



ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΑΝΟΙΚΤΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

Μ.Π.Σ.: ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ (ΔΙΑ)

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

“Το φαινόμενο της αστικής θερμικής νησίδας: Μελέτη περίπτωσης στην πόλη της Πάτρας”

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΦΟΙΤΗΤΡΙΑ : ΚΑΠΟΥΛΑ ΜΑΡΙΑ

A.M. 112343

Α’ ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ : ΚΑΖΑΝΤΖΙΔΗΣ ΑΝΔΡΕΑΣ

Β’ ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ : ΠΑΠΑΝΑΣΤΑΣΙΟΥ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ



ΠΑΤΡΑ

ΜΑΙΟΣ, 2026

Η παρούσα εργασία αποτελεί πνευματική ιδιοκτησία της φοιτήτριας Καπούλα Μαρίας («συγγραφέας/δημιουργός») που την εκπόνησε. Στο πλαίσιο της πολιτικής ανοικτής πρόσβασης η συγγραφέας/δημιουργός εκχωρεί στο ΕΑΠ, μη αποκλειστική άδεια χρήσης του δικαιώματος αναπαραγωγής, προσαρμογής, δημόσιου δανεισμού, παρουσίασης στο κοινό και ψηφιακής διάχυσής τους διεθνώς, σε ηλεκτρονική μορφή και σε οποιοδήποτε μέσο, για διδακτικούς και ερευνητικούς σκοπούς, άνευ ανταλλάγματος και για όλο το χρόνο διάρκειας των δικαιωμάτων πνευματικής ιδιοκτησίας. Η ανοικτή πρόσβαση στο πλήρες κείμενο για μελέτη και ανάγνωση δεν σημαίνει καθ' οιονδήποτε τρόπο παραχώρηση δικαιωμάτων διανοητικής ιδιοκτησίας του/της συγγραφέα/δημιουργού ούτε επιτρέπει την αναπαραγωγή, αναδημοσίευση, αντιγραφή, αποθήκευση, πώληση, εμπορική χρήση, μετάδοση, διανομή, έκδοση, εκτέλεση, «μεταφόρτωση» (downloading), «ανάρτηση» (uploading), μετάφραση, τροποποίηση με οποιονδήποτε τρόπο, τμηματικά ή περιληπτικά της εργασίας, χωρίς τη ρητή προηγούμενη έγγραφη συναίνεση του/της συγγραφέα/δημιουργού. Η συγγραφέας/δημιουργός διατηρεί το σύνολο των ηθικών και περιουσιακών της δικαιωμάτων.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ	iv
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ.....	v
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΓΡΑΦΗΜΑΤΩΝ	vi
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	7
ABSTRACT	9
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	11
1. Το Φαινόμενο της Αστικής Θερμικής Νησίδας.....	12
1.1 Ορισμός του φαινομένου της Αστικής Θερμικής Νησίδας.....	12
1.2 Μηχανισμοί μετάδοσης της θερμότητας	16
1.3 Ενεργειακά ισοζύγια.....	17
1.4 Μικροκλίμα αστικών και αγροτικών περιοχών.....	20
1.4.1 Μικρομετεωρολογία	20
1.4.2 Αγροτικές περιοχές	22
1.4.3 Αστικές περιοχές	22
2. Αίτια και παράγοντες που επηρεάζουν το φαινόμενο της Αστικής Θερμικής Νησίδας.....	24
2.1 Ενεργειακή κατανάλωση	24
2.2 Οικιστικός χαρακτήρας περιοχών	25
2.3 Ποιότητα ατμοσφαιρικού αέρα	28
2.4 Ιδιότητες υλικών	29
2.5 Καταστροφή Πρασίνου	31
3. Επιπτώσεις του φαινομένου της Αστικής Θερμικής Νησίδας.....	34
3.1 Επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία	34
3.2 Επιπτώσεις στην πανίδα	36
3.3 Επιπτώσεις στο περιβάλλον.....	39
3.4 Επιπτώσεις στην ενεργειακή κατανάλωση.....	41
4. Προτάσεις αντιμετώπισης φαινομένου της Αστικής Θερμικής Νησίδας	43
4.1 Πράσινες και μπλε υποδομές.....	43
4.2 Αστική γεωμετρία και στρατηγικές αστικού σχεδιασμού και βιοκλιματικής αρχιτεκτονικής.....	47
4.3 Σύγχρονες και φιλικές προς το περιβάλλον τεχνολογίες.....	53
5. Μελέτη της Αστικής Θερμικής Νησίδας στην πόλη της Πάτρας.....	55
5.1 Περιβαλλοντικά και οικιστικά χαρακτηριστικά της πόλης και πολεοδομική εξέλιξη	55
5.2 Σταθμοί λήψης και δεδομένα	57
5.3 Πειραματικές υποθέσεις	61
5.4 Μεθοδολογία	62
5.5 Αποτελέσματα επαγωγικής στατιστικής για τις υποθέσεις H1–H4	63
5.6 Αποτελέσματα περιγραφικής στατιστικής.....	72
5.7 Συζήτηση	81
5.8 Περιορισμοί της μελέτης	82
5.9 Συμπεράσματα και προτάσεις για μελλοντική έρευνα.....	83
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	84

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1. Το φαινόμενο της αστικής θερμικής νησίδας (Arifwidodo et al., 2016).....	12
Εικόνα 2. Ιδανικό μοτίβο ισόθερμης νησίδας σε αστική περιοχή (σκιασμένο). (Stull, 1988)	13
Εικόνα 3 Εισερχόμενη και εξερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία (NASA, n.d.).....	18
Εικόνα 4 Ενεργειακό ισοζύγιο της γης	19
Εικόνα 5 Ενεργειακό ισοζύγιο σε τυπική αστική και αγροτική περιοχή(Bousse, 2024)	20
Εικόνα 6 Εξωτερικές κλιματιστικές μονάδες	24
Εικόνα 7 Αστικό φαράγγι στη Σιγκαπούρη	26
Εικόνα 8 Kowloon, Hong Kong	28
Εικόνα 9 Τιμές albedo διαφόρων αστικών επιφανειών (Bousse, 2024).....	30
Εικόνα 10 Ο κύκλος της εξατμισοδιαπνοής (United States Environmental Protection Agency, n.d.)	32
Εικόνα 11 Αστικός δρόμος στο Βανκούβερ	45
Εικόνα 12 Η ζωντανή πράσινη στέγη της Ακαδημίας Επιστημών της Καλιφόρνιας.....	46
Εικόνα 13 Δομή διαπερατού οδοστρώματος	51
Εικόνα 14 Πράσινη στέγη (Mihalakakou et al., 2023)	53
Εικόνα 15 Σταθμός Ρίο	58
Εικόνα 16 Σταθμός Τριών Ναυάρχων	58
Εικόνα 17 Σταθμός Γερμανού	59
Εικόνα 18 Σταθμός Παραλία	59

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1.Εμπειρικές γενικεύσεις που ισχύουν για την ένταση του φαινομένου της αστικής θερμικής νησίδας (Arnfield, 2003)	15
Πίνακας 2. Ενδεικτική ένταση της Αστικής Θερμικής Νησίδας (UHI) σε μεγάλες πόλεις του κόσμου (Tzavali et al., 2015).....	16
Πίνακας 3 Μέγιστη και ελάχιστη θερμοκρασία για κάθε σταθμό για το έτος 2025	60
Πίνακας 4 Μέση θερμοκρασία ημέρας και νύχτας για κάθε μήνα	60
Πίνακας 5 Μέσες θερμοκρασίες ανά σταθμό	61
Πίνακας 6 Μ.Ο. θερμοκρασίας ημέρας ανά εποχή και σταθμό	65
Πίνακας 7 Θερμοκρασία νύχτας (Temp_Night) ανά εποχή και σταθμό	67
Πίνακας 8 Εύρος θερμοκρασίας ημέρας – νύχτας ανά εποχή και σταθμό	70
Πίνακας 9 Ένταση ΑΘΝ ανά μήνα στην Πόλη της Πάτρας	79
Πίνακας 10 Μέση ετήσια UHI μεταξύ σταθμού Γερμανού και Παραλίας	81

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΓΡΑΦΗΜΑΤΩΝ

Γράφημα 1 Μ.Ο. θερμοκρασιών ημέρας ανά σταθμό και εποχή	73
Γράφημα 2. Μ.Ο. θερμοκρασιών νύχτας ανά σταθμό και εποχή	74
Γράφημα 3 Διαφορές Μ.Ο. θερμοκρασιών ημέρας-νύχτας ανά σταθμό και εποχή.....	75
Γράφημα 4 Μ.Ο. θερμοκρασίας ημέρας και νύχτας για κάθε μήνα στον σταθμό Γερμανού	76
Γράφημα 5 Μ.Ο. θερμοκρασίας ημέρας και νύχτας για κάθε μήνα στον σταθμό Παραλία ..	76
Γράφημα 6 Μ.Ο. θερμοκρασίας ημέρας και νύχτας για κάθε μήνα στον σταθμό Ρίο	77
Γράφημα 7 θερμοκρασίας ημέρας και νύχτας για κάθε μήνα στον σταθμό Τριών Ναυάρχων	77

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η ολοένα αυξανόμενη αστικοποίηση, σε συνδυασμό με την κλιματική αλλαγή, έχει εντείνει το φαινόμενο της Αστικής Θερμικής Νησίδας (Urban Heat Island – UHI), το οποίο αποτελεί μία από τις σημαντικότερες περιβαλλοντικές προκλήσεις των σύγχρονων πόλεων. Η αύξηση της θερμοκρασίας στις αστικές περιοχές επηρεάζει την ποιότητα ζωής, την ανθρώπινη υγεία, την ενεργειακή κατανάλωση και τη λειτουργία των αστικών οικοσυστημάτων, καθιστώντας αναγκαία την κατανόηση των μηχανισμών που το προκαλούν και την ανάπτυξη αποτελεσματικών στρατηγικών αντιμετώπισής του.

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η διερεύνηση του φαινομένου της Αστικής Θερμικής Νησίδας, η ανάλυση των φυσικών και ανθρωπογενών παραγόντων που συμβάλλουν στη δημιουργία και την έντασή του, καθώς και η αξιολόγηση των επιπτώσεών του στο αστικό περιβάλλον. Παράλληλα, εξετάζονται σύγχρονες πρακτικές και τεχνολογικές λύσεις που μπορούν να συμβάλουν στον μετριασμό του φαινομένου, με έμφαση στις αρχές του βιώσιμου και βιοκλιματικού αστικού σχεδιασμού.

Το ερευνητικό κενό που επιχειρεί να καλύψει η εργασία αφορά την περιορισμένη αξιοποίηση στατιστικών μεθόδων για τη συστηματική διερεύνηση του φαινομένου σε ελληνικές πόλεις και ειδικότερα στην πόλη της Πάτρας, όπου οι επιδράσεις της αστικής ανάπτυξης στο τοπικό μικροκλίμα δεν έχουν μελετηθεί εκτενώς με βάση πραγματικά μετεωρολογικά δεδομένα και επαγωγικές στατιστικές τεχνικές.

Η συνεισφορά της μελέτης έγκειται στην εμπειρική διερεύνηση της Αστικής Θερμικής Νησίδας στην Πάτρα μέσω της αξιοποίησης δεδομένων από δίκτυο μετεωρολογικών σταθμών και της διατύπωσης και ελέγχου συγκεκριμένων ερευνητικών υποθέσεων. Η εφαρμογή επαγωγικής στατιστικής επιτρέπει την εξαγωγή τεκμηριωμένων συμπερασμάτων σχετικά με τη χωρική και χρονική διαφοροποίηση του φαινομένου και τη συσχέτισή του με τα χαρακτηριστικά του αστικού περιβάλλοντος, προσφέροντας χρήσιμα στοιχεία για τον περιβαλλοντικό σχεδιασμό και τη λήψη αποφάσεων.

Η μεθοδολογία της εργασίας βασίζεται αρχικά στη διεξοδική βιβλιογραφική ανασκόπηση της διεθνούς και ελληνικής βιβλιογραφίας σχετικά με το φαινόμενο της ΑΘΝ. Στο ερευνητικό μέρος πραγματοποιείται συλλογή και επεξεργασία δεδομένων θερμοκρασίας από τέσσερις επιλεγμένους μετεωρολογικούς σταθμούς της Πάτρας (σταθμός Γερμανού, Ρίο, Παραλία και Τριών Ναυάρχων), διατυπώνονται ερευνητικές υποθέσεις και εφαρμόστηκε η μέθοδος

επαγωγικής στατιστικής ANOVA για την αξιολόγηση των δεδομένων και την εξαγωγή συμπερασμάτων.

Η εργασία οργανώνεται σε πέντε κεφάλαια. Το πρώτο κεφάλαιο παρουσιάζει το θεωρητικό υπόβαθρο του φαινομένου, τους μηχανισμούς μετάδοσης της θερμότητας, τα ενεργειακά ισοζύγια και τα χαρακτηριστικά του αστικού μικροκλίματος. Το δεύτερο κεφάλαιο αναλύει τους βασικούς παράγοντες που επηρεάζουν την ανάπτυξη της Αστικής Θερμικής Νησίδας, όπως η ενεργειακή κατανάλωση, η μορφή του αστικού ιστού, οι ιδιότητες των δομικών υλικών, η ποιότητα του ατμοσφαιρικού αέρα και η μείωση του αστικού πρασίνου. Το τρίτο κεφάλαιο εξετάζει τις επιπτώσεις του φαινομένου στην ανθρώπινη υγεία, στο περιβάλλον, στην πανίδα και στην ενεργειακή κατανάλωση. Το τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζει σύγχρονες στρατηγικές αντιμετώπισης, όπως οι πράσινες και μπλε υποδομές, ο βιοκλιματικός αστικός σχεδιασμός και οι φιλικές προς το περιβάλλον τεχνολογίες. Τέλος, το πέμπτο κεφάλαιο περιλαμβάνει τη μελέτη περίπτωσης της πόλης της Πάτρας, όπου εφαρμόζεται η ερευνητική μεθοδολογία, αναλύονται τα δεδομένα και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα και τα συμπεράσματα της έρευνας.

Η παρούσα μελέτη, βασισμένη σε ωριαία δεδομένα θερμοκρασίας του 2025 από τέσσερις σταθμούς της Πάτρας, έδειξε σημαντικές χωρικές και εποχικές διαφοροποιήσεις. Ο σταθμός Γερμανού παρουσίασε τις υψηλότερες ετήσιες μέσες θερμοκρασίες, τόσο κατά τη διάρκεια της ημέρας (21,1 °C) όσο και της νύχτας (16,1 °C), καθώς και το μεγαλύτερο μέσο ημερήσιο θερμοκρασιακό εύρος (5,0 °C), έναντι 2,8 °C στο Ρίο, 1,8 °C στους Τριών Ναυάρχων και 1,7 °C στην Παραλία. Ο δείκτης έντασης Αστικής Θερμικής Νησίδας μεταξύ Γερμανού και Παραλίας είχε ετήσιο μέσο 2,6 °C, με αρνητικές νυχτερινές τιμές τον Νοέμβριο και τον Δεκέμβριο, γεγονός που δείχνει ότι η Παραλία ήταν θερμότερη από τον Γερμανού στις συγκεκριμένες νυχτερινές περιόδους.

Η μελέτη παρουσιάζει ορισμένους περιορισμούς, κυρίως λόγω της διαθεσιμότητας και της χωρικής και χρονικής ανάλυσης των δεδομένων. Η ΑΘΝ επηρεάζεται από πολλούς παράγοντες, όπως οι καιρικές συνθήκες, η βλάστηση και η πυκνότητα δόμησης, οι οποίοι είναι δύσκολο να απομονωθούν πλήρως. Οι μετεωρολογικοί σταθμοί μπορεί να μην αποτυπώνουν μικροκλιματικές διαφοροποιήσεις σε επίπεδο γειτονιάς ή δρόμου. Τέλος, τα αποτελέσματα αφορούν τη συγκεκριμένη περιοχή μελέτης και τη χρονική περίοδο του 2025 και δεν μπορούν να γενικευθούν χωρίς επιπλέον έρευνα.

ABSTRACT

The rapid pace of urbanization, combined with the effects of climate change, has intensified the Urban Heat Island (UHI) phenomenon, making it one of the most significant environmental challenges faced by modern cities. The increase in urban temperatures adversely affects quality of life, public health, energy consumption, and the functioning of urban ecosystems, highlighting the need to better understand the mechanisms responsible for its development and to identify effective mitigation strategies.

The aim of this thesis is to investigate the Urban Heat Island phenomenon by examining the natural and anthropogenic factors that contribute to its formation and intensity, as well as by assessing its impacts on the urban environment. Furthermore, the study reviews contemporary mitigation approaches, emphasizing sustainable urban planning principles, bioclimatic design, green and blue infrastructure, and environmentally friendly technologies that can reduce the intensity of the phenomenon.

The research gap addressed by this study lies in the limited application of statistical methods to systematically investigate the Urban Heat Island effect in Greek cities, particularly in the city of Patras. Although the phenomenon has been widely studied internationally, there is a lack of comprehensive analyses based on meteorological observations and inferential statistical techniques for the specific study area.

The contribution of this research lies in its empirical investigation of the Urban Heat Island phenomenon in Patras through the analysis of meteorological data collected from a network of weather stations and the testing of specific research hypotheses. The application of inferential statistical methods enables the extraction of reliable conclusions regarding the spatial and temporal variability of the phenomenon and its relationship with urban characteristics, providing useful evidence for environmental planning and sustainable urban development.

The methodology adopted in this thesis combines an extensive review of the international and Greek scientific literature with an empirical case study. Temperature data collected from four selected meteorological stations in Patras (Germanou Station, Rio, Paralia, and Trion Navarchon) are processed and analyzed, research hypotheses are formulated, and the ANOVA inferential statistical method is applied to evaluate the data and derive meaningful conclusions.

The thesis is structured into five chapters. The first chapter presents the theoretical background of the Urban Heat Island phenomenon, including heat transfer mechanisms, urban energy balance, and the characteristics of urban and rural microclimates. The second chapter examines the main factors influencing the development of the phenomenon, such as energy consumption, urban morphology, air quality, material properties, and the reduction of urban green spaces. The third chapter discusses the impacts of the Urban Heat Island on human health, wildlife, the environment, and energy consumption. The fourth chapter presents mitigation measures, focusing on green and blue infrastructure, urban planning strategies, bioclimatic architecture, and environmentally friendly technologies. Finally, the fifth chapter presents the case study of the city of Patras, describing the study area, the data and methodology, the statistical analysis, and the main findings and conclusions of the research.

The present study, based on hourly temperature data from four stations in Patras for 2025, revealed significant spatial and seasonal variations. Germanou Station recorded the highest annual average temperatures, both during the day (21.1 °C) and at night (16.1 °C), as well as the largest mean daily temperature range (5.0 °C), compared with 2.8 °C in Rio, 1.8 °C at Trion Navarchon, and 1.7 °C in Paralia. The Urban Heat Island intensity index between Germanou Station and Paralia had an annual average of 2.6 °C, with negative nighttime values in November and December, indicating that Paralia was warmer than Germanou Station during those nighttime periods.

The study has certain limitations, mainly related to the availability and spatial and temporal resolution of the data. The Urban Heat Island is influenced by numerous factors, including weather conditions, vegetation, and building density, which are difficult to isolate completely. The meteorological stations may not capture microclimatic variations at neighbourhood or street level. Finally, the findings concern the specific study area and the time period of 2025 and cannot be generalized without further research.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ταχεία αστικοποίηση που χαρακτηρίζει τις σύγχρονες κοινωνίες έχει επιφέρει σημαντικές μεταβολές στο περιβάλλον. Μια από τις πιο χαρακτηριστικές και μελετημένες συνέπειες είναι το φαινόμενο της Αστικής Θερμικής Νησίδας (ΑΘΝ). Το φαινόμενο αυτό αναφέρεται στην παρατηρούμενη αύξηση της θερμοκρασίας στις αστικές περιοχές σε σύγκριση με τις γειτονικές αγροτικές ή περιαστικές περιοχές και είναι αποτέλεσμα της έντονης ανθρώπινης δραστηριότητας και της εκτεταμένης κάλυψης του εδάφους με δομημένα υλικά, όπως το σκυρόδεμα και η ασφαλτος, τα οποία απορροφούν και αποθηκεύουν μεγάλες ποσότητες ηλιακής ακτινοβολίας κατά τη διάρκεια της ημέρας και την αποδίδουν αργά κατά τις νυχτερινές ώρες. Παράλληλα, η έλλειψη βλάστησης και υδάτινων επιφανειών μειώνει τη δυνατότητα εξάτμισης και διαπνοής, μηχανισμοί που φυσιολογικά συμβάλλουν στη μείωση της θερμοκρασίας. Επιπλέον, οι ανθρώπινες δραστηριότητες, όπως η βιομηχανική παραγωγή και η αυξημένη κατανάλωση ενέργειας για θέρμανση και ψύξη, ενισχύουν περαιτέρω τη θερμική επιβάρυνση του αστικού περιβάλλοντος.

Οι επιπτώσεις της ΑΘΝ είναι πολυδιάστατες και επηρεάζουν τόσο το φυσικό περιβάλλον όσο και την ποιότητα ζωής των κατοίκων των πόλεων. Η αύξηση της θερμοκρασίας συνδέεται με την επιδείνωση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης, καθώς ευνοεί τον σχηματισμό φωτοχημικού νέφους και όζοντος, ενώ ταυτόχρονα περιορίζει τον φυσικό αερισμό των αστικών περιοχών. Επιπλέον, το φαινόμενο μπορεί να επηρεάσει τα τοπικά καιρικά πρότυπα, όπως τη συχνότητα και την ένταση των βροχοπτώσεων, αυξάνοντας τον κίνδυνο πλημμυρικών φαινομένων.

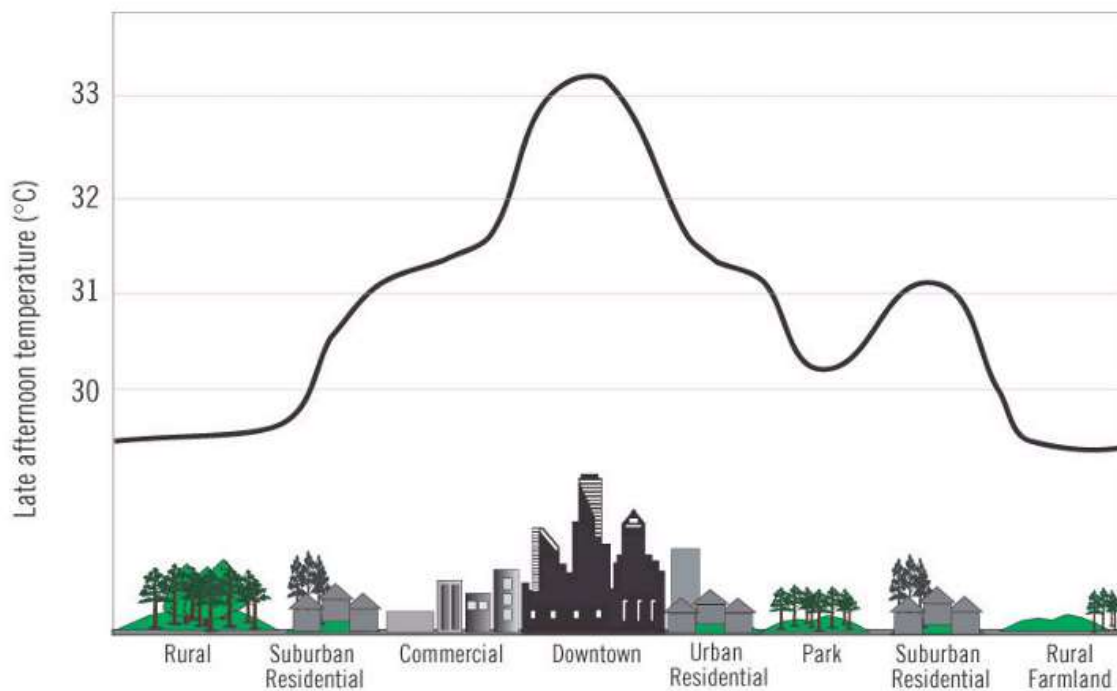
Οι κοινωνικές και υγειονομικές διαστάσεις του φαινομένου καθίστανται ολοένα και πιο έντονες, ιδιαίτερα για ευάλωτες ομάδες πληθυσμού, όπως οι ηλικιωμένοι και τα άτομα με χρόνια νοσήματα, οι οποίοι εκτίθενται σε αυξημένο θερμικό στρες, ενώ σημαντικές είναι και οι περιβαλλοντικές συνέπειες της ΑΘΝ στα οικοσυστήματα, καθώς η αυξημένη θερμοκρασία επηρεάζει τη βιοποικιλότητα, τη λειτουργία των υδάτινων σωμάτων και τη φυσιολογία φυτών και ζώων.

Καθώς η κλιματική αλλαγή αναμένεται να εντείνει τα ακραία θερμικά φαινόμενα, η κατανόηση της ΑΘΝ και των επιπτώσεών της καθίσταται απαραίτητη για τον βιώσιμο αστικό σχεδιασμό. Η μελέτη του φαινομένου συμβάλλει στη διαμόρφωση στρατηγικών μετριασμού και προσαρμογής, με στόχο τη βελτίωση των περιβαλλοντικών συνθηκών και την ενίσχυση της ανθεκτικότητας των πόλεων στο μέλλον.

1. Το Φαινόμενο της Αστικής Θερμικής Νησίδας

1.1 Ορισμός του φαινομένου της Αστικής Θερμικής Νησίδας

Ο ολοένα και αυξανόμενος ρυθμός αστικοποίησης παγκοσμίως, έχει επιφέρει δραματικές αλλαγές ως προς την ακτινοβολία, την υγρασία, τις θερμικές και αεροδυναμικές ιδιότητες του περιβάλλοντος (Kolokotroni & Giridharan, 2008). Οι διάφορες υφιστάμενες υποδομές των αστικών περιοχών όπως δρόμοι, κτίρια κ.α., δύναται να απορροφούν και εκπέμπουν την ηλιακή ακτινοβολία σε μεγαλύτερο βαθμό απ' ό,τι τα φυσικά τοπία στα οποία υπάρχει περισσότερο πράσινο, λίμνες και θάλασσες. Έτσι η θερμοκρασία στις περιοχές αυτές αυξάνεται με αποτέλεσμα να δημιουργούνται «θερμικές νησίδες». Σύμφωνα με το παραπάνω, ως αστική θερμική νησίδα (ΑΘΝ), ορίζεται το φαινόμενο κατά το οποίο οι αστικές περιοχές παρουσιάζουν υψηλότερες θερμοκρασίες σε σχέση με τις περιαστικές ή αγροτικές περιοχές (Oke, 1982) και πρωτομελετήθηκε από τον Luke Howard το 1833.

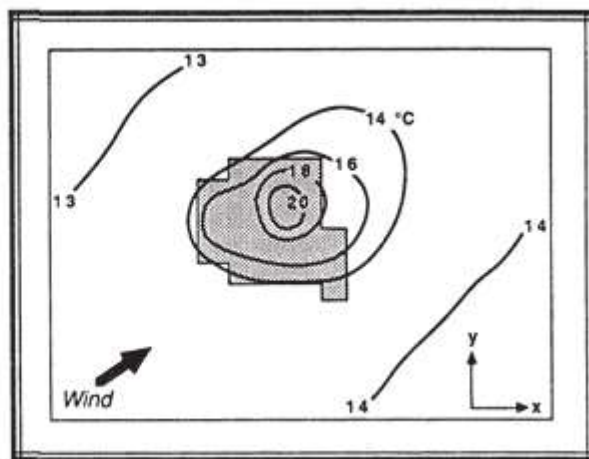


Εικόνα 1. Το φαινόμενο της αστικής θερμικής νησίδας (Arifwido et al., 2016)

Το φαινόμενο της ΑΘΝ σύμφωνα με τον Oke (1982), μπορεί να διαχωριστεί σε τρεις βασικές κατηγορίες :

1. Θερμική νησίδα του στρώματος κομοστέγης (**canopy-layer heat island**) : εκτείνεται από την επιφάνεια του εδάφους έως περίπου το μέσο ύψος των στεγών, κατά τρόπο αντίστοιχο με το φυτικό στρώμα που δημιουργούν τα κλαδιά και η φυλλωσιά των δέντρων.
2. Θερμική νησίδα του οριακού ατμοσφαιρικού στρώματος (**boundary-layer heat island**) : αποτελεί ένα εσωτερικό οριακό στρώμα μεσοκλίμακας, του οποίου τα χαρακτηριστικά καθορίζονται, τουλάχιστον εν μέρει, από την παρουσία της πόλης στο υποκείμενο έδαφος.
3. Επιφανειακή θερμική νησίδα (**surface heat island**) : θερμική νησίδα στο επίπεδο μέτρησης (screen-level) σε μια μεγάλη πόλη εύκρατου κλίματος (πληθυσμός περίπου 2.100.000), η οποία βρίσκεται σε επίπεδο και ανοιχτό ανάγλυφο.

