους καιρού

Για την πόλη του Ελσίνκι παρουσιάζονται οι συσχετίσεις της UO με τους επικρατέστερους WTs τόσο κατά τη διάρκεια της νύχτας (nighttime) όσο και κατά τη διάρκεια της ημέρας (daytime) στα παρακάτω σχήματα.

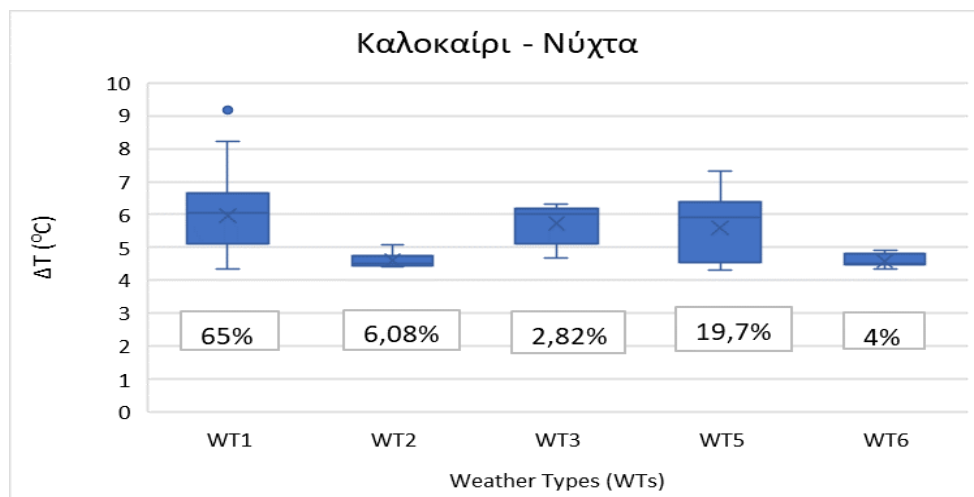
Συγκεκριμένα, κατά τη διάρκεια της ημέρας και κατά τη διάρκεια εμφάνισης της UO, επικρατούν οι τύποι καιρού WT1, WT2, WT3 και WT5. Ο κυρίαρχος, με τη μεγαλύτερη συχνότητα εμφάνισης 86,5% επί των ημερών UO είναι ο WT1 (Σχήμα 6.27).





Σχήμα 6.27. Συσχέτιση του ανώτατου 5% των ημερήσιων τιμών ΔT ($^{\circ}\text{C}$) με τους τύπους καιρού για την περιοχή του Ελσίνκι.

Κατά τη διάρκεια της νύχτας έχουμε την εμφάνιση των τύπων καιρού που επικρατούν την ημέρα WT1, WT2, WT3, WT5 με την προσθήκη του WT6. Ωστόσο, το ποσοστό εμφάνισης του WT1 μειώνεται από το 86,5% σε 65% ενώ των WT2, WT3 και WT5 αυξάνεται από 2,4% σε 6,08%, από 2,4% σε 2,82% και από 8% σε 19,7% αντιστοίχως. Επιπλέον, η επίδραση στη θερμοκρασία όλων των WTs είναι μικρότερη τη νύχτα από την ημέρα (Σχήμα 6.28)



Σχήμα 6.28. Συσχέτιση του ανώτατου 5% των νυχτερινών τιμών ΔT ($^{\circ}\text{C}$) με τους τύπους καιρού για την περιοχή του Ελσίνκι.

Όπως σχολιάστηκε και στην παράγραφο 5.3.4, οι WT1 και WT5, αποτελούν τους κυρίαρχους τυπικούς θερινούς WTs για την ευρύτερη περιοχή του Ελσίνκι. Και οι δύο WTs σχετίζονται με υψηλές για την περιοχή μέσες θερμοκρασίες (13°C), χαμηλής έντασης ανέμους, μέτρια νεφοκάλυψη και νοτιοδυτικές ροές. Σύμφωνα με τους Votsis et al. (2021), οι νοτιοδυτικές ροές από τη θάλασσα, παρόλο που ενδέχεται να

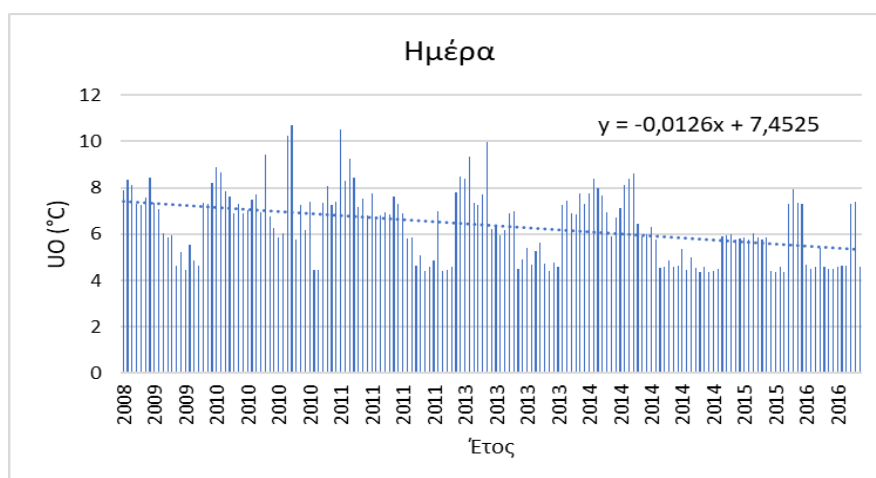


οδηγήσουν σε ψυχρότερες συνθήκες στις περιοχές της ακτογραμμής της πόλης, μπορούν να παρασύρουν θερμότερο αέρα από την πυκνοδομημένη αστική περιοχή κοντά στη θάλασσα, ενισχύοντας το φαινόμενο UHI στην ενδοχώρα. Επιπλέον, έχει αποδειχθεί ότι μετεωρολογικές συνθήκες χαμηλής έντασης ανέμων και μερικής ή καθόλου νεφοκάλυψης ευνοούν την ένταση της UHI για την πόλη του Ελσίνκι, σύμφωνα με τους Drebs et al. (2023).

Χρονική και χωρική κατανομή αστικής υπερθέρμανσης

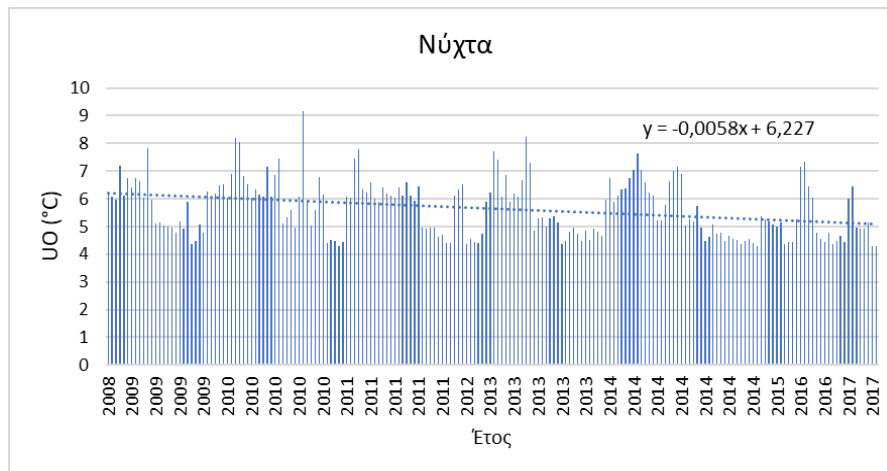
Η χρονική διακύμανση της UO για την περίοδο από το 2008 έως το 2017 παρουσιάζεται στο παρακάτω διαγράμματα τόσο κατά τη διάρκεια της ημέρας (Σχήμα 6.29) όσο και κατά τη διάρκεια της νύχτας (Σχήμα 6.30) για την ευρύτερη περιοχή της πόλης του Ελσίνκι. Και εδώ, εξετάστηκε η πιθανή ύπαρξη στατιστικά σημαντικών (95% επίπεδο εμπιστοσύνης) γραμμικών τάσεων χρησιμοποιώντας το στατιστικό τεστ Mann-Kendall.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα, παρατηρείται μια αρνητική στατιστικά σημαντική γραμμική τάση στη διαχρονική διακύμανση της UO, για την περίοδο 2008-2018 τόσο κατά τη διάρκεια της ημέρας (Σχήμα 6.29), όσο και κατά τη διάρκεια της νύχτας (Σχήμα 6.30). Η πόλη του Ελσίνκι είναι μια αρκετά νέα πόλη με την έννοια ότι ξεκίνησε την ταχεία αστικοποίησή της μόλις τη δεκαετία του 1970. Αυτό σημαίνει ότι οι πολεοδόμοι και οι αρχιτέκτονες εφαρμόζουν καλύτερα κατασκευαστικά πρότυπα (ενεργειακά κτήρια, υπόγειες κατασκευές, αύξηση του albedo της πόλης κτλ.) και εξακολουθούν να βελτιστοποιούν τις πρακτικές κατασκευής, γεγονός που ενδεχομένως να δικαιολογεί την αποδυνάμωση της UO κατά τη διάρκεια των τελευταίων χρόνων.



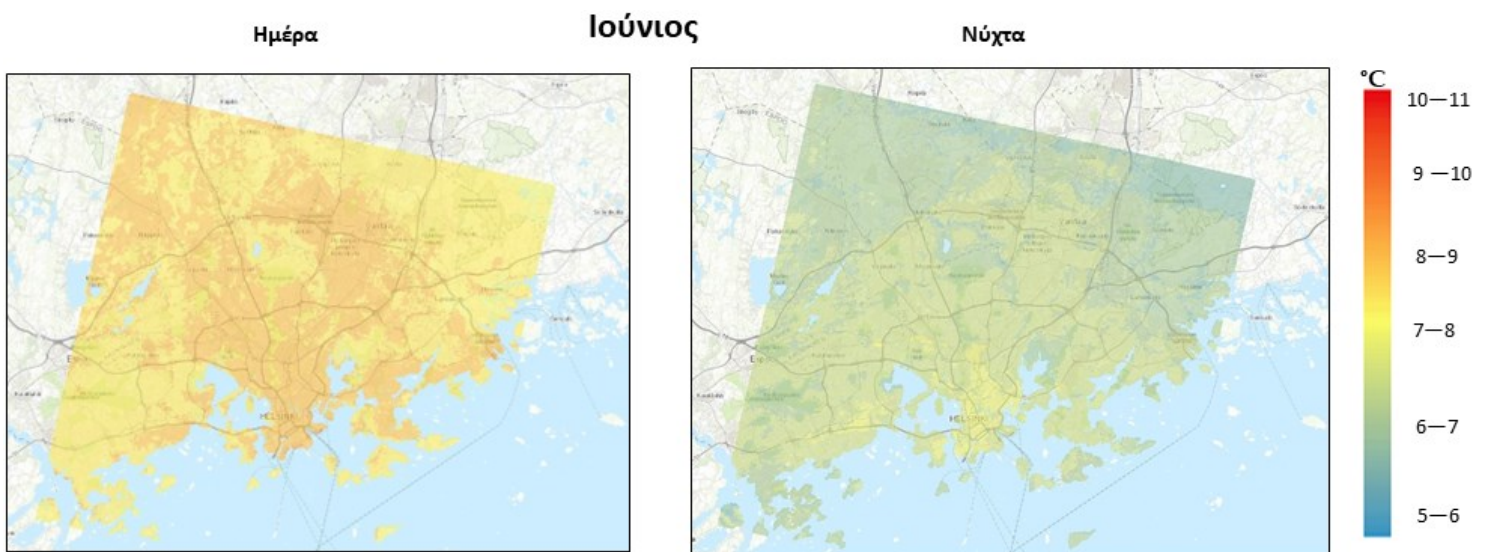
Σχήμα 6.29. Η χρονική διακύμανση της αστικής υπερθέρμανσης για την περίοδο από το 2008 έως το 2017 κατά τη διάρκεια της ημέρας για την περιοχή του Ελσίνκι.





Σχήμα 6.30. Η χρονική διακύμανση της αστικής υπερθέρμανσης για την περίοδο από το 2008 έως το 2017 κατά τη διάρκεια της νύχτας για την περιοχή του Ελσίνκι.

Τα χωρικά χαρακτηριστικά (hot-spots) των μέσων τιμών της UOI, απεικονίζονται στα παρακάτω σχήματα για κάθε μήνα κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού (ημέρα και νύχτα) από το 2008 έως το 2017, για κάθε σημείο πλέγματος του αστικού ιστού που έχει τιμή που να ανήκει στο ανώτερο 5% ΔT_{imax} . Και στην περίπτωση αυτή, τα σημεία που δεν είχαν τιμές παρουσιάζονται λευκά δίχως κάποια χρωματική απόχρωση.