Όταν απεικονίζουμε με ισόθερμες καμπύλες σε έναν χάρτη τις θερμοκρασίες μίας πόλης, το αποτέλεσμα που παίρνουμε είναι όμοιο με το τοπογραφικό περίγραμμα ενός νησιού, εξ ου κι ο όρος θερμική νησίδα (Εικ. 1).



Εικόνα 2. Ιδανικό μοτίβο ισόθερμης νησίδας σε αστική περιοχή (σκιασμένο). (Stull, 1988)

Οι θερμικές νησίδες σχηματίζονται υπό ποικίλες συνθήκες, κατά τη διάρκεια της ημέρας ή της νύχτας, σε μικρές ή μεγάλες πόλεις, σε προαστιακές περιοχές, σε βόρεια ή νότια κλίματα και σε οποιαδήποτε εποχή (U.S. Environmental Protection Agency [EPA], n.d.)

Η ακριβής μέτρηση της έντασης του φαινομένου της ΑΘΝ είναι απαραίτητη προϋπόθεση προκειμένου αυτό να μελετηθεί σωστά. Βασικός τρόπος υπολογισμού της είναι η ποσοτικοποίηση του φαινομένου, υπολογίζοντας τη μέση διαφορά θερμοκρασίας μιας αστικής περιοχής από αυτή της παρακείμενης αγροτικής περιοχής και περιγράφεται από τη σχέση :

$$UHI = T_{\text{urban}} - T_{\text{rural}}$$

όπου:

T_{urban} η θερμοκρασία στην αστική περιοχή σε °C και

T_{rural} η θερμοκρασία στη γειτονική αγροτική περιοχή σε °C

και μπορεί να φτάσει στους 1–2°C κατά τη διάρκεια της μέρας και στους 3–6°C κατά τη διάρκεια της νύχτας (Cichowicz & Bochenek, 2024). Συνεπώς το εύρος θερμοκρασίας μεταξύ μέρας και νύχτας θα παρουσιάζεται υψηλότερο στις αγροτικές περιοχές και μικρότερο στις αστικές.

Κατά τη διάρκεια της νύχτας, η ένταση της ΑΘΝ καθορίζεται σε μεγάλο βαθμό από τις διαφορές μεταξύ αστικών και αγροτικών περιοχών ως προς τη γεωμετρία των επιφανειών, τις θερμικές τους ιδιότητες και τη συμβολή της ανθρωπογενούς θερμότητας. Αντίθετα, τα αίτια των ημερήσιων διαφορών στην επιφανειακή θερμοκρασία (ΔT_s) είναι ουσιαστικά διαφορετικά. Συγκεκριμένα, ως βασικοί μηχανισμοί θέρμανσης θεωρούνται αφενός οι μεταβολές στην αποδοτικότητα της συναγωγής που σχετίζονται με την τραχύτητα της επιφάνειας και αφετέρου οι αλλαγές στην κατανομή των ροών θερμότητας, οι οποίες συνδέονται με τα τοπικά κλιματικά και φυτοκαλυπτικά χαρακτηριστικά. Ορισμένες μελέτες υποστηρίζουν ότι η ημερήσια μεταβολή της επιφανειακής θερμοκρασίας (ΔT_s) αυξάνεται γραμμικά με την ποσότητα της βροχόπτωσης, λόγω αλλαγών στην αεροδυναμική αντίσταση. Στις ξηρές κλιματικές περιοχές οι πόλεις διαχέουν τη θερμότητα αποτελεσματικότερα από τα γυμνά περιβάλλοντα, ενώ στις υγρές περιοχές παρατηρείται το αντίστροφο φαινόμενο (Whan, 2019). Για τον σκοπό αυτό και για την περεταίρω διερεύνηση του προκειμένου να παρακολουθείται η εξέλιξη του ανά τα χρόνια, έχουν αναπτυχθεί παγκόσμιες αλλά και περιφερειακές βάσεις θερμοκρασιακών δεδομένων (Yang et al., 2024)

Τα τελευταία 20 χρόνια πολλοί μελετητές έχουν προβεί σε γενικευμένες παραδοχές ως επί το πλείστον μέσω της εμπειρικής εργασίας τους, που σχετίζονται με την ένταση του φαινομένου και σε γενικές γραμμές ισχύουν έως και σήμερα. Στον πίνακα 1 παρατίθενται ορισμένες από αυτές.

Εμπειρικές Γενικεύσεις	Πηγή
Η ένταση μειώνεται όσο αυξάνεται η ταχύτητα του ανέμου	Ackerman (1985); Park (1986); Travis et al. (1987); Kidder and Essenwanger (1995); Eliasson (1996b); Ripley et al. (1996); Figuerola and Mazzeo (1998); Magee et al. (1999); Morris et al. (2001); Unger et al. (2001)
Η ένταση μειώνεται όσο αυξάνεται η νεφοκάλυψη	Ackerman (1985); Travis et al. (1987); Kidder and Essenwanger (1995); Eliasson (1996b); Ripley et al. (1996); Figuerola and Mazzeo (1998); Magee et al. (1999); Morris et al. (2001); Unger et al. (2001)
Η ένταση είναι μεγαλύτερη κατά τη διάρκεια συνθηκών αντικυκλώνα	Unwin (1980); Unger (1996); Shahgedanova et al. (1997); Tumanov et al. (1999); Morris and Simmonds (2000)
Η ένταση είναι μεγαλύτερη κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού ή της μισής θερμής περιόδου του έτους	Schmidlin (1989); Klysik and Fortuniak (1999); Philandras et al. (1999); Morris et al. (2001)
Η ένταση τείνει να αυξάνεται όσο αυξάνεται το μέγεθος μιας πόλης ή/και ο πληθυσμός της.	Park (1986); Yamashita et al. (1986); Hogan and Ferrick (1998)
Η ένταση είναι μεγαλύτερη κατά τη διάρκεια της νύχτας	Unwin (1980); Adebayo (1987); Schmidlin (1989); Djen (1992); Ripley et al. (1996); Jauregui (1997); Magee et al. (1999); Mont'avez et al. (2000); Tereshchenko and Filonov (2001)
Το φαινόμενο της αστικής θερμικής νησίδας μπορεί να εξαφανιστεί κατά τη διάρκεια της μέρας ή μπορεί να είναι πιο ήπιο από τις αγροτικές περιοχές	Unwin (1980); Tapper (1990); Steinecke (1999)
Οι τιμές θέρμανσης και ψύξης είναι υψηλότερες στην εξοχή απ' ό,τι στην πόλη	Johnson (1985)

Πίνακας 1.Εμπειρικές γενικεύσεις που ισχύουν για την ένταση του φαινομένου της αστικής θερμικής νησίδας (Arnfield, 2003)

Πόλη	Χώρα	Μέγιστη ένταση UHI (°C)
Αθήνα	Ελλάδα	6–12
Λονδίνο	Ηνωμένο Βασίλειο	8

Τόκιο	Ιαπωνία	8
Πεκίνο	Κίνα	7–10
Σαγκάη	Κίνα	6–8
Νέο Δελχί	Ινδία	8–10
Σιγκαπούρη	Σιγκαπούρη	5–7
Φοίνιξ	ΗΠΑ	5–9
Τουσόν	ΗΠΑ	6–8
Μελβούρνη	Αυστραλία	4–7

Πίνακας 2. Ενδεικτική ένταση της Αστικής Θερμικής Νησίδας (UHI) σε μεγάλες πόλεις του κόσμου (Tzavali et al., 2015)

1.2 Μηχανισμοί μετάδοσης της θερμότητας

Υπάρχουν διάφοροι τρόποι με τους οποίους οι μηχανισμοί της γης δρουν προκειμένου να θερμάνουν ή να ψύξουν την ατμόσφαιρα. Οι ακτινοβολιακές διεργασίες στην ατμόσφαιρα διαδραματίζουν καθοριστικό ρόλο στο ενεργειακό ισοζύγιο του συστήματος Γης – ατμόσφαιρας. Η εισερχόμενη ακτινοβολία συμβάλλει στη θέρμανση της επιφάνειας της Γης, τόσο μέσω της άμεσης απορρόφησης της ηλιακής ακτινοβολίας όσο και μέσω της επανεκπεμπόμενης ακτινοβολίας από την ατμόσφαιρα, η οποία αποτελεί τον βασικό μηχανισμό του φαινομένου του θερμοκηπίου και της ατμοσφαιρικής θέρμανσης. Αντιθέτως, η ανοδική ακτινοβολία συνεισφέρει στην ψύξη του κλιματικού αυτού συστήματος, καθώς επιτρέπει την αποβολή στο διάστημα της ενέργειας που απορροφάται τόσο από την ηλιακή όσο και από τη γήινη ακτινοβολία, συμβάλλοντας έτσι στη διατήρηση της θερμικής ισορροπίας της Γης. Ιδιαίτερη σημασία σε αυτές τις διεργασίες έχει η αλληλεπίδραση της ακτινοβολίας με μόρια που παρουσιάζουν ενεργό συμπεριφορά στο υπέρυθρο φάσμα. Τα μόρια αυτά απορροφούν σε μεγάλο βαθμό τη γήινη ακτινοβολία που εκπέμπεται από την επιφάνεια της Γης και μπορούν επιπλέον να διεγερθούν μέσω μηχανισμών μεταφοράς θερμότητας εντός της ατμόσφαιρας. Η απορροφημένη ενέργεια επανεκπέμπεται ισοτροπικά, ενώ ένα μέρος της επαναπορροφάται από την ατμόσφαιρα, με αποτέλεσμα η ακτινοβολία να υπόκειται σε συνεχή αλληλεπίδραση και τροποποίηση κατά τη διάδοσή της (Harde, 2013).

Οι βασικές διεργασίες μεταφοράς θερμότητας περιγράφονται ως ακολούθως:

- Η γη θερμαίνεται από την ηλιακή ακτινοβολία και στη συνέχεια μεταδίδει τη θερμότητα αυτή στα ανώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας με τη μορφή μεγάλου κύματος

ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Αφού θερμανθεί ο αέρας που βρίσκεται σε άμεση επαφή με την επιφάνεια του εδάφους, στη συνέχεια θερμαίνονται και τα ανώτερα στρώματα του αέρα που έρχονται σε επαφή με τα κατώτερα. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται **αγωγιμότητα (conduction)**. Αγωγιμότητα δηλαδή έχουμε όταν δύο σώματα διαφορετικής θερμοκρασίας βρίσκονται σε επαφή και η ενέργεια μεταφέρεται από το θερμότερο προς το ψυχρότερο. Αυτή η μεταφορά θερμότητας συνεχίζεται έως ότου τα δύο σώματα να αποκτήσουν την ίδια θερμοκρασία ή μέχρι να διακοπεί η επαφή τους (NCERT, 2006).

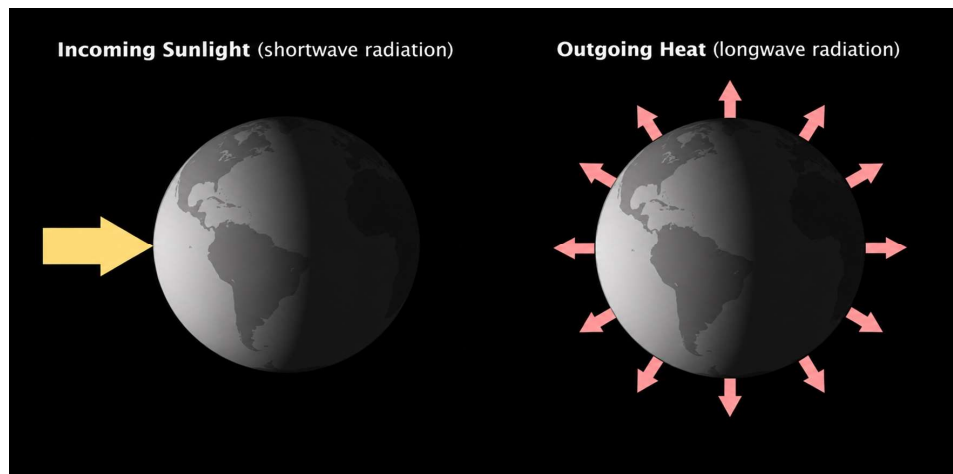
- Όταν ο αέρας που βρίσκεται κοντά στην επιφάνεια της Γης αφού θερμανθεί, γίνεται ελαφρύτερος και ανυψώνεται κατακόρυφα με τη μορφή ρευμάτων, μεταφέροντας τη θερμότητα προς τα υψηλότερα στρώματα θερμαίνοντας περαιτέρω την ατμόσφαιρα. Αυτή η κατακόρυφη μεταφορά θερμότητας ονομάζεται **μεταγωγή (convection)** και περιορίζεται αποκλειστικά στην τροπόσφαιρα (NCERT, 2006).

- Η μεταφορά θερμότητας μέσω της οριζόντιας κίνησης του αέρα ονομάζεται **οριζόντια μεταφορά ή μεταφορά μάζας (advection)**. Η οριζόντια κίνηση του αέρα είναι γενικά πιο σημαντική από την κατακόρυφη. Στα μεσαία γεωγραφικά πλάτη, η πλειονότητα των ημερήσιων (ημέρας – νύχτας) μεταβολών του καιρού οφείλεται κυρίως στη μεταφορά θερμότητας μέσω της συναγωγής (NCERT, 2006).

1.3 Ενεργειακά ισοζύγια

Το ενεργειακό ισοζύγιο της Γης (Earth's energy budget) περιγράφει πώς η ενέργεια εισέρχεται, μεταφέρεται και αποβάλλεται από το σύστημα Γης - ατμόσφαιρας. Για να παραμείνει η μέση θερμοκρασία της Γης σχετικά σταθερή με τον χρόνο, η ενέργεια που λαμβάνει η Γη πρέπει να είναι περίπου ίση με την ενέργεια που χάνει (NASA, n.d.).

Η επιφάνεια της Γης αποτελεί βασικό κόμβο ανταλλαγής ενέργειας στις ατμοσφαιρικές διεργασίες. Δέχεται την μικρού μήκους κύματος ηλιακή ακτινοβολία, από την οποία μόνο ένα μέρος ανακλάται πίσω στο διάστημα, ενώ το υπόλοιπο απορροφάται. Παράλληλα, η επιφάνεια απορροφά ακτινοβολία μεγάλου μήκους κύματος που εκπέμπεται από τα νέφη, τα αιωρούμενα σωματίδια και τα ατμοσφαιρικά αέρια. Ωστόσο, μόνο ένα κλάσμα της απορροφούμενης ενέργειας επανεκπέμπεται προς την ατμόσφαιρα υπό μορφή μεγάλου μήκους κύματος ακτινοβολίας (Δαλέζιος, 2015).

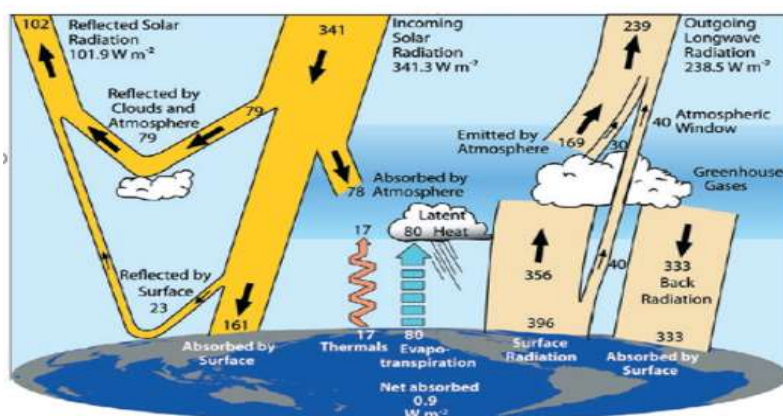


Εικόνα 3 Εισερχόμενη και εξερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία (NASA, n.d.)

Η μέση ένταση της ηλιακής ενέργειας που φτάνει στο ανώτατο σημείο της ατμόσφαιρας σε ευθεία με τον Ήλιο είναι περίπου 1.360 watt/m^2 . Η μέγιστη ενέργεια που μπορεί να παρέχει η Ήλιος στη Γη, ονομάζεται συνολική ηλιακή ενέργεια (total solar irradiance). Δεδομένου ότι η Γη είναι σφαιρική, μόνο το μισό τελικά φτάνει ως την επιφάνεια της ενώ το ποσό αυτό διαιρείται επιπλέον εξαιτίας της γωνίας πρόσπτωσης της ακτινοβολίας στις διαφορές περιοχές οι οποίες δε βρίσκονται κάθετες ως προς την ακτινοβολία, αλλά υπό γωνία. Έτσι τελικά καταλήγει μόνο το $\frac{1}{4}$ της συνολικής ενέργειας κατά μέσο όρο σε ολόκληρο τον πλανήτη, δηλαδή περίπου τα 340 watts/m^2 (NASA, n.d.). Από αυτή το 30% (102 Wm^{-2}) ανακλάται άμεσα πίσω στο διάστημα από τα σύννεφα και τους πάγους, τα μόρια της ατμόσφαιρας και την επιφάνεια της γης (albedo). Από την υπόλοιπη, το 30% περίπου απορροφάται από ατμόσφαιρα (78 Wm^{-2}) και περίπου το 70% καταλήγει στην επιφάνεια (161 Wm^{-2}) της γης την οποία και θερμαίνει. Μεγάλο μέρος αυτής της θερμότητας που εκπέμπει η γη, επιστρέφει στην ατμόσφαιρα ως μεγάλου μήκους κύματος ΗΜ ακτινοβολία (υπέρυθρη ακτινοβολία). Από τα 396 Wm^{-2} που εκπέμπεται από την επιφάνεια της γης, το 60% (239 Wm^{-2}) χάνεται στο διάστημα. Η υπόλοιπη ενέργεια απορροφάται από σύννεφα και αέρια όπως το διοξείδιο του άνθρακα, μεθάνιο, όζον, υδρατμοί κ.α. Στη συνέχεια, η ατμόσφαιρα όπου παγιδεύεται η θερμότητα, επανακπέμπει υπέρυθρη ακτινοβολία προς τη γη και το διάστημα (Παυλάκης, n.d.).

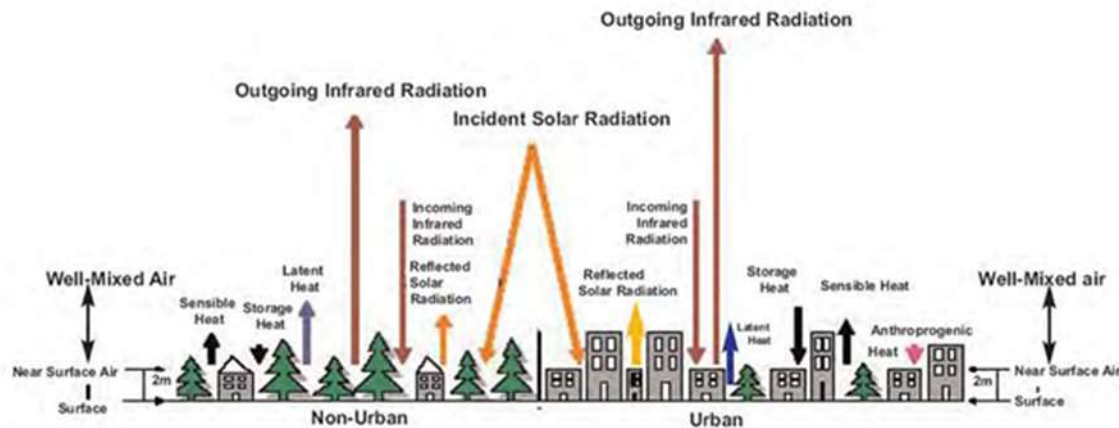
Συνολικά η γήινη ακτινοβολία και η ενέργεια που εκπέμπεται πίσω στο διάστημα από την ατμόσφαιρα εξισορροπεί την ενέργεια που απορροφήθηκε από τη γη (NCERT, 2006). Στο συνολικό ενεργειακό ισοζύγιο, η επιφάνεια της Γης προσλαμβάνει μεγαλύτερη ποσότητα ακτινοβολιακής ενέργειας από αυτήν που αποβάλλει. Το ενεργειακό αυτό πλεόνασμα

μεταφέρεται εκ νέου προς την ατμόσφαιρα κυρίως μέσω δύο τυρβωδών ροών: της αισθητής ροής θερμότητας και της λανθάνουσας ροής θερμότητας, η οποία συνδέεται με τις διεργασίες εξάτμισης. Παράλληλα, μέρος της ενέργειας μεταδίδεται στο έδαφος μέσω της ροής θερμότητας του εδάφους ή αποθηκεύεται σε φυσικά και ανθρωπογενή στοιχεία, όπως η βλάστηση και τα κτίρια. Η αισθητή ροή θερμότητας συμβάλλει καθοριστικά στη θέρμανση της κατώτερης ατμόσφαιρας, επηρεάζοντας τυπικά στρώμα πάχους έως περίπου 100 m κατά τη διάρκεια της ημέρας, με εξαίρεση περιπτώσεις έντονης μεταγωγής (Δαλέζιος, 2015).



Εικόνα 4 Ενεργειακό ισοζύγιο της γης

Όταν λοιπόν η ροή της εισερχόμενης ηλιακής ενέργειας ισούται με την εξερχόμενη ροή θερμότητας προς το διάστημα, η ακτινοβολία της Γης βρίσκεται σε ισορροπία και η θερμοκρασία της είναι γενικά σταθερή. Οποιοσδήποτε παράγοντας μπορεί να αυξήσει ή να μειώσει την ποσότητα της εισερχόμενης ή και εξερχόμενης ενέργειας, διαταράσσει αυτή την ισορροπία (NASA, n.d.). Για παράδειγμα αλλαγές στη σύνθεση της ατμόσφαιρας και της χρήσης γης, ανθρωπογενείς εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου αερολυμάτων, επηρεάζουν το κλίμα μέσω διαταραχών στο ενεργειακό ισοζύγιο. Από το 1971 παρατηρείται αύξηση της καθαρής ακτινοβολιακής διέγερσης (ERF) της Γης, κυρίως λόγω της αύξησης των αερίων του θερμοκηπίου και της έντονης αστικοποίησης. Η θέρμανση που προκαλείται από την ακτινοβολιακή διέγερση έχει ως αποτέλεσμα να αποβάλλεται περισσότερη θερμότητα στο διάστημα σύμφωνα με την απόκριση θερμοκρασίας του Planck. (IPCC, 2021)



Εικόνα 5 Ενεργειακό ισοζύγιο σε τυπική αστική και αγροτική περιοχή(Bousse, 2024)

1.4 Μικροκλίμα αστικών και αγροτικών περιοχών

1.4.1 Μικρομετεωρολογία

Η Ελλάδα έχει τυπικό Μεσογειακό κλίμα, με ήπιους και βροχερούς χειμώνες, θερμά και ξηρά καλοκαίρια και γενικά μεγάλη ηλιοφάνεια καθ' όλη τη διάρκεια του έτους. Η ποικιλία των κλιματικών τύπων οφείλεται στην τοπογραφία της χώρας και στις διαφορές υψομέτρου, καθώς και στην εναλλαγή ξηράς και θάλασσας: το ξηρό κλίμα κυριαρχεί στην Ανατολική Ελλάδα, ενώ η Βόρεια και Δυτική Ελλάδα παρουσιάζουν πιο υγρές συνθήκες.

Κλιματολογικά, το έτος διακρίνεται σε δύο κύριες περιόδους: την ψυχρή και βροχερή χειμερινή περίοδο (μέσα Οκτωβρίου – τέλος Μαρτίου), με μέση ελάχιστη θερμοκρασία 0–10°C, και την θερμή και άνομβρη περίοδο (Απρίλιος – Οκτώβριος), με σταθερό καιρό, σχεδόν αίθριο ουρανό και μέση μέγιστη θερμοκρασία 29–35°C κατά το τέλος Ιουλίου – αρχές Αυγούστου (HNMS, n.d.). Εκτός του γενικότερου κλίματος μιας περιοχής, διαμορφώνονται κλιματολογικές συνθήκες οι οποίες διαφέρουν μεταξύ τους ανά γεωγραφική έκταση όπου παρατηρούνται και ορίζονται ως μικροκλίματα.

Ο Ήλιος αποτελεί την κυρίαρχη και ουσιαστικά τη μοναδική πηγή ενέργειας για τα περισσότερα φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα στην ατμόσφαιρα της Γης. Οι συνεισφορές ενέργειας από ανθρωπογενείς δραστηριότητες, από το εσωτερικό της Γης και από τα λοιπά άστρα είναι εξαιρετικά περιορισμένες και πρακτικά αμελητέες (περίπου 0,01% από ανθρωπογενείς, 0,005% από το εσωτερικό της γης και 10⁻⁵% από τα υπόλοιπα άστρα). Η

ηλιακή ακτινοβολία διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο σε πληθώρα διεργασιών στην επιφάνεια της Γης, όπως οι ροές ενέργειας και υγρασίας, η φωτοσύνθεση και η εξατμισοδιαπνοή. Επιπλέον, οι μεταβολές της ηλιακής ακτινοβολίας σε μικρές χωρικές και χρονικές κλίμακες επηρεάζουν άμεσα τη βλάστηση, την ανάπτυξη και την παραγωγικότητα των φυτών, καθώς και τα ενεργειακά και υδατικά ισοζύγια του εδάφους.

Η τροπόσφαιρα εκτείνεται από την επιφάνεια της Γης έως περίπου τα 11 km, ωστόσο μόνο τα κατώτερα 1–2 km επηρεάζονται άμεσα από την υποκείμενη επιφάνεια της γης. Το τμήμα αυτό ορίζεται ως ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα (ΑΟΣ) και αποτελεί το κατώτερο τμήμα της τροπόσφαιρας που ανταποκρίνεται στις επιφανειακές διεργασίες σε χρονικές κλίμακες από λίγες ώρες έως περίπου μία ημέρα. Στο ΑΟΣ κυριαρχούν η τριβή, η ανταλλαγή ορμής, θερμότητας και μάζας, η εξάτμιση και διαπνοή, η εκπομπή ρύπων, καθώς και η τροποποίηση της ροής λόγω του ανάγλυφου. Το πάχος του μεταβάλλεται σημαντικά χωρικά και χρονικά, με τυπικές τιμές 1–2 km πάνω από την ξηρά και περίπου 0,5 km πάνω από τους ωκεανούς.

Οι μετεωρολογικές παράμετροι στο ΑΟΣ παρουσιάζουν έντονες ημερήσιες διακυμάνσεις, ιδιαίτερα η θερμοκρασία κοντά στην επιφάνεια, σε αντίθεση με την ελεύθερη ατμόσφαιρα. Η τριβή επιβραδύνει την ταχύτητα του ανέμου κοντά στο έδαφος και προκαλεί μεταβολή της διεύθυνσής του, ενώ οι κατακόρυφες ταχύτητες παραμένουν πολύ μικρές. Χαρακτηριστικό γνώρισμα του ΑΟΣ αποτελεί η συχνή εμφάνιση τύρβης (ατμοσφαιρικών αναταράξεων), η οποία είναι υπεύθυνη για την κατακόρυφη μεταφορά θερμότητας, ορμής, υδρατμών και ρύπων. Επιπλέον, στο νυχτερινό οριακό στρώμα παρατηρούνται συχνά κύματα που μεταφέρουν κυρίως ορμή και ενέργεια.