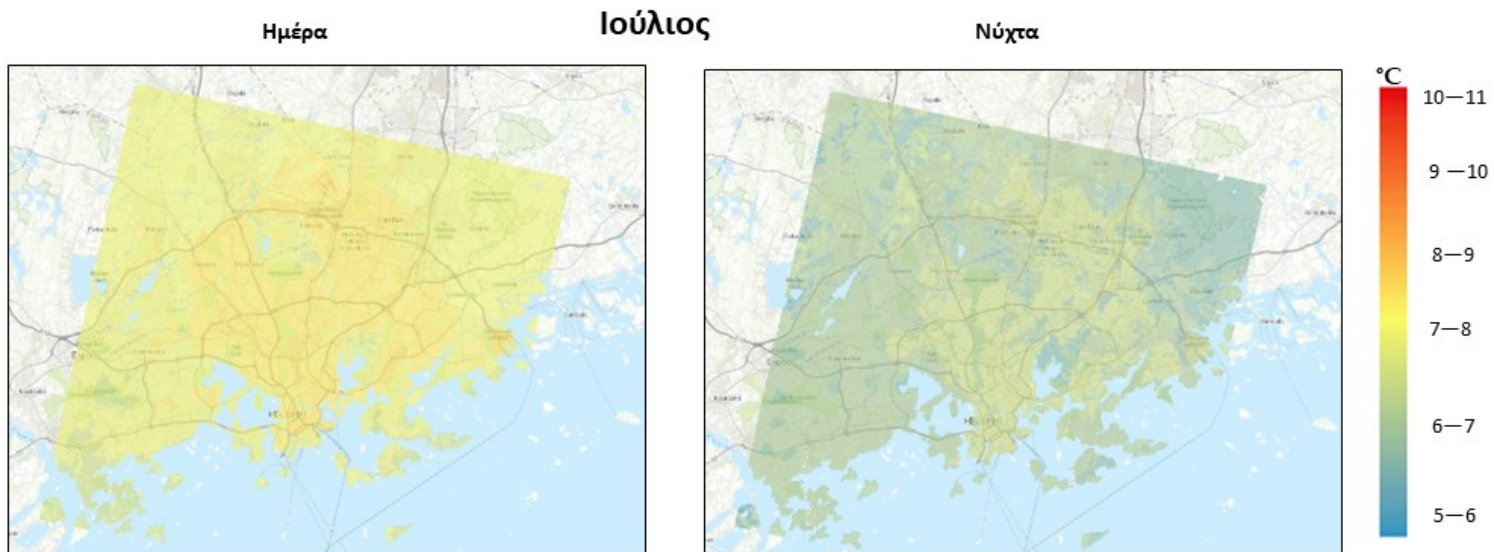


Σχήμα 6.31. Χωρική κατανομή της αστικής υπερθέρμανσης για το Ελσίνκι για το μήνα Ιούνιο κατά τη διάρκεια της ημέρας (αριστερά) και της νύχτας (δεξιά).

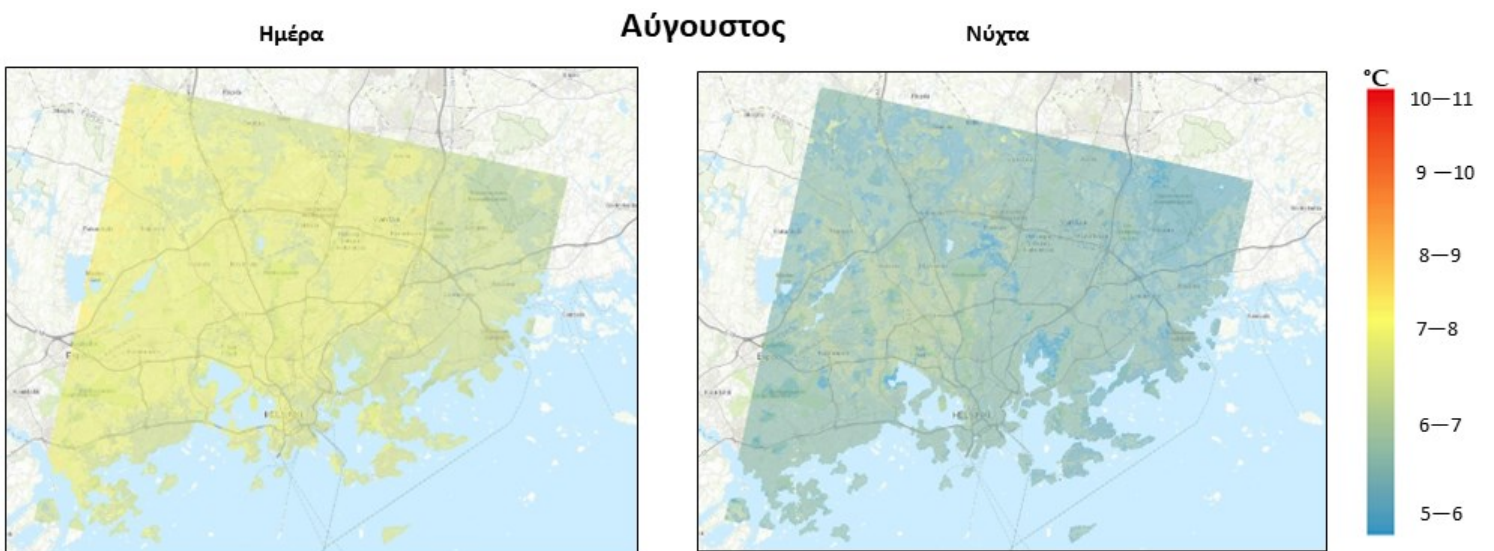
Πιο συγκεκριμένα, κατά τη διάρκεια της ημέρας και για το μήνα Ιούνιο υψηλές τιμές UOI εντοπίζονται στον αστικό κλοιό του κέντρου της πόλης, στη βόρειο-δυτική συνοικία Malmi, καθώς και σε ημιαστικές περιοχές (Kopala και Honkasuo) βόρειο-ανατολικά της πόλης. Κατά τη διάρκεια της νύχτας, παρατηρούνται χαμηλότερες τιμές UOI σε σύγκριση με την ημέρα, οι οποίες είναι εντοπισμένες κυρίως στο κέντρο και στην ευρύτερη περιοχή της πόλης (Σχήμα 6.31).



Για το μήνα Ιούλιο οι υψηλότερες τιμές του φαινομένου κατά τη διάρκεια της ημέρας συγκεντρώνονται στο κέντρο της πόλης όντας όμως πιο εκτεταμένες χωρικά και σε περιοχές βόρειο-δυτικά της πόλης από ότι τη νύχτα. Οι παραθαλάσσιες περιοχές τόσο κατά τη διάρκεια της ημέρας όσο και κατά τη διάρκεια της νύχτας σημειώνουν χαμηλότερες τιμές UO. Κατά τη διάρκεια της νύχτας, οι τιμές της UO είναι συγκριτικά χαμηλότερες και περιορίζονται κυρίως στο κέντρο της πόλης αλλά σε ημιαστικές περιοχές, βόρεια της πόλης (Σχήμα 6.32).



Σχήμα 6.32. Χωρική κατανομή της αστικής υπερθέρμανσης για το Ελσίνκι για το μήνα Ιούλιο κατά τη διάρκεια της ημέρας (αριστερά) και της νύχτας (δεξιά).

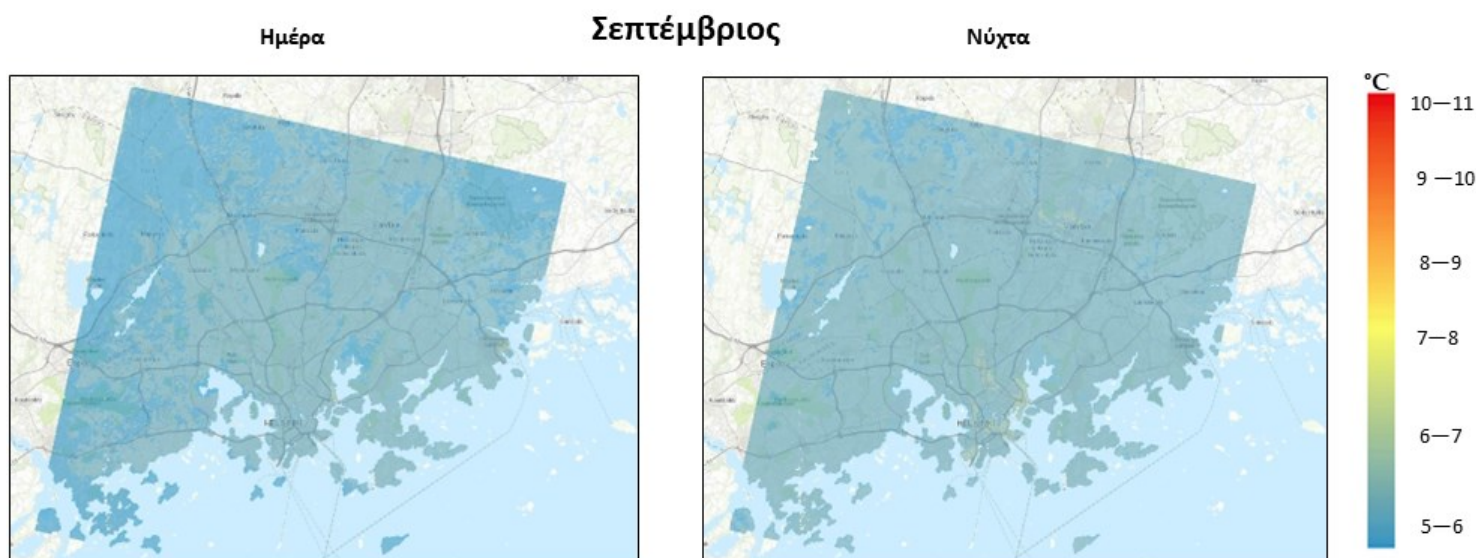


Σχήμα 6.33. Χωρική κατανομή της αστικής υπερθέρμανσης για το Ελσίνκι για το μήνα Αύγουστο κατά τη διάρκεια της ημέρας (αριστερά) και της νύχτας (δεξιά).

Τον Αύγουστο κατά τη διάρκεια της ημέρας το επίκεντρο του φαινομένου, δηλαδή οι υψηλότερες τιμές της διαφοράς θερμοκρασίας εντοπίζονται κυρίως στις περιοχές



ανατολικά και βόρεια του αστικού ιστού. Από την άλλη, κατά τη διάρκεια της νύχτας, η έκταση των υψηλών τιμών του φαινομένου εξασθενεί και περιορίζεται κυρίως στις βόρειο-ανατολικές περιοχές πλησίον του αστικού κέντρου σε αντίθεση με την ημέρα που είναι πιο εκτεταμένη (Σχήμα 6.33).



Σχήμα 6.34. Χωρική κατανομή της αστικής υπερθέρμανσης για το Ελσίνκι για το μήνα Σεπτέμβριο κατά τη διάρκεια της ημέρας (αριστερά) και της νύχτας (δεξιά).

Για το Σεπτέμβριο, χαμηλές τιμές UO επικρατούν τόσο κατά τη διάρκεια της ημέρας όσο και της νύχτας. Κατά τη διάρκεια νύχτας το φαινόμενο είναι ελαφρώς πιο έντονο, με μερικά διακριτά hot-spots να εμφανίζονται βόρεια και δυτικά του αστικού κλοιού της πόλης του Ελσίνκι (Σχήμα 6.34).

Συνοψίζοντας, κατά τη διάρκεια της ημέρας και για όλους τους μήνες, hot-spots της UO εντοπίζονται σε όλη την ευρύτερη περιοχή της πόλης του Ελσίνκι, μεγαλύτερης έντασης κυρίως στις αρχές του καλοκαιριού. Την περίοδο αυτή, αξιοσημείωτα hot-spots λαμβάνουν χώρα στον αστικό κλοιό του κέντρου της πόλης, σε αστικές και ημιαστικές περιοχές βόρειο δυτικά της πόλης (συνοικία Malmi), καθώς και σε διάσπαρτες ημιαστικές περιοχές βόρειο-ανατολικά της πόλης (συνοικίες Korpala και Honkasuo). Από την άλλη πλευρά, κατά τη διάρκεια της νύχτας, τόσο η ένταση όσο και η έκταση των hot-spots της UO , είναι αρκετά περιορισμένη, και αυτά εντοπίζονται κυρίως στον αστικό κλοιό και σε λίγες ημιαστικές περιοχές γύρω από αυτόν. Γενικά, το φαινόμενο της UO , με τη πάροδο του καλοκαιριού περιορίζεται χωρικά και εξασθενεί ως προς τη δυναμική του.