Η δομή και το ύψος του ΑΟΣ επηρεάζονται καθοριστικά από τον ημερήσιο κύκλο θέρμανσης και ψύξης της επιφάνειας της Γης, ιδιαίτερα πάνω από την ξηρά, όπου η θερμοκρασία επιφάνειας παρουσιάζει μεγάλες ημερήσιες διακυμάνσεις. Κατά τη διάρκεια της νύχτας, η ακτινοβολιακή ψύξη του εδάφους οδηγεί στο σχηματισμό ευσταθούς (νυχτερινού) οριακού στρώματος, με τυπικό ύψος 100–500 m και συχνή εμφάνιση θερμοκρασιακής αναστροφής.

Μετά την ανατολή του Ήλιου, η θέρμανση της επιφάνειας προκαλεί τη διάβρωση της νυχτερινής αναστροφής («κάψιμο της αναστροφής») και την ανάπτυξη ασταθούς οριακού στρώματος, αρχικά ρηχού, το οποίο αναπτύσσεται ταχέως και φθάνει μέγιστο ύψος 1–2 km κατά τις μεσημβρινές ώρες. Πριν από τη δύση του Ήλιου, η μείωση της ηλιακής ακτινοβολίας οδηγεί στην κατάρρευση του ασταθούς οριακού στρώματος και στον περιορισμό της τύρβης

σε ρηχό στρώμα. Στη συνέχεια, επανασχηματίζεται το νυχτερινό ευσταθές οριακό στρώμα, ενώ το υπερκείμενο στρώμα αέρα αποκόπτεται από την επιφάνεια και σχηματίζει το αποκομμένο στρώμα, το οποίο διατηρεί τις θερμοδυναμικές ιδιότητες της ημερήσιας περιόδου (Δαλέζιος, 2015).

1.4.2 Αγροτικές περιοχές

Στις αγροτικές περιοχές η θερμοκρασία μειώνεται γρήγορα μετά τη δύση του ηλίου (συνήθως $2 \text{ έως } 3^{\circ}\text{C}^{-1}$) λόγω απώλειας ενέργειας μέσω ακτινοβολίας των επιφανειών και στη συνέχεια ακολουθεί μια ομαλή νυχτερινή πτώση θερμοκρασίας με ρυθμό $0,5^{\circ}\text{C}^{-1}$ έως την ανατολή του ηλίου όπου και διακόπτεται αυτή η ακολουθία. Το ενεργειακό ισοζύγιο είναι αρνητικό καθώς η επιφάνεια χάνει περισσότερη ακτινοβολία από όση δέχεται. Αντίθετα την ημέρα αυξάνεται απότομα καθώς η ηλιακή ακτινοβολία προκαλεί τυρβώδη μεταφορά θερμότητας κοντά στο έδαφος και προς τα επάνω. Η ανάπτυξη της περιορίζεται λόγω της υφιστάμενης νυχτερινή θερμοκρασιακής αναστροφής με το θερμότερο στρώμα αέρα το οποίο εμποδίζει την ανάμειξη.

Καθώς προχωρά η ημέρα αυτή η θερμοκρασιακή αναστροφή τελικά διαλύεται με έντονη κατακόρυφη ανάμειξη των θερμοκρασιών (Oke, 1982). Οι αγροτικές κλιματικές ζώνες χαρακτηρίζονται συνήθως από χαμηλότερες θερμοκρασίες και υψηλότερη υγρασία σε σύγκριση με τις αστικές περιοχές. Αυτό οφείλεται στην παρουσία εκτεταμένης βλάστησης και ανοικτών χώρων, που προάγουν τη φυσική ψύξη και την κυκλοφορία του αέρα, ενώ συμβάλλουν στη διατήρηση της υγρασίας. Η μειωμένη απορρόφηση και εκπομπή θερμότητας περιορίζει την ένταση του φαινομένου της ΑΘΝ. Επιπλέον, η ύπαρξη φυσικών εδαφικών καλυμμάτων, όπως δάση, λιβάδια και υδάτινες επιφάνειες, δημιουργεί πιο σταθερό μικροκλίμα, βελτιώνει την ποιότητα του αέρα και συμβάλλει σε χαμηλότερες θερμοκρασίες κατά τη διάρκεια της νύχτας (Wiseman, 2025)

1.4.3 Αστικές περιοχές

Το κλίμα των αστικών περιοχών παρουσιάζει ανομοιογένεια κυρίως λόγω της αλληλεπίδρασης των επιφανειών με την ατμόσφαιρα και μπορεί να επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό τις μετρήσεις των ενεργειακών ροών. Για παράδειγμα, ένα κτίριο το οποίο αποτελείται από επιμέρους επιφάνειες (υαλοπίνακες, τοίχοι), υφίσταται διαφορετική έκθεση στην ηλιακή ακτινοβολία και τον αέρα. Οι χώροι ανάμεσα από τα κτίρια, δημιουργούν τα λεγόμενα αστικά φαράγγια (urban canyon). Τα αστικά φαράγγια και οι στέγες των κτιρίων συνθέτουν τα οικοδομικά τετράγωνα,

τα οποία οργανώνονται ιεραρχικά σε γειτονιές, ζώνες χρήσεων γης και, τελικά, στο σύνολο της πόλης. Σε κάθε χωρική κλίμακα, το ενεργειακό ισοζύγιο δεν προκύπτει ως απλός μέσος όρος των επιμέρους στοιχείων, αλλά επηρεάζεται ουσιαστικά από τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ τους. Παράλληλα, μονάδες της ίδιας κλίμακας συνδέονται μέσω οριζόντιας μεταφοράς (advection). Καθώς αυξάνεται η χωρική κλίμακα, η χωρική μεταβλητότητα μειώνεται.

Ομοίως, στο επίπεδο του εδάφους, οι επιφάνειες δημιουργούν ένα μωσαϊκό από πράσινους χώρους, δέντρα, ασφαλτοστρωμένες περιοχές διαφορετικές, θερμικές, υδρολογικές και αεροδυναμικές ιδιότητες. Το ισοζύγιο για τις διακριτές αυτές επιφάνειες διαφέρει δημιουργώντας μεγάλες χωρικές αντιθέσεις ως προς τη θερμοκρασία των επιφανειών τους με αποτέλεσμα να υπάρχει έντονη αλληλεπίδραση μεταξύ τους καθώς και μεταφορά θερμότητας και αέρα (Arnfield, 2003).

2. Αίτια και παράγοντες που επηρεάζουν το φαινόμενο της Αστικής Θερμικής Νησίδας

2.1 Ενεργειακή κατανάλωση

Στους παράγοντες που μπορούν να προκαλέσουν αύξηση της θερμοκρασίας μιας αστικής περιοχής, μεταξύ άλλων, συγκαταλέγεται η ανθρωπογενής δραστηριότητα όπως η χρήση ψυκτικών μέσων για τη δημιουργία βέλτιστων συνθηκών διαβίωσης. Η αυξανόμενη χρήση κλιματιστικών συσκευών με σκοπό τη βελτίωση της θερμικής άνεσης των ανθρώπων παρουσιάζει διαρκώς ανοδική τάση. Ως θερμική άνεση σύμφωνα με το πρότυπο ASHRAE 55 ορίζεται η ψυχολογική κατάσταση κατά την οποία το άτομο εκφράζει ικανοποίηση από το θερμικό περιβάλλον. Το συγκεκριμένο πρότυπο χρησιμοποιείται κυρίως στις Ηνωμένες Πολιτείες, ωστόσο έχει αναγνωριστεί διεθνώς και αποτελεί σημείο αναφοράς για τον σχεδιασμό, την πιστοποίηση και την αξιολόγηση της θερμικής ποιότητας εσωτερικών χώρων (ASHRAE, 2023).

Τα συστήματα κλιματισμού διατηρούν χαμηλότερες τις θερμοκρασίες στο εσωτερικό των κτιρίων απομακρύνοντας θερμότητα προς το περιβάλλον μέσω των εξωτερικών μονάδων που διαθέτουν. Ως αποτέλεσμα, η απορριπτόμενη αυτή θερμότητα συμβάλλει στην αύξηση της εξωτερικής θερμοκρασίας των αστικών περιοχών, ενισχύοντας το φαινόμενο της ΑΘΝ (Nuruzzaman, 2015).

Η μείωση της παροχής ζεστού νερού κατά 50% και της χρήσης κλιματισμού κατά 100% θα μπορούσε να οδηγήσει σε μείωση της θερμοκρασίας κοντά στην επιφάνεια κατά το πολύ 0,5°C. Παρά το γεγονός ότι οι μονάδες κλιματισμού καταναλώνουν μεγάλη ποσότητα ενέργειας για την ψύξη εσωτερικών χώρων, στην ουσία η θερμότητα που αποβάλλουν είναι περισσότερη από όση αφαιρούν από το εσωτερικό ενός κτιρίου (Bousse, 2024).



Εικόνα 6 Εξωτερικές κλιματιστικές μονάδες

2.2 Οικιστικός χαρακτήρας περιοχών

Άλλοι σημαντικοί παράγοντες που επηρεάζουν το φαινόμενο της ΑΘΝ και σχετίζονται με τα χαρακτηριστικά μιας αστικής περιοχής, αναλύονται παρακάτω:

• Μέγεθος πληθυσμού

Η αυξημένη συγκέντρωση πληθυσμών στα αστικά κέντρα, ως αποτέλεσμα της ύπαρξης εκτεταμένων υποδομών και υπηρεσιών, οδηγεί σε αύξηση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα (CO_2). Το CO_2 έχει την ιδιότητα να παγιδεύει τη θερμότητα, συμβάλλοντας έτσι στην άνοδο της θερμοκρασίας στις αστικές περιοχές (Nuruzzaman, 2015).

Σύμφωνα με τον Oke (1973 and 1982), ο πληθυσμός και το μέγεθος μια πόλης μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως δείκτης υπολογισμού του φαινομένου της ΑΘΝ. Κατά τη μελέτη των παραγόντων αυτών, βρέθηκε πως υπάρχει άμεση σύνδεση μεταξύ τους καθώς το μέγεθος του πληθυσμού και της πόλης έχουν επίδραση στον αριθμό των κτιρίων και των υποδομών, όπως επίσης και στον αριθμό των οχημάτων (Bousse, 2024). Πιο συγκεκριμένα, οι δημογραφικές μεταβολές επηρεάζουν τον χωρικό σχεδιασμό των πόλεων, τη δομή και την πυκνότητα των κτιρίων, τον βασικό τύπο βιομηχανίας καθώς και τη θέση και το μέγεθος των βιομηχανικών εγκαταστάσεων διαμορφώνοντας τις μικροκλιματικές συνθήκες στις πόλεις. Οι μικροκλιματικές αλλαγές μπορεί να σχετίζονται με πολλούς παράγοντες όπως η αυξημένη απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας, συμπεριλαμβανομένης της ακτινοβολίας που ανακλάται από επιφάνειες (Lopez - Cabeza et al., 2022), την παγίδευση της υπέρυθρης ακτινοβολίας λόγω ανομορφιών στη δομή των κτιρίων και ειδικά στα πυκνοκτισμένα αστικά κέντρα (Ampatzidis & Kershaw, 2020), την καθυστέρηση στην απελευθέρωση θερμότητας από επιστρωμένες επιφάνειες (Yang et al., 2013), τη μετατροπή της ηλιακής ακτινοβολίας σε μικρού μήκους κύματος θερμότητα αντί για λανθάνουσα μορφή (Salata et al., 2015), καθώς και την απελευθέρωση θερμότητας λόγω της καύσης καυσίμων (Louiza et al., 2015), η οποία ενισχύεται από την διεύρυνση και αύξηση των αστικών και ατομικών μεταφορών, τη λειτουργία των βιομηχανικών εγκαταστάσεων και την κατανάλωση ενέργειας στα νοικοκυριά, κυρίως λόγω της χρήσης συστημάτων για ψύξη και θέρμανση (Stewart & Oke, 2012).

• Αστική Γεωμετρία

Οι αστικές κατασκευές έχουν την ικανότητα να προσλαμβάνουν την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία μικρού μήκους κύματος και να συσσωρεύουν θερμική ενέργεια. Μετά τη δύση

του ηλίου, όταν το περιβάλλον αρχίζει να ψύχεται, η αποθηκευμένη αυτή ενέργεια απελευθερώνεται σταδιακά προς την ατμόσφαιρα κατά τη διάρκεια της νύχτας υπό μορφή θερμότητας ή μεγάλου μήκους κύματος ακτινοβολία (Rizwan et al., 2008). Η ποσότητα της ηλιακής ακτινοβολίας που απορροφάται, καθορίζεται από τα χαρακτηριστικά της επιφάνειας, όπως το χρώμα και η γεωμετρική της διάταξη. Επιπλέον, η πολύπλοκη μορφολογία του αστικού δομημένου περιβάλλοντος ευνοεί τις πολλαπλές ανακλάσεις και την αυξημένη απορρόφηση της ακτινοβολίας, οδηγώντας σε χαμηλότερες τιμές albedo σε σχέση με τις αγροτικές περιοχές (Rizwan et al., 2008). Το μέγεθος και το σχήμα των κτιρίων επίσης καθορίζει την αστική γεωμετρία μιας περιοχής και επηρεάζει τη μεταφορά θερμότητας διαμέσου ενός αστικού τοπίου (Sobstyl et al., 2015). Οι Bittencourt και Candido (2010) μελέτησαν τη σχέση μεταξύ της αστικής γεωμετρίας και του φαινομένου της ΑΘΝ, επισημαίνοντας το πόσο σημαντικό είναι να λαμβάνονται υπ' όψιν και να αναλύονται τα δεδομένα αστικής αεροδυναμικής. Η επίδραση της πίεσης του ανέμου στη γεωμετρία των πόλεων, καθώς και η διασπορά του διαμέσου της πόλης, θεωρείται κρίσιμη για τη βελτίωση της ποιότητας του περιβάλλοντος και, κατ' επέκταση, της ποιότητας ζωής των κατοίκων. Για τον λόγο αυτό η αστική γεωμετρία των πόλεων θεωρείται ένας από τους βασικούς παράγοντες που επηρεάζουν τη δημιουργία θερμικών νησίδων. Σύγχρονες μελέτες προσδιορίζουν τη γεωμετρία αυτή μέσω του λόγου ύψους προς πλάτος (H/W), ο οποίος αυξάνεται όταν το ύψος των κτιρίων υπερβαίνει το πλάτος των αστικών φαράγγιων (urban canyon). Ως αστικό φαράγγι νοείται ο δρόμος που περιβάλλεται από κτίρια και από τις δυο πλευρές του. Ο Oke (1981, 1988), επιβεβαίωσε μέσω πειραματικών προσομοιώσεων, ότι η αύξηση του λόγου H/W συνδέεται με μειωμένη αποτελεσματικότητα της ψύξης του μικροκλίματος, καθώς και ότι οι υψηλές τιμές του δείκτη αυτού περιορίζουν τον φυσικό αερισμό των αστικών χώρων (Saadallah, 2018).



Εικόνα 7 Αστικό φαράγγι στη Σιγκαπούρη

• Αστικός θόλος (urban canopy)

Στις αστικές περιοχές, η ύπαρξη πολυώροφων και πυκνά δομημένων κτιρίων δημιουργεί ένα πολυεπίπεδο δομικό περιβάλλον. Η θερμότητα που ανακλάται από τις επιφάνειες των κτιρίων παγιδεύεται μεταξύ γειτονικών, υψηλότερων κατασκευών, σχηματίζοντας το λεγόμενο αστικό θόλο (urban canopy). Το αστικό στρώμα θόλου (Urban Canopy Layer – UCL) εκτείνεται από την επιφάνεια του εδάφους έως το μέσο ύψος των στεγών των κτιρίων, λειτουργώντας κατ' αναλογία με το φυτικό στρώμα θόλου που απαντάται στα φυσικά οικοσυστήματα (Oke, 1982). Η διαμόρφωση αυτού του αστικού θόλου περιορίζει τον φυσικό αερισμό και την απαγωγή θερμότητας, με αποτέλεσμα την περαιτέρω ενίσχυση του φαινομένου της ΑΘΝ (Nuruzzaman, 2015).

• Ανεπαρκής Αερισμός

Τα υδάτινα σώματα και τα τοπογραφικά χαρακτηριστικά που περιβάλλουν μια πόλη μπορούν επίσης να επηρεάσουν την κατανομή και την ένταση της ΑΘΝ. Οι παράκτιες πόλεις υπόκεινται σε έναν τακτικό ημερήσιο κύκλο θαλάσσιων και χερσαίων αερίων, που έχει ως αποτέλεσμα να μεταφέρονται στις θερμότερες αστικές περιοχές οι πιο υγρές και ψυχρές αέριες μάζες που βρίσκονται πάνω από τον ωκεανό, κυρίως κατά τις πρώτες βραδινές ώρες, δημιουργώντας διακριτές διαβαθμίσεις θερμοκρασίας, όπως παρατηρείται στο Βανκούβερ της Βρετανικής Κολομβίας. Το ίδιο φαινόμενο παρατηρείται και σε πόλεις που βρίσκονται σε κοιλάδες οι οποίες μπορεί να επηρεάζονται από καθημερινά μοτίβα ροής ψυχρού αέρα, γνωστά και ως καταβατικές ροές, τα οποία είναι συνήθως ισχυρότερα τη νύχτα και μπορούν να τροποποιήσουν άμεσα τις αστικές θερμοκρασίες σε σύνθετες τοπογραφίες (Ruddell, 2019).

Η ύπαρξη πυκνών κτισμάτων περιορίζει σημαντικά τη διέλευση και την ταχύτητα του ανέμου και αυτό συνεπάγεται τη μείωση της ψύξης μέσω της μεταγωγής. Τα κτίρια λειτουργούν σαν φράγματα ανέμου μειώνοντας την ταχύτητα του έως και 60% (Jabbar et al., 2023). Έτσι, η θερμότητα παγιδεύεται σε στάσιμες περιοχές εξαιτίας των πολυώροφων κτιρίων και των πυκνών κατασκευών που εμποδίζουν τον αερισμό, οδηγώντας σε περαιτέρω επιδείνωση του φαινομένου της ΑΘΝ (Nuruzzaman, 2015).



Εικόνα 8 Kowloon, Hong Kong

2.3 Ποιότητα ατμοσφαιρικού αέρα

Στις αστικές περιοχές και ιδιαίτερα στα κεντρικά τμήματα των πόλεων παρατηρούνται συχνά αυξημένα επίπεδα ατμοσφαιρικής ρύπανσης. Οι εκπομπές καυσαερίων από τα οχήματα, καθώς και οι βιομηχανικοί και άλλοι ατμοσφαιρικοί ρύποι που απελευθερώνονται στην ατμόσφαιρα, μπορούν να επηρεάζουν το ακτινοβολιακό ισοζύγιο της πόλης. Οι ατμοσφαιρικοί ρύποι, και ιδιαίτερα τα ανόργανα και ανθρακούχα αερολύματα, μπορούν να συμβάλλουν στην ενίσχυση του φαινομένου της ΑΘΝ μέσω της απορρόφησης, της σκέδασης και της επανεκπομπής ακτινοβολίας, καθώς και μέσω της επίδρασής τους στη νυχτερινή απώλεια θερμότητας. Υπό ορισμένες συνθήκες, οι διεργασίες αυτές μπορούν να περιορίσουν τη νυχτερινή ψύξη των αστικών περιοχών, λειτουργώντας κατά τρόπο που έχει περιγραφεί ως «φαινόμενο θερμοκηπίου» σε τοπική κλίμακα (Rizwan et al., 2008). Ως αποτέλεσμα, σημειώνεται άνοδος της θερμοκρασίας και εντείνεται η δυσφορία εξαιτίας του επιβαρυσμένου αστικού μικροκλίματος. (Nuruzzaman, 2015) Από τις έξι βασικές κατηγορίες ατμοσφαιρικών ρύπων που παρακολουθούνται συστηματικά στην Κίνα (αιωρούμενα σωματίδια διαμέτρου μικρότερης των 2,5 μm ($\text{PM}_{2,5}$), αιωρούμενα σωματίδια διαμέτρου έως 10 μm (PM_{10}), διοξείδιο του αζώτου (NO_2), το όζον (O_3), το διοξείδιο του θείου (SO_2) και το μονοξείδιο του άνθρακα (CO)), παρατηρήθηκε πως όσον αφορά τη χωρική και χρονική τους κατανομή, οι περιοχές που παρουσιάζουν υψηλές τιμές του δείκτη έντασης της ΑΘΝ (UHI) εμφανίζουν ταυτόχρονα αυξημένα επίπεδα ατμοσφαιρικής ρύπανσης. Ενδεικτικά, τα μεγάλα αστικά κέντρα καταγράφουν υψηλότερες τιμές UHI σε σύγκριση με μικρότερες πόλεις, ενώ τα οικονομικά ανεπτυγμένα και πυκνοκατοικημένα μητροπολιτικά συμπλέγματα παρουσιάζουν σημαντικά υψηλότερες συγκεντρώσεις ατμοσφαιρικών ρύπων σε σχέση με άλλες περιοχές.

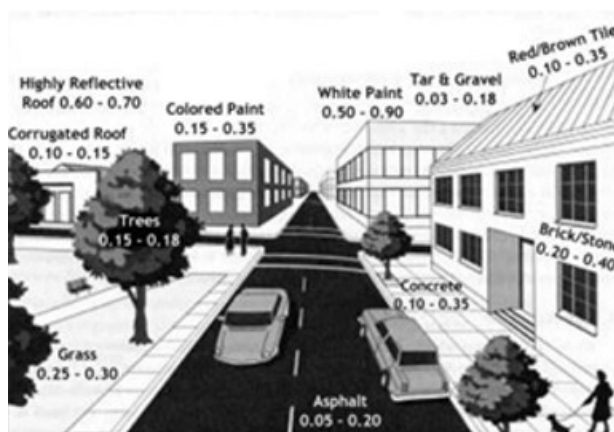
Πλήθος ερευνητικών μελετών έχει καταδείξει ότι το φαινόμενο της ΑΘΝ και η ατμοσφαιρική ρύπανση βρίσκονται σε σχέση αμφίδρομης αλληλεπίδρασης. Συγκεκριμένα, το φαινόμενο της ΑΘΝ προκαλεί αυξημένες θερμοκρασίες στις αστικές περιοχές σε σύγκριση με τις γειτονικές αγροτικές, γεγονός που επηρεάζει τη σταθερότητα του ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος. Η μεταφορά του θερμότερου αέρα πάνω από τον αστικό ιστό οδηγεί στη δημιουργία τοπικής ζώνης χαμηλής πίεσης, η οποία μπορεί να περιορίσει την κατακόρυφη διασπορά των ρύπων και να ευνοήσει τη συσσώρευσή τους κοντά στην επιφάνεια του εδάφους στις πόλεις. Παράλληλα, τα αερολύματα, όπως τα $PM_{2,5}$ και PM_{10} , απορροφούν και σκεδάζουν την ηλιακή ακτινοβολία, μειώνοντας την ποσότητα της ηλιακής ενέργειας που καταλήγει στο έδαφος προκαλώντας ψύξη κατά τη διάρκεια της ημέρας. Από την άλλη, τα ίδια σωματίδια απορροφούν τη μεγάλου μήκους κύματος ακτινοβολία που εκπέμπεται από την επιφάνεια του εδάφους επανεκπέμποντας την κατά τη διάρκεια της νύχτας, οδηγώντας σε αύξηση της θερμοκρασίας και εντείνοντας το φαινόμενο της ΑΘΝ (Fan et al., 2025).

2.4 Ιδιότητες υλικών

Οι θερμικές ιδιότητες των αστικών υλικών, όπως η θερμική εκπομπή, η θερμοχωρητικότητα και η ηλιακή ανακλαστικότητα, επηρεάζουν τη διαδικασία δημιουργίας της ΑΘΝ, καθώς καθορίζουν τον τρόπο με τον οποίο η ηλιακή ενέργεια απορροφάται, εκπέμπεται και ανακλάται (United States Environmental Protection Agency, 2008).

○ Η **ηλιακή ανακλαστικότητα**, γνωστή και ως albedo, είναι το ποσοστό της ηλιακής ακτινοβολίας που ανακλάται από μια επιφάνεια (Ritter, 2006) και σχετίζεται άμεσα με το χρώμα του υλικού: τα σκούρα υλικά παρουσιάζουν μικρότερη ανακλαστικότητα, ενώ τα ανοιχτόχρωμα μεγαλύτερη. Σε παγκόσμια κλίμακα, τα αστικά κτίρια και οι δρόμοι κατασκευάζονται συχνότερα από υλικά με χαμηλό albedo, όπως σκυρόδεμα, μέταλλο ή επιφάνειες επιστρωμένες με άσφαλτο με αποτέλεσμα να απορροφούν περισσότερη ηλιακή ενέργεια και να ανακλούν λιγότερη σε σύγκριση με περιοχές που διαθέτουν υψηλή φυτοκάλυψη. Αντιθέτως, υλικά με υψηλό albedo, όπως τα σύννεφα ή το χιόνι, ανακλούν μεγάλο μέρος της ακτινοβολίας. Οι διαφορές στην ανακλαστικότητα μεταξύ αστικών και αγροτικών περιοχών είναι βασικός παράγοντας δημιουργίας της ΑΘΝ, καθώς τα υλικά που χρησιμοποιούνται στα αστικά κέντρα απορροφούν περισσότερη ηλιακή ενέργεια, αυξάνοντας τόσο τη θερμοκρασία της επιφάνειας όσο και τη θερμοκρασία του αέρα (Cancino, 2010).

Συνεπώς η ακτινοβολία albedo σχετίζεται άμεσα με τη διαμόρφωση του μικροκλίματος μιας περιοχής (Nuruzzaman, 2015). Τέτοια υλικά, με τιμές albedo που μπορεί να φτάνουν έως και 0,90, απαντώνται ιδιαίτερα σε ανακλαστικές στέγες ή οδοστρώματα, στα οποία χρησιμοποιούνται ανοιχτόχρωμα αδρανή υλικά (Rosenzweig et al., 2006). Για παράδειγμα, ένας οικισμός με λευκές όψεις κτιρίων και ανοιχτόχρωμες στέγες παρουσιάζει υψηλότερο albedo, γεγονός που περιορίζει την ποσότητα θερμότητας που επανεκπέμπεται από τα κτίρια προς το περιβάλλον (Bousse, 2024). Μέσω παραμετρικών αναλύσεων για την τον προσδιορισμό των αλλαγών του μικροκλίματος, αποδεικνύεται ότι η μεταβολή στην ανακλαστικότητα τόσο των επιφανειών του εδάφους όσο και των κατακόρυφων επιφανειών μπορεί να μεταβάλει μετρήσιμα τις συνθήκες στο επίπεδο του πεζού, επηρεάζοντας τα φορτία μικρού μήκους κύματος ακτινοβολίας, τις ανταλλαγές μεγάλου μήκους κύματος ακτινοβολίας, καθώς και την ισορροπία μεταξύ συναγωγικών και ακτινοβολιακών ροών θερμότητας. (Ghoniem et al., 2025).



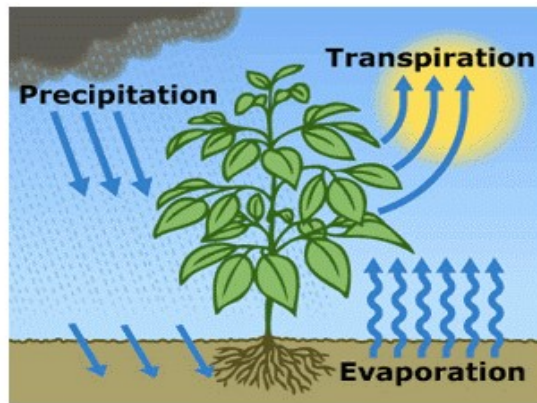
Εικόνα 9 Τιμές albedo διαφόρων αστικών επιφανειών (Bousse, 2024)

ο Η **θερμική εκπομπή (emissivity)** αποτελεί επίσης σημαντικό χαρακτηριστικό, καθώς έχει τη δυνατότητα να καθορίσει την ικανότητα ενός υλικού να απελευθερώνει ποσά θερμότητας που έχει απορροφήσει. Υλικά με χαμηλή εκπομπή θερμότητας, όπως το γυαλί ή τα πολύ ανακλαστικά υλικά, διατηρούνται πιο δροσερά, καθώς αποβάλλουν θερμότητα πιο αποτελεσματικά. Αντίθετα, τα περισσότερα οικοδομικά υλικά, όπως το σκυρόδεμα και η άσφαλτος, παρουσιάζουν υψηλή θερμική εκπομπή λόγω των ιδιοτήτων τους, συμβάλλοντας έτσι στη συσσώρευση θερμότητας και στην ενίσχυση της ΑΘΝ (Beardmore, 2010; Keller, 2010).

ο Τέλος, μια κρίσιμη ιδιότητα που συμβάλλει στη δημιουργία της ΑΘΝ είναι η **θερμοχωρητικότητα** των υλικών, δηλαδή η ικανότητά τους να αποθηκεύουν θερμότητα. Η εκτεταμένη χρήση υλικών επίστρωσης όπως η ασφαλτός, η πέτρα, ο χάλυβας και το σκυρόδεμα, τα οποία παρουσιάζουν υψηλή θερμοχωρητικότητα, αυξάνουν σημαντικά τη θερμοκρασία τους έναντι κάποιων άλλων όπως είναι τα αγροτικά υλικά, δηλαδή η άμμος και το ξηρό έδαφος (Beardmore, 2010). Η ιδιότητα αυτή επηρεάζει σημαντικά τη διατήρηση θερμότητας στο αστικό κέντρο, καθώς τα κτίρια αποθηκεύουν αποτελεσματικά την ηλιακή ενέργεια ως θερμότητα, δημιουργώντας μια ζώνη όπου η θερμότητα μπορεί να συγκρατηθεί σχεδόν διπλάσια σε σύγκριση με τις αγροτικές περιοχές (Cancino, 2010).

2.5 Καταστροφή Πρασίνου

Τα δέντρα και η αστική βλάστηση (όπως θάμνοι, χαμηλοί θάμνοι και ψηλά αγρωστώδη) συμβάλλουν στη μείωση τόσο της επιφανειακής όσο και της θερμοκρασίας του αέρα, παρέχοντας σκίαση και προκαλώντας ψύξη μέσω της διαδικασίας της εξατμισοδιαπνοής. Η εξατμισοδιαπνοή συνίσταται στην απορρόφηση νερού από το έδαφος μέσω του ριζικού συστήματος των φυτών και στη μεταγενέστερη εξάτμισή του από τα φύλλα τους. Κατά τη διαδικασία αυτή, θερμική ενέργεια αφαιρείται από τον περιβάλλοντα αέρα για την εξάτμιση του νερού, οδηγώντας σε μείωση της θερμοκρασίας. Αντίστοιχο φαινόμενο ψύξης παρατηρείται και στο έδαφος που περιβάλλει τη βλάστηση, καθώς και όταν τα φυτά συγκρατούν στα φύλλα τους το νερό της βροχόπτωσης. Σύμφωνα με ανασκόπηση 308 επιστημονικών μελετών, οι αστικές δασικές εκτάσεις εμφανίζουν κατά μέσο όρο θερμοκρασίες χαμηλότερες κατά $1,6^{\circ}\text{C}$ σε σύγκριση με μη φυτεμένες αστικές περιοχές (United States Environmental Protection Agency, n.d.)



Εικόνα 10 Ο κύκλος της εξατμισοδιαπνοής (United States Environmental Protection Agency, n.d.)

Για την κάλυψη των αυξανόμενων αναγκών σε αστικές υποδομές και εγκαταστάσεις, εκτεταμένες δασικές και φυτικές εκτάσεις αποψιλώνονται σε μεγάλη κλίμακα. Η καταστροφή του πρασίνου και η μείωση του αριθμού των δέντρων περιορίζει σημαντικά τη φυσική ικανότητα ψύξης του περιβάλλοντος, καθώς η βλάστηση συμβάλλει στη σκίαση και στην απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας, ενώ παράλληλα χρησιμοποιεί θερμική ενέργεια για τη διαδικασία της φωτοσύνθεσης (Akbari et al., 2001).

Οποιαδήποτε επιφάνεια καλύπτεται από βλάστηση παρουσιάζει διαφορετική αναλογία Bowen σε σχέση με μια ορυκτή επιφάνεια, καθώς μεγάλο μέρος της καθαρής ακτινοβολίας μετατρέπεται σε ενέργεια για την εξατμισοδιαπνοή και τη φωτοσύνθεση (Wong and Yu, 2005) ενώ ελάττωση της φυτικής κάλυψης οδηγεί σε δραστική μείωση της φυσικής θερμορυθμιστικής λειτουργίας του οικοσυστήματος και διαταράσσει το υδρολογικό ισοζύγιο, παράγοντες που ενισχύουν τη δημιουργία και την ένταση του φαινομένου της ΑΘΝ (Nuruzzaman, 2015).

Η αναλογία Bowen εκφράζει το λόγο μεταξύ:

- της **αισθητής θερμικής ροής** (sensible heat flux, H), δηλαδή της θερμότητας που αυξάνει τη θερμοκρασία του αέρα, και
- της **λανθάνουσας θερμικής ροής** (latent heat flux, LE), δηλαδή της ενέργειας που καταναλώνεται για εξάτμιση/εξατμισοδιαπνοή.

Και δίνεται από τη σχέση:

Bowen ratio = H / LE (Campbell Scientific, n.d.)

Οι αστικές περιοχές χαρακτηρίζονται κυρίως από αδιαπέραστες και ξηρές επιφάνειες, όπως κτίρια, δρόμοι, πεζοδρόμια και χώροι στάθμευσης, γεγονός που συνεπάγεται τη σταδιακή αντικατάσταση της βλάστησης καθώς οι πόλεις επεκτείνονται. Η μεταβολή αυτή στη χρήση της γης, περιορίζει την υγρασία και τη σκίαση, γεγονός που οδηγεί στη μείωση της εξατμισοδιαπνοής και σε αύξηση της επιφανειακής θερμοκρασίας του αέρα (USEPA, 2008). Στις αστικές περιοχές, μόνο το 20–30% της βροχόπτωσης επιστρέφει στην ατμόσφαιρα μέσω της εξατμισοδιαπνοής, ενώ το 30–70% μετατρέπεται σε επιφανειακή απορροή ενώ παράλληλα μόνο το 5% της ποσότητας του νερού διηθείται στο έδαφος. Αντίθετα, στις αγροτικές περιοχές με υψηλή φυσική κάλυψη, περίπου το 40% της βροχόπτωσης επανεισάγεται στην ατμόσφαιρα μέσω της εξατμισοδιαπνοής, η επιφανειακή απορροή περιορίζεται στο 10% και το 50% του νερού διηθείται στο έδαφος (Cancino, 2010).

Σε έρευνα που πραγματοποιήθηκε σε πόλη της Αμερικής, λαμβάνοντας θερμοκρασίες κατά μήκος διαδρομών με διαφορετική φυτοκάλυψη και πυκνότητα κτιρίων και σε διαφορετικές ώρες της ημέρας, τα αποτελέσματα ανέδειξαν την υψηλή συσχέτιση μεταξύ της θερμοκρασίας του αστικού αέρα και των αδιαπέρατων και φυτοκαλυμμένων επιφανειών. Συγκεκριμένα η διακύμανση της ημερήσιας θερμοκρασίας εντός του αστικού τοπίου ήταν κατά μέσο όρο 3,5 °C, με τη θερμοκρασία να μειώνεται μη γραμμικά όσο αυξανόταν η κάλυψη από δέντρα. Το βέλτιστο ψυκτικό αποτέλεσμα παρατηρήθηκε στα σημεία όπου η φυτοκάλυψη υπερέβαινε το 40%. Η ένταση της ημερήσιας ψύξης αυξανόταν επίσης με τη χωρική κλίμακα, με τη μεγαλύτερη επίδραση του παράγοντα αυτού να παρατηρείται σε επίπεδο τυπικής αστικής οικοδομικής έκτασης (ακτίνα 60–90 m). Η ημερήσια θερμοκρασία του αέρα αυξανόταν γραμμικά με την αύξηση των αδιαπέραστων επιφανειών, ωστόσο η ένταση της θέρμανσης ήταν μικρότερη από το ψυκτικό όφελος που σχετίζεται με την αυξημένη φυτοκάλυψη. Αντίθετα, η νυχτερινή θερμοκρασία αυξανόταν με την αύξηση των αδιαπέρατων επιφανειών, ενώ η επίδραση της φυτοκάλυψης ήταν περιορισμένη κατά τη διάρκεια της νύχτας. (Mohammed & Mohammed, n.d.).

3. Επιπτώσεις του φαινομένου της Αστικής Θερμικής Νησίδας

3.1 Επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία

Οι επιπτώσεις της αύξησης της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος έχουν μελετηθεί εκτενώς καθώς επηρεάζουν διάφορες πτυχές της καθημερινής ζωής του ανθρώπου. Συνήθως είναι πιο άμεσες και μπορεί να έχουν αρνητικό αντίκτυπο στην υγεία ακόμα και εντός λίγων ημερών. Οι επιπτώσεις μπορούν να θεωρηθούν από ήπιες όπως επιδείνωση συμπτωμάτων υπαρχόντων νοσημάτων, έως και σοβαρές όπως κίνδυνος νοσηλείας και θάνατος (Heaviside et al., 2017). Η ευαλωτότητα απέναντι στη ζέστη δεν είναι ίδια για όλους τους κατοίκους των πόλεων. Ο κίνδυνος επηρεάζεται από τον βαθμό έκθεσης στη θερμότητα όπως η διαβίωση σε περιοχές με έντονο φαινόμενο θερμικής νησίδας, η έλλειψη δένδροκάλυψης ή κλιματισμού, η κατοίκηση σε ανώτερους ορόφους κτιρίων και η εργασία σε εξωτερικούς χώρους, καθώς και από παράγοντες ατομικής ευαισθησίας, όπως η πολύ μικρή ή προχωρημένη ηλικία, το χαμηλό μορφωτικό επίπεδο, τα προβλήματα υγείας ή η περιορισμένη πρόσβαση σε υπηρεσίες υγείας. Η κοινωνική απομόνωση και η έλλειψη υλικών πόρων εντείνουν περαιτέρω τον κίνδυνο. Άλλες μελέτες επισημαίνουν ότι ευάλωτες κοινωνικές ομάδες, όπως οι ηλικιωμένοι και τα άτομα χαμηλού εισοδήματος, συγκεντρώνονται συχνά σε περιοχές όπου το φαινόμενο είναι εντονότερο (Tong et al., 2021).

Άμεσες επιπτώσεις

Η αστική ζέστη συνδέεται άμεσα με καρδιοπνευμονικά νοσήματα, νεφρικές παθήσεις και ψυχικές διαταραχές (Tong et al., 2021). Η θερμική καταπόνηση, ή θερμικό στρες, αφορά προβλήματα που προκύπτουν από έκθεση σε ακραίες θερμοκρασίες. Σε υψηλές θερμοκρασίες περιλαμβάνει θερμοπληξία, θερμική εξάντληση, συγκοπή και θερμικές κράμπες, (ΕΛΙΝΥΑΕ, n.d.). Η θνησιμότητα εξαιτίας των υψηλών θερμοκρασιών παρατηρείται όταν οι τιμές ξεπερνούν ένα συγκεκριμένο όριο (θερμοκρασία κατωφλίου) το οποίο ποικίλλει ανάλογα με το μέσο όρο θερμοκρασίας της κάθε χώρας. Οι χώρες που έχουν χαμηλότερο μέσο όρο θερμοκρασιών τείνουν να παρουσιάζουν και χαμηλότερο όριο, ωστόσο η θνησιμότητα επηρεάζεται και από άλλους παράγοντες όπως για παράδειγμα η κοινωνικοοικονομική κατάσταση του πληθυσμού, τα χαρακτηριστικά της πόλης κτλ (Heaviside, 2020). Σε μελέτη που πραγματοποιήθηκε στο West Midlands του Ηνωμένου Βασιλείου, διαπιστώθηκε ότι το

φαινόμενο της θερμικής νησίδας ευθυνόταν για περισσότερο από το ήμισυ των θανάτων που σχετίζονταν με τη ζέστη κατά τον καύσωνα του 2003 (Tong et al., 2021).

Συμπεράσματα ερευνών έχουν καταδείξει την συσχέτιση μεταξύ νοσηρότητας και θνησιμότητας σε ασθενείς που πάσχουν από διαβήτη και κυμάτων καύσωνα. Τα ποσοστά αύξησης των περιστατικών μπορεί να φτάνουν και το 18% για τη θνησιμότητα και 10% για τη νοσηρότητα (Shi et al., 2021).

Η θερμοκρασία αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους περιβαλλοντικούς παράγοντες που επηρεάζουν τον ύπνο. Οι φυσιολογικοί κύκλοι ύπνου – αφύπνισης ρυθμίζονται από τους κιρκάδιους ρυθμούς, οι οποίοι λειτουργούν σε εικοσιτετράωρη βάση, ενώ η ικανότητα του οργανισμού να ρυθμίζει τη θερμότητα του σώματος είναι καθοριστική τόσο για την έναρξη όσο και για τη διατήρηση του ύπνου. Σε βιολογικό επίπεδο, η έλλειψη ύπνου επηρεάζει αρνητικά βασικές λειτουργίες, όπως η μνήμη, η αποκατάσταση των μυϊκών ιστών και η απομάκρυνση μεταβολικών υπολειμμάτων από τον εγκέφαλο. Παράλληλα, η ανεπαρκής ανάπαυση μπορεί να αποδυναμώσει την ανοσολογική απόκριση, να διαταράξει τις μεταβολικές διεργασίες και να ενισχύσει τη συστηματική φλεγμονή. Οι επιπτώσεις αυτές σχετίζονται με αυξημένη πιθανότητα εμφάνισης καρδιαγγειακών παθήσεων, σακχαρώδους διαβήτη και παχυσαρκίας. Από ψυχιατρική σκοπιά, η στέρηση ύπνου συνδέεται με μείωση της διάθεσης, ενώ οι χρόνιες διαταραχές ύπνου φαίνεται να συμβάλλουν στην εμφάνιση καταθλιπτικών συμπτωμάτων και αυξημένου αυτοκτονικού ιδεασμού (Obradovich et al., 2017).

Οι παρατεταμένες περίοδοι υψηλών θερμοκρασιών που επηρεάζουν αρνητικά την ποιότητα του ύπνου, μπορούν να αυξήσουν το άγχος και την ευερεθιστότητα και να επιδεινώσουν προϋπάρχουσες ψυχικές διαταραχές (Sustainability Directory, n.d.).

Έμμεσες επιπτώσεις

Το φαινόμενο της ΑΘΝ μπορεί να σχετίζεται και έμμεσα με την υγεία του ανθρώπου. Μία από τις σημαντικότερες έμμεσες επιπτώσεις των αστικών θερμικών νησίδων είναι η υποβάθμιση της ποιότητας του αέρα. Οι υψηλές θερμοκρασίες ευνοούν τον σχηματισμό τροποσφαιρικού όζοντος το οποίο αποτελεί βασικό στοιχείο του φωτοχημικού νέφους. Το όζον ερεθίζει την αναπνευστική οδό και επιδεινώνει παθήσεις όπως το άσθμα, καθώς μπορεί να προκαλέσει κρίσεις άσθματος, να επιδεινώσει τη χρόνια αποφρακτική πνευμονοπάθεια και να συμβάλει στην εμφάνιση διαφόρων άλλων αναπνευστικών νοσημάτων. Επιπλέον, το φαινόμενο της

ΑΘΝ συμβάλλει στη συσσώρευση ρύπων, αυξάνοντας τις συγκεντρώσεις αιωρούμενων σωματιδίων και άλλων τοξικών ουσιών. Οι συνθήκες αυτές πλήττουν περισσότερο τους κοινωνικά και οικονομικά ευάλωτους πληθυσμούς, διευρύνοντας τις ανισότητες στην υγεία που ήδη παρατηρούνται στα αστικά περιβάλλοντα (Sustainability Directory, n.d.) ενώ τα ακραία θερμικά φαινόμενα ενδέχεται να υπερφορτώσουν τα συστήματα υγείας, ιδίως στις αναπτυσσόμενες χώρες (Tong et al., 2021). Η αύξηση της θερμοκρασίας επηρεάζει επίσης τη γεωγραφική εξάπλωση και τη βιολογία των διαβιβαστών λοιμωδών νοσημάτων. Η παράταση της θερμής περιόδου ευνοεί την αναπαραγωγή και την επιβίωση εντόμων όπως τα κουνούπια και τα τσιμπούρια, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε αυξημένη μετάδοση ασθενειών, όπως ο ιός του Δυτικού Νείλου, ο ιός Zika και η νόσος του Lyme, εντός των πόλεων (Sustainability Directory, n.d.). Παράλληλα, η άνοδος της θερμοκρασίας αναμένεται να μειώσει την παραγωγικότητα και την ικανότητα για υπαίθρια εργασία, ιδιαίτερα στις τροπικές και υποτροπικές περιοχές (Tong et al., 2021). Τέλος, η επίδραση της αστικής ζέστης στην ψυχική υγεία αποτελεί μια λιγότερο εμφανή αλλά ιδιαίτερα σημαντική διάσταση (Sustainability Directory, n.d.). Έχει επίσης παρατηρηθεί ότι η άνοδος της θερμοκρασίας σχετίζεται με αυξημένα περιστατικά επιθετικής συμπεριφοράς και βίας, ενώ η μακροχρόνια έκθεση σε θερμά και ρυπασμένα αστικά περιβάλλοντα επιβαρύνει συνολικά την ψυχική ευεξία, ιδίως σε πληθυσμούς με περιορισμένους πόρους (Sustainability Directory, n.d.).

Η κλιματική αλλαγή και το φαινόμενο της ΑΘΝ εξελίσσονται παράλληλα και αλληλεπιδρούν, γεγονός που ενδέχεται να ενισχύσει περαιτέρω τις επιπτώσεις της ζέστης στο μέλλον. Εκτιμάται ότι έως το 2100 η θνησιμότητα που σχετίζεται με τη ζέστη στην Ευρώπη θα αυξηθεί έως και 50 φορές, ως αποτέλεσμα της κλιματικής αλλαγής σε συνδυασμό με την αστική επέκταση (Tong et al., 2021).

3.2 Επιπτώσεις στην πανίδα

Το φαινόμενο της ΑΘΝ προκαλεί σημαντικές μεταβολές στο μικροκλίμα των πόλεων, με άμεσες συνέπειες για την τοπική πανίδα. Οι επιπτώσεις εμφανίζονται σε όλους τους έμβιους οργανισμούς που απαντώνται στο περιβάλλον.

Ζωα

Η αύξηση της θερμοκρασίας σε αστικές περιοχές επιδρά στη συμπεριφορά, την κινητικότητα και την κατανομή των ζώων, προσαρμόζοντας ή περιορίζοντας την παρουσία ορισμένων

ειδών. Σημαντική φαίνεται να είναι η επίδραση της αυξημένης θερμοκρασίας στους πληθυσμούς των πουλιών. Παρόλο που η σχέση μεταξύ της ποικιλομορφίας των πουλιών και του φαινομένου της ΑΘΝ δεν έχουν αποσαφηνιστεί, παρατηρούνται ορισμένες αριθμητικές μεταβολές στους πληθυσμούς και στους μηχανισμούς επιβίωσης τους οι οποίοι συνοψίζονται παρακάτω:

- Αυξάνει το θερμικό στρες, ιδιαίτερα κατά την περίοδο αναπαραγωγής.
- Μειώνει τον αριθμό των ειδών στις αστικές περιοχές, καθώς τα πουλιά μετακινούνται σε ψυχρότερα περιβάλλοντα.
- Επηρεάζει τη μετανάστευση, με ορισμένα είδη να παραμένουν στις πόλεις λόγω ηπιότερων χειμώνων.
- Διαταράσσει την αναπαραγωγή και τη διαθεσιμότητα τροφής, μειώνοντας την επιτυχία φωλιάσματος.
- Μειώνει τη λειτουργική ποικιλότητα, ευνοώντας είδη με μεγαλύτερη αντοχή στη ζέστη (Shi et al., 2023).

Έντομα

Έχει παρατηρηθεί μείωση και αλλαγές στην ποικιλομορφία των εντόμων των περιοχών που παρουσιάζουν αυξημένες τιμές ΑΘΝ. Οι υψηλές θεοκρασίες τείνουν να ευνοούν είδη με μεγαλύτερη αντοχή στη ζέστη ενώ δυσκολεύει την ανάπτυξη και την επιβίωση στα λιγότερο προσαρμοστικά. Για παράδειγμα, μελέτες έχουν δείξει μείωση του συνολικού αριθμού ειδών αραχνών στις αστικές περιοχές σε σύγκριση με τις αγροτικές καθώς η ΑΘΝ φιλτράρει τα είδη με χαμηλή ή μέτρια θερμική αντοχή, ευνοώντας μόνο τα θερμόφιλα είδη (Shi et al., 2024).

Σύμφωνα με τους Carlo Polidori et al (2023) το φαινόμενο της ΑΘΝ, μπορεί να επηρεάσει τις μέλισσες ως προς το μέγεθος του σώματος τους καθώς και το σχήμα και τη συμμετρία των πτερύγων, με αποτέλεσμα να μειώνεται η ικανότητα πτήσης, η ενέργεια που απαιτείται για πτήση, η απόσταση που μπορούν να διανύσουν και να χειροτερεύει η γενική φυσική τους κατάσταση. Επίσης επιδρά στους βιολογικούς δείκτες στρες μέσα στα κύτταρα τους, γεγονός που συνδέεται με την ανάπτυξη προνυμφών, την ιδιότητα μάθησης των ενηλίκων και τη συνολική υγεία (Polidori et al., 2023).

Υδρόβιοι οργανισμοί

Η επίδραση της ΑΘΝ στα υδάτινα οικοσυστήματα είναι σύνθετη και ιδιαίτερα σημαντική καθώς υποβαθμίζει την ποιότητα των υδάτων κυρίως μέσω της θερμικής ρύπανσης, με

σημαντικές επιπτώσεις και στα υδάτινα οικοσυστήματα, επηρεάζοντας την ποιότητα του νερού, την ποικιλία των οργανισμών και τη συνολική λειτουργία τους. Η επαφή του βρόχινου νερού με τις θερμαινόμενες αστικές επιφάνειες μπορεί να αυξήσει τη θερμοκρασία του νερού από περίπου 21°C έως και 35°C, όταν τα οδοστρώματα φτάνουν θερμοκρασίες της τάξης των 38°C. Η θερμή απορροή όμβριων υδάτων προκαλεί απότομες μεταβολές στη θερμοκρασία υδάτινων σωμάτων, οι οποίες επηρεάζουν άμεσα τον μεταβολισμό και την αναπαραγωγή των υδρόβιων οργανισμών και ενδέχεται να είναι επιβλαβείς ή ακόμη και θανατηφόρες. Μεταβολές της θερμοκρασίας του νερού μεγαλύτερες από 1–2°C σε διάστημα 24 ωρών μπορούν να προκαλέσουν θερμικό σοκ και έντονο θερμικό στρες σε ευαίσθητα είδη, όπως η πέστροφα brook (Jabbar et al., 2023).

Η άνοδος της θερμοκρασίας των υδάτων μεταβάλλει τη δομή των βιολογικών κοινοτήτων, ενισχύοντας είδη με υψηλή αντοχή στη θερμότητα και περιορίζοντας εκείνα που εμφανίζουν μικρότερη προσαρμοστικότητα, γεγονός που οδηγεί σε απώλεια οικολογικής ποικιλότητας. Η υποχώρηση των τοπικών ειδών επηρεάζει τη λειτουργία των τροφικών αλυσίδων και αποσταθεροποιεί τις φυσικές διεργασίες. Παράλληλα, οι θερμικές μεταβολές τροποποιούν τον χρονισμό της αναπαραγωγής και τις μετακινήσεις υδρόβιων οργανισμών, δημιουργώντας ασυμφωνία μεταξύ των βιολογικών τους αναγκών και της διαθεσιμότητας πόρων. Επιπλέον, μεταβολές στο υδρολογικό καθεστώς, όπως η ενισχυμένη εξάτμιση και οι αλλαγές στα πρότυπα βροχόπτωσης, περιορίζουν τα κατάλληλα ενδιαιτήματα (My Geo Quest, n.d.).

Επιπροσθέτως, η αύξηση της θερμοκρασίας του νερού και η μείωση στα επίπεδα του διαλυμένου οξυγόνου, μπορεί να προκαλέσει αρνητικές συνθήκες οι οποίες δυσχεραίνουν την επιβίωση των υδρόβιων οργανισμών και επηρεάζουν βασικές φυσιολογικές λειτουργίες τους. Παράλληλα, οι μεταβολές της θερμοκρασίας μπορούν να διαταράξουν την αναπαραγωγή, τον ρυθμό ανάπτυξης και τη συμπεριφορά πολλών ειδών, οδηγώντας σε μείωση πληθυσμών και αλλαγές στη σύνθεση των οικολογικών κοινοτήτων. Επιπλέον, οι θερμοκρασιακές διαφορές των υδάτινων σωμάτων και η θερμική στρωμάτωση, περιορίζουν την κατακόρυφη ανάμειξη του νερού και τη μεταφορά θρεπτικών στοιχείων. Τέλος, η θερμική ρύπανση μπορεί να ενισχύσει τις αρνητικές επιδράσεις, όπως η χημική ρύπανση, η απώλεια ενδιαιτημάτων και η κλιματική αλλαγή, αυξάνοντας τους κινδύνους για τους οργανισμούς γλυκού και θαλάσσιου νερού (Harper, 2024).

Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι αυξημένες θερμοκρασίες ενδέχεται να αυξήσουν τους πληθυσμούς ειδών όπως ορισμένων επιβλαβών φυκιών (ευτροφισμός) τα οποία είναι σε θέση

να μειώσουν τα επίπεδα διαλυμένου οξυγόνου, επηρεάζοντας αρνητικά τα υδάτινα οικοσυστήματα (Abdullah, 2024).

3.3 Επιπτώσεις στο περιβάλλον

Το φαινόμενο της ΑΘΝ δεν επηρεάζει μόνο τη θερμοκρασία των πόλεων, αλλά επιδρά και σε άλλες σημαντικές κλιματικές παραμέτρους. Η αύξηση της θερμοκρασίας και η μεταβολή των ενεργειακών ισοζυγίων στην αστική επιφάνεια μπορούν να οδηγήσουν σε αλλαγές στα τοπικά και περιφερειακά κλιματικά συστήματα, καθιστώντας το αστικό περιβάλλον πιο ευάλωτο σε ακραία φαινόμενα (Rosenzweig et al., 2018).

Ατμοσφαιρική ρύπανση

Η αύξηση της παραγωγής ενέργειας εξαιτίας του φαινομένου της ΑΘΝ έχει ως επακόλουθο την αύξηση των αέριων ρύπων. Οι εκπομπές διοξειδίου του θείου (SO_2), οξειδίων του αζώτου (NO_x) και άλλων επιβλαβών ουσιών συμβάλλουν στην ενδυνάμωση του φαινομένου του θερμοκηπίου και επιταχύνουν τις διαδικασίες κλιματικής μεταβολής. (Jabbar et al., 2023) Οι υψηλές θερμοκρασίες που σχετίζονται με το φαινόμενο της ΑΘΝ επιβαρύνουν την ατμόσφαιρα και τα επίπεδα ατμοσφαιρικής ρύπανσης κυρίως λόγω της επιτάχυνσης χημικών αντιδράσεων που λαμβάνουν χώρα, παράγοντας όζον το οποίο ευθύνεται για τη δημιουργία φωτοχημικού νέφους (Imran et al., 2022).

Τέλος, το φαινόμενο της ΑΘΝ συμβάλλει έμμεσα στην υποβάθμιση της ποιότητας του αέρα. Οι υψηλότερες θερμοκρασίες ευνοούν τον σχηματισμό όζοντος και τη συσσώρευση ρύπων, ιδιαίτερα σε συνθήκες χαμηλού αερισμού. Η επιδείνωση της ποιότητας του αέρα έχει αρνητικές συνέπειες τόσο για το κλίμα της πόλης όσο και για τα οικοσυστήματα και την ανθρώπινη υγεία (Rosenzweig et al., 2018).