Στο Ελσίνκι, εκτός από το γεγονός ότι είναι μια παράκτια πόλη, η παρουσία ενδοαστικών υδάτινων τμημάτων είναι έντονη και άρρηκτα συνδεδεμένη με το χαρακτήρα της πόλης. Μεγάλος αριθμός νησιών, είτε μεγάλης έκτασης είτε μικρότερης, πλαισιώνουν την πόλη. Σε πολλά από αυτά (Lauttasaari, Katajanokka, Brändö κ.α.) η πρόσβαση είναι άμεση (οδικώς), αποτελώντας έτσι αναπόσπαστο κομμάτι της πόλης. Επιπλέον, όρμοι μεγάλης έκτασης που εισέρχονται στην ενδοχώρα (Toolo bay), ποτάμια (Vantaa) και αναρίθμητες μικρές λίμνες διάσπαρτες στον αστικό κλοιό, συνθέτουν ένα αστικό περιβάλλον με έντονη την παρουσία του υδάτινου στοιχείου. Ως γνωστόν, η υψηλή θερμοχωρητικότητα των υδάτινων σωμάτων τείνει να μειώνει το ημερήσιο εύρος θερμοκρασίας των παρακείμενων παράκτιων περιοχών σε σύγκριση με τις περισσότερες ηπειρωτικές τοποθεσίες. Η παρουσία υδάτινων σωμάτων επηρεάζει επίσης τόσο την χωρική όσο και χρονική συμπεριφορά της UHI. Η ισχύς και ο χαρακτήρας του φαινομένου εξαρτώνται για παράδειγμα, από την απόσταση από το υδάτινο σώμα, το μέγεθος και το σχήμα του υδατικού σώματος και τη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ του υδατικού συστήματος και της χερσαίας περιοχής (Saaroni and Ziv 2003). Για παράδειγμα, οι Steeneveld et al. (2014) μελετώντας την επίδραση των ανοιχτών υδάτινων περιοχών στην ένταση της UHI στο Ρότερνταμ της Ολλανδίας, κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού, κατέληξαν ότι υψηλότερες ημερήσιες εντάσεις της UHI εντοπίζονται σε τοποθεσίες με περισσότερο νερό στο περιβάλλον τους, καθώς η υψηλή θερμική ικανότητα των υδάτινων περιοχών, τις κρατά σχετικά ζεστές κατά τη διάρκεια της νύχτας. Το προηγούμενο παράδειγμα αποδεικνύει δε ότι παρά το μεγάλο δυναμικό εξάτμισης των υδάτινων σωμάτων, η χρήση τους ως εργαλείο μετριασμού για υψηλές αστικές θερμοκρασίες δεν είναι τόσο απλή (Hathway and Sharples 2012). Στο πλαίσιο αυτό όμως, θα μπορούσαμε ενδεχομένως να δικαιολογήσουμε σύμφωνα με τα παραπάνω την παρουσία εντονότερου UO κατά τη διάρκεια της ημέρας έναντι της νύχτας στην ευρύτερη περιοχή του Ελσίνκι, τόσο ως προς τη χωρική κατανομή αλλά και ως προς τη δυναμική του.



7. Γενικά συμπεράσματα – Προοπτικές

Στην παρούσα διατριβή διερευνάται η συσχέτιση μεταξύ των τοπικών καιρικών τύπων (WTs) και του φαινομένου της έντασης της αστικής θερμικής νήσου (UHI) και της αστικής υπερθέρμανσης (UO), κατά τη θερινή περίοδο, σε 4 αστικά Ευρωπαϊκά κέντρα. Όπως τονίζεται και στα εισαγωγικά κεφάλαια της διατριβής (Κεφάλαια 1 και 2), το φαινόμενο της UHI αποτελεί ένα εξαιρετικά σημαντικό, ανθρωπογενές και τοπικής κλίμακας φαινόμενο, όπου εκτός από τη μερική τροποποίηση του κλίματος σε μεγάλα αστικά κέντρα, συσχετίζεται με δυσμενείς επιπτώσεις στην ποιότητα του αέρα, με την κατανάλωση ενέργειας, με τη θνησιμότητα που σχετίζεται με την υπερθέρμανση και με τις ατμοσφαιρικές κυκλοφορίες τοπικής και περιφερειακής κλίμακας. Ως εκ τούτου, στο πλαίσιο ενός όλο και θερμαινόμενου παγκόσμιου περιβάλλοντος, είναι επιτακτική ανάγκη να βελτιώσουμε την κατανόηση αυτού του φαινομένου και να επικεντρωθούμε στην εξέλιξη και πρόβλεψή του, με στόχο την υποστήριξη της ανάπτυξης επιτυχημένων στρατηγικών μετριασμού κυρίως για μεγάλα αστικά κέντρα. Για την επίτευξη αυτού του στόχου (όπως παρουσιάστηκε και στο Κεφάλαιο 3), οι ταξινομήσεις τύπων καιρού (WTs) έχουν αποδειχθεί εξαιρετικά χρήσιμα εργαλεία, για τη μελέτη τόσο του σχηματισμού όσο και των επιπτώσεων της UHI.

Σε πρώτη φάση, στην παρούσα διατριβή, μελετήθηκαν τόσο οι μεταβολές στη συχνότητα τύπων καιρού (WTs), όσο και οι ετήσιες μεταβολές τριών μετεωρολογικών παραμέτρων (θερμοκρασία στην επιφάνεια του εδάφους, θερμοκρασία στην επιφάνεια της θάλασσας και σημείο δρόσου) στην ευρύτερη περιοχή της Ευρώπης, για μια χρονική περίοδο 41 ετών (1979 έως το 2019). Για το λόγο αυτό, αξιοποιήθηκε ένα πρόσφατα αναπτυγμένο σύστημα ταξινόμησης τύπων καιρού (Gridded Weather Type Classification 2- GWTC2), καθώς και μια σειρά στατιστικών μεθόδων, όπως αυτές περιγράφονται αναλυτικά στο Κεφάλαιο 4. Τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την ανάλυση που πραγματοποιήθηκε θα μπορούσαν να συνοψιστούν ως εξής:

- Στη συντριπτική πλειοψηφία των περιοχών της ευρύτερης Ευρώπης, οι θερμοί WTs δείχνουν σημαντική αύξηση στη συχνότητά τους από το 1979, ενώ ταυτόχρονα, οι περισσότεροι ψυχροί WTs παρουσιάζουν σημαντική μείωση. Σχετικά με τους μεταβατικούς WTs, μικρές μεταβολές παρατηρούνται.
- Αξιοσημείωτες μεταβολές στη συχνότητα των WTs σημειώνονται πρωτίστως στις περιοχές που περιλαμβάνουν τμήματα της Βόρειας Θάλασσας, της



Νορβηγικής Θάλασσας, της Θάλασσας της Γροιλανδίας και της Θάλασσας του Μπάρεντς και δευτερευόντως στον τομέα που περιλαμβάνει τη Νότια και Κεντρική Ευρώπη.

- Για την περίοδο μελέτης 1979 έως 2019, οι πολικές θαλάσσιες περιοχές (Νορβηγική Θάλασσα, Θάλασσα του Μπάρεντς και Θάλασσα της Γροιλανδίας) παρουσιάζουν μέση αύξηση θερμοκρασίας 3-4 °C, καθώς και αύξηση του σημείου δρόσου. Για την ίδια περίοδο επίσης, σημαντικές αλλαγές (+ 2-3 °C) σημειώνονται στις θαλάσσιες περιοχές γύρω από την Ισλανδία.

Εν συνέχεια, στο Κεφάλαιο 5, επιχειρείται η ταξινόμηση των επικρατούντων WTs για 4 μεγάλες Ευρωπαϊκές πόλεις (Αθήνα, Βαρκελώνη, Ελσίνκι και Λουξεμβούργο), για την περίοδο 1950-2020. Για τους επικρατούντες WTs διερευνώνται τα χαρακτηριστικά τους, η μηνιαία (από το 1950-2020) και ετήσια (από το 1990-2020) συχνότητα εμφάνισης τους. Τα επόμενα βήματα πραγματοποιούνται στο Κεφάλαιο 6, όπου αρχικώς υπολογίζεται η ένταση του φαινομένου της UHI (UHII), καθώς και η αστική υπερθέρμανση (UO) για κάθε πόλη από το 2008 έως το 2017, για τη θερινή περίοδο (Ιούνιος έως Σεπτέμβριο) τόσο κατά τη διάρκεια της ημέρας όσο και κατά τη διάρκεια της νύχτας. Στο στάδιο αυτό αξιοποιήθηκαν τα δεδομένα από την πρόσφατη βάση δεδομένων Copernicus urban climate. Έπειτα, πραγματοποιείται η κατανομή συχνοτήτων της UHII για κάθε πόλη, εξετάζεται η συσχέτιση της UO με τους κυριάρχους WTs και τέλος, διερευνάται η χρονική και χωρική (hot-spots) κατανομή της UO. Τα βασικά συμπεράσματα αυτής της μελέτης μπορούν να συνοψιστούν ως εξής για κάθε πόλη.

Για την πόλη της Αθήνας:

- Προσδιορίστηκαν 10 WTs από το 1950-2020, από τους οποίους 2 αναφέρονται στην θερμή και 8 στην ψυχρή περίοδο του έτους. Οι θερμοί WTs επικρατούν λιγότερες ημέρες από τους ψυχρούς. Ένας από τους δύο WTs της θερμής περιόδου παρουσιάζει θετική στατιστικά σημαντική γραμμική τάση στη διαχρονική διακύμανση της συχνότητας του από το 1990-2020, ενώ για τον άλλο, υπολογίστηκε ότι παρουσιάζει αρνητική στατιστικά σημαντική γραμμική τάση.
- Το φαινόμενο της UHI παρουσιάζεται πιο έντονο κατά τη διάρκεια της νύχτας.



- Κατά τη διάρκεια την ημέρας και κατά τη διάρκεια της νύχτας, οι θερινοί WTs σχετίζονται με την ενίσχυση της UO. Τέτοιοι WTs συνδέονται με θερμές και υγρές συνθήκες κατά τη διάρκεια της ημέρας και με ξηρές θερμές συνθήκες τη νύχτα.
- Αρνητικές στατιστικά σημαντικές γραμμικές τάσεις εντοπίζονται στη διαχρονική διακύμανση της UO, για την περίοδο 2008-2018, τόσο για την ημέρα όσο και για τη νύχτα, ενώ σε όλες τις περιπτώσεις hot-spots της UO εμφανίζουν τις μέγιστες τιμές τους στις αρχές/τέλη του καλοκαιριού.

Για την περίπτωση της Βαρκελώνης:

- Για τη χρονοσειρά 1950-2020 περιγράφεται καταλληλότερα από 7 τύπους καιρού, από τους οποίους οι 3 αναφέρονται στη θερμή και οι 4 στη ψυχρή περίοδο του έτους. Τις περισσότερες ημέρες της χρονοσειράς επικρατούν τύποι καιρού που ανήκουν στη θερμή περίοδο του έτους. Και οι 3 WTs της θερμής περιόδου παρουσιάζουν μια θετική στατιστικά σημαντική γραμμική τάση στη διαχρονική διακύμανση της συχνότητας τους από το 1990-2020.
- Το φαινόμενο της UHI είναι κυρίως νυχτερινό.
- Κατά τη διάρκεια της ημέρας και της νύχτας, η UO σχετίζεται με την εμφάνιση των κυρίαρχων τυπικών θερινών WTs. Οι θερινοί WTs συνδέουν την παρουσία τους με υψηλές θερμοκρασίες, μέτριας έντασης ανέμους και μέτρια νεφοκάλυψη.
- Κατά τη διάρκεια της ημέρας μια εξαιρετικά μικρή αύξηση, μη στατιστικά σημαντική υπολογίστηκε, ενώ για την περίπτωση της νύχτας διαπιστώθηκε μια αρνητικά στατιστικά σημαντική γραμμική τάση στη διαχρονική διακύμανση της UO, για την περίοδο 2008-2018.
- Τα νυχτερινά hot-spots της UO είναι πιο καλά εντοπισμένα και παρουσιάζουν μεγαλύτερη ένταση, κυρίως στις αρχές/τέλη του καλοκαιριού, ενώ κατά διάρκεια της ημέρας τα hot-spots της UO είναι πιο έντονα στις αρχές/μέσα του καλοκαιριού.

Στην περίπτωση του Λουξεμβούργου:

- Για τη χρονοσειρά 1950-2020 σύμφωνα με τα αποτελέσματα χαρακτηρίζεται από 8 WTs, οι οποίοι χωρίζονται σε 3 της θερμής περιόδου και σε 5 της ψυχρής. Οι θερινοί WTs επικρατούν λιγότερες ημέρες από τους ψυχρούς. Δύο από τους



τρεις WTs της θερμής περιόδου παρουσιάζουν μια θετική στατιστικά σημαντική γραμμική τάση στη διαχρονική διακύμανση (1990-2020) της συχνότητας τους.

- Το φαινόμενο της UHI είναι κυρίως νυχτερινό.
- Κατά τη διάρκεια της ημέρας και της νύχτας, η UO σχετίζεται με την εμφάνιση των κυρίαρχων τυπικών θερινών WTs. Και οι 3 WTs, συνδέουν την παρουσία τους με υψηλές θερμοκρασίες, μέτριας έντασης ανέμους και μέτρια νεφοκάλυψη.
- Κατά τη διάρκεια της ημέρας υπολογίστηκε μια θετική στατιστικά σημαντική γραμμική τάση στη διαχρονική διακύμανση της UO, ενώ για την περίπτωση της νύχτας μια πολύ μικρή αρνητική στατιστικά σημαντική γραμμική τάση, για την περίοδο 2008-2018.
- Κατά τη διάρκεια της ημέρας, hot-spots της UO εντοπίζονται με μεγαλύτερη ένταση κυρίως τον Ιούνιο και τον Ιούλιο, ενώ κατά τη διάρκεια της νύχτας, η ένταση είναι για όλους μήνες αισθητά πιο έντονα σε σύγκριση με τα hot-spots κατά τη διάρκεια της ημέρας.