Άνεμοι

Το φαινόμενο της ΑΘΝ είναι δυνατόν να επηρεάσει τη συμπεριφορά των ανέμων σε τοπικό επίπεδο, εξαιτίας των θερμοκρασιακών και βαρομετρικών διαφορών που παρατηρούνται ανάμεσα στις αστικές και τις αγροτικές περιοχές. Η ανομοιόμορφη κατανομή της θερμότητας ευνοεί την ανάπτυξη τοπικών ρευμάτων αέρα, όπως η λεγόμενη «αστική αύρα». Επιπλέον, τα αστικά κέντρα μπορούν να διαμορφώνουν ιδιαίτερα μικροκλιματικά χαρακτηριστικά,

επηρεάζοντας τόσο την ένταση όσο και την κατεύθυνση των ανέμων. Οι μεταβολές αυτές ενδέχεται να περιορίσουν τον φυσικό εξαερισμό των πόλεων, οδηγώντας σε επιδείνωση της ποιότητας του αέρα και σε αυξημένη κατακράτηση θερμότητας (López & Pérez, 2022).

Οι ΑΘΝ επηρεάζουν επίσης τα μοτίβα του ανέμου. Αν και τα αστικά εμπόδια αυξάνουν την τραχύτητα της επιφάνειας και γενικά μειώνουν την ταχύτητα του ανέμου, η ενισχυμένη θερμική μεταφορά μπορεί σε ορισμένες περιπτώσεις να αυξήσει τους ασθενείς ανέμους. Η ανομοιογενής αυτή συμπεριφορά του ανέμου, σε συνδυασμό με τον «καναλισμό» στους αστικούς δρόμους, δυσχεραίνει τη διασπορά των ατμοσφαιρικών ρύπων (Bader et al., 2018).

Βροχοπτώσεις

Η ΑΘΝ έχει τη δυνατότητα να τροποποιεί τα καιρικά χαρακτηριστικά τόσο σε τοπικό όσο και σε ευρύτερο χωρικό επίπεδο, με ιδιαίτερη επίδραση στα φαινόμενα βροχόπτωσης. Η συσσώρευση θερμότητας στο αστικό περιβάλλον ενισχύει τις ανοδικές κινήσεις του αέρα, γεγονός που διευκολύνει τη δημιουργία νεφών και αυξάνει την πιθανότητα εμφάνισης έντονων καταιγίδων. Επιπροσθέτως, οι αστικές περιοχές μπορούν να μεταβάλλουν τη χωρική κατανομή και την ένταση των βροχοπτώσεων, προκαλώντας συχνά αυξημένα ύψη βροχής στις περιοχές που βρίσκονται υπήνεμα των πόλεων. Οι συνθήκες αυτές ενδέχεται να οδηγήσουν σε ισχυρές τοπικές βροχές και φαινόμενα αστικών πλημμυρών, επιβαρύνοντας σημαντικά τα συστήματα απορροής και διαχείρισης όμβριων υδάτων (López & Pérez, 2022).

Μία από τις βασικές αρνητικές επιπτώσεις της ΑΘΝ αφορά τη βροχόπτωση. Η παρουσία κτιρίων και σκληρών επιφανειών στις πόλεις προκαλεί ανύψωση των αερίων μαζών, ενώ οι υψηλότερες θερμοκρασίες ενισχύουν την ατμοσφαιρική αστάθεια. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε αυξημένη ή πιο έντονη βροχόπτωση, ιδιαίτερα κατάντη των αστικών περιοχών, αυξάνοντας τον κίνδυνο πλημμυρών. Παράλληλα, οι μεταβολές αυτές δεν είναι ομοιόμορφες και σε ορισμένες περιοχές παρατηρείται αστάθεια ή απουσία σαφούς σχέσης μεταξύ αστικοποίησης και βροχόπτωσης, γεγονός που δυσχεραίνει τον υδρολογικό σχεδιασμό (Bader et al., 2018).

Το φαινόμενο της ΑΘΝ επηρεάζει επίσης τη δομή και την ένταση των καταιγίδων. Έρευνες δείχνουν ότι οι καταιγίδες που διέρχονται πάνω από αστικές περιοχές μεταβάλλουν συχνότερα τη μορφή και τη δυναμική τους σε σύγκριση με εκείνες που κινούνται πάνω από αγροτικές εκτάσεις. Η ενισχυμένη μεταφορά θερμότητας και υγρασίας μπορεί να οδηγήσει σε ισχυρότερη συνεκτική δραστηριότητα (ανοδική κίνηση ζεστού και υγρού αέρα που δημιουργεί

σύννεφα καταιγίδας) , αυξάνοντας τη συχνότητα ή την ένταση ακραίων καιρικών φαινομένων (Bader et al., 2018).

Παράλληλα, οι αυξημένες συγκεντρώσεις αερολυμάτων και ατμοσφαιρικών ρύπων στις πόλεις μπορούν να επηρεάσουν αρνητικά τις διεργασίες σχηματισμού της βροχής. Τα σωματίδια αυτά ενδέχεται να παρεμποδίζουν τη συγχώνευση των σταγονιδίων στα νέφη, διαταράσσοντας τον φυσικό υδρολογικό κύκλο και οδηγώντας, σε ορισμένες περιπτώσεις, σε μείωση ή καθυστέρηση της έντονης βροχόπτωσης (Bader et al., 2018).

Κλίμα

Ένα ακόμη αρνητικό αποτέλεσμα της ΑΘΝ είναι η εμφάνιση του φαινομένου της αστικής νησίδας υγρασίας. Σε πολλές πόλεις παρατηρούνται υψηλότερα επίπεδα υγρασίας σε σύγκριση με τις γύρω αγροτικές περιοχές, ιδιαίτερα κατά τις νυχτερινές ώρες. Η αυξημένη υγρασία, σε συνδυασμό με τις υψηλές θερμοκρασίες, επιδεινώνει το αίσθημα της θερμικής δυσφορίας και εντείνει τους καύσωνες στο αστικό περιβάλλον (Bader et al., 2018).

3.4 Επιπτώσεις στην ενεργειακή κατανάλωση

Ο κτιριακός τομέας αποτελεί βασικό συντελεστή του παγκόσμιου ενεργειακού συστήματος, αντιπροσωπεύοντας περίπου το 31% της τελικής κατανάλωσης ενέργειας σε παγκόσμιο επίπεδο. Η κατανάλωση ενέργειας στα κτίρια αυξάνεται διαχρονικά, κυρίως λόγω της ταχείας αστικοποίησης, της πληθυσμιακής αύξησης και της κλιματικής αλλαγής. Σημαντικοί παράγοντες που επηρεάζουν την ενεργειακή κατανάλωση των κτιρίων είναι η θερμοκρασία περιβάλλοντος, τα δομικά χαρακτηριστικά, η απόδοση και λειτουργία των ενεργειακών συστημάτων, καθώς και οι δραστηριότητες των ενοίκων. Μεταξύ αυτών, η θερμοκρασία περιβάλλοντος διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο, καθώς επηρεάζει άμεσα τα φορτία θέρμανσης και ψύξης, τα οποία αντιστοιχούν σε σημαντικό ποσοστό της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας των κτιρίων, ιδίως για ψύξη με σημαντική άνοδο του μέγιστου ηλεκτρικού φορτίου. Πέραν της παγκόσμιας κλιματικής αλλαγής, οι αστικές περιοχές υφίστανται πρόσθετη τοπική αύξηση της θερμοκρασίας λόγω του φαινομένου της ΑΘΝ. Αν και το φαινόμενο αυτό εκδηλώνεται σε περιορισμένη χωρική έκταση, επηρεάζει δυσανάλογα την κατανάλωση ενέργειας, καθώς η πλειονότητα των κτιρίων βρίσκεται σε αστικές περιοχές. Η ΑΘΝ δημιουργεί την ανάγκη για αύξηση των ψυκτικών φορτίων των κτιρίων και, σε συνδυασμό με

τη συνεχιζόμενη αστικοποίηση, αναμένεται να επιφέρει περαιτέρω αύξηση της ενεργειακής ζήτησης στο μέλλον. Έχει υπολογιστεί πως η μέση απαίτηση σε ενέργεια εξ' αιτίας του φαινομένου της ΑΘΝ, φτάνει το 19% με έντονες διακυμάνσεις μεταξύ των πόλεων μεταξύ 10%-120% με τις μεγαλύτερες τιμές να εντοπίζονται στα αστικά κέντρα απ' ότη στην αστική περιφέρεια (Abdullah & Hassan, 2020).

Οι αυξημένες θερμοκρασίες στις αστικές περιοχές συνεπάγονται αυξημένες απαιτήσεις για ψύξη, γεγονός που οδηγεί και σε υψηλότερη ενεργειακή κατανάλωση. Σύμφωνα με τον Οκε, αύξηση της μέσης ατμοσφαιρικής θερμοκρασίας κατά 0,6°C συνδέεται με άνοδο της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας για ψύξη κατά 1,5–2,0% στις Ηνωμένες Πολιτείες. Παράλληλα, εκτιμάται ότι περίπου 5–10% της συνολικής ηλεκτροπαραγωγής χρησιμοποιείται για την αντιστάθμιση της θερμικής επιβάρυνσης των πόλεων (Jabbar et al., 2023).

4. Προτάσεις αντιμετώπισης φαινομένου της Αστικής Θερμικής Νησίδας

4.1 Πράσινες και μπλε υποδομές

Η ενίσχυση της φυτικής κάλυψης αποτελεί μία από τις πιο αποδοτικές παρεμβάσεις για τον περιορισμό των επιπτώσεων που σχετίζονται με το αστικό μικροκλίμα. Η ενσωμάτωσή της στον χωρικό σχεδιασμό και το θεσμικό πλαίσιο αποτελεί κρίσιμη προϋπόθεση για την επίτευξη αποτελεσματικών λύσεων, καθώς τεκμηριώνεται η δυνατότητά της να μειώνει τη θερμοκρασία του αστικού περιβάλλοντος. Τα δέντρα συμβάλλουν ουσιαστικά στον περιορισμό του φαινομένου των ΑΘΝ, κυρίως μέσω της εξατμισοδιαπνοής, η οποία αποτελεί τον κυριότερο μηχανισμό φυσικού δροσισμού του περιβάλλοντος. Επιπλέον, επιδρούν άμεσα στη μείωση της θερμικής επιβάρυνσης, μέσω της απορρόφησης διοξειδίου του άνθρακα, συμβάλλοντας περαιτέρω στη βελτίωση της ατμοσφαιρικής ποιότητας (Nuruzzaman, 2015).

Οι μπλε υποδομές σε συνδυασμό με τη φυτοκάλυψη συγκροτούν ολοκληρωμένες οικολογικές παρεμβάσεις. Συστήματα όπως υδάτινοι σχηματισμοί, δίκτυα απορροής, υδροβιότοποι και κατασκευές με υδάτινα στοιχεία μέσω φυσικών διεργασιών, όπως η εξάτμιση και η μεταφορά θερμότητας, συμβάλλουν στη μείωση της θερμοκρασίας και στη βελτίωση των συνθηκών διαβίωσης στον αστικό χώρο (Ministry of Physical Planning, Construction and State Assets, n.d.).

Ανάπτυξη αστικού πρασίνου

Τα αστικά δασικά οικοσυστήματα, καθώς και οι χώροι πρασίνου όπως πάρκα και κήποι, συμβάλλουν θετικά ως προς τη θερμική ρύθμιση των πόλεων, πέρα από την οικολογική και κοινωνική τους αξία. Εκτός από τη σκίαση που παρέχουν, καθοριστικό ρόλο διαδραματίζουν οι διεργασίες που σχετίζονται με τον υδρολογικό κύκλο, όπως η εξάτμιση από το έδαφος και η διαπνοή της βλάστησης, μηχανισμοί μέσω των οποίων απομακρύνονται μεγάλες ποσότητες θερμικής ενέργειας. Η αντιμετώπιση του φαινομένου της ΑΘΝ προϋποθέτει ορθολογικό χωρικό σχεδιασμό, με αξιοποίηση και επέκταση των υφιστάμενων δασικών εκτάσεων, ώστε να δημιουργούνται ζώνες φυσικού δροσισμού. Παράλληλα, είναι απαραίτητη η προστασία των εδαφικών συνθηκών που υποστηρίζουν και ευνοούν τη βλάστηση. Επιπλέον, μέσω της ενίσχυση των πράσινων περιμετρικών ζωνών και της διασύνδεσής τους με τον αστικό ιστό

βοηθούν στη μείωση της θερμικής επιβάρυνσης (Ministry of Physical Planning, Construction and State Assets, n.d.).

Ανάπλαση δρόμων, πεζοδρομίων και πλατειών

Οι οδικοί άξονες συγκαταλέγονται στις πλέον θερμικά επιβαρυνμένες επιφάνειες των πόλεων λόγω της χρήσης αδιαπέρατων υλικών και της εκλυόμενης θερμότητας από την αυξημένη κυκλοφορία. Η δένδροφύτευση κατά μήκος των δρόμων συμβάλλει ουσιαστικά στον περιορισμό της θερμικής επιβάρυνσης, καθώς παρέχει σκίαση, μειώνει τη θερμοκρασία των επιφανειών και ενισχύει μηχανισμούς δροσισμού, όπως η εξατμισοδιαπνοή. Η αποτελεσματικότητα αυτών των παρεμβάσεων ενισχύεται από την επιλογή κατάλληλων φυτικών ειδών ανθεκτικών στις υψηλές θερμοκρασίες, τη διασύνδεση των γραμμικών αυτών στοιχείων με ευρύτερα δίκτυα πρασίνου, καθώς και τον συντονισμένο σχεδιασμό τους με τις τεχνικές υποδομές. Παράλληλα, η εξασφάλιση επαρκών εδαφικών όγκων για την ανεμπόδιση ανάπτυξη των ριζών ενισχύει τη βιωσιμότητα της βλάστησης και συμβάλλει στη διαχείριση των όμβριων υδάτων. Κατά την επιλογή φυτικών ειδών για δένδροφυτεύσεις σε οδικούς άξονες και περιοχές με εκτεταμένες αδιαπέρατες επιφάνειες, κρίνεται απαραίτητη η προσαρμογή τους σε συνθήκες περιορισμένης υγρασίας και υψηλής ηλιακής έκθεσης. Επιπλέον, λόγω της έντονης ανθρώπινης δραστηριότητας και των ιδιαίτερων μικροκλιματικών συνθηκών, τα είδη αυτά οφείλουν να διαθέτουν αυξημένη ανθεκτικότητα σε μηχανικές καταπονήσεις, όπως οι ισχυροί άνεμοι που εντείνονται από τη μορφολογία του αστικού περιβάλλοντος και δημιουργούν τα «αστικά φαράγγια» (Ministry of Physical Planning, Construction and State Assets, n.d.). Επίσης η κατασκευή διαπερατών οδοστρωμάτων αποτελούν μια αποτελεσματική λύση για τον μετριασμό της θερμικής επιβάρυνσης στις αστικές περιοχές, σε αντίθεση με τις αδιαπέρατες επιφάνειες που δεν επιτρέπουν τη διήθηση του νερού και συνεπώς δεν ευνοούν σημαντική ψυκτική δράση μέσω εξατμισοδιαπνοής. Η αντικατάσταση των συμβατικών επιστρώσεων με υλικά που επιτρέπουν την απορρόφηση και διέλευση του νερού βοηθούν στη μείωση της επιφανειακής θερμοκρασίας, καθώς η υγρασία που συγκρατείται εντός του υποστρώματος λειτουργεί ως μηχανισμός φυσικού δροσισμού. Με αυτόν τον τρόπο, η διήθηση του νερού ενισχύει τη θερμική ρύθμιση του αστικού περιβάλλοντος, περιορίζοντας τη συσσώρευση θερμότητας στις επιφάνειες και βελτιώνοντας τις μικροκλιματικές συνθήκες (Nuruzzaman, 2015).

Αντίστοιχα, οι πλατείες συχνά χαρακτηρίζονται από περιορισμένη παρουσία υψηλής βλάστησης, γεγονός που οδηγεί σε αυξημένες θερμοκρασίες κατά τους θερινούς μήνες και μειωμένη χρήση τους από το κοινό. Η ενίσχυση της φύτευσης, ιδιαίτερα σε σημεία παραμονής των επισκεπτών, αποτελεί βασική προϋπόθεση για τη βελτίωση του μικροκλίματος και την αναβάθμιση της λειτουργικότητάς τους. Κατά τον σχεδιασμό θα πρέπει να γίνεται πρόβλεψη επαρκούς χώρου για την ανάπτυξη δέντρων, με προτίμηση σε φυλλοβόλα είδη που εξασφαλίζουν επαρκώς τη σκίαση. Επιπλέον, η μείωση των καλυμμένων με σκληρά υλικά επιφανειών ή η ενσωμάτωση ειδικών διαμορφώσεων φύτευσης, σε συνδυασμό με στοιχεία όπως κατασκευές σκίασης, κατάλληλα υλικά και υδάτινες εγκαταστάσεις, συμβάλλει στη δημιουργία πιο άνετων δημόσιων χώρων (Ministry of Physical Planning, Construction and State Assets, n.d.).



Εικόνα 11 Αστικός δρόμος στο Βανκούβερ

Πράσινη δόμηση και συστήματα αποστράγγισης πόλεων

Οι φυτεμένες στέγες αποτελούν σημαντική στρατηγική για τον μετριασμό του φαινομένου των αστικών θερμικών νησίδων, δεδομένου ότι οι επιφάνειες των δωμάτων αποτελούν σημαντικό ποσοστό της αστικής έκτασης. Η μετατροπή τους σε βιοφυτεμένες επιφάνειες ενισχύει τη ρύθμιση της θερμοκρασίας του αστικού περιβάλλοντος, καθώς η βλάστηση απορροφά θερμική ενέργεια και βοηθά στον καθαρισμό του αέρα, διατηρώντας τις θερμοκρασίες σε χαμηλότερα επίπεδα.

Οι φυτικές διεργασίες, όπως η εξατμισοδιαπνοή, αξιοποιούν την απορροφώμενη ενέργεια, ενισχύοντας το δροσιστικό αποτέλεσμα. Παράλληλα, η ικανότητα συγκράτησης νερού από τα

φυτεμένα δώματα επιβραδύνει την απορροή, παρατείνοντας τη δροσιστική τους δράση και συμβάλλοντας στη μείωση της θερμοκρασίας για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα. Επιπροσθέτως, οι πράσινες στέγες βελτιώνουν την ενεργειακή ισορροπία των κτιρίων, μειώνοντας τις απαιτήσεις για ψύξη και ενισχύοντας τη συνολική ενεργειακή απόδοση. (Nuruzzaman, 2015).

Τα ολοκληρωμένα συστήματα αστικής αποστράγγισης αποτελούν βασικό μέσο βιώσιμης διαχείρισης των όμβριων υδάτων σε αδιαπέραστες επιφάνειες, ενσωματώνοντας πρακτικές που αξιοποιούν φυσικές διεργασίες. Μέσω της απομάκρυνσης θερμασμένου νερού και της ενίσχυσης της διήθησης και της εξατμισοδιαπνοής, συμβάλλουν στη μεταφορά και μείωση της θερμικής ενέργειας στο αστικό περιβάλλον. Η ενσωμάτωσή τους σε υφιστάμενα και νέα έργα υποδομής, ενισχύει τον δροσισμό. Τέλος, η επιλογή κατάλληλων φυτικών ειδών που παρουσιάζουν υψηλή ανθεκτικότητα σε μεταβαλλόμενες συνθήκες υγρασίας, είναι κρίσιμη για τη διατήρηση της αποτελεσματικότητας αυτών των συστημάτων (Ministry of Physical Planning, Construction and State Assets, n.d.).



Εικόνα 12 Η ζωντανή πράσινη στέγη της Ακαδημίας Επιστημών της Καλιφόρνιας

Επιφανειακά ύδατα

Τα υδατορεύματα, οι υδροβιότοποι, οι παρόχθιες περιοχές και γενικότερα τα επιφανειακά εσωτερικά ύδατα, φυσικά ή τεχνητά, αποτελούν βασικά στοιχεία των μπλε υποδομών με πολλαπλές λειτουργίες. Πέρα από τη συμβολή τους στη διαχείριση υδάτων και την

αντιπλημμυρική προστασία, διαδραματίζουν ουσιαστικό ρόλο στη μείωση της θερμικής επιβάρυνσης καθώς δρουν ως ρυθμιστές θερμοκρασίας, απορροφώντας θερμότητα κατά τη διάρκεια της ημέρας και αποδίδοντάς την σταδιακά, ενώ παράλληλα μέσω της εξάτμισης ενισχύουν περεταίρω τον δροσισμό και μειώνουν την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας.

Η αξιοποίησή τους για τον μετριασμό των ΑΘΝ προϋποθέτει ενέργειες αποκατάστασης και ανάδειξης των υδατικών σωμάτων, καθώς και διατήρηση ή ενίσχυση της παρακείμενης βλάστησης. Η επαναφορά καλυμμένων ρεμάτων, η ένταξή τους σε δίκτυα διαδρομών και η ενσωμάτωσή τους στον σχεδιασμό δημόσιων χώρων με κατάλληλη φυτική σύνθεση συμβάλλουν στη βελτίωση του μικροκλίματος. Επιπλέον, η δημιουργία νέων χώρων πρασίνου με υδάτινα στοιχεία ενισχύει τη λειτουργικότητα και την περιβαλλοντική ποιότητα του αστικού ιστού (Ministry of Physical Planning, Construction and State Assets, n.d.).

Πολλές μελέτες έως τώρα έχουν εξετάσει πώς το μέγεθος και το σχήμα των υδάτινων σωμάτων επηρεάζουν τη μείωση του φαινομένου της ΑΘΝ. Τα μεγαλύτερα υδάτινα σώματα έχουν ισχυρότερη και πιο εκτεταμένη συνολική επίδραση (ιδίως τη νύχτα βοηθούν στην απομάκρυνση θερμού αέρα και ρύπων), αλλά είναι λιγότερο αποδοτικά σε σχέση με τον χώρο που καταλαμβάνουν. Αντίθετα, τα μικρότερα μπορεί να είναι πιο αποδοτικά χωρικά και να προσφέρουν τοπική ψύξη (ιδίως την ημέρα), όμως σε ορισμένες συνθήκες όπως ζεστές καλοκαιρινές νύχτες, μπορούν ακόμη και να επιδεινώσουν τη θερμική άνεση αν δεν έχουν το κατάλληλο μέγεθος. Επιπλέον, το σχήμα και η αλληλεπίδραση με τον άνεμο παίζουν καθοριστικό ρόλο, ενώ ένα δίκτυο μικρότερων υδάτινων στοιχείων μπορεί να είναι ιδιαίτερα αποτελεσματικό σε πυκνοδομημένες περιοχές. Συνολικά, η αποτελεσματικότητα του μέτρου εξαρτάται από τον σωστό σχεδιασμό σε σχέση με τις επικρατούσες περιβαλλοντικές συνθήκες (Ampatzidis et al. ,2023).

4.2 Αστική γεωμετρία και στρατηγικές αστικού σχεδιασμού και βιοκλιματικής αρχιτεκτονικής

Ο σχεδιασμός του αστικού χώρου με στόχο τον περιορισμό των αστικών θερμικών νησίδων προϋποθέτει μια ολιστική στρατηγική, η οποία συνδυάζει χωρικές, μορφολογικές και υλικές παρεμβάσεις για τη βελτίωση των συνθηκών θερμικής άνεσης. Ο ορθός σχεδιασμός της γεωμετρίας των οδών και των αστικών φαραγγιών οδηγεί σε βελτίωση του μικροκλίματος. Η

διάταξη και ο προσανατολισμός των κτιριακών όγκων επηρεάζουν καθοριστικά τον αερισμό της πόλης, καθώς μπορούν να διαμορφώσουν διαδρομές ροής ψυχρότερων αερίων μαζών και να μειώσουν την εξάρτηση από μηχανικά συστήματα ψύξης. Ταυτόχρονα, οι χώροι πρασίνου, όπως πάρκα, αστικά δάση και φυτεμένες στέγες, ενισχύουν τον δροσισμό μέσω σκίασης και εξατμισοδιαπνοής. Επιπλέον, η επιλογή υλικών με υψηλή ανακλαστικότητα της ηλιακής ακτινοβολίας περιορίζει την αποθήκευση θερμότητας, ενισχύοντας περαιτέρω την αποτελεσματικότητα των παρεμβάσεων αυτών (Ministry of Physical Planning, Construction and State Assets, n.d.).

Προσανατολισμός και μορφολογία κτιρίων

Η χωρική διάρθρωση και ο προσανατολισμός των κτιριακών όγκων αποτελούν κρίσιμους παράγοντες για τον μετριασμό του φαινομένου των αστικών θερμικών νησίδων, καθώς επηρεάζουν άμεσα τη ροή του αέρα και τη θερμική συμπεριφορά του δομημένου περιβάλλοντος. Η κατάλληλη οργάνωση του αστικού ιστού, με πρόβλεψη για διαδρόμους αερισμού και πράσινες συνδέσεις, ενισχύει τη διάχυση της συσσωρευμένης θερμότητας και συμβάλλει στη βελτίωση των μικροκλιματικών συνθηκών.

Παράλληλα, η αστική μορφολογία, συμπεριλαμβανομένων της πυκνότητας δόμησης, του ύψους των κτιρίων και του δείκτη ορατότητας ουρανού, επηρεάζει σημαντικά τη θερμική ισορροπία, ιδιαίτερα όταν συνδυάζεται με την παρουσία δενδρώδους βλάστησης. Η αποτελεσματικότητα τεχνικών παρεμβάσεων, όπως οι φυτεμένες ή υψηλής ανακλαστικότητας επιφάνειες, εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του τοπικού μικροκλίματος και της γεωμετρίας της πόλης.

Σε επίπεδο σχεδιασμού, η προσαρμογή των κτιρίων στις επικρατούσες διευθύνσεις ανέμου, η διαμόρφωση διαμπερών ρευμάτων αέρα και η χρήση κατάλληλων υλικών για τη μείωση της απορρόφησης θερμότητας ενισχύουν τη θερμική άνεση (Ministry of Physical Planning, Construction and State Assets, n.d.).

Σύμφωνα με τον Yamamoto (2006), ιδιαίτερα σε περιοχές κοντά σε ποτάμια, η διάταξη των κτιρίων επηρεάζει σημαντικά τη ροή του αέρα. Η βασική ιδέα είναι να δημιουργούνται «διάδρομοι ανέμου», ώστε ο δροσερός αέρας από το ποτάμι να μπορεί να εισχωρεί στην πόλη. Όταν τα κτίρια είναι τοποθετημένα παράλληλα με το ποτάμι, η κυκλοφορία του αέρα προς το εσωτερικό της πόλης παρεμποδίζεται. Αν τοποθετηθούν υπό γωνία 45°, η ροή του αέρα

εξαρτάται από τη διεύθυνση του ανέμου και δεν είναι πάντα αποτελεσματική. Αντίθετα, όταν τα κτίρια είναι κάθετα προς το ποτάμι, διευκολύνεται η είσοδος του αέρα στην πόλη.

Ανοιχτοί χώροι

Οι ανοιχτοί αστικοί χώροι αποτελούν σημαντικό παράγοντα για τον περιορισμό της έντασης της ΑΘΝ, καθώς επηρεάζουν άμεσα τη θερμική ισορροπία των δημόσιων χώρων. Η κατάλληλη διαμόρφωση των οδών, των χώρων στάθμευσης και των λοιπών υπαίθριων επιφανειών μπορεί να μειώσει τη συσσώρευση θερμότητας και να βελτιώσει τις συνθήκες του μικροκλίματος, οδηγώντας σε χαμηλότερες θερμοκρασίες αέρα και επιφανειών.

Παράλληλα, η μετατροπή των συμβατικών χώρων στάθμευσης σε πιο φιλικές προς το περιβάλλον σημεία και η ενσωμάτωση στοιχείων σκίασης συμβάλλουν ουσιαστικά στη μείωση της θερμικής καταπόνησης και στη βελτίωση της θερμικής άνεσης στους δημόσιους (Ministry of Physical Planning, Construction and State Assets, n.d.)

Χρήση ψυχρών και υψηλής ανακλαστικότητας υλικών

Οι επιφάνειες υψηλού συντελεστή ανακλαστικότητας (albedo) αυξάνουν τη συνολική ανακλαστικότητα του αστικού περιβάλλοντος, αντανakλώντας μεγαλύτερο ποσοστό της ηλιακής ακτινοβολίας και συμβάλλοντας έτσι στη μείωση της θερμοκρασίας των επιφανειών, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε εξοικονόμηση ενέργειας. Επιπλέον, περιορίζουν τη θερμική αποθήκευση στα κτίρια, με αποτέλεσμα τη μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης και τη βελτίωση της θερμικής άνεσης σε μη κλιματιζόμενους χώρους (Chang & Su, n.d.). Ο αστικός εξοπλισμός, τα δομικά υλικά και οι χρωματικές επιλογές αποτελούν καθοριστικούς παράγοντες για τον έλεγχο της απορρόφησης και της συσσώρευσης θερμότητας στο περιβάλλον, συμβάλλοντας ουσιαστικά στον μετριασμό των αστικών θερμικών νησίδων. Οι παρεμβάσεις αυτές μπορούν να εφαρμοστούν και σε υφιστάμενους δημόσιους χώρους μέσω του κατάλληλου εξοπλισμού όπως επίσης και να ενσωματωθούν στον πολεοδομικό σχεδιασμό, διαμορφώνοντας τις επιλογές υλικών και τις προδιαγραφές των υποδομών. Η αποτελεσματικότητά τους ενισχύεται μέσω της χρήσης στοιχείων σκίασης που μειώνουν την άμεση ηλιακή έκθεση, της επιλογής ανακλαστικών και ανοιχτόχρωμων επιφανειών που περιορίζουν την αποθήκευση θερμότητας, όπως επίσης και μέσω της ενσωμάτωσης υδάτινων στοιχείων που βοηθούν τη θερμική εκτόνωση μέσω της εξάτμισης. Παράλληλα, η χρήση υλικών χαμηλής θερμικής αγωγιμότητας και η κατάλληλη σχεδίαση λοιπών στοιχείων αστικού

εξοπλισμού συμβάλλουν περεταίρω στη βελτίωση της θερμικής άνεσης και στη μείωση της θερμικής καταπόνησης στους δημόσιους χώρους (Ministry of Physical Planning, Construction and State Assets, n.d.).

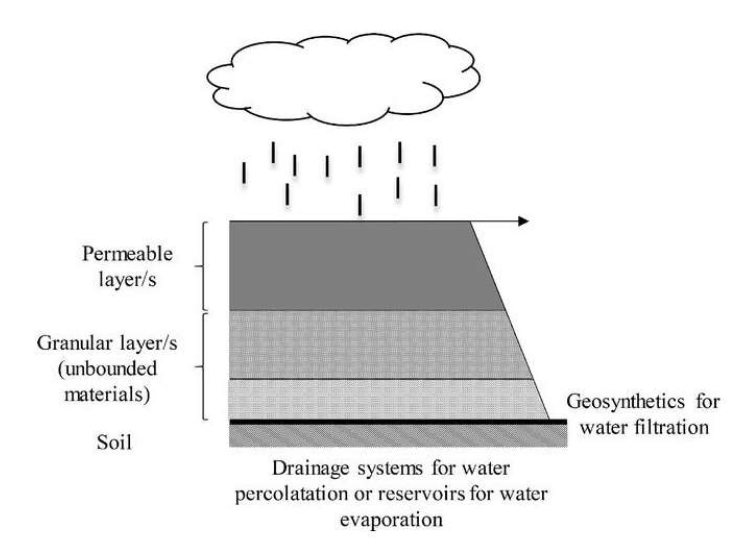
Οι επιφάνειες οδοστρώματος και πεζοδρομίων με υψηλή ανακλαστικότητα (high albedo) μπορούν να μειώσουν την απορρόφηση ηλιακής ακτινοβολίας, καθώς αντανακλούν μεγαλύτερο ποσοστό της προσπίπτουσας ηλιακής ενέργειας. Η επιλογή κατάλληλων υλικών επίστρωσης, όπως ειδικά σκυροδέματα με αυξημένη ανακλαστικότητα ή μίγματα λευκού τσιμέντου, έχει προταθεί ως δυνατότητα ενίσχυσης αυτής της ιδιότητας, με τιμές ανακλαστικότητας που μπορούν να διαφέρουν σημαντικά ανάλογα με τη σύσταση του (Nuruzzaman, 2015).

Τα ανακλαστικά οδοστρώματα χαρακτηρίζονται από υψηλότερο συντελεστή ανακλαστικότητας (albedo) σε σύγκριση με τα συμβατικά, τα οποία εμφανίζουν σχετικά χαμηλές τιμές. Οι κυρίαρχοι μηχανισμοί μεταφοράς θερμότητας στην εξωτερική επιφάνεια είναι η ακτινοβολία και η συναγωγή, ενώ στο εσωτερικό των επιμέρους στρώσεων του οδοστρώματος η θερμότητα μεταδίδεται κυρίως μέσω αγωγής. Η ένταση της θερμικής ροής εξαρτάται τόσο από ενδογενείς παράγοντες, όπως οι θερμοφυσικές ιδιότητες των υλικών, όσο και από εξωγενείς, όπως οι μετεωρολογικές συνθήκες. Ειδικότερα, η θερμική ροή λόγω εξάτμισης καθορίζεται από την περιεκτικότητα υγρασίας στην επιφάνεια και από τη διαφορά πυκνότητας υδρατμών μεταξύ του οδοστρώματος και του αέρα (Vizzari et al., 2025).

Τα διαπερατά οδοστρώματα αποτελούν σύνθετα, πολυστρωματικά συστήματα που έχουν σχεδιαστεί για να περιορίζουν την επιφανειακή απορροή και να συμβάλλουν στη διαχείριση των όμβριων, επιτρέποντας τη διείσδυση του νερού στο έδαφος. Η κατασκευή τους βασίζεται κυρίως σε υλικά υψηλού πορώδους, όπως πορώδεις σκυρόδεμα και άσφαλτος, ενώ τα τελευταία χρόνια δίνεται έμφαση και στην αξιοποίηση ανακυκλωμένων υλικών, στο πλαίσιο πιο βιώσιμων σχεδιαστικών προσεγγίσεων.

Η τυπική δομή τους περιλαμβάνει μια διαπερατή επιφανειακή στρώση, μέσω της οποίας το νερό της βροχής εισέρχεται στο σύστημα, ακολουθούμενη από υποκείμενες στρώσεις με αυξημένο πορώδες. Οι στρώσεις αυτές λειτουργούν ως προσωρινός χώρος αποθήκευσης και ταυτόχρονα ως φίλτρο για το διηθούμενο νερό. Σε μεγαλύτερο βάθος, η συμπεριφορά του συστήματος εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του υπεδάφους: όταν αυτό είναι επαρκώς διαπερατό, το νερό απορροφάται πλήρως, ενώ σε διαφορετική περίπτωση οδηγείται, εν μέρει ή

εξ ολοκλήρου, σε κατάλληλα συστήματα αποστράγγισης ή κατεισδύει προς τους υπόγειους υδροφορείς. Η μετακίνηση του νερού μέσα σε τέτοιου είδους πορώδη μέσα δεν είναι απλή διαδικασία, καθώς επηρεάζεται από την ταυτόχρονη παρουσία και αλληλεπίδραση υγρής, αέριας και στερεής φάσης (Vizzari et al., 2025). Επιπλέον, υλικά που χαρακτηρίζονται από αυξημένη διαπερατότητα και χαμηλή θερμική αγωγιμότητα, τα οποία διευκολύνουν τη διήθηση του νερού και περιορίζουν τη μεταφορά θερμότητας, μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά τη ψυκτική απόδοση των διαπερατών οδοστρωμάτων όπως και τις περιβαλλοντικές συνθήκες, όπως η θερμοκρασία του αέρα, η ταχύτητα του ανέμου, η σχετική υγρασία, καθώς και η συνολική παρουσία νερού (Vizzari et al., 2025).



Εικόνα 13 Δομή διαπερατού οδοστρώματος

Τα υλικά στέγασης με υψηλή ανακλαστικότητα αποτελούν σημαντική παράμετρο στη θερμική συμπεριφορά των κτιρίων, καθώς οι σκούρες επιφάνειες απορροφούν μεγαλύτερα ποσά ηλιακής ακτινοβολίας, οδηγώντας σε αύξηση της εσωτερικής θερμοκρασίας και συνεπώς σε υψηλότερες ενεργειακές απαιτήσεις για ψύξη. Αντίθετα, οι ανοιχτόχρωμες επιστρώσεις, με παρόμοιες μονωτικές ιδιότητες, αντανακλούν μεγαλύτερο μέρος της ακτινοβολίας, περιορίζοντας τη θέρμανση των δομικών στοιχείων και συμβάλλοντας στη μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης. Πειραματικά δεδομένα έχουν δείξει ότι η διαφορά στην ανακλαστικότητα μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική μείωση της θερμοκρασίας της επιφάνειας της στέγης. (Nuruzzaman, 2015)

Έχει αποδειχθεί ότι η αύξηση του συντελεστή ανακλαστικότητας (albedo) των στεγών σε τιμές 0,5 και 0,7 επιτυγχάνει παρόμοια αποτελέσματα με την κάλυψη πράσινων στεγών κατά

25% και 50% αντίστοιχα. Σε ορισμένες συνθήκες και για συγκεκριμένους τύπους πόλεων, η μέγιστη ψυκτική επίδραση επιτυγχάνεται μέσω του συνδυασμού διαφορετικών στρατηγικών μετριασμού, οι οποίες δρουν τόσο στο μακροκλίμα όσο και στο μικροκλίμα της πόλης. Σε μελέτη που πραγματοποιήθηκε στην πανεπιστημιούπολη του Sapienza University της Ρώμης, διαπιστώθηκε ότι η ταυτόχρονη εφαρμογή ψυχρών στεγών, ψυχρών επιστρώσεων δαπέδων και η αύξηση της αστικής βλάστησης οδήγησε σε μέση μείωση της θερμοκρασίας του αέρα κατά περίπου 1,49 °C και σε μείωση του δείκτη MOCI (Μεσογειακός δείκτης θερμικής άνεσης) κατά περίπου 0,24 μονάδες. Επιπλέον, κατά τη διάρκεια μιας θερμής καλοκαιρινής ημέρας, η χρήση υλικών υψηλού albedo αντί κυβόλιθων στην επιφάνεια ενός προαύλιου χώρου προκάλεσε αύξηση του δείκτη θερμικής άνεσης Predicted Mean Vote (PMV) κατά περίπου 1 μονάδα, ενώ η εφαρμογή των ίδιων υλικών και στους τοίχους οδήγησε σε αύξηση του PMV κατά περίπου 2 μονάδες (Falasca et al., 2019)

Σύμφωνα με τους Giouli Mihalakakou et al (2023), τα οφέλη των πράσινων στεγών μπορούν να ταξινομηθούν στις ακόλουθες κατηγορίες:

- **Ενεργειακά οφέλη:** Έρευνες, τόσο θεωρητικές όσο και πειραματικές, έχουν καταδείξει τη συμβολή των πράσινων στεγών στη μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης. Η εξοικονόμηση ενέργειας προκύπτει κυρίως μέσω της ελάττωσης των αναγκών ψύξης και θέρμανσης και επηρεάζεται από παράγοντες όπως τα δομικά χαρακτηριστικά του κτιρίου, οι μηχανισμοί μεταφοράς θερμότητας και οι θερμοφυσικές ιδιότητες των στοιχείων της στέγης (π.χ. συντελεστές θερμοπερατότητας). Παράλληλα, το κλίμα, η διαμόρφωση του συστήματος και τα χαρακτηριστικά της βλάστησης —ιδίως ο Δείκτης Φυλλικής Επιφάνειας (LAI)— διαδραματίζουν καθοριστικό ρόλο, καθώς επηρεάζουν φαινόμενα όπως η σκίαση και η εξατμισοδιαπνοή.
- **Περιβαλλοντικά οφέλη και ποιότητα αέρα:** Οι πράσινες στέγες συμβάλλουν στη βελτίωση της ποιότητας της ατμόσφαιρας, ενισχύοντας την κατακράτηση και απομάκρυνση ατμοσφαιρικών ρύπων μέσω της βλάστησης. Επιπλέον, συμβάλλουν στη μείωση των επιπέδων διοξειδίου του άνθρακα, τόσο έμμεσα μέσω της εξοικονόμησης ενέργειας όσο και άμεσα μέσω της φωτοσυνθετικής δράσης των φυτών.
- **Περιβαλλοντικά οφέλη και ποιότητα υδάτων:** Η παρουσία φυτεμένων στεγών επιδρά καθοριστικά στον έλεγχο της απορροής των όμβριων υδάτων, μειώνοντας τον όγκο και την έντασή τους και συμβάλλοντας στον περιορισμό πλημμυρικών φαινομένων. Παράλληλα, βελτιώνεται η ποιότητα των απορροών, καθώς το υπόστρωμα και η

βλάστηση λειτουργούν ως φυσικά φίλτρα συγκρατώντας ρύπους και θρεπτικά στοιχεία όπως τα νιτρικά και αμμωνιακή μορφή του αζώτου.

- **Οικοσυστημικά οφέλη:** Οι πράσινες στέγες παρέχουν σημαντικά οφέλη στο οικοσύστημα τα οποία σχετίζονται κυρίως με την αύξηση της βιοποικιλότητας και την επαναφορά φυσικών στοιχείων στο αστικό περιβάλλον.
- **Κοινωνικά, αισθητικά και ψυχολογικά οφέλη:** Οι πράσινες στέγες μπορούν να λειτουργήσουν και ως χώροι ηρεμίας μέσα στην πόλη, με μειωμένα επίπεδα θορύβου και ρύπανσης, βοηθώντας στη βελτίωση της ψυχικής και σωματικής υγείας, καθώς και της συνολικής ευημερίας των κατοίκων (Mihalakakou et al., 2023)



Εικόνα 14 Πράσινη στέγη (Mihalakakou et al., 2023)

4.3 Σύγχρονες και φιλικές προς το περιβάλλον τεχνολογίες

Φωτοβολταϊκά συστήματα

Τα φωτοβολταϊκά συστήματα στον αστικό χώρο αποτελούν τεχνολογική παρέμβαση με διπλό όφελος για τον μετριασμό των αστικών θερμικών νησίδων, καθώς λειτουργούν τόσο ως μέσο πρόληψης όσο και ως εργαλείο περιορισμού των ήδη υφιστάμενων επιπτώσεων. Η αξιοποίησή τους συμβάλλει στην παραγωγή ανανεώσιμης ενέργειας και στη μείωση της εξάρτησης από συμβατικές ενεργειακές πηγές, περιορίζοντας έμμεσα τη θερμική επιβάρυνση του περιβάλλοντος. Παράλληλα, η ενσωμάτωσή τους στον αρχιτεκτονικό σχεδιασμό μπορεί να προσφέρει σκίαση και να μειώσει τα θερμικά φορτία των κτιρίων, ενισχύοντας τη θερμική άνεση στους εσωτερικούς χώρους. Επιπλέον, η εφαρμογή τους σε δημόσιους χώρους συνδυάζει την παραγωγή ενέργειας με την παροχή προστασίας από την ηλιακή ακτινοβολία,

συμβάλλοντας συνολικά στη βελτίωση του μικροκλίματος και της λειτουργικότητας του αστικού περιβάλλοντος (Ministry of Physical Planning, Construction and State Assets, n.d.).

Τεχνολογίες ψύξης και θερμικής μόνωσης

Οι τεχνολογίες θερμομόνωσης και ψύξης αποτελούν κρίσιμες παρεμβάσεις για τον περιορισμό της θερμικής επιβάρυνσης στο αστικό περιβάλλον και τον μετριασμό των αστικών θερμικών νησίδων. Η θερμομόνωση μειώνει τη θερμική ανταλλαγή μεταξύ εσωτερικού και εξωτερικού χώρου, περιορίζοντας τις ενεργειακές ανάγκες για θέρμανση και ψύξη, ιδιαίτερα σε πυκνοδομημένες περιοχές. Αντίστοιχα, οι τεχνολογίες ψύξης συμβάλλουν στη μείωση της θερμοκρασίας του δομημένου περιβάλλοντος, ενισχύοντας τη θερμική άνεση και περιορίζοντας τις επιπτώσεις της αστικοποίησης. Η αποτελεσματικότητά τους ενισχύεται μέσω ενεργειακής αναβάθμισης του κτιριακού κελύφους, καθώς και με την αξιοποίηση προηγμένων μονωτικών υλικών υψηλής απόδοσης και μικρού πάχους. Παράλληλα, ο σχεδιασμός κτιρίων χαμηλής ενεργειακής κατανάλωσης, με κατάλληλη γεωμετρία και προσανατολισμό, συμβάλλει στη βελτιστοποίηση της ενεργειακής συμπεριφοράς τους. Επιπλέον, ο συνδυασμός παθητικών και ενεργητικών συστημάτων ψύξης αποτελεί μια ολοκληρωμένη προσέγγιση στη διαχείριση της θερμότητας, αξιοποιώντας τόσο φυσικές διεργασίες όσο και τεχνολογικά μέσα (Ministry of Physical Planning, Construction and State Assets, n.d.).

Οι (Talaei, M & Azari, R 2024) εξετάζοντας τον ρόλο των έξυπνων κελυφών που ενσωματώνουν έξυπνα υλικά και συστήματα και έχουν τη δυνατότητα να προσαρμόζονται στις περιβαλλοντικές συνθήκες κτιρίων και τη συμβολή τους στην αντιμετώπιση του φαινομένου της ΑΘΝ, καταλήγουν στο συμπέρασμα ότι τα οφέλη τους είναι σημαντικά, καθώς συμβάλλουν στη μείωση της θερμοκρασίας στις πόλεις, στη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας για ψύξη και θέρμανση, στη βελτίωση της ενεργειακής αποδοτικότητας των κτιρίων και στην ενίσχυση της θερμικής άνεσης των χρηστών. Η λειτουργία τους βασίζεται στη χρήση αισθητήρων και υλικών που αντιδρούν σε παράγοντες όπως η θερμοκρασία, το ηλιακό φως, η υγρασία και ο αέρας, επιτρέποντας στο κτίριο να αλλάζει συμπεριφορά, για παράδειγμα σκουραίνοντας ή κάνοντας τα τζάμια διάφανα, ρυθμίζοντας τη σκίαση, βελτιώνοντας τον αερισμό ή μειώνοντας την απορρόφηση θερμότητας. Τα συστήματα αυτά μπορούν να χειρίζονται λειτουργίες όπως ο έλεγχος θερμότητας, ο έλεγχος φυσικού φωτισμού, ο αερισμός, η διαχείριση υγρασίας και ρύπανσης, αλλά και η παραγωγή ενέργειας.

5. Μελέτη της Αστικής Θερμικής Νησίδας στην πόλη της Πάτρας

5.1 Περιβαλλοντικά και οικιστικά χαρακτηριστικά της πόλης και πολεοδομική εξέλιξη

Η Πάτρα αποτελεί το τρίτο μεγαλύτερο αστικό κέντρο της Ελλάδας ως προς τον πληθυσμό και λειτουργεί ως διοικητική πρωτεύουσα του νομού Αχαΐας και της Περιφέρειας Δυτικής Ελλάδας. Παράλληλα, συνιστά το σημαντικότερο αστικό και λιμενικό κέντρο της Πελοποννήσου. Ο ρόλος της ως μέσο επικοινωνίας της χώρας με τη Δύση είναι καθοριστικός, καθώς το λιμάνι της συγκαταλέγεται στα μεγαλύτερα της Ελλάδας και αποτελεί κομβικό σημείο διασύνδεσης με την Ιταλία και τη Δυτική Ευρώπη. Η γεωγραφική θέση της σε απόσταση περίπου 216 χιλιομέτρων δυτικά της Αθήνας, στα βορειοδυτικά παράλια της Πελοποννήσου, στους πρόποδες του Παναχαϊκού όρους και σε άμεση επαφή με τον Πατραϊκό Κόλπο, καθορίζει σε μεγάλο βαθμό τη λειτουργική και χωρική της ανάπτυξη. Οι σύγχρονες υποδομές μεταφορών, όπως η Γέφυρα Ρίου – Αντιρρίου εξασφαλίζουν τη σύνδεση της Πελοποννήσου με τη Δυτική Στερεά Ελλάδα και την Ήπειρο ενώ η ακτοπλοϊκή σύνδεση με τα Ιόνια νησιά και την Ιταλία καθιστά την πόλη σημαντικό συγκοινωνιακό κόμβο (Κατσάμπουλας, 2011).

Κλίμα και βιοποικιλότητα

Το φυσικό περιβάλλον της περιοχής χαρακτηρίζεται από τυπικό μεσογειακό κλίμα, με σχετικά ήπιο χειμώνα και δροσερά αλλά υγρά καλοκαίρια. Το βιοκλιματικό καθεστώς κατατάσσεται στον μεσογειακό τύπο, με μικρό αριθμό ξηρών ημερών κατά τη θερινή περίοδο, ενώ στις υψηλότερες περιοχές παρατηρούνται πιο ψυχρές συνθήκες. Το Παναχαϊκό όρος, με μέγιστο υψόμετρο που φτάνει τα 2.000 μέτρα, συμβάλλει στη διαμόρφωση ενός σύνθετου οικοσυστήματος με έντονη βιοποικιλότητα, παρά τις παρεμβάσεις που έχει υποστεί φυσικό περιβάλλον, όπως η αποδάσωση και η διάβρωση των εδαφών (Κατσάμπουλας, 2011). Στα βόρεια της πόλης βρίσκεται επίσης το έλος της Αγυιάς, ένα μικρό παράκτιο υγροτοπικό οικοσύστημα με έκταση περίπου 30 εκταρίων. Βασικά χαρακτηριστικά του υγροτόπου είναι το σχετικά ξηρό κλίμα, καθώς και το υψηλό επίπεδο βιοποικιλότητας που παρουσιάζει, οπότε σύμφωνα με μελέτη του γραφείου Πάτρας της Ελληνικής Ορνιθολογικής Εταιρείας, μέχρι τις αρχές της δεκαετίας του 1990 είχαν καταγραφεί στην περιοχή περισσότερα από 90 είδη πουλιών (Δήμος Πατρέων, n.d.).

Οικιστικά χαρακτηριστικά και πολεοδομική οργάνωση

Η αστική γεωγραφία της Πάτρας παρουσιάζει μια χαρακτηριστική διχοτόμηση στην Άνω και Κάτω Πόλη, η οποία προκύπτει από την δράση φυσικών και ανθρωπογενών παραγόντων. Η Κάτω Πόλη, εκτείνεται στην παράκτια ζώνη μεταξύ των εκβολών των χειμάρρων Γλαύκου και Χάραδρου, συγκεντρώνει τις κύριες δραστηριότητες, όπως το εμπόριο και η διακίνηση αγαθών στο λιμάνι και αποτελεί τον σύγχρονο και νεότερο πυρήνα της πόλης. Αντίθετα, η Άνω Πόλη που βρίσκεται σε υψηλότερο υψόμετρο, γύρω από το φρούριο αποτελεί τον παλαιότερο οικιστικό πυρήνα. Η σύνδεση των δύο αυτών τμημάτων πραγματοποιείται μέσω κλιμακωτών διόδων, γεγονός που αναδεικνύει τις έντονες μορφολογικές κλίσεις του εδάφους.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η πολεοδομική οργάνωση της πόλης, η οποία θεμελιώθηκε κατά την περίοδο μετά την ίδρυση του ελληνικού κράτους στις αρχές του 19ου αιώνα. Με πρωτοβουλία του Ιωάννη Καποδίστρια, ανατέθηκε στον Σταμάτη Βούλγαρη η εκπόνηση πολεοδομικού σχεδίου για την αναμόρφωση της πόλης. Το σχέδιο αυτό αποτέλεσε ένα από τα πρώτα οργανωμένα εγχειρήματα πολεοδομικού σχεδιασμού στη νεότερη Ελλάδα και εισήγαγε μια σαφή γεωμετρική διάταξη με ορθογωνικό κάναβο δρόμων και συμμετρικά τοποθετημένες πλατείες. Ιδιαίτερο στοιχείο του σχεδίου ήταν η ανάπτυξη ενός νέου αστικού τμήματος στην παραλιακή ζώνη, καθώς και η πρόβλεψη ζωνών πρασίνου και περιπάτου.

Παρά τον αρχικό σχεδιασμό, η μεταγενέστερη εξέλιξη της πόλης οδήγησε σε σημαντικές αποκλίσεις από την αρχική ιδέα. Η σταδιακή μείωση των ελεύθερων χώρων και των ζωνών πρασίνου, καθώς και η εντατική εκμετάλλευση της γης, επέφεραν τη διάσπαση των αρχικών οικοδομικών τετραγώνων και την κάλυψη μεγάλου μέρους των ακάλυπτων επιφανειών ιδίως κατά τη μεταπολεμική περίοδο με τη ραγδαία πληθυσμιακή αύξηση και τις εκτεταμένες επεκτάσεις του σχεδίου πόλης.

Το αρχικό πολεοδομικό σχέδιο, το οποίο διαμορφώθηκε σταδιακά έως το 1929 και κάλυπτε περίπου 4.000 στρέμματα, διατηρήθηκε σε μεγάλο βαθμό μέχρι τη δεκαετία του 1970. Στη συνέχεια, μια σειρά επεκτάσεων, ιδιαίτερα κατά τις δεκαετίες του 1970 και του 1980, οδήγησαν σε υπερδιπλασιασμό και τελικά σε υπερτριπλασιασμό της αστικής έκτασης, χωρίς αντίστοιχη αύξηση του πληθυσμού. Οι επεκτάσεις συνεχίστηκαν και τις επόμενες δεκαετίες, ενισχύοντας την οριζόντια ανάπτυξη της πόλης (Κατσάμπουλας, 2011).

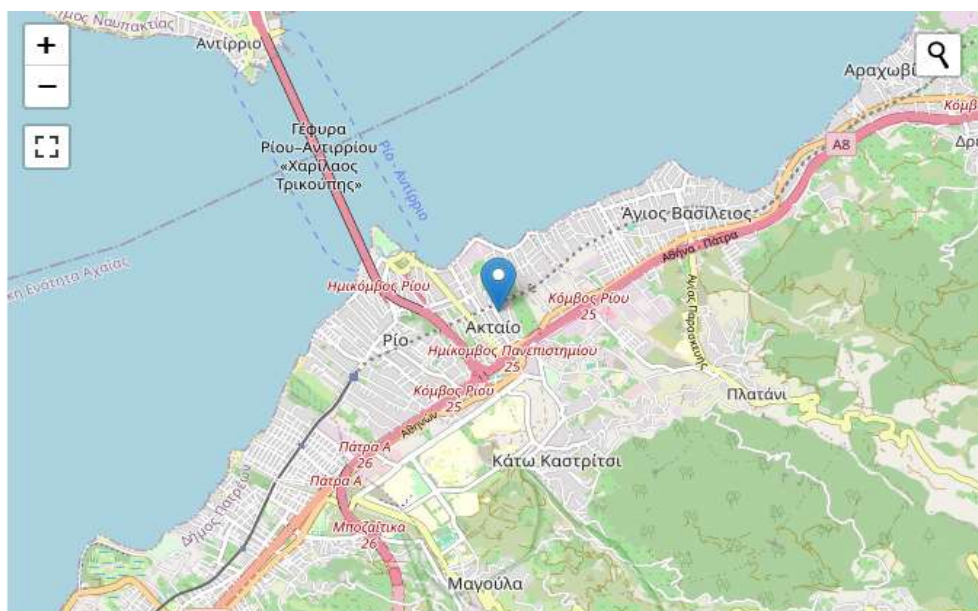
Υδρολογικά χαρακτηριστικά

Συμπληρωματικά, το υδρολογικό δίκτυο της περιοχής, το οποίο περιλαμβάνει τους χείμαρρους Γλαύκο, Χάραδρο, Διακονιάρη και Βουτενίτη, επηρεάζει τη χωρική οργάνωση και τις περιβαλλοντικές συνθήκες. Άλλα ποτάμια και χείμαρροι είναι ο Μείλιχος, ο Σέλεμνος και η Παναγίτσα (Δήμος Πατρέων, n.d.). Ιδιαίτερα ο Γλαύκος, με εκτεταμένη λεκάνη απορροής, διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στη διαμόρφωση του τοπίου, ενώ ταυτόχρονα έχουν απαιτηθεί παρεμβάσεις για την αντιμετώπιση πλημμυρικών φαινομένων. Η ευνοϊκή υδρογεωλογική κατάσταση της περιοχής συνοδεύεται από την παρουσία υδροφόρων σχηματισμών με αξιόλογη δυναμικότητα, ιδίως σε πεδινές και ημιορεινές ζώνες (Κατσάμπουλας, Α. 2011).