Για την περίπτωση της πόλης του Ελσίνκι:

- Οι μέρες της χρονοσειράς 1950-2020 κατανέμονται σε 6 WTs, όπου χωρίζονται σε 4 της ψυχρής και 2 της θερμής περιόδου. Οι ψυχροί WTs κυριαρχούν τις περισσότερες μέρες της χρονοσειράς. Ένας από τους δύο WTs της θερμής περιόδου παρουσιάζει μια θετική στατιστικά σημαντική γραμμική τάση στη διαχρονική (1990-2020) διακύμανση της συχνότητας τους.
- Το φαινόμενο UHI φαίνεται να είναι πιο ισχυρό κατά τη διάρκεια της νύχτας.
- Κατά τη διάρκεια της ημέρας και της νύχτας, η UO σχετίζεται με την εμφάνιση των κυρίαρχων τυπικών θερινών WTs. Και οι δύο WTs σχετίζονται με υψηλές για την περιοχή μέσες θερμοκρασίες, χαμηλής έντασης ανέμους, μέτρια νεφοκάλυψη και νοτιοδυτικές ροές.
- Παρατηρείται μια αρνητική στατιστικά σημαντική γραμμική τάση στη διαχρονική διακύμανση της UO, για την περίοδο 2008-2018 τόσο κατά τη διάρκεια της ημέρας, όσο και κατά τη διάρκεια της νύχτας.
- Κατά τη διάρκεια της ημέρας, hot-spots της UO εντοπίζονται με μεγαλύτερη ένταση κυρίως στις αρχές του καλοκαιριού ενώ το φαινόμενο της UO με την



πάροδο του καλοκαιριού περιορίζεται χωρικά και εξασθενεί ως προς τη δυναμική του.

Για το σύνολο και των 4 πόλεων, προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

- Παρατηρείται μια αύξηση των κυρίαρχων WTs της θερμής περιόδου από το 1990-2020, σε συμφωνία και με τα αποτελέσματα του Κεφαλαίου 5.
- Το φαινόμενο της UHI, παρουσιάζεται ισχυρότερο κατά τη διάρκεια της νύχτας, για τη θερινή περίοδο.
- Οι θερινοί WTs που ενισχύουν την UO, κυρίως σχετίζονται με συνθήκες υψηλών θερμοκρασιών, ασθενών ανέμων και χαμηλής/μέτριας νεφοκάλυψης. Ωστόσο, τοπικά φαινόμενα μικρής ή μεσαίας κλίμακας (π.χ. παρουσία θαλάσσιας αύρας κυρίως στις παράκτιες πόλεις) φαίνεται να επηρεάζουν περισσότερο την ένταση και την έκταση της UO.
- Ως προς τη χρονική διακύμανση της UO, δεν παρατηρείται κάποιο συγκεκριμένο μοτίβο, αντίθετα φαίνεται να εξαρτάται τόσο από τα χαρακτηριστικά της πόλης (επέκταση, αύξηση/μείωση πληθυσμού, έκταση, αστικό τοπίο κ.α.) όσο και από οικονομικούς παράγοντες (παράδειγμα η περίπτωση της Αθήνας).
- Ως προς τη χωρική διακύμανση της UO, για τις Μεσογειακές πόλεις (Αθήνα και Βαρκελώνη) παρατηρούνται πιο καλά εντοπισμένα νυχτερινά hot-spots της UO, μεγαλύτερης έντασης και έκτασης, κυρίως στις αρχές/τέλη του καλοκαιριού, ενώ στις πόλεις μεγαλύτερου γεωγραφικού πλάτους (Λουξεμβούργο και Ελσίνκι) τα hot-spots της UO, είναι πιο έντονα στις αρχές του καλοκαιριού.
- Όσο αυξάνεται το γεωγραφικό πλάτος, παρατηρείται περιορισμός της UO, τόσο χωρικά όσο και ως προς τη δυναμική του φαινομένου, ενώ το φαινόμενο φαίνεται να είναι πιο ενισχυμένο κατά τη διάρκεια της νύχτας σε σύγκριση με την ημέρα.

Συνοψίζοντας, στη παρούσα διατριβή διάφορες στατιστικές μέθοδοι και πρόσφατα ανεπτυγμένες βάσεις δεδομένων έχουν αξιοποιηθεί, με σκοπό την διερεύνηση τόσο των τάσεων των τύπων καιρού (WTs) στην Ευρώπη, όσο και για τη μελέτη του φαινομένου της έντασης της αστικής θερμικής νησίδας μέσω ταξινομήσεων WTs, σε 4 μεγάλα αστικά κέντρα της. Η μεθοδολογία και η πορεία της παρούσας διατριβής αποτελεί μια



καινοτόμα διαδικασία, υπό το πρίσμα της αξιοποίησης της πολύ πρόσφατα ανεπτυγμένης ταξινόμησης WTs GWTC2, όπου πρώτη φορά εφαρμόζεται για τη μελέτη των τάσεων στη συχνότητα των WTs σε τέτοια έκταση για την Ευρώπη, αλλά κυρίως της χρήσης της ακόμη πιο πρόσφατης και μεγάλης βάσης δεδομένων από την Υπηρεσία Κλιματικής Αλλαγής Copernicus, η οποία επίσης πρώτη φορά αξιοποιείται για τη μελέτη της UHI στα 4 αυτά Ευρωπαϊκά κέντρα. Τα αποτελέσματα από την αξιοποίηση της GTWC2, συμβάλλουν στη περαιτέρω διερεύνηση της Αρκτικής ενίσχυσης και της υπερθέρμανσης των αστικών Ευρωπαϊκών περιοχών. Η μελέτη δε της UHI με τη χρήση μιας βάσης τόσο πυκνής χωρικά (σε επίπεδο γειτονιάς) όσο και χρονικά (ωριαίες τιμές θερμοκρασίας), σε συνδυασμό με την ανάπτυξη τοπικών ταξινομήσεων WTs, αποκαλύπτουν νέες παραμέτρους που συμβάλουν στην ενίσχυση της έντασης της UHI καθώς και της UO, ειδικά σε πόλεις που η μελέτη της UHI είναι αρκετά περιορισμένη (π.χ. Λουξεμβούργο και Ελσίνκι). Επιπλέον, η διαχείριση και η επεξεργασία τόσο μεγάλου όγκου δεδομένων (big data), αποτέλεσε αφορμή για τον σχεδιασμό μιας αυτοματοποιημένης μεθοδολογίας, η οποία μπορεί να εφαρμοστεί εν συνεχεία για κάθε πόλη. Κλείνοντας, συγκρίνοντας τα αποτελέσματα για κάθε πόλη, ενδιαφέρουσες προτάσεις αστικού σχεδιασμού μπορούν να προκύψουν προκειμένου να σχεδιαστούν και να εφαρμοστούν επιτυχημένες στρατηγικές μετριασμού του φαινομένου κατά τη θερινή περίοδο, ενώ η αξιοποίηση των τοπικών ταξινομήσεων WTs μπορεί να συνεισφέρει στην αποτελεσματική πρόγνωση του. Φυσικά, οι μελλοντικές προοπτικές της παραπάνω μεθοδολογίας είναι αρκετές. Θα σταθούμε κυρίως στη μελέτη του φαινομένου της UHI για την περίοδο της χειμερινής περιόδου (με την ίδια μεθοδολογία), όπου αναμένεται να αναδειχθούν σημαντικά συμπεράσματα κυρίως για πόλεις μεγάλων γεωγραφικών πλατών καθώς και στην αξιοποίηση της βάσης Copernicus urban climate, για τη μελέτη του φαινομένου σε παραπάνω Ευρωπαϊκές και Ελληνικές πόλεις.



Βιβλιογραφία

- Akbari H., Pomerantz M. and Taha H. 2001. Cool surfaces and shade trees to reduce energy use and improve air quality in urban areas, *Solar Energy*, 70(3): 295-310.
- Anagnostopoulou C., Zanis P., Katragkou E., Tegoulas I. and Tolika, K. 2014. Recent past and future patterns of the etesian winds based on regional scale climate model simulations. *Climate Dynamics*, 42, 1819–1836.
- Arellano B. and Roca J. 2021. Remote sensing and night time urban heat island, *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLIII-B3-2021, 15–22.
- Arnfield A.J. 1990. Canyon geometry, the urban fabric and nocturnal cooling: A simulation approach. *Physical Geography* 11: 220-239.
- Arnfield A.J. 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: 1-26.
- Ashley W.S., Bentley M.C. and Stallins J.A. 2012. Urban-induced thunderstorm modification in the Southeast United States. *Climatic Change*, 113(2): 481-498.
- Barry R.G. and Perry A.H. 2001. Synoptic climatology and its applications. *Synoptic and Dynamic Climatology*, Routledge, 547–603.
- Basu R., 2009. High ambient temperature and mortality: A review of epidemiologic studies from 2001 to 2008. *Environmental Health: A Global Access Science Source*, 8(1). Retrieved from <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-71049181519&partnerID=40&md5=890eff6bac86213b3d01a1d216c1ecc6>
- Bhatt U.S., Walker D.A., Reynolds M.K., Comiso J.C., Epstein H.E., Gia G-S., Gens R., Pinzon J.E., Tucker C.J., Tweediw C.E. and Webber, P.J. 2010. Circumpolar Arctic tundra vegetative change is linked to sea ice decline. *Earth Interactions*, 14:1–20.
- Bower D., McGregor G.R., Hanna D.M. and Sheridan S.C. 2007. Development of a spatial synoptic classification scheme for western Europe. *International Journal of Climatology* 27, 2017-2040.
- Buscail C., Upegui E. and Viel J.F. 2012. Mapping heatwave health risk at the community level for public health action. *International Journal Health Geographics*. 11:38.
- Campagna M., Di Cesare E.A. and Cocco C. 2020. Integrating Green-Infrastructures Design in Strategic Spatial Planning with Geodesign. *Sustainability*. 12, 1820
- Chandler T.J. 1961. The changing climate of London's heat island. *Geography* 46: 295- 307.



- Changon S.A. and Huff F.A. 1986. The urban-related nocturnal rainfall anomaly at St. Louis. *Journal of Climate and Applied Meteorology* 25: 1985-1995.
- Christen A. and Vogt R. 2004. Energy and radiation balance of a central European city. *International Journal of Climatology* 24: 1395-1421.
- Ciais P., Reichstein M., Viovy N., et al. 2005. Europe-wide reduction in primary productivity caused by the heat and drought in 2003. *Nature* 437, 529–533.
- Clarke J.F. 1972. Some effects of the urban structure on heat mortality. *Environmental Research* 5: 93-104.
- Conti S., Meli P., Mineli G., Solimini R., Toccaceli V., Vichi M., Beltrano C. and Perini L. 2005. Epidemiologic study of mortality during the summer 2003 heat wave in Italy. *Environmental Research* 98: 390-399.
- Coutts A.M., Beringer J. and Tapper N.J. 2003. Impact of increasing urban density on local climate: Spatial and temporal variations in the surface energy balance in Melbourne, Australia. *Journal of Applied Meteorology*, 46: 477-493.
- Dandou A., Tombrou M. and Soulakellis N. 2009. The influence of the city of Athens on the evolution of the sea-breeze front. *Boundary-Layer Meteorology*, 131: 35-51.
- Dandou A., Tombrou M., Akylas E., Soulakellis N. and Bossioli E. 2005. Development and evaluation of an urban parameterization scheme in the Penn State/NCAR Mesoscale Model (MM5). *Journal of Geophysical Research*, 110, D10102.
- Davis R.E. 1991. A synoptic climatological analysis of winter visibility trends in the Mideastern United States. *Atmospheric Environment*, 25B (2), 165-175.
- Davis R.E. and Kalkstein L.S. 1990. Development of an automated spatial synoptic classification. *International Journal of Climatology*, 10, 769-794.
- Davis R.E. and Rogers R.F. 1992. A synoptic climatology of severe storms in Virginia. *The Professional Geographer*, 44(3): 319-332.
- Davis R.E. and Walker D.R. 1992. An Upper-Air Synoptic Climatology of the Western United States. *Journal of Climate*, 5(12): 1449-1467.
- Davis R.E., Normile C.P., Sitka L., Hondula D.M., Knight D.B., Gawtry S.P. and Stenger P.J. 2010. A comparison of trajectory and air mass approaches to examine ozone variability. *Atmospheric Environment*, 44, 64-74.
- De Ridder K., Angel Acero J., Lauwaet D., Lefebvre W., Maiheu B. and Mendizabal M. 2013. RAMSES project report D4.1: Validation of agglomeration-scale climate projections.
- De Ridder K., Lauwaet D. and Maiheu B. 2015. UrbClim—A fast urban boundary layer climate model. *Urban Climate*, 12, 21–48.



- Deser C., Thomas R., Alexander M. and Lawrence D. 2010. The seasonal atmospheric response to projected Arctic Sea ice loss in the late 21st century. *Journal of Climate* 23:333–351.
- Dong W., Liu Z., Zhang L., Tang Q., Liao H. and Li X. 2014. Assessing heat health risk for sustainability in Beijing's urban heat island. *Sustainability*. 6(10):7334–57.
- Drebs A., Suomi J. and Mäkelä A. 2023. Urban heat island research at high latitudes -utilising Finland as an example. *Boreal Environment Research*. 28: 81-96.
- Du H., Wang D., Wang Y., Zhao X., Qin F., Jiang H. and Cai Y. 2016. Influences of land cover types, meteorological conditions, anthropogenic heat and urban area on surface urban heat island in the Yangtze River Delta urban agglomeration. *Science of the Total Environment*. 571, 461–470.
- Ekholm J. 1981. Joensuun paikallisilmasto. *Terra* 93(4): 145–154.
- Eliasson I. 1996. Urban nocturnal temperatures. Street geometry and land use. *Atmospheric Environment*. 30, 379–392.
- Escourrou G. 1991. Climate and pollution in Paris. *Energy and Buildings*. 15–16, 673–676.
- Flanner M.G. 2009. Integrating anthropogenic heat flux with global climate models, *Geophysical Research Letters*, 36, L02801, 1-5.
- Founda D., Pierros F., Petrakis M. and Zerefos C. 2015. Interdecadal variations and trends of the urban Heat Island in Athens (Greece) and its response to heat waves. *Atmospheric Research*. 161–162, 1–13.
- Francis J.A. and Vavrus S.J. 2012. Evidence linking Arctic amplification to extreme weather in mid-latitudes. *Geophysical Research Letters*, 39:1–6.
- Frank K.L., Geils B.W., Kalkstein L.S. and Thistle Jr. H.W. 2008. Synoptic climatology of the long-distance dispersal of white pine blister rust II. Combination of surface and upper-level conditions. *International Journal of Biometeorology*, 52, 653-666.
- Giannaros C., Nenes A., Giannaros T.M., Kourtidis K. and 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.M. and Melas D. 2012. Study of the urban heat island in a coastal Mediterranean City: the case study of Thessaloniki, Greece. *Atmospheric Research*. 118, 103–120.
- Giannaros T.M., Melas D., Daglis I.A., Keramitsoglou I. and Kourtidis K. 2013. Numerical study of the urban heat island over Athens (Greece) with the WRF model. *Atmospheric Environment*, 73, 103–111.
- Gilbert R.O. 1987. *Statistical Methods for Environmental Pollution Monitoring*, Wiley, NY.