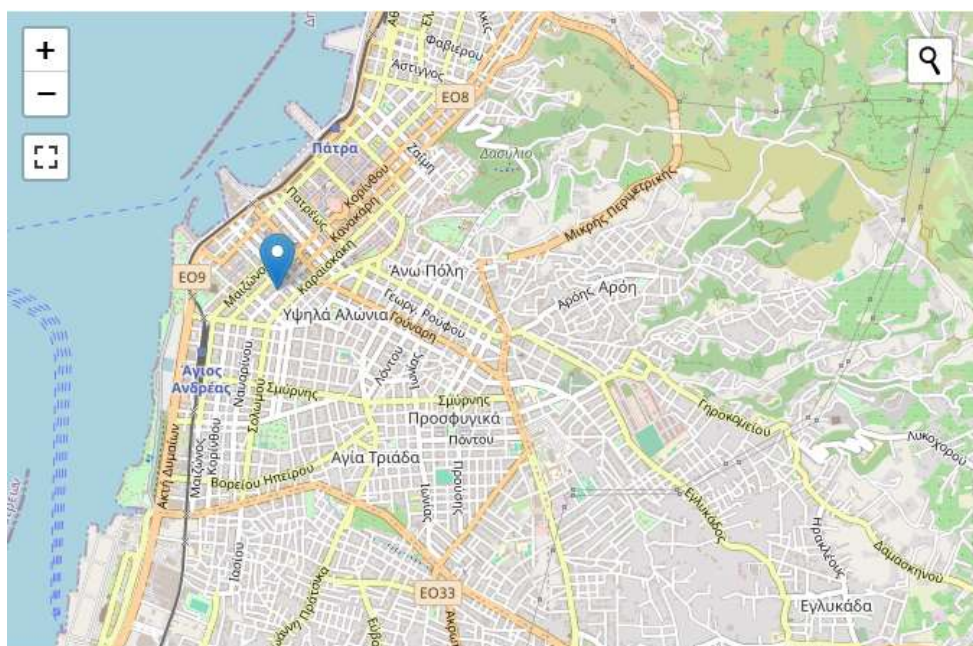
5.2 Σταθμοί λήψης και δεδομένα

Για την αποτίμηση του φαινομένου της ΑΘΝ ελήφθησαν δεδομένα από 4 σταθμούς που βρίσκονται εγκατεστημένοι σε διάφορα σημεία στην πόλη της Πάτρας. Από αυτούς, οι δύο βρίσκονται στο κέντρο της πόλης (σταθμός Γερμανού και σταθμός Τριών Ναυάρχων) σε σημεία που παρουσιάζουν πυκνή δόμηση ενώ οι άλλοι δύο που εντοπίζονται σε λιγότερο αστικά σημεία της πόλης και κοντά στη θάλασσα (σταθμός Ρίο και σταθμός Παραλία). Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν αφορούν τη χρονική περίοδο 2025 και περιλαμβάνουν τις ωριαίες τιμές θερμοκρασίας όλου του έτους.

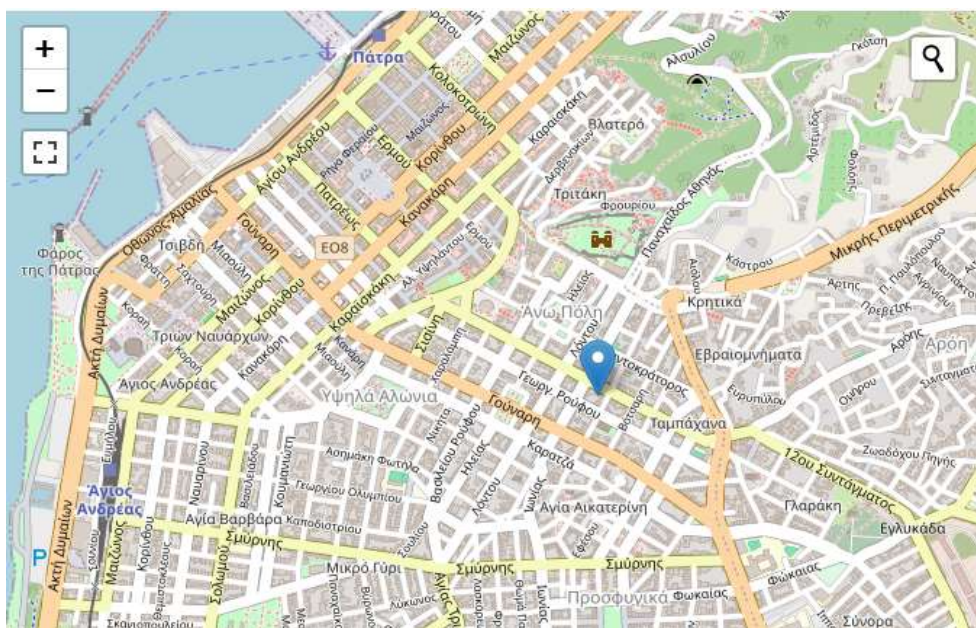
Παρακάτω παρατίθενται οι σταθμοί αποτυπωμένοι σε χάρτη.



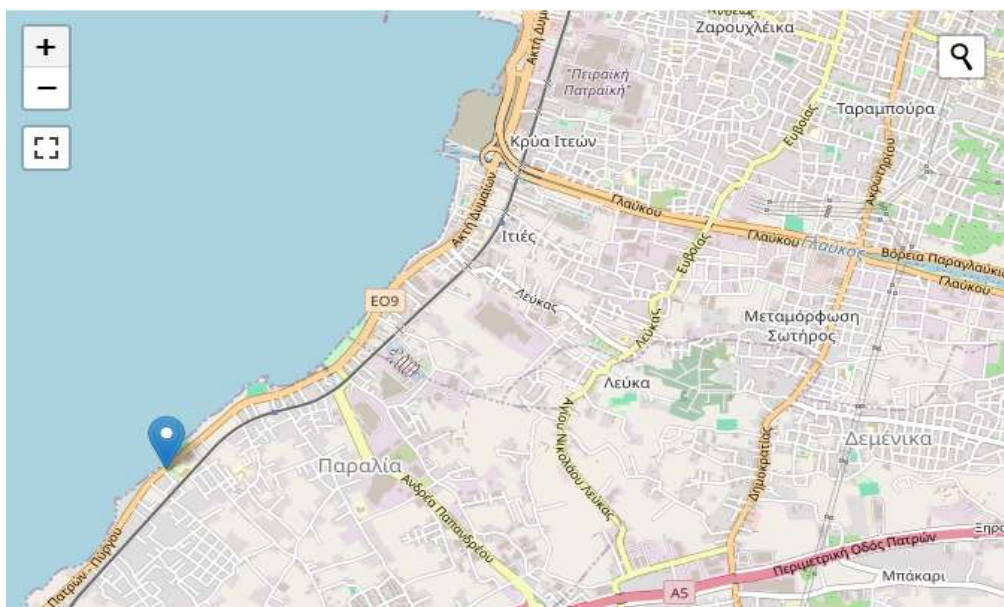
Εικόνα 15 Σταθμός Ρίο



Εικόνα 16 Σταθμός Τριών Ναυάρχων



Εικόνα 17 Σταθμός Γερμανού



Εικόνα 18 Σταθμός Παραλία

Από τα δεδομένα των σταθμών καταγράφηκαν τα ακόλουθα αποτελέσματα:

	ΣΤΑΘΜΟΣ ΓΕΡΜΑΝΟΥ	ΣΤΑΘΜΟΣ ΡΙΟ	ΣΤΑΘΜΟΣ ΠΑΡΑΛΙΑ	ΣΤΑΘΜΟΣ ΤΡΙΩΝ ΝΑΥΑΡΧΩΝ
ΜΕΓΙΣΤΗ ΕΤΗΣΙΑ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ(°C)	40,4	38,7	35,2	33,6
ΕΛΑΧΙΣΤΗ ΕΤΗΣΙΑ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ(°C)	0,7	0,5	-1,9	0,4

Πίνακας 3 Μέγιστη και ελάχιστη θερμοκρασία για κάθε σταθμό για το έτος 2025

	ΣΤΑΘΜΟΣ ΓΕΡΜΑΝΟΥ		ΣΤΑΘΜΟΣ ΠΑΡΑΛΙΑ		ΣΤΑΘΜΟΣ ΡΙΟ		ΣΤΑΘΜΟΣ ΤΡΙΩΝ ΝΑΥΑΡΧΩΝ	
	ΜΕΣΗ ΘΕΡΜΟΚΡ ΑΣΙΑ ΗΜΕΡΑΣ	ΜΕΣΗ ΘΕΡΜΟΚΡ ΑΣΙΑ ΝΥΧΤΑΣ	ΜΕΣΗ ΘΕΡΜΟΚΡ ΑΣΙΑ ΗΜΕΡΑΣ	ΜΕΣΗ ΘΕΡΜΟ ΚΡΑΣΙΑ ΝΥΧΤΑ Σ	ΜΕΣΗ ΘΕΡΜΟ ΚΡΑΣΙΑ ΗΜΕΡΑ Σ	ΜΕΣΗ ΘΕΡΜΟ ΚΡΑΣΙΑ ΝΥΧΤΑ Σ	ΜΕΣΗ ΘΕΡΜΟ ΚΡΑΣΙΑ ΗΜΕΡΑ Σ	ΜΕΣΗ ΘΕΡΜΟ ΚΡΑΣΙΑ ΝΥΧΤΑ Σ
ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΣ	12,6	7,9	7,5	6,1	8,6	7,0	8,7	7,2
ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ	13,1	6,3	5,8	3,9	7,0	4,9	6,1	5,0
ΜΑΡΤΙΟΣ	15,6	9,8	9,7	7,3	11,7	8,7	10,4	8,6
ΑΠΡΙΛΙΟΣ	17,5	12,3	12,0	10,1	13,7	10,7	12,6	10,7
ΜΑΙΟΣ	20,4	15,6	16,2	14,2	17,9	14,8	16,7	14,7
ΙΟΥΝΙΟΣ	27,8	22,4	22,0	20,6	25,3	21,4	23,1	20,6
ΙΟΥΛΙΟΣ	28,8	24,4	23,4	22,7	26,4	23,1	24,5	22,7
ΑΥΓΟΥΣΤΟΣ	28,8	24,2	23,6	22,2	26,4	23,1	24,8	23,1
ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ	25,9	21,7	22,7	21,4	23,6	20,6	20,7	19,6
ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ	19,0	14,8	17,7	16,1	15,5	13,3	14,2	13,0
ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ	17,8	12,9	16,7	14,9	13,1	11,1	12,9	11,4
ΔΕΚΕΜΒΡΙΟΣ	14,5	9,1	13,1	11,2	9,6	7,4	9,2	7,6
ΕΤΗΣΙΑ ΜΕΣΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ	20,2	15,1	15,9	14,2	16,6	13,8	15,3	13,7

Πίνακας 4 Μέση θερμοκρασία ημέρας και νύχτας για κάθε μήνα

	ΣΤΑΘΜΟΣ ΓΕΡΜΑΝΟΥ	ΣΤΑΘΜΟΣ ΡΙΟ	ΣΤΑΘΜΟΣ ΠΑΡΑΛΙΑ	ΣΤΑΘΜΟΣ ΤΡΙΩΝ ΝΑΥΑΡΧΩΝ
ΜΕΓΙΣΤΗ ΕΤΗΣΙΑ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ (°C)	40,4	38,7	35,2	33,6
ΕΛΑΧΙΣΤΗ ΕΤΗΣΙΑ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ (°C)	0,7	0,5	-1,9	0,4

ΜΕΣΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΗΜΕΡΑΣ (°C)	21,8	16,8	15,6	15,5
ΜΕΣΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΝΥΧΤΑΣ (°C)	16,8	14,0	13,9	13,8
ΜΕΓΙΣΤΗ ΜΕΣΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΗΜΕΡΑΣ (°C)	34,8	32,8	30,1	30,7
ΕΛΑΧΙΣΤΗ ΜΕΣΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΗΜΕΡΑΣ (°C)	6,5	1,4	3,2	3,0
ΜΕΓΙΣΤΗ ΜΕΣΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΝΥΧΤΑΣ (°C)	29,9	28,7	26,4	28,0
ΕΛΑΧΙΣΤΗ ΜΕΣΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΝΥΧΤΑΣ (°C)	3,0	1,8	0,7	1,8

Πίνακας 5 Μέσες θερμοκρασίες ανά σταθμό

5.3 Πειραματικές υποθέσεις

Στο πλαίσιο της παρούσας μελέτης, διερευνάται αν τα πρότυπα θερμοκρασίας στην περιοχή μελέτης συνάδουν με τη θεωρία της ΑΘΝ, σύμφωνα με την οποία οι αστικές περιοχές εμφανίζουν υψηλότερες θερμοκρασίες σε σχέση με τις περιφερειακές/παράκτιες περιοχές και αντίθετα μικρότερο εύρος στη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ ημέρας και νύχτας. Με βάση τη διεθνή βιβλιογραφία και τα χαρακτηριστικά των τεσσάρων σταθμών, διατυπώνονται οι ακόλουθες υποθέσεις:

H1. Ημερήσιες θερμοκρασίες

Οι μέσες ημερήσιες θερμοκρασίες θα είναι σημαντικά υψηλότερες στους αστικούς σταθμούς (Γερμανού, Τριών Ναυάρχων), σε σύγκριση με τους περιφερειακούς/παράκτιους σταθμούς (Ρίο, Παραλία). Ειδικότερα, αναμένεται ο σταθμός Γερμανού να παρουσιάζει τις υψηλότερες μέσες ημερήσιες θερμοκρασίες και ο σταθμός Παραλία τις χαμηλότερες.

H2. Νυχτερινές θερμοκρασίες

Οι μέσες νυχτερινές θερμοκρασίες θα είναι σημαντικά υψηλότερες στους αστικούς σταθμούς (Γερμανού, Τριών Ναυάρχων), σε σύγκριση με τους περιφερειακούς/παράκτιους σταθμούς (Ρίο, Παραλία). Ειδικότερα, αναμένεται ο σταθμός Γερμανού να εμφανίζει τις υψηλότερες

μέσες νυχτερινές θερμοκρασίες και ο σταθμός Παραλία τις χαμηλότερες, αντανakλώντας την εντονότερη διατήρηση θερμότητας στον αστικό ιστό κατά τη διάρκεια της νύχτας.

H3. Διαφορά θερμοκρασίας ημέρας - νύχτας

Το μέσο ημερήσιο θερμοκρασιακό εύρος (δηλαδή η διαφορά θερμοκρασίας ημέρας – νύχτας) θα είναι μικρότερο στους αστικούς σταθμούς σε σύγκριση με τους περιφερειακούς/παράκτιους σταθμούς. Αναμένεται ο σταθμός Γερμανού να παρουσιάζει το μικρότερο ημερήσιο εύρος θερμοκρασίας, υποδηλώνοντας μικρότερες διακυμάνσεις που συνδέονται με τα αστικά χαρακτηριστικά της περιοχής.

H4. Εποχική ενίσχυση του φαινομένου

Η ένταση των διαφορών θερμοκρασίας μεταξύ αστικών και περιφερειακών/παράκτιων σταθμών θα διαφοροποιείται ανά εποχή, με τις διαφορές να είναι εντονότερες κατά την θερμή περίοδο του έτους (π.χ. καλοκαίρι), σε σύγκριση με τις ψυχρότερες εποχές.

5.4 Μεθοδολογία

Η παρούσα μελέτη υιοθέτησε παρατηρησιακό πειραματικό σχεδιασμό τύπου 4 × 4 between - subjects, με σκοπό τη διερεύνηση του φαινομένου της ΑΘΝ στην πόλη της Πάτρας. Ο σχεδιασμός βασίζεται στη σύγκριση τεσσάρων μετεωρολογικών σταθμών με διαφοροποιημένο βαθμό αστικοποίησης (Τριών Ναυάρχων, Ρίο, Γερμανού, Παραλία) και τεσσάρων εποχών (Άνοιξη, Καλοκαίρι, Φθινόπωρο, Χειμώνας), μέσω καταγραφών θερμοκρασίας σε ημερήσια και νυχτερινή βάση.

Ο **παράγοντας Σταθμός** έχει τέσσερα επίπεδα, εκ των οποίων δύο χαρακτηρίστηκαν ως κυρίως αστικοί (Γερμανού, Τριών Ναυάρχων) και δύο ως περισσότερο περιφερειακοί/παράκτιοι (Ρίο, Παραλία), με σκοπό την αποτύπωση του χωρικού gradient της ΑΘΝ. Ο **παράγοντας Εποχή** επίσης έχει τέσσερα επίπεδα (Άνοιξη, Καλοκαίρι, Φθινόπωρο, Χειμώνας), ώστε να εξεταστεί αν η ένταση των θερμικών διαφορών μεταβάλλεται εποχικά. Κάθε ημερήσια παρατήρηση (ημέρα - περίπτωση) ανήκει σε έναν μόνο συνδυασμό Σταθμού × Εποχής, άρα και οι δύο παράγοντες αντιμετωπίστηκαν ως between - subjects.

Ως **εξαρτημένες μεταβλητές** χρησιμοποιήθηκαν:

1. η μέση θερμοκρασία ημέρας (Temp_Day),
2. η μέση θερμοκρασία νύχτας (Temp_Night) και

3. το ημερήσιο θερμοκρασιακό εύρος ($\text{Temp_diff} = \text{Temp_Day} - \text{Temp_Night}$).

Για κάθε σταθμό και εποχή υπολογίστηκαν περιγραφικά στατιστικά (μέσος, τυπική απόκλιση, ελάχιστη και μέγιστη τιμή) πάνω στις ημερήσιες τιμές, και στη συνέχεια οι τρεις μεταβλητές αναλύθηκαν με ξεχωριστές διδιάστατες ANOVA (4×4) (Analysis of Variance), με παράγοντες Σταθμός και Εποχή και όρο αλληλεπίδρασης Σταθμός $\times$ Εποχή. Στο επίπεδο των υποθέσεων, ο σχεδιασμός στοχεύει να ελέγξει: (α) αν οι αστικοί σταθμοί εμφανίζουν υψηλότερες θερμοκρασίες ημέρας και νύχτας σε σχέση με τους περιφερειακούς, (β) αν το ημερήσιο εύρος θερμοκρασίας είναι μικρότερο στους αστικούς σταθμούς, ιδίως στον Γερμανού, και (γ) αν οι διαφορές αυτές εντείνονται σε συγκεκριμένες εποχές (π.χ. καλοκαίρι, χειμώνας), όπως προβλέπει η θεωρία της ΑΘΝ.

Οι αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν στο SPSS με εντολή UNIANOVA, με Type III SS, Bonferroni διορθώσεις για τις ζεύγος - προς - ζεύγος συγκρίσεις και εκτίμηση των μεγεθών επίδρασης. Προτιμήθηκε η επίδραση να υπολογιστεί με χρήση του ολικού η^2 ($\text{SS_effect} / \text{SS_total}$) και όχι του παρεχόμενου από το λογισμικό μερικού η^2 (partial eta). Ελέγχθηκε η ομοιογένεια διακυμάνσεων με το τεστ Levene και παρατηρήθηκαν παραβιάσεις και για τις τρεις εξαρτημένες μεταβλητές. Λόγω αυτού, το επίπεδο σημαντικότητας ορίστηκε σε πιο αυστηρό όριο ($\alpha = .01$) σε σχέση με το σύνηθες ($\alpha = .05$). Τα αποτελέσματα ερμηνεύθηκαν λαμβάνοντας υπόψη τόσο τις στατιστικές δοκιμές όσο και τα προφίλ των εκτιμώμενων οριακών μέσων ανά Σταθμό και Εποχή.

Επιπλέον, στην παρούσα έρευνα θα εξεταστεί, μέσω της περιγραφικής στατιστικής των δεδομένων, κατά πόσο τα παρατηρούμενα μοτίβα συμφωνούν με τα αποτελέσματα της επαγωγικής στατιστικής που προέκυψαν από τις αναλύσεις ANOVA.

5.5 Αποτελέσματα επαγωγικής στατιστικής για τις υποθέσεις H1–H4

Οι ληφθείσες μετρήσεις ελέγχθηκαν για απώλεια δεδομένων π.χ. λόγω μη λειτουργίας κάποιων σταθμών και ακραίες τιμές. Σε ορισμένες μέρες και ώρες, παρατηρήθηκε απώλεια δεδομένων που οδήγησε σε παραδοξότητες στις μετρήσεις όπως για παράδειγμα μεγαλύτερες νυχτερινές θερμοκρασίες σε σχέση με τις ημερήσιες, λόγω λήψης δεδομένων μόνο νωρίς το πρωί όπου οι θερμοκρασίες είναι ακόμα χαμηλότερες και μόνο νωρίς το βράδυ όπου οι θερμοκρασίες

παραμένουν σχετικά υψηλότερες. Ωστόσο, λόγω της πυκνότητας των μετρήσεων δεν φαίνεται να υπήρξε επίδραση που να οφείλεται στην αφαίρεση των δεδομένων αυτών.

Για τη διερεύνηση της ΑΘΝ πραγματοποιήθηκαν τρεις διδιάστατες αναλύσεις διακύμανσης με παράγοντες Σταθμός (Τριών Ναυάρχων, Ρίο, Γερμανού, Παραλία) και Εποχή, με εξαρτημένες μεταβλητές τη θερμοκρασία ημέρας (Temp_Day), τη θερμοκρασία νύχτας (Temp_Night) και το ημερήσιο θερμοκρασιακό εύρος (Temp_diff). Επιπλέον, υπολογίστηκαν περιγραφικά στατιστικά (μέσος όρος, τυπική απόκλιση, ελάχιστη και μέγιστη τιμή) για κάθε σταθμό. Για τον υπολογισμό των μέσων θερμοκρασιών, οι εποχές χωρίστηκαν με βάση μια πιο αντιπροσωπευτική κλιματολογική προσέγγιση που σύμφωνα με τους Kotsias et al. (2022) έχει ως εξής:

1. Χειμώνας: 26 Νοεμβρίου – 20 Μαρτίου
2. Άνοιξη: 21 Μαρτίου – 31 Μαΐου
3. Καλοκαίρι: 1 Ιουνίου – 22 Σεπτεμβρίου
4. Φθινόπωρο: 23 Σεπτεμβρίου – 25 Νοεμβρίου

Για τον διαχωρισμό των ωριαίων τιμών σε “ημέρα” και “νύχτα” χρησιμοποιήθηκαν κατά προσέγγιση ώρες ανατολής και δύσης του Ηλίου για την Πάτρα, οι οποίες ορίστηκαν ξεχωριστά για κάθε μήνα. Για παράδειγμα, τον Ιανουάριο θεωρήθηκε ως ημέρα το διάστημα 08:00–17:00, ενώ τον Ιούλιο το διάστημα 06:00–21:00. Κάθε ωριαία τιμή αντιστοιχεί σε ένα πλήρες ωριαίο διάστημα (π.χ. η τιμή της “ώρας 6” αντιστοιχεί στο διάστημα 06:00–06:59). Μια τέτοια ωριαία τιμή χαρακτηρίστηκε ως “ημέρα” όταν το μέσο σημείο του διαστήματος (π.χ. 6:30 για την ώρα 6:00) έπεφτε μετά την ανατολή και πριν τη δύση του Ηλίου. Σε κάθε άλλη περίπτωση η τιμή χαρακτηρίστηκε ως “νύχτα”. Με βάση αυτόν τον κανόνα, για παράδειγμα, αν η ανατολή του Ηλίου είναι στις 06:30, η ωριαία τιμή της “ώρας 6:00” (06:00–06:59) θεωρείται ως ημέρα, καθώς το μέσο σημείο της (06:30) συμπίπτει με την ώρα της ανατολής (SunriseSunset.org, n.d.; U.S. Naval Observatory, Astronomical Applications Department, n.d.)

Θερμοκρασία ημέρας (H1)

Από την περιγραφική στατιστική προέκυψε πως ο σταθμός Γερμανού παρουσίασε τη μεγαλύτερη μέση θερμοκρασία ημέρας ($M = 21,1$, $SD = 6.2$, $min = 6,5$ °C, $max = 34,8$ °C), υποδεικνύοντας σαφώς θερμότερο ημερήσιο καθεστώς σε σχέση με τους υπόλοιπους σταθμούς. Ο Τριών Ναυάρχων εμφάνισε $M = 15,5$ ($SD = 6.6$, $min = 3,0$ °C, $max = 30,7$ °C), το

Ρίο $M = 16,8$ ($SD = 7,32$, $min = 1,4$ °C, $max = 32,8$ °C) και η Παραλία $M = 15,6$ ($SD = 6,4$, $min = 3,2$ °C, $max = 30,1$ °C).

Εποχή	Σταθμός	M.O.	T.A.	Min (°C)	Max (°C)	N
Άνοιξη	Γερμανού	19,2	2,6	13,2	23,7	54
	Παραλία	14,0	2,8	7,8	18,8	62
	Ρίο	15,8	3,0	9,0	21,9	61
	Τριών Ναυάρχων	14,8	2,9	7,8	20,2	60
Καλοκαίρι	Γερμανού	28,2	2,7	21,1	34,8	103
	Παραλία	23,2	2,0	17,7	30,1	104
	Ρίο	25,8	2,6	19,3	32,8	114
	Τριών Ναυάρχων	24,0	2,4	18,2	30,7	93
Φθινόπωρο	Γερμανού	18,6	4,0	9,8	28,4	75
	Παραλία	17,1	2,3	13,3	22,1	51
	Ρίο	14,9	3,6	8,3	24,0	65
	Τριών Ναυάρχων	13,7	2,8	8,7	21,1	60
Χειμώνας	Γερμανού	14,8	3,0	6,5	21,0	71
	Παραλία	8,9	3,0	3,2	14,9	114
	Ρίο	9,2	2,6	1,4	15,7	113
	Τριών Ναυάρχων	8,6	2,5	3,0	15,4	91

Πίνακας 6 M.O. θερμοκρασίας ημέρας ανά εποχή και σταθμό

Από τη στατιστική μέθοδο ANOVA η ανάλυση διακύμανσης έδειξε σημαντικό κύριο αποτέλεσμα Σταθμού στη θερμοκρασία ημέρας με:

- $F(3,1275)=184.40$, δηλαδή η διακύμανση μεταξύ των σταθμών ήταν πολύ μεγαλύτερη από την τυχαία διακύμανση εντός των σταθμών, υποδηλώνοντας σημαντικές διαφορές θερμοκρασίας μεταξύ των θέσεων μέτρησης.
- $p < .001$, που δείχνει ότι το αποτέλεσμα είναι στατιστικά σημαντικό, δηλαδή η πιθανότητα να παρατηρήθηκε αυτή η διαφορά τυχαία είναι εξαιρετικά μικρή.
- $\eta^2 \approx .07$ (μέγεθος επίδρασης), υποδηλώνοντας ότι περίπου το 7% της συνολικής διακύμανσης της θερμοκρασίας ημέρας εξηγείται από τον παράγοντα «Σταθμός», ενώ το υπόλοιπο ποσοστό αποδίδεται σε άλλους παράγοντες ή σε μη εξηγούμενη διακύμανση, όπως η απόσταση από τη θάλασσα, οι άνεμοι, η δόμηση της περιοχής κ.ά.