- Gillett N.P. and Stott P.A. 2009. Attribution of anthropogenic influence on seasonal sea level pressure. *Geophysical Research Letters* 36: L23709.
- Goggins W.B., Chan E.Y.Y, Ng E., Ren C. and Chen L. 2012. Effect modification of the association between short-term meteorological factors and mortality by urban heat islands in Hong Kong. *PLoS One*. 7(6):e38551
- Greene J.S. and Kalkstein L.S. 1996. Quantitative analysis of summer air masses in the eastern United States and an application to human mortality. *Climate Research* 7, 43-53.
- Greene J.S., Kalkstein L.S., Ye H. and Smoyer K. 1999. Relationships between Synoptic Climatology and Atmospheric Pollution at 4 US cities. *Theoretical and Applied Climatology* 62, 163-174.
- Grimmond C.S.B. and Oke T.R. 1995. Comparison of heat fluxes from summertime observations in the suburbs of four North American cities. *Journal of Applied Meteorology* 34: 873-889.
- Grimmond C.S.B. and Oke T.R. 1999b. Heat storage in urban areas: local-scale observations and evaluation of a simple model. *Journal of Applied Meteorology* 38: 922-940.
- Guo Y., Barnett A.G. and Tong S. 2013. Spatiotemporal model or time series model for assessing city-wide temperature effects on mortality? *Environmental Research*.120:55–62.
- Hacker J.N., Belcher S.E. and Connell R.K. 2005. Beating the Heat: Keeping UK Buildings Cool in a Warming Climate. *Climate Impacts Programme*, Oxford, United Kingdom.
- Hanna A.F., Yeatts K.B., Xiu A., Zhengyuan Z., Smith R.L., Davis N.N., Talgo K.D., Arora G., Robinson P.J., Meng Q. and Pinto J.P. 2011. Associations between ozone and morbidity using the Spatial Synoptic Classification system. *Environmental Health* 10(49): 15 pp.
- Harlan S.L. and Ruddell D.M. 2011. Climate change and health in cities: impacts of heat and air pollution and potential co-benefits from mitigation and adaptation. *Current Opinion in Environmental Sustainability*. 2011;3:126–34.
- Harlan S.L., Brazel A.J., Jenerette G.D., Jones N.S., Larsen L., Prashad L., et al. 2007. In the shade of affluence: the inequitable distribution of the urban heat island. In: *Equity and the Environment*. Emerald Group Publishing Limited.15:173-202
- Hathway E.A. and Sharples S. 2012. The interaction of rivers and urban form in mitigating the urban heat island effect: a UK case study. *Building and Environment* 58: 14–22.
- Hatvani-Kovacs G., Belusko M., Skinner N., Pockett J. and Boland J 2016. Drivers and barriers to heat stress resilience. *Science of Total Environment*. Elsevier. 571:603–14.



- Hawkins T.W., Brazel A.J., Stefanov W.L., Bigler W. and Saffell E.M. 2004. The role of rural variability in urban heat island determination for Phoenix, Arizona. *Journal of Applied Meteorology* 43: 476-486.
- He B.J. 2018. Potentials of meteorological characteristics and synoptic conditions to mitigate urban heat island effects. *Urban Climate*. 24, 26–33.
- Heaviside C., Vardoulakis S and Cai X-MM. 2016. Attribution of mortality to the urban heat island during heatwaves in the West Midlands, UK. *Environmental Health*. 15:49–59.
- Hersbach H., Bell B., Berrisford P., Biavati G., Horányi A., Muñoz Sabater J., Nicolas J., Peubey C., Radu R., Rozum I., Schepers D., Simmons A., Soci C., Dee D. and Thépaut J-N. 2018. ERA5 hourly data on single levels from 1979 to present. *Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS)*.
- Hidalgo J. and Jougl R. 2018. On the use of local weather types classification to improve climate understanding: an application on the urban climate of Toulouse. *PLoS One* 13 (12), e0208138.
- Higgins, M.E., Cassano, J.J., 2009. Impacts of reduced sea ice on winter Arctic atmospheric circulation, precipitation and temperature. *Journal of Geophysical Research* 114: D16107.
- Hondula D.M. and Davis R.E. 2011. Climatology of winter transition days for the contiguous USA, 1951-2007. *Theoretical and Applied Climatology* 103(1-2), 27-37.
- Houssos E.E., Lolis C.J. and Bartzokas A. 2008. Atmospheric circulation patterns associated with extreme precipitation amounts in Greece. *Advances in Geosciences*, 17, 5–11.
- Huang G. and Cadenasso M.L. 2016. People, landscape, and urban heat island: dynamics among neighborhood social conditions, land cover and surface temperatures. *Landscape Ecology*. Springer Netherlands. 31: 2507–15.
- Huang G., Zhou W. and Cadenasso M.L. 2011. Is everyone hot in the city? Spatial pattern of land surface temperatures, land cover and neighborhood socioeconomic characteristics in Baltimore, MD. *Journal of Environmental Management*. 92:1753–9.
- Hung T., Uchihama D., Ochi S. and Yasuoka Y. 2006. Assessment with satellite data of the urban heat island effects in Asian mega cities. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 8(1): 34-48.
- Huth R. 2010. Synoptic-climatological applicability of circulation classifications from the COST733 collection: First results. *Physics and Chemistry of the Earth* 35, 388-394.
- Huth R., Beck C., Philipp A., Demuzere M., Ustrnul Z., Cahynová M., ... Tveito O.E. 2008. Classifications of atmospheric circulation patterns. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1146(1), 105-152.



- Ionita M., Lohmann G., Rimbu N., Chelcea S. and Dima M. 2011. Interannual to decadal summer drought variability over 15 Europe and its relationship to global sea surface temperature. *Climate Dynamics* 38:363–377.
- IPCC, 2019. Summary for Policymakers. In: *Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems* [P.R. Shukla, J. Skea, E. Calvo Buendia, V. Masson-Delmotte, H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, P. Zhai, R. Slade, S. Connors, R. van Diemen, M. Ferrat, E. Haughey, S. Luz, S. Neogi, M. Pathak, J. Petzold, J. Portugal Pereira, P. Vyas, E. Huntley, K. Kissick, M. Belkacemi, J. Malley, (eds.)].
- Iungman T., Khomenko S., Nieuwenhuijsen M., Barboza E.P., Ambròs A., Padilla C. and Mueller N. 2021. The impact of urban and transport planning on health: Assessment of the attributable mortality burden in Madrid and Barcelona and its distribution by socioeconomic status, *Environmental Research*, 196, 110988.
- Jamason P.F., Kalkstein L.S. and Gergen P.J. 1997. A synoptic evaluation of asthma hospital admissions in New York City. *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, 156: 1781-1788.
- Jolliffe I.T. 1986. *Principal Component Analysis*. Springer.
- Jorba O., Pérez C., Rocadenbosch F. and Baldasano J. 2004. Cluster Analysis of 4-Day Back Trajectories Arriving in the Barcelona Area, Spain, from 1997 to 2002. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 43, 887–901.
- Kalkstein L.S. and Corrigan P.R. 1986. A synoptic climatological approach for geographical analysis: assessment of sulfur dioxide concentrations. *Annals of the Association of American Geographers*, 76, 381-395.
- Kalkstein L.S. and Greene J.S. 1997. An evaluation of climate/mortality relationships in large U.S. cities and the possible impacts of climate change. *Environmental Health Perspectives*, 105(1): 84-93.
- Kalkstein L.S., Nichols M.C., Barthel C.D. and Greene J.S. 1996. A new spatial synoptic classification: application to air-mass analysis. *International Journal of Climatology*, 16, 983-1004.
- Kalkstein L.S., Sheridan S.C. and Graybeal D.Y. 1998. A determination of character and frequency changes in air masses using a spatial synoptic classification. *International Journal of Climatology* 18, 1223-1236.
- Kalnay E., Kanamitsu M., Kistler R., Collins W., Deaven D., Gandin L., Iredell M., Saha S., White G., Woollen J., Zhu Y., Chelliah M., Ebisuzaki W., Higgins W., Janowiak J., Mo K.C., Ropelewski C., Wang J., Leetmaa A., Reynolds R., Jenne R. and Joseph D. 1996.



- The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 77(3): 437-471.
- Kassomenos P., Kissas G., Petrou I., Begou P., Khan H.S. and Santamouris M. 2022. The influence of daily weather types on the development and intensity of the urban heat island in two Mediterranean coastal metropolises. *Science of the Total Environment*. 819, 153071.
- Kassomenos P.A. and Katsoulis B.D. 2006. Mesoscale and macroscale aspects of the morning urban heat island around Athens, Greece. *Meteorology and Atmospheric Physics* 94: 209-218.
- Kautz L.A., Martius O., Pfahl S., Pinto J. G., Ramos A. M., Sousa P. M. and Woollings T. 2022. Atmospheric blocking and weather extremes over the Euro-Atlantic sector – a review, *Weather and Climate Dynamics*, 3, 305–336.
- Kendall M. 1975. Multivariate analysis. *Charles Griffin*, London, p 210.
- Keramitsoglou I., Kiranoudis C.T., Ceriola G., Weng Q. and Rajasekar U. 2011. Identification and analysis of urban surface temperature patterns in Greater Athens, Greece, using MODIS imagery. *Remote Sensing Environment*, 115, 3080–3090.
- Kershaw S.E. and Millward A.A. 2012. A spatio-temporal index for heat vulnerability assessment. *Environmental Monitoring and Assessment*. 184:7329–42
- Khan H.S., Santamouris M., Kassomenos P., Paolini R., Caccetta P. and Petrou I. 2021. Spatiotemporal variation in urban overheating magnitude and its association with synoptic airmasses in a coastal city. *Scientific Reports*. 11, 6762.
- Kim Y.H. and Baik J.J. 2002. Maximum urban heat island intensity in Seoul. *Journal of Applied Meteorology* 41: 651-659.
- Kim Y.H. and Baik J.J. 2005. Spatial and temporal structure of the urban heat island in Seoul. *Journal of Applied Meteorology* 44: 651-659.
- Kistler R., Kalnay E., Collins W., Saha S., White G., Woollen J., Chelliah M., Ebisuzaki W., Kanamitsu M., Kousky V., Van Den Dool H., Jenne R. and Fiorino, M. 2001. The NCEP–NCAR 50-Year Reanalysis: Monthly Means CD-ROM and Documentation. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 82 (2): 247-267.
- Knight D.B., Davis R.E., Sheridan S.C., Hondula D.M., Sitka L.J., Deaton M., Lee T.R., Gawtry S.D., Stenger P.J., Mazzei F. and Kenny B.P. 2008. Increasing frequencies of warm and humid air masses over the conterminous United States from 1948 to 2005. *Geophysical Research Letters* 35, L10702, 1-5.
- Kourtidis K., Georgoulas A.K., Rapsomanikis S., Amiridis V., Keramitsoglou I., Hooyberghs H., Maiheu B. and Melas D. 2015. A study of the hourly variability of the urban heat



- island effect in the Greater Athens Area during summer, *Science of the Total Environment*, 517: 162–177.
- Kuttler W., Weber S., Schonfeld J. and Hesselschwerdt A. 2007. Urban/rural atmospheric water vapour differences and urban moisture excess in Krefeld, Germany. *International Journal of Climatology* 25: 2005-2015.
- Laaksonen K. 1994. Lämpötilan jakaumia Hyvinkään kaupungissa keskikesän öinä. *Terra* 106(3): 326–342.
- Landsberg H.E. 1981. The urban climate. *International Geophysics Series*, Vol.28, Academic Press, New York, 275 P.
- Lauwaet D., De Ridder K., Saeed S., Brisson E., Chatterjee F., Van Lipzig N.P.M. and Hooyberghs H. 2016. Assessing the current and future urban heat island of Brussels. *Urban Climate*. 15, 1–15.
- Lee C.C. 2012. Utilizing synoptic climatological methods to assess the impacts of climate change on future tornado-favorable environments. *Natural Hazards*, 62(2) 325-343.
- Lee C.C. 2015. The development of a gridded weather typing classification scheme. *International Journal of Climatology*, 35: 641–659.
- Lee C.C. 2017. Reanalysing the impacts of atmospheric teleconnections on cold-season weather using multivariate surface weather types and self-organizing maps. *International Journal of Climatology*, 37:3714–3730
- Lee C.C. 2020. The gridded weather typing classification version 2: a global-scale expansion. *International Journal of Climatology*, 40(2):1178–1196.
- Lee C.C. and Sheridan S.C. 2018. Trends in weather type frequencies across North America. *npj Climate and Atmospheric Science*, 1:41
- Lee C.C., Ballinger T.J. and Domino N.A. 2012. Utilizing map pattern classification and surface weather typing to relate climate to the Air Quality Index in Cleveland, Ohio. *Atmospheric Environment*, 63, 50-59.
- Lee S.H. and Baik J.J. 2010. Statistical and dynamical characteristics of the urban heat island intensity in Seoul. *Theoretical and Applied Climatology*, 100 (1), 227–237.
- Lehoczky A., Sobrino J.A., Skoković D. and Aguilar E. 2017. The Urban Heat Island Effect in the City of Valencia: A Case Study for Hot Summer Days. *Urban Science*, 1, 9.
- Lemus-Canovas M., Martin-Vide J., Moreno-Garcia M.C. and Lopez-Bustins J.A. 2020. Estimating Barcelona's metropolitan daytime hot and cold poles using Landsat-8 Land Surface Temperature, *Science of The Total Environment*, 699, 134307.



- Li X., Zhou Y., Asrar G.R., Imhoff M. and Li X. 2017. The surface urban heat island response to urban expansion: A panel analysis for the conterminous United States, *Science of The Total Environment*, 605–606: 426-435.
- Li X., Zhou Y., Yu S., Jia G., Li H. and Wenliang Li W. 2019. Urban heat island impacts on building energy consumption: A review of approaches and findings, *Energy*, 174: 407-419.
- Lin J., Qiu S., Tan X. and Zhuang Y. 2023. Measuring the Relationship between Morphological Spatial Pattern of Green Space and Urban Heat Island Using Machine Learning Methods. *Building Environment*. 228, 109910
- Lind S., Ingvaldsen R.B. and Furevik T. 2018. Arctic warming hotspot in the northern Barents Sea linked to declining sea-ice import. *Nature Climate Change* 8, 634–639.
- Liu Y., Li Q., Yang L., Mu K., Zhang M. and Liu J. 2020. Urban heat island effects of various urban morphologies under regional climate conditions. *Science of the Total Environment*. 743, 140589.
- Livada I., Santamouris M., Niachou K., Papanikolaou N. and Mihalakakou G. 2002. Determination of places in the great Athens area where the heat island effect is observed. *Theoretical and Applied Climatology*. 71, 219–230.
- Lolis C.J. 2012. High-resolution precipitation over the southern Balkans. *Climate Research*, 55, 167–179.
- Lolis C.J. and Kotsias G. 2020. The use of weather types in the definition of seasons: The case of southern Balkans. *Theoretical and Applied Climatology*, 142, 1199–1219.
- Lowry W.P. 1977. Empirical estimation of urban effects on climate: a problem analysis. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 16 (2), 129–135.
- Macias-Fauria M. and Post E. 2018. Effects of sea ice on Arctic biota: an emerging crisis discipline. *Biology Letters*, 14:20170702.
- Maheras P. and Anagnostopoulou C. 2003. Circulation Types and Their Influence on the Interannual Variability and Precipitation Changes in Greece. In *Mediterranean Climate—Variability and Trends*; Bolle, H.J., Ed. *Springer: Berlin, Germany*, pp. 215–239.
- Manly B.F.J. 1986. *Multivariate statistical methods: a primer*. *Chapman and Hall*, London, 159 pp.
- Martilli A., Roulet Y.A., Junier M., Kirchner F., Rotach M.W. and Clappier A. 2003. On the impact of urban surface exchange parameterizations on air quality simulations: The Athens case. *Atmospheric Environment*, 37, 4217–4231.



- Martin-Vide J. and Moreno-Garcia M.C. 2020. Probability values for the intensity of Barcelona's urban heat island (Spain), *Atmospheric Research*, 240,104877.
- Matzarakis A., De Rocco M. and Najjar G. 2009. Thermal bioclimate in Strasbourg – The 2003 heat wave. *Theoretical and Applied Climatology*, 98: 209-220.
- Mavrogianni A., Davies M., Batty, M., et al. 2011. The comfort, energy and health implications of London's urban heat island. *Building Services Engineering Research & Technology*, 32(1): 35-52.
- Mavrogianni A., Wilkinson P., Davies M., Biddulph P. and Oikonomou E. 2012. Building characteristics as determinants of propensity to high indoor summer temperatures in London dwellings. *Building Environment*. 55:117–30.
- McVicar T.R., Roderick M.L., Donohue R.J., Li L.T., Van Niel T.G., Thomas A., Grieser J., Jhajharia D., Himri Y., Mahowald N.M., Mescherskaya A.V., Kruger A.C., Rehman S. and Dinpashoh Y. 2012. Global review and synthesis of trends in observed terrestrial near-surface wind speeds: implications for evaporation. *Journal of Hydrology*, 416:182–205.
- Messinger F., DiMego G., Kalnay E., Mitchell K., Shafran P.C., Ebisuzaki W., Jovic D., Woollen J., Rogers E., Berbery E.H., Ek M.B., Fan Y., Grumbine R., Higgins W., Li H., Lin Y., Manikin G., Parrish D. and Shi W. 2006. North American Regional Reanalysis. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 87, 343-360.
- Michailidou C., Maheras P., Arseni-Papadimitriou A., Kolyva-Machera F. and Anagnostopoulou, C. 2009. A study of weather types at Athens and Thessaloniki and their relationship to circulation types for the cold-wet period, part I: Two-step cluster analysis. *Theoretical and Applied Climatology*, 97, 163–177.
- Mitchell B.C. and Chakraborty J. 2014. Urban heat and climate justice: a landscape of thermal inequity in Pinellas County. Florida *Geographical Review*. Wiley-Blackwell.104:459–80.
- Morris C.J.G., Simmonds I. and Plummer N. 2001. Quantification of the influences of wind and cloud on the nocturnal urban heat island of a large city. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*. 40 (2): 169–182.
- Ngarambe J., Joen S.J., Han C.H. and Yun G.Y. 2021. Exploring the relationship between particulate matter, CO, SO₂, NO₂, O₃ and urban heat island in Seoul, Korea. *Journal of Hazardous Materials*. 403, 123615.
- Ngarambe J., Oh J.W., Su M.A., Santamouris M. and Yun G.Y. 2021. Influences of wind speed, sky conditions, land use and land cover characteristics on the magnitude of the urban heat island in Seoul: an exploratory analysis. *Sustainable Cities and Society*. 71, 102953.



- Nunez M. and Oke T.R. 1976. Long-wave radiative flux divergence and nocturnal cooling of the urban atmosphere. *Boundary-Layer Meteorology* 10: 121-135.
- O'Neill M.S. and Ebi K.L. 2009. Temperature extremes and health: impacts of climate variability and change in the United States. *Journal of Occupational and Environmental Medicine*. 51:13–25.
- Oke T.R. 1974. *Review of Urban Climatology, 1968-1973*. WMO Technical Note No. 134, WMO No. 383, World Meteorological Organization, Geneva.
- Oke T.R. 1976. The distinction between canopy and boundary-layer heat islands. *Atmosphere*. 14: 268-277.
- Oke T.R. 1982. The energetic basis of the urban heat island. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. 108, 1–24.
- Oke T.R. 1987. *Boundary Layer Climates*. Methuen and Co.: New York.
- Oke T.R., Johnson G.T., Steyn D.G. and Watson I.D. 1991. Simulation of surface urban heat islands under “ideal” conditions at night – Part 2: Diagnosis of causation. *Boundary-Layer Meteorology* 56: 339-358.
- Oke T.R., Mills G., Christen A. and Voogt J.A. 2017. *Urban climates*. Cambridge University Press.
- Orville R.E., Huffines G., Nielsen-Gammon J., Zhang R., et al. 2001. Enhancement of cloud-to-ground lightning over Houston, Texas. *Geophysical Research Letters* 28: 2597- 2600.
- Othoniel B., Rugani B., Heijungs R., Beyer M., Machwitz M. and Post P. 2019. An improved life cycle impact assessment principle for assessing the impact of land use on ecosystem services, *Science of The Total Environment*, 693, 133374.
- Paschalidou A.K. and Kassomenos P.A. 2016. What are the most fire-dangerous atmospheric circulations in the Eastern-Mediterranean? Analysis of the synoptic wildfire climatology. *Science of Total Environment*, 2016, 539, 536–545.
- Patz J.A., Campbell-Lendrum D., Holloway T., and Foley J.A. 2005. Impact of regional climate change on human health. *Nature*, 438(7066), 310–317. Retrieved from <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-27844536963&partnerID=40>
- Petralli M., Massetti L. and Orlandini S. 2011. Five years of thermal intra-urban monitoring in Florence (Italy) and application of climatological indices. *Theoretical and Applied Climatology*, 104, 349–356.
- Pongracz R., Bartholy J. and Deszo Z. 2006. Remotely sensed thermal information applied to urban climate analysis. *Advances in Space Research*, 37(12): 2191-2196.



- Pyrgou A. and 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.
- Reis C., Lopes A., Correia E. and Fragoso M. 2020. Local weather types by thermal periods: deepening the knowledge about Lisbon's urban climate. *Atmosphere*, 11 (8), 840.
- Richman M.B. 1986. Rotation of Principal Components. *International Journal of Climatology*, 6(3): 293-335.
- Rignot E., Fenty I., Menemenlis D. and Xu Y. 2012. Spreading of warm ocean waters around Greenland as a possible cause for glacier acceleration. *Annals of Glaciology*, 53(60):257–266.
- Robine J.M., Cheung S.L.K., Le Roy S., Van Oyen H., Griffiths C., Michel J.P. and Herrmann F.R. 2008. Death toll exceeded 70,000 in Europe during the summer of 2003, *Comptes Rendus Biologies*, 331, 2, 171-178.
- Romero R., Sumner G., Ramis C. and Genovés A. 1999. A classification of the atmospheric circulation patterns producing significant daily rainfall in the Spanish Mediterranean area. *International Journal of Climatology*. 19:765–785.
- Rosenfeld A.H., Akbari H., Romn J.J. and Pomerantz M. 1998. Cool communities: strategies for heat island mitigation and smog reduction. *Energy and Buildings* 28: 51-62.
- Runnalls K.E., and Oke T.R. 2000. Dynamics and controls of the near-surface heat island of Vancouver, British Columbia. *Physical Geography* 21: 283-304.
- Saaroni H. and Ziv B. 2003. The impact of a small lake on heat stress in a Mediterranean urban park: the case of Tel Aviv, Israel. *International Journal of Biometeorology* 47: 156–165.
- Sachweh M. and Koepke P. 1995. Radiation fog and urban climate. *Geophysical Research Letters* 22: 1073-1076.
- Saha S. and Coauthors 2014: The NCEP Climate Forecast System Version 2. *Journal of Climate*, 27, 2185–2208.
- Sailor D.J. 2011. A review of methods for estimating anthropogenic heat and moisture emissions in the urban environment. *International Journal of Climatology* 31: 189-199.
- Salvati A., Roura H.C. and Cecere C. 2017. Assessing the urban heat island and its energy impact on residential buildings in Mediterranean climate: Barcelona case study, *Energy and Buildings*, 146: Pages 38-54.
- Santamouris M. 2007. Heat island research in Europe: The state-of-the-art. *Advances in Building Energy Research*. 1: 123-150.



- Santamouris M. 2016. Innovating to zero the building sector in Europe: minimising the energy consumption. Eradication of the energy poverty and mitigating the local climate change. *Solar Energy* 128, 61–94.
- Santamouris M., Haddad S., Fiorito F., Osmond P., Ding L., Prasad D., Zhai X. and Wang R. 2017. Urban Heat Island and overheating characteristics in Sydney. Australia. An analysis of multiyear measurements. *Sustainability*, 9, 712.
- Santamouris M., Paraponiaris K. and Mihalakakou G. 2007. Estimating the ecological footprint of the heat island effect over Athens Greece. *Climatic Change*. 80(3–4): 265–276.
- Santer B.D., Mears C., Wentz F.J., Taylor K.E., Gleckler P.J., Wigley T.M.L., Barnett T.P., Boyle J.S., Brüggemann W., Gillett N.P., Klein S.A., Meehl G.A., Nozawa T., Pierce D.W., Stott P.A., Washington W.M. and Wehner M.F., 2007. Identification of human-induced changes in atmospheric moisture content. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 104 (39): 15248–15253
- Sarkar A. and De Ridder K. 2011. The Urban Heat Island Intensity of Paris: A Case Study Based on a Simple Urban Surface Parametrization, *Boundary-Layer Meteorology*, 138 (3): 511–520.
- Sarrat C., Lemonsu A., Masson V. and Guedalia D. 2006. Impact of urban heat island on regional atmospheric pollution, *Atmospheric Environment*, 40, 10: 1743-1758.
- Schär C., Vidale P., Lüthi D. et al. 2004. The role of increasing temperature variability in European summer heatwaves. *Nature* 427, 332–336.
- Schwartz M.D. 1991. An integrates approach to air mass classification in the north central United States. *The Professional Geographer* 43(1), 77-91.
- Screen J.A. 2014. Arctic amplification decreases temperature variance in northern mid to high-latitudes. *Nature Climate Change* 4:577.
- Seierstad I.A. and Bader J. 2008. Impact of a projected future Arctic Sea ice reduction of extratropical storminess and the NAO. *Climate Dynamics* 33:937.
- Sen P.K. 1968. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's Tau. *American Statistics Journal* 63 (324).
- Serreze M. and Barry R. 2011. Processes and impacts of Arctic amplification: a research synthesis. *Global Planet Change* 77:85–96.
- Shah I., Soh B., Lim C., Lau E. and Ghahramani A. 2023. Thermal Transfer and Temperature Reductions from Shading Systems on Opaque Facades: Quantifying the Impacts of Influential Factors. *Energy and Building*. 278, 112604



- Shahmohamadi P., Che-Ani A.I., Etessam I., Maulud K.N.A. and Tawil N.M. 2011. Healthy Environment: The Need to Mitigate Urban Heat Island Effects on Human Health, *Procedia Engineering* 20: 61-70.
- Sharma S. 1995. Applied Multivariate Techniques. *John Wiley & Sons*, New York, ISBN:978-0471310648, 512 pp.
- Shem W. and Shepherd M. 2009. On the impact of urbanization of summertime thunderstorms in Atlanta: Two numerical model case studies. *Atmospheric Research* 92: 172-189.
- Sheridan S.C. 2000. The redevelopment of an air-mass classification scheme for North America, with applications to climate trends and teleconnections. *Doctoral Dissertation, University of Delaware, Wilmington, Delaware, USA*, 308 pp.
- Sheridan S.C. 2002. The redevelopment of a weather-type classification scheme for North America. *International Journal of Climatology*, 22, 51-68.
- Sheridan S.C. and Dolney T.J. 2003. Heat, mortality, and level of urbanization: measuring vulnerability across Ohio, USA. *Climate Research* 24, 255-265.
- Sheridan S.C. and Kalkstein A.J. 2009. Trends in heat-related mortality in the United States, 1975-2004. *Natural Hazards* 50, 145-160.
- Sheridan S.C. and Lee C.C. 2010. Synoptic climatology and the general circulation model. *Progress in Physical Geography* 34(1), 101-109.
- Sheridan S.C. and Lee C.C. 2011. The self-organizing map in synoptic climatological research. *Progress in Physical Geography* 35(1), 109-119.
- Sheridan S.C., Allen M.J., Lee C.C. and Kalkstein L.S. 2012a. Future heat vulnerability in California Part II: Projecting future heat related mortality. *Climatic Change* 115(2), 291-309.
- Sheridan S.C., Lee C.C., Allen M.J. and Kalkstein L.S. 2012b. Future heat vulnerability in California Part I: Projecting future weather types and heat events. *Climatic Change* 115(2), 311-326.
- Sierka E., Radosz Ł., Ryś K. and Woźniak, G. 2022. Ecosystem Services and Post-Industrial Areas. Green Scenar. Min. Ind. Responses to Environ. Challenges Anthr. Epoch, 265–274.
- Steenefeld G.J., Koopmans S., Heusinkveld B.G. and Theeuwes N.E. 2014. Refreshing the role of open water surfaces on mitigating the maximum urban heat island effect. *Landscape and Urban Planning* 121: 92–96.
- Steenefeld G.J., Koopmans S., Heusinkveld B.G., van Howe L.W.A. and Holtslag A.A.M. 2011. Quantifying urban heat island effects and human comfort for cities of variable



- size and urban morphology in the Netherlands. *Journal of Geophysical Research* 117, D20129.
- Sugar C.A. and James G.M. 2003. Finding the Number of Clusters in a Dataset. *Journal of the American Statistical Association*, 98(463): 750-763.
- Taha H. 1997. Modeling the impacts of large-scale albedo changes on ozone air quality in the South Coast Air Basin. *Atmospheric Environment* 31: 1667-1676.
- Tan H., Kotamarthi R., Wang J., Qian Y. and Chakraborty T.C. 2023. Impact of Different Roofing Mitigation Strategies on Near-Surface Temperature and Energy Consumption over the Chicago Metropolitan Area during a Heatwave Event. *Science of Total Environment*. 860, 160508
- Taniguchi M., Burnett W. and Ness G. 2008. Integrated research on subsurface environments in Asian urban areas. *Science of the Total Environment*. 404: 377-392.
- Taylor J., Wilkinson P., Davies M., Armstrong B., Chalabi Z., Mavrogianni A., et al. 2015. Mapping the effects of urban heat island, housing, and age on excess heat-related mortality in London. *Urban Climate*.14:517–28
- Timmermans M-L. and Marshall J. 2020. Understanding Arctic Ocean circulation: a review of ocean dynamics in a changing climate. *Journal of Geophysical Research: Oceans* 125, e2018JC014378.
- Tomlinson C.J., Chapman L., Thornes J.E. and Baker C.J. 2011. Including the urban heat island in spatial heat health risk assessment strategies: a case study for Birmingham, UK. *International Journal Health Geographics*. 10(1):42.
- Tyrlis E. and Lelieveld J. 2013. Climatology and dynamics of the summer etesian winds over the eastern Mediterranean. *Journal of Atmospheric Sciences*, 70, 3374–3396.
- Urban A., Davidkovová H. and Kyselý J. 2014. Heat- and cold-stress effects on cardiovascular mortality and morbidity among urban and rural populations in the Czech Republic. *International Journal of Biometeorology*. Springer New York LLC. 58:1057–68.
- Van Lanen H.A.J., Wanders N., Tallaksen L.M. and Van Loon A.F. 2013. Hydrological drought across the world: impact of climate and physical catchment structure, *Hydrology and Earth System Sciences*, 17, 1715–1732.
- Vardoulakis E., Karamanis D., Fotiadi A. and Mihalakakou G. 2013. The Urban heat island effect in a small Mediterranean city of high summer temperatures and energy demands. *Solar Energy* 94, 128–144.
- Vardoulakis S., Dear K., and Wilkinson P. 2016 Challenges and opportunities for urban environmental health and sustainability: *the HEALTHYPOLIS initiative*. *Environ Health*.15(Suppl 1):S30.



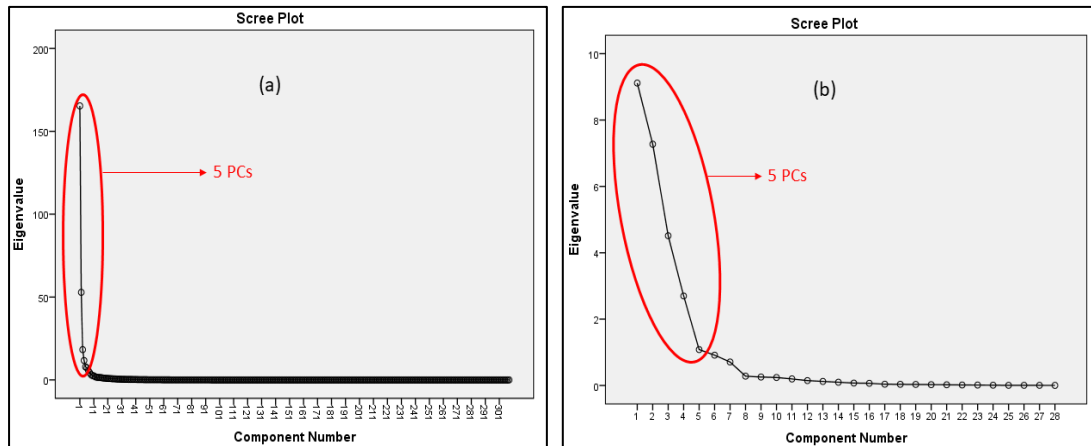
- Verdonck M.L., Demuzere M., Hooyberghs H., Beck C., Cyrus J., Schneider A., Dewulf R. and Van Coillie F. 2018. The potential of local climate zones maps as a heat stress assessment tool, supported by simulated air temperature data, *Landscape and Urban Planning*, 178: 183–197.
- Votsis A., Ruuhela R. and Gregow H. 2021. The socio-spatial patterns of heat stress exposure in Helsinki on two hot days of 2018 and 2019, *FMI's Climate Bulletin: Research Letters*, 3(1), 22–24.
- Willett K., Gillett N., Jones P. and Thorne P. 2007. Attribution of observed surface humidity changes to human influence. *Nature*, 44971637107120028–0836.
- Wolf T. and McGregor G. 2013. The development of a heatwave vulnerability index for London, United Kingdom. *Weather and Climate Extremes. Elsevier*. 1:59–68.
- World Urbanization Prospects: *The 2018 Revision* (UN, 2019).
- Yang X., Chen Y., Peng L.L. and Wang Q. 2020. Quantitative methods for identifying meteorological conditions conducive to the development of urban heat islands. *Building and Environment*. 178, 106953.
- Yarnal B. 1993. Synoptic Climatology in Environmental Analysis. *Belhaven Press*: London; 192 pp.
- Yarnal B., Comrie A.C., Frakes B. and Brown D.P. 2001. Developments and prospects in synoptic climatology. *International Journal of Climatology* 21, 1923-1950.
- Zhou B., Lauwaet D., Hooyberghs H., De Ridder K., Kropp J.P. and Rybski D. 2016. Assessing Seasonality in the Surface Urban Heat Island of London, *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 55: 493-505
- Zhou D., Zhao S., Liu S., Zhang L. and Zhu C. 2014. Surface urban heat island in China's 32 major cities: spatial patterns and drivers. *Remote Sensing of Environment*. 152, 51–61.



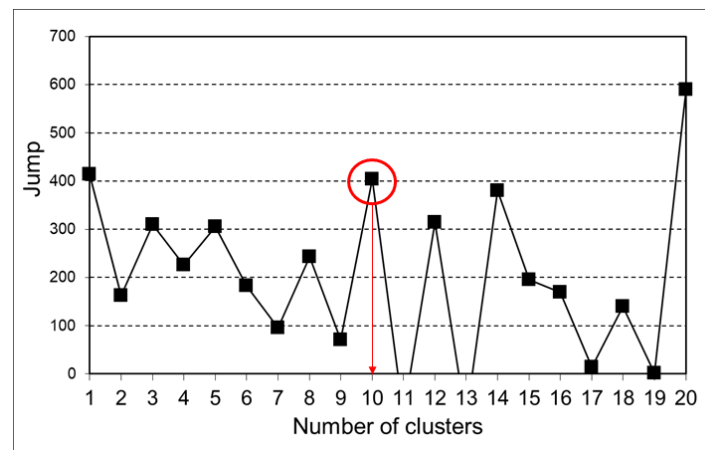
Παράρτημα 1

Στο παρόν παράρτημα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της εφαρμογής της PCA στις ημερήσιες τιμές των δύο συνόλων μετεωρολογικών παραμέτρων καθώς και τα αποτελέσματα της μεθόδου άλματος (Jump method) για κάθε πόλη, όπως αυτά αναφέρονται στο Κεφάλαιο 5.

Περίπτωση Αθήνας



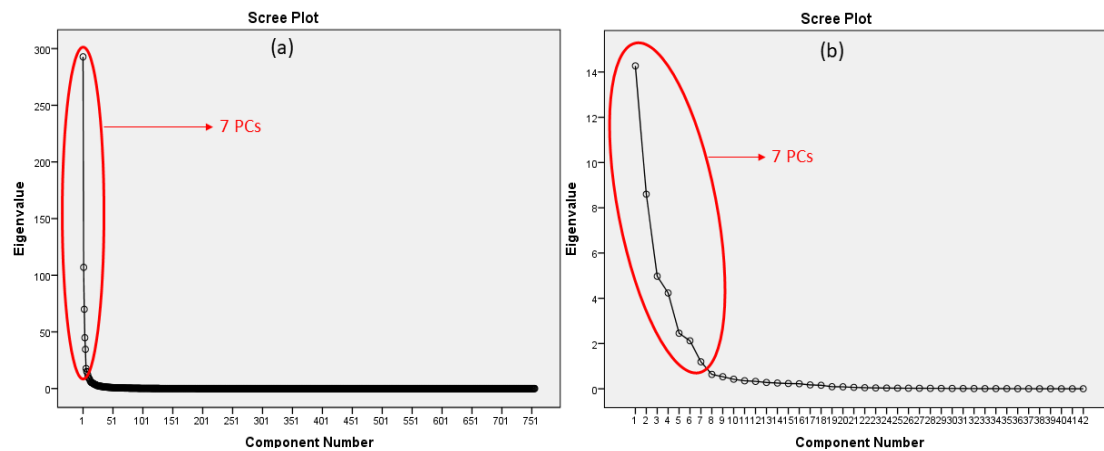
Σχήμα Π5.2. Το διάγραμμα Scree που χρησιμοποιείται για την επιλογή του αριθμού των PCs για τη μικρή γεωγραφική περιοχή (αριστερά) και για τη μεγάλη (δεξιά) για την περίπτωση της Αθήνας. Τα κόκκινα σημάδια υποδεικνύουν τους επιλεγμένους αριθμούς.



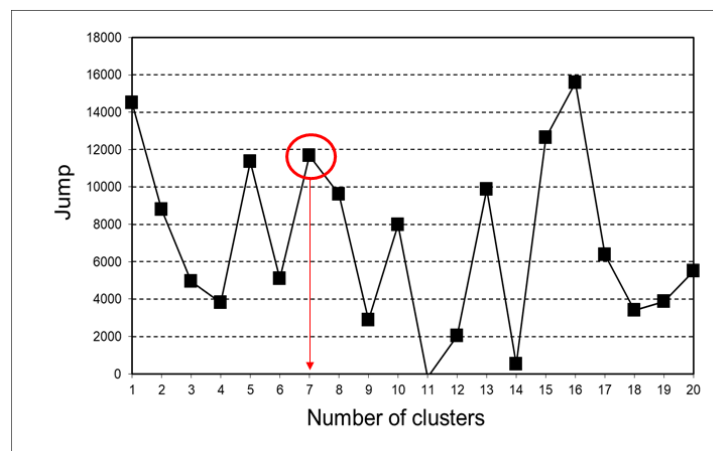
Σχήμα Π5.3. Το διάγραμμα του άλματος (Jump) που χρησιμοποιείται για την επιλογή του αριθμού των συστάδων για την περίπτωση της Αθήνας. Τα κόκκινα σημάδια υποδεικνύουν τους επιλεγμένους αριθμούς.



Περίπτωση Βαρκελώνης



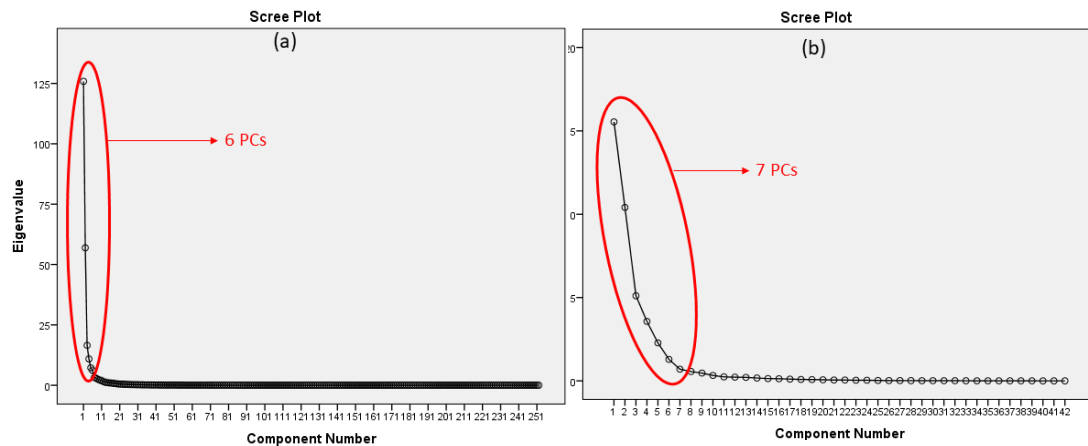
Σχήμα Π5.7. Το διάγραμμα Scree που χρησιμοποιείται για την επιλογή του αριθμού των PCs για τη μικρή γεωγραφική περιοχή (αριστερά) και για τη μεγάλη (δεξιά) για την περίπτωση της Βαρκελώνης. Τα κόκκινα σημάδια υποδεικνύουν τους επιλεγμένους αριθμούς



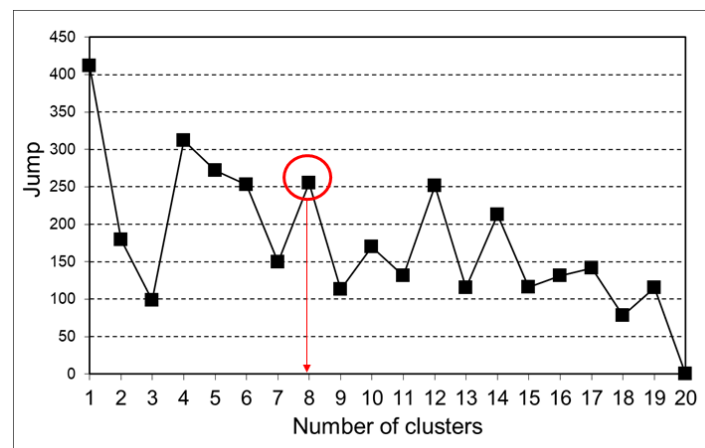
Σχήμα Π5.8. Το διάγραμμα του άλματος (Jump) που χρησιμοποιείται για την επιλογή του αριθμού των συστάδων για την περίπτωση της Βαρκελώνης. Τα κόκκινα σημάδια υποδεικνύουν τους επιλεγμένους αριθμούς.



Περίπτωση Λουξεμβούργου



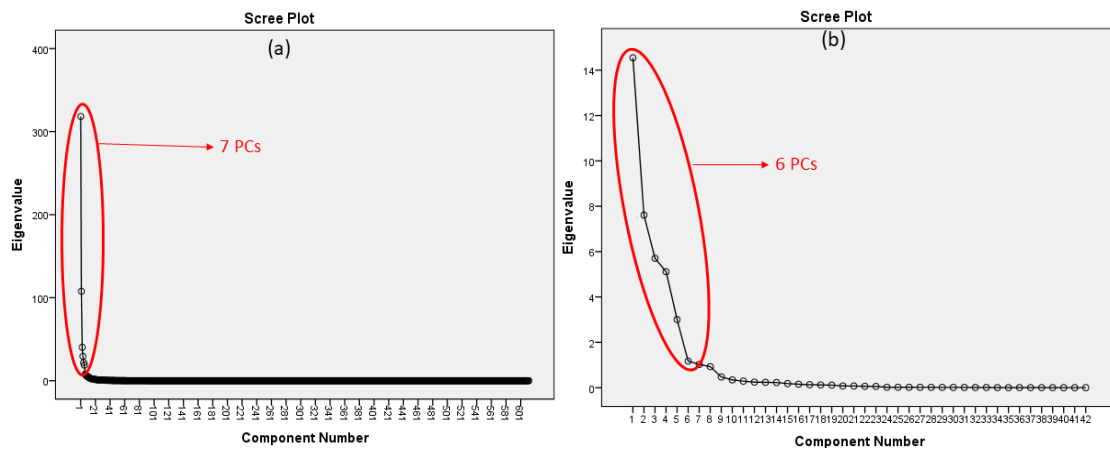
Σχήμα Π5.12. Το διάγραμμα Scree που χρησιμοποιείται για την επιλογή του αριθμού των PCs για τη μικρή γεωγραφική περιοχή (αριστερά) και για τη μεγάλη (δεξιά) για την περίπτωση του Λουξεμβούργου. Τα κόκκινα σημάδια υποδεικνύουν τους επιλεγμένους αριθμούς.



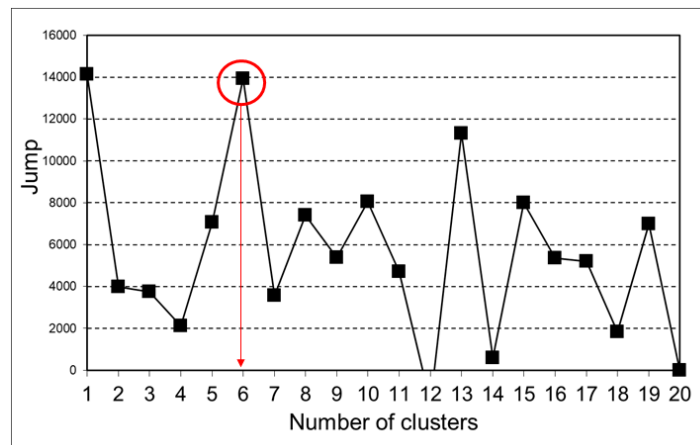
Σχήμα Π5.13. Το διάγραμμα του άλματος (Jump) που χρησιμοποιείται για την επιλογή του αριθμού των συστάδων για την περίπτωση του Λουξεμβούργου. Τα κόκκινα σημάδια υποδεικνύουν τους επιλεγμένους αριθμούς.



Περίπτωση Ελσίνκι



Σχήμα Π5.17. Το διάγραμμα Scree που χρησιμοποιείται για την επιλογή του αριθμού των PCs για τη μικρή γεωγραφική περιοχή (αριστερά) και για τη μεγάλη (δεξιά) για την περίπτωση του Ελσίνκι. Τα κόκκινα σημάδια υποδεικνύουν τους επιλεγμένους αριθμούς.



Σχήμα Π5.18. Το διάγραμμα του άλματος (Jump) που χρησιμοποιείται για την επιλογή του αριθμού των συστάδων για την περίπτωση του Ελσίνκι. Τα κόκκινα σημάδια υποδεικνύουν τους επιλεγμένους αριθμούς.



Παράρτημα 2

Το Παράρτημα 2 περιλαμβάνει όλους τους κώδικες που γράφτηκαν στο περιβάλλον της Python και οι οποίοι εφαρμόζονται για την επεξεργασία του μεγάλου όγκου δεδομένων από το Copernicus urban climate και την παρουσίαση των αποτελεσμάτων της παρούσας διατριβής.

Κώδικες:

1. Κώδικας διαχωρισμού των θαλάσσιων και χερσαίων πλεγματοκλών σημείων, σύμφωνα με τη μάσκα land-sea-mask του Copernicus urban climate

```
from netCDF4 import Dataset
import numpy as np
import glob
import xarray as xr
import pandas as pd
import datetime

ds = xr.open_mfdataset('landseamask_city_UrbClim_v1.0.nc')
df = ds.to_dataframe()

landcoordinates = df.loc[df['landseamask'] == 1]
seacoordinates = df.loc[df['landseamask'] != 1]
```

2. Κώδικας διαχωρισμού των αγροτικών και αστικών πλεγματοκλών σημείων, σύμφωνα με τη μάσκα rural-urban-mask του Copernicus urban climate

```
from netCDF4 import Dataset
import numpy as np
import glob
import xarray as xr
import pandas as pd
import datetime

ds = xr.open_mfdataset('ruralurbanmask_city_UrbClim_v1.0.nc')
df = ds.to_dataframe()
```



```
ruralcoordinates = df.loc[df['ruralurbanmask'] == 1]
urbancoordinates = df.loc[df['ruralurbanmask'] != 1]
```

3. Κώδικας διαχωρισμού των ωριαίων δεδομένων σε ημερήσια και νυχτερινά και μετατροπή των αποτελεσμάτων σε αρχείο .csv

```
from netCDF4 import Dataset
import numpy as np
import glob
import xarray as xr
import pandas as pd
import datetime

ds = xr.open_mfdataset('*_.nc')
df = ds.to_dataframe()
df = df.reset_index()
df = df.set_index('time')
df = df.drop(columns=['x', 'y'])
day = df.between_time('09:00', '20:00')
#night = df.between_time('23:00', '06:00')
day.to_csv('_t.csv')
#night.to_csv('_n.csv')
```

4. Κώδικας υπολογισμού της μέσης τιμής θερμοκρασίας όλων των αγροτικών πλεγμάτων σημείων

```
from netCDF4 import Dataset
import numpy as np
import glob
import xarray as xr
import pandas as pd
import datetime
```



```
import matplotlib.pyplot as plt

df = pd.read_csv('_.csv')

df1 = pd.read_csv('seacoordinates.csv')

df2 = pd.read_csv('urbancoordinates.csv')

df =
df.loc[~((df.latitude.isin(df1['latitude'])) & (df.longitude.isi
n(df1['longitude']))),:]

df =
df.loc[~((df.latitude.isin(df2['latitude'])) & (df.longitude.isi
n(df2['longitude']))),:]

df["tas"].mean()
```

5. Κώδικας υπολογισμού της έντασης της αστικής θερμικής νησίδας (ΔT_i), ως η διαφορά μεταξύ των αστικών πλεγματικών σημείων και της μέσης τιμής θερμοκρασίας όλων των αγροτικών πλεγματικών σημείων που υπολογίστηκε από το κώδικα 4. Μετατροπή των αποτελεσμάτων σε αρχείο .csv

```
from netCDF4 import Dataset

import numpy as np

import glob

import xarray as xr

import pandas as pd

import datetime

df = pd.read_csv('_.csv')

df1 = pd.read_csv('seacoordinates.csv')

df =
df.loc[~((df.latitude.isin(df1['latitude'])) & (df.longitude.isi
n(df1['longitude']))),:]

df['tas'] - = 'mean rural value'

df.to_csv('_.csv')
```



6. Κώδικας υπολογισμού της αστικής υπερθέρμανσης, ως το ανώτερο 5% των ολικών μέγιστων θερμοκρασιών (ΔT_{imax}) κατά τη διάρκεια της ημέρας και κατά τη διάρκεια της νύχτας. Μετατροπή των αποτελεσμάτων σε αρχείο .csv

```
from netCDF4 import Dataset

import numpy as np

import glob

import xarray as xr

import pandas as pd

import datetime

df = pd.read_csv('_ .csv')

del df['x']

del df['y']

del df['Unnamed: 0']

df['time'] = pd.to_datetime(df.time, format='%Y-%m-%d')

df['year'] = df['time'].dt.year

df['month'] = df['time'].dt.month

df['day'] = df['time'].dt.day

df1 =

df.groupby(['year', 'month', 'day', 'latitude', 'longitude']).mean

()

df2 = df1.sort_values(["tas"], ascending=(False))

df2 = df2.reset_index()

df3 = df2.drop(df2.index[_:_],0,inplace=True)

df3.to_csv('_ .csv')
```

7. Κώδικας υπολογισμού της κατανομής συχνότητας της έντασης της αστικής θερμικής νησίδας για κάθε μήνα και κατά τη διάρκεια της ημέρας και της νύχτας. Μετατροπή των αποτελεσμάτων σε αρχείο .csv

```
from netCDF4 import Dataset

import numpy as np
```



```
import glob

import xarray as xr

import pandas as pd

import datetime

df = pd.read_csv('_.csv')

df = df.round({"tas":0})

s = df.tas

counts = s.value_counts()

percent = s.value_counts(normalize=True)

percent100 =

s.value_counts(normalize=True).mul(100).round(1).astype(str) +

'%'

df1 = pd.DataFrame({'per100': percent100})

df1.to_csv('_.csv')
```