Το κύριο αποτέλεσμα της **Εποχής** ήταν επίσης ιδιαίτερα ισχυρό:

- $F(3,1275)=1919.09$, δηλαδή η μεταβλητότητα μεταξύ των εποχών ήταν πολύ μεγαλύτερη από τη μεταβλητότητα της θερμοκρασίας μέσα στην ίδια εποχή.
- $p < .001$, γεγονός που δείχνει ότι οι εποχικές διαφορές είναι στατιστικά σημαντικές.
- $\eta^2 \approx .71$, υποδηλώνοντας ότι περίπου το 71% της συνολικής διακύμανσης της θερμοκρασίας εξηγείται από την εποχή, κάτι που δείχνει πολύ ισχυρή επίδραση της εποχικότητας.

Τέλος, η αλληλεπίδραση **Σταθμού** $\times$ **Εποχής** ήταν σημαντική με:

- $F(9,1275)=10.87$, δηλαδή η επίδραση της εποχής στη θερμοκρασία δεν ήταν ίδια σε όλους τους σταθμούς, καθώς η μεταβλητότητα μεταξύ των συνδυασμών Σταθμού $\times$ Εποχής ήταν μεγαλύτερη από την τυχαία μεταβλητότητα των δεδομένων.
- $p < .001$, γεγονός που δείχνει ότι η αλληλεπίδραση είναι στατιστικά σημαντική και η πιθανότητα να προέκυψε τυχαία είναι εξαιρετικά μικρή.
- $\eta^2 \approx .01$, υποδηλώνοντας ότι περίπου το 1% της συνολικής διακύμανσης της θερμοκρασίας εξηγείται από την αλληλεπίδραση μεταξύ Σταθμού και Εποχής, δηλαδή από το γεγονός ότι οι εποχικές μεταβολές της θερμοκρασίας διαφέρουν ελαφρώς μεταξύ των σταθμών.

Οι επιμέρους **Post-hoc συγκρίσεις Bonferroni** μεταξύ των σταθμών έδειξαν πιο συγκεκριμένα ποιες ομάδες διέφεραν μεταξύ τους ως προς τη μέση θερμοκρασία ημέρας.

- Ο σταθμός Γερμανού παρουσίασε σημαντικά υψηλότερες μέσες θερμοκρασίες ημέρας σε σύγκριση με όλους τους υπόλοιπους σταθμούς (**όλα $p < .001$**), γεγονός που υποδηλώνει ότι πρόκειται για τον θερμότερο σταθμό.
- Το Ρίο εμφάνισε σημαντικά υψηλότερες θερμοκρασίες από τον Τριών Ναυάρχων ($p < .001$), γεγονός που δείχνει σαφή διαφοροποίηση μεταξύ των δύο περιοχών.
- Αντίθετα, το Ρίο δεν διέφερε ουσιαστικά από την Παραλία ($p = .029$), υποδηλώνοντας παρόμοιες μέσες θερμοκρασίες μεταξύ των δύο σταθμών.
- Τέλος, ο Τριών Ναυάρχων και η Παραλία δεν παρουσίασαν στατιστικά σημαντική διαφορά ($p = .096$), γεγονός που δείχνει ότι οι μέσες θερμοκρασίες τους ήταν συγκρίσιμες.

Έλεγχος υπόθεσης H1

Η H1 προέβλεπε ότι οι ημερήσιες θερμοκρασίες θα είναι σημαντικά υψηλότερες στους αστικούς σταθμούς (Γερμανού, Τριών Ναυάρχων) σε σχέση με τους περιφερειακούς (Ρίο, Παραλία), με τον σταθμό Γερμανού να έχει τις υψηλότερες και τον σταθμό Παραλία τις χαμηλότερες τιμές. Τα αποτελέσματα επιβεβαιώνουν σαφώς ότι ο σταθμός Γερμανού είναι ο

θερμότερος σταθμός και ότι ο σταθμός Παραλία είναι μεταξύ των ψυχρότερων, αλλά δεν επιβεβαιώνουν πλήρως ότι «οι αστικοί σταθμοί συνολικά» υπερτερούν των περιφερειακών, αφού ο Τριών Ναυάρχων δεν υπερέβη σημαντικά ούτε το Ρίο ούτε την Παραλία. Συνεπώς, η H1 υποστηρίζεται μερικώς.

Θερμοκρασία νύχτας (H2)

Από την περιγραφική στατιστική για τις θερμοκρασίες νύχτας, ο σταθμός Γερμανού εμφάνισε και πάλι τις υψηλότερες μέσες τιμές ($M = 16,1$, $SD = 6.17$, $min = 3,0$ °C, $max = 29,9$ °C). Οι υπόλοιποι σταθμοί είχαν χαμηλότερες και αρκετά κοντινές μέσες τιμές: Τριών Ναυάρχων $M = 13,8$ ($SD = 6,4$, $min = 1,8$ °C, $max = 28,0$ °C), Ρίο $M = 14,0$ ($SD = 6,7$, $min = 1,8$ °C, $max = 28,7$ °C) και Παραλία $M = 13,9$ ($SD = 6,7$, $min = 0,7$ °C, $max = 26,4$ °C).

Εποχή	Σταθμός	M.O.	T.A.	Min (°C)	Max (°C)	N
Άνοιξη	Γερμανού	14,3	2,2	9,0	18,2	54
	Παραλία	12,2	2,8	5,4	16,5	62
	Ρίο	12,7	2,8	6,3	17,5	61
	Τριών Ναυάρχων	12,7	2,7	6,8	17,4	60
Καλοκαίρι	Γερμανού	23,4	2,3	17,2	29,9	103
	Παραλία	21,9	1,7	16,5	26,4	104
	Ρίο	22,3	2,2	16,4	28,7	114
	Τριών Ναυάρχων	22,0	2,2	16,0	28,0	93
Φθινόπωρο	Γερμανού	14,1	2,9	8,4	21,6	75
	Παραλία	15,5	2,4	11,1	20,6	51
	Ρίο	12,7	3,2	7,0	20,7	65
	Τριών Ναυάρχων	12,3	2,8	7,0	19,8	60
Χειμώνας	Γερμανού	8,8	2,3	3,0	14,7	71
	Παραλία	6,9	3,0	0,7	13,0	114
	Ρίο	7,0	2,4	1,8	12,6	113
	Τριών Ναυάρχων	7,0	2,3	1,8	12,5	91

Πίνακας 7 Θερμοκρασία νύχτας (Temp_Night) ανά εποχή και σταθμό

Η στατιστική ανάλυση ANOVA έδειξε σημαντικό κύριο αποτέλεσμα του παράγοντα **Σταθμός** στη θερμοκρασία νύχτας:

- $F(3,1275)=26.06$, δηλαδή η διακύμανση μεταξύ των σταθμών ήταν μεγαλύτερη από την τυχαία διακύμανση εντός των σταθμών, υποδηλώνοντας ότι υπάρχουν διαφοροποιήσεις στη νυχτερινή θερμοκρασία μεταξύ των θέσεων μέτρησης.
- $p < .001$, γεγονός που δείχνει ότι το αποτέλεσμα είναι στατιστικά σημαντικό και η πιθανότητα να προέκυψε τυχαία είναι εξαιρετικά μικρή.
- $\eta^2 \approx .01$ (μέγεθος επίδρασης), υποδηλώνοντας ότι περίπου το 1% της συνολικής διακύμανσης της θερμοκρασίας νύχτας εξηγείται από τις χωρικές διαφορές μεταξύ των σταθμών, γεγονός που αντιστοιχεί σε μικρό αλλά υπαρκτό μέγεθος επίδρασης.

Το κύριο αποτέλεσμα της **Εποχής** ήταν ιδιαίτερα ισχυρό:

- $F(3,1275)=2426.8$, δηλαδή η μεταβλητότητα μεταξύ των εποχών ήταν πολύ μεγαλύτερη από τη μεταβλητότητα της θερμοκρασίας μέσα στην ίδια εποχή.
- $p < .001$, γεγονός που δείχνει ότι οι εποχικές διαφορές στη θερμοκρασία νύχτας είναι στατιστικά σημαντικές.
- $\eta^2 \approx .81$, υποδηλώνοντας ότι περίπου το 81% της συνολικής διακύμανσης της θερμοκρασίας νύχτας εξηγείται από την εποχή, κάτι που δείχνει εξαιρετικά ισχυρή επίδραση της εποχικότητας.

Η αλληλεπίδραση **Σταθμού $\times$ Εποχής** ήταν επίσης στατιστικά σημαντική:

- $F(9,1275)=6.74$, δηλαδή η επίδραση της εποχής στη θερμοκρασία νύχτας δεν ήταν ίδια σε όλους τους σταθμούς, καθώς οι εποχικές μεταβολές διαφοροποιούνταν μεταξύ των θέσεων μέτρησης.
- $p < .001$, γεγονός που δείχνει ότι η αλληλεπίδραση είναι στατιστικά σημαντική και δύσκολα αποδίδεται σε τυχαία διακύμανση.
- $\eta^2 \approx .01$, υποδηλώνοντας ότι περίπου το 1% της συνολικής διακύμανσης της θερμοκρασίας νύχτας εξηγείται από την αλληλεπίδραση μεταξύ Σταθμού και Εποχής, δηλαδή από τις μικρές διαφοροποιήσεις της εποχικής συμπεριφοράς μεταξύ των σταθμών.

Οι επιμέρους **Post-hoc συγκρίσεις Bonferroni** μεταξύ των σταθμών έδειξαν πιο συγκεκριμένα ποιες περιοχές διέφεραν μεταξύ τους ως προς τη μέση νυχτερινή θερμοκρασία.

- Ο σταθμός Γερμανού παρουσίασε σημαντικά υψηλότερες νυχτερινές θερμοκρασίες από όλους τους υπόλοιπους σταθμούς (**όλα $p < .001$**), γεγονός που υποδηλώνει ότι αποτελεί τη θερμότερη θέση μέτρησης κατά τη διάρκεια της νύχτας.

- Ο Τριών Ναυάρχων δεν διέφερε στατιστικά σημαντικά από το Ρίο ($p = 1.000$), γεγονός που δείχνει παρόμοιες μέσες νυχτερινές θερμοκρασίες μεταξύ των δύο σταθμών.
- Η Παραλία εμφάνισε ελαφρώς υψηλότερες νυχτερινές θερμοκρασίες από τον Τριών Ναυάρχων ($p \approx .013$), ωστόσο η διαφορά αυτή θεωρήθηκε οριακή και δεν κρίθηκε στατιστικά σημαντική μετά τη διόρθωση Bonferroni.
- Τέλος, το Ρίο και η Παραλία δεν παρουσίασαν στατιστικά σημαντική διαφορά ($p = .218$), υποδηλώνοντας συγκρίσιμα επίπεδα νυχτερινής θερμοκρασίας μεταξύ των δύο περιοχών.

Έλεγχος υπόθεσης H2

Η H2 προέβλεπε υψηλότερες νυχτερινές θερμοκρασίες στους δύο αστικούς σταθμούς (Γερμανού και Τριών Ναυάρχων) σε σύγκριση με τους περιφερειακούς σταθμούς (Ρίο και Παραλία), με τον σταθμό Γερμανού να αναμένεται ως ο θερμότερος και την Παραλία ως ο ψυχρότερος. Τα αποτελέσματα επιβεβαίωσαν ότι ο σταθμός Γερμανού παρουσίασε σημαντικά υψηλότερες νυχτερινές θερμοκρασίες από όλους τους υπόλοιπους σταθμούς, ενώ η Παραλία συγκαταλέγεται στις ψυχρότερες θέσεις μέτρησης. Ωστόσο, ο Τριών Ναυάρχων δεν παρουσίασε υψηλότερες νυχτερινές θερμοκρασίες σε σχέση με το Ρίο και την Παραλία, καθώς οι μεταξύ τους διαφορές ήταν μικρές ή μη στατιστικά σημαντικές. Επομένως, η υπόθεση H2 υποστηρίζεται μερικώς.

Εύρος θερμοκρασίας ημέρας – νύχτας (H3)

Μέσω της περιγραφικής στατιστικής προέκυψε πως το ημερήσιο θερμοκρασιακό εύρος (Temp_diff) παρουσίασε πολύ έντονες χωρικές διαφοροποιήσεις. Ο σταθμός Γερμανού εμφάνισε πολύ μεγάλο μέσο εύρος ($M = 5,0$, $SD = 2,1$, $min = -0,1$ °C, $max = 12,2$ °C), ενώ το Ρίο είχε επίσης αυξημένο εύρος ($M = 2,8$, $SD = 1,2$, $min = -0,9$ °C, $max = 5,8$ °C). Αντίθετα, ο Τριών Ναυάρχων ($M = 1,8$, $SD = 0,8$, $min = -0,5$ °C, $max = 5,0$ °C) και η Παραλία ($M = 1,7$, $SD = 1,0$, $min = -0,7$ °C, $max = 6,3$ °C) εμφάνισαν σημαντικά μικρότερο εύρος ημέρας – νύχτας.

Εποχή	Σταθμός	M.O.	T.A.	Min (°C)	Max (°C)	N
Άνοιξη	Γερμανού	4,9	1,1	1,8	6,8	54
	Παραλία	1,9	0,8	0,0	4,4	62
	Ρίο	3,1	0,8	1,2	5,3	61
	Τριών Ναυάρχων	2,0	0,7	0,9	3,6	60
Καλοκαίρι	Γερμανού	4,8	1,2	0,4	8,0	103
	Παραλία	1,3	1,0	-0,5	4,7	104

	Ρίο	3,4	0,9	0,9	5,7	114
	Τριών Ναυάρχων	2,0	0,9	0,0	5,0	93
Φθινόπωρο	Γερμανού	4,4	2,5	-0,1	9,2	75
	Παραλία	1,6	0,9	-0,7	3,3	51
	Ρίο	2,1	1,1	-0,3	4,7	65
	Τριών Ναυάρχων	1,4	0,7	-0,5	2,8	60
Χειμώνας	Γερμανού	5,9	2,8	0,4	12,2	71
	Παραλία	2,0	0,9	-0,4	6,3	114
	Ρίο	2,3	1,1	-0,9	5,8	113
	Τριών Ναυάρχων	1,6	0,7	0,4	3,2	91

Πίνακας 8 Εύρος θερμοκρασίας ημέρας – νύχτας ανά εποχή και σταθμό

Η στατιστική ανάλυση ANOVA έδειξε σημαντικό κύριο αποτέλεσμα του παράγοντα **Σταθμός** στο ημερήσιο εύρος θερμοκρασίας (διαφορά ημέρας – νύχτας):

- **F(3,1275)=448.8**, δηλαδή οι διαφορές στο ημερήσιο θερμοκρασιακό εύρος μεταξύ των σταθμών ήταν πολύ μεγαλύτερες από την τυχαία μεταβλητότητα εντός των σταθμών, υποδηλώνοντας ισχυρή επίδραση της χωρικής θέσης.
- **p < ,001**, γεγονός που δείχνει ότι το αποτέλεσμα είναι στατιστικά σημαντικό και εξαιρετικά απίθανο να έχει προκύψει τυχαία.
- **$\eta^2 \approx .47$** (μέγεθος επίδρασης), υποδηλώνοντας ότι περίπου το 47% της συνολικής διακύμανσης του ημερήσιου θερμοκρασιακού εύρους εξηγείται από τις διαφορές μεταξύ των σταθμών, γεγονός που αντιστοιχεί σε ισχυρή επίδραση.

Το κύριο αποτέλεσμα της **Εποχής** ήταν μικρότερο αλλά στατιστικά σημαντικό:

- **F(3,1275)=11.77**, δηλαδή υπάρχουν διαφορές στο ημερήσιο εύρος θερμοκρασίας μεταξύ εποχών, αλλά αυτές είναι σχετικά περιορισμένες σε σχέση με την επίδραση του σταθμού.
- **p < .001**, γεγονός που δείχνει ότι οι εποχικές διαφορές είναι στατιστικά σημαντικές.
- **$\eta^2 \approx .01$** , υποδηλώνοντας ότι περίπου το 1% της συνολικής διακύμανσης εξηγείται από την εποχή.

Η αλληλεπίδραση **Σταθμού × Εποχής** ήταν επίσης στατιστικά σημαντική:

- $F(9,1275)=13.60$, δηλαδή η επίδραση της εποχής στο ημερήσιο εύρος θερμοκρασίας διαφοροποιείται μεταξύ των σταθμών.
- $p < ,001$, γεγονός που δείχνει ότι η αλληλεπίδραση είναι στατιστικά σημαντική.
- $\eta^2 \approx .04$, υποδηλώνοντας ότι περίπου το 4% της συνολικής διακύμανσης του ημερήσιου εύρους εξηγείται από τη συνδυαστική επίδραση Σταθμού $\times$ Εποχής.

Οι επιμέρους **Post-hoc συγκρίσεις Bonferroni** έδειξαν πιο συγκεκριμένα τις διαφορές μεταξύ των σταθμών:

- Ο σταθμός Γερμανού παρουσίασε σημαντικά μεγαλύτερο ημερήσιο θερμοκρασιακό εύρος από όλους τους υπόλοιπους σταθμούς (**όλα $p < .001$**), υποδηλώνοντας τη μεγαλύτερη ημερήσια διακύμανση θερμοκρασίας.
- Το Ρίο εμφάνισε επίσης σημαντικά μεγαλύτερο εύρος σε σχέση με τον Τριών Ναυάρχων και την Παραλία (**όλα $p < .001$**), γεγονός που δείχνει ενδιάμεση αλλά αυξημένη διακύμανση.
- Αντίθετα, οι σταθμοί Τριών Ναυάρχων και Παραλία δεν διέφεραν μεταξύ τους ($p = 1,000$), υποδηλώνοντας παρόμοιο ημερήσιο θερμοκρασιακό εύρος.

Έλεγχος υπόθεσης H3

Η υπόθεση προέβλεπε μικρότερο ημερήσιο θερμοκρασιακό εύρος στους αστικούς σταθμούς, με τον Γερμανού να αναμένεται ως ο σταθμός με το μικρότερο εύρος. Ωστόσο τα αποτελέσματα παρουσιάζουν το αντίθετο αποτέλεσμα, ότι ο Γερμανού παρουσιάζει το μεγαλύτερο ημερήσιο εύρος θερμοκρασίας και ότι η διαφορά του από τους υπόλοιπους σταθμούς είναι έντονη και στατιστικά σημαντική. Ο σταθμός Τριών Ναυάρχων επίσης εμφανίζει υψηλότερο εύρος σε σχέση με αυτόν της Παραλίας αλλά όχι μεγαλύτερο από τον σταθμό Ρίο, γεγονός που δείχνει ότι η διάκριση μεταξύ «αστικών» και «περιφερειακών» σταθμών δεν είναι απολύτως σταθερή σε όλα τα ζεύγη συγκρίσεων. Συνεπώς, η υπόθεση H3 δεν υποστηρίζεται, καθώς η ιδιαίτερα υψηλή τιμή του Γερμανού έρχεται σε αντίθεση με την αρχική πρόβλεψη και δεν τεκμηριώνεται πλήρως μια καθολική διάκριση μεταξύ αστικών και περιφερειακών σταθμών ως προς το ημερήσιο θερμοκρασιακό εύρος.

Εποχική ενίσχυση (έλεγχος αλληλεπίδρασης Σταθμού $\times$ Εποχής) (H4)

Η H4 προέβλεπε ότι οι διαφορές θερμοκρασίας μεταξύ αστικών και περιφερειακών σταθμών θα διαφοροποιούνται ανά εποχή και θα είναι εντονότερες κυρίως κατά τη θερινή περίοδο.

Και στις τρεις αναλύσεις ANOVA βρέθηκαν στατιστικά σημαντικές αλληλεπιδράσεις Σταθμού $\times$ Εποχής, γεγονός που δείχνει ότι το φαινόμενο της ΑΘΝ δεν είναι σταθερό στον χρόνο, αλλά μεταβάλλεται ανά εποχή.

Με βάση τους μέσους όρους, η μεγαλύτερη διαφορά στη μέση θερμοκρασία ημέρας μεταξύ του σταθμού Γερμανού και του σταθμού Παραλία καταγράφηκε τον χειμώνα ($5,9^{\circ}\text{C}$), ενώ αντίστοιχα μεγάλες διαφορές παρατηρήθηκαν και την άνοιξη ($5,2^{\circ}\text{C}$) και το καλοκαίρι ($5,0^{\circ}\text{C}$). Επομένως, τα δεδομένα δεν υποστηρίζουν ειδικά την αρχική πρόβλεψη ότι η μεγαλύτερη διαφοροποίηση θα εμφανίζεται αποκλειστικά κατά τη θερινή περίοδο. Η στατιστικά σημαντική αλληλεπίδραση Σταθμού $\times$ Εποχής δείχνει ότι οι διαφορές μεταβάλλονται εποχικά, χωρίς όμως οι παρούσες αναλύσεις να επιτρέπουν πλήρη στατιστική τεκμηρίωση της υπεροχής μιας συγκεκριμένης εποχής.

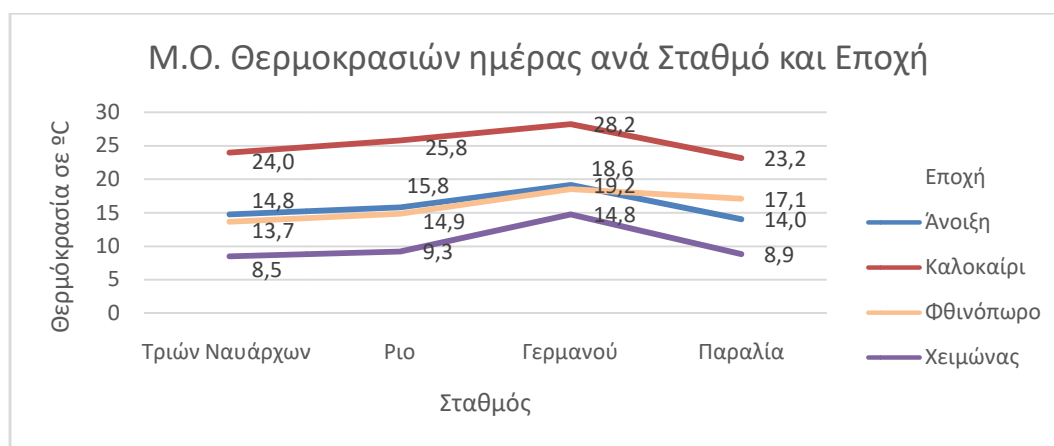
Η υπόθεση υποστηρίζεται ως προς την ύπαρξη εποχικής μεταβλητότητας των διαφορών θερμοκρασίας μεταξύ των σταθμών. Χωρίς πρόσθετες συγκρίσεις απλών επιδράσεων ανά εποχή, δεν είναι δυνατόν να προσδιοριστεί με στατιστική βεβαιότητα σε ποια εποχή η διαφοροποίηση είναι εντονότερη και η ειδική πρόβλεψη ότι οι διαφοροποιήσεις θα είναι εντονότερες κατά τη θερινή περίοδο δεν επιβεβαιώνεται πλήρως, καθώς η μεγαλύτερη περιγραφική διαφορά μέσης θερμοκρασίας ημέρας μεταξύ Γερμανού και Παραλίας καταγράφηκε τον χειμώνα. Συνεπώς, η H_4 υποστηρίζεται μερικώς.

5.6 Αποτελέσματα περιγραφικής στατιστικής

Ο σταθμός Γερμανού εμφανίζεται ως ο θερμότερος σταθμός τόσο κατά τη διάρκεια της ημέρας όσο και της νύχτας, σύμφωνα με τα αποτελέσματα των αναλύσεων. Αντίθετα, ο αστικός σταθμός Τριών Ναυάρχων δεν παρουσιάζει συστηματικά υψηλότερες θερμοκρασίες σε σχέση με τους περιφερειακούς σταθμούς Ρίο και Παραλία. Η εικόνα αυτή επιβεβαιώνεται και από τα γραφήματα των μηνιαίων μέσων όρων ημέρας και νύχτας (Πίνακας 4). Επιπλέον, ο σταθμός Γερμανού παρουσιάζει το μεγαλύτερο ημερήσιο θερμοκρασιακό εύρος (διαφορά μέσου όρου ημέρας-νύχτας). Ωστόσο, ο σταθμός Ρίο, αν και χαρακτηρίζεται ως περιφερειακός/παράκτιος, εμφανίζει μεγαλύτερο εύρος σε σχέση με τον Τριών Ναυάρχων και την Παραλία, γεγονός που δείχνει ότι η ταξινόμηση αστικών και περιφερειακών σταθμών δεν αποτυπώνει πλήρως όλες τις διαφορές μεταξύ των περιοχών (Πίνακας 3).

Η σημαντική αλληλεπίδραση **Εποχής** × **Σταθμού** αποτυπώνεται ξεκάθαρα και στα τρία ακόλουθα γραφήματα.

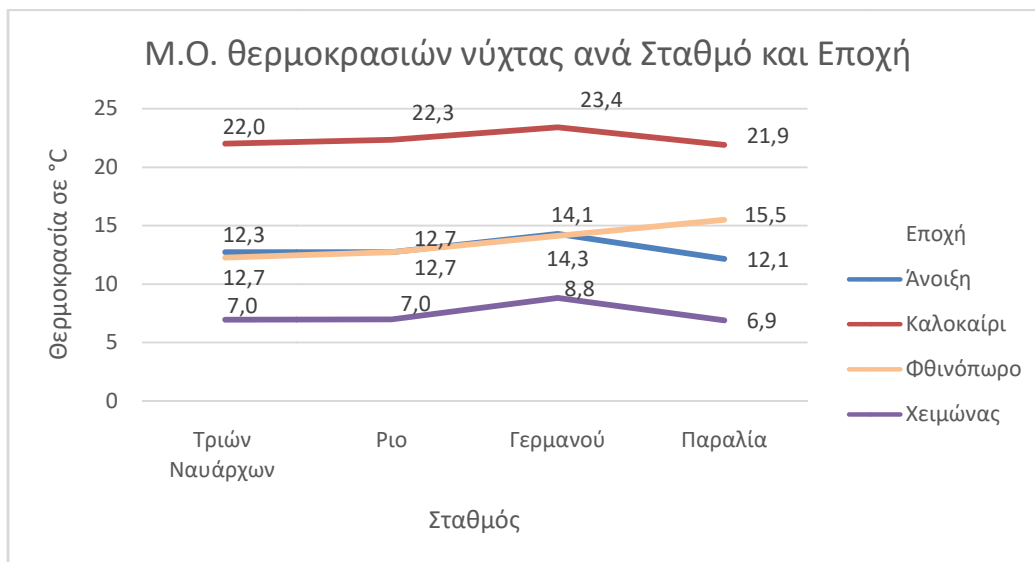
Στη θερμοκρασία ημέρας, όλες οι καμπύλες των εποχών έχουν την ίδια βασική μορφή – αύξηση από τον Τριών Ναυάρχων προς το Ρίο, κορύφωση στον Γερμανού και μείωση στην Παραλία –συνεπώς το πόσο «ψηλά» κυμαίνονται οι θερμοκρασίες στον σταθμό Γερμανού σε σχέση με τους άλλους σταθμούς εξαρτάται από την τοποθεσία του σταθμού. Τα αριθμητικά δεδομένα δείχνουν εντονότερη διαφορά μέσης θερμοκρασίας ημέρας μεταξύ Γερμανού και Παραλίας είναι περίπου 5,0 °C την άνοιξη και το καλοκαίρι, μειώνεται σε περίπου 1,5 °C το φθινόπωρο και κορυφώνεται τον χειμώνα στα περίπου 5,9 °C, γεγονός που υποδηλώνει πολύ έντονη αστική – παράκτια διαφοροποίηση τόσο στη θερμή περίοδο όσο και, ακόμη περισσότερο, τον χειμώνα. Ωστόσο η θερμοκρασία επηρεάζεται και από άλλους τοπικούς γεωγραφικούς και μετεωρολογικούς παράγοντες, όπως η απόσταση από τη θάλασσα, το υψόμετρο, το ανάγλυφο της περιοχής και η τοπική κυκλοφορία του αέρα, οι οποίοι μπορούν να ενισχύσουν ή να μετριάσουν τις θερμοκρασιακές διαφορές μεταξύ των σταθμών. Επίσης σημαντικό ρόλο στη διαμόρφωση του μικροκλίματος διαδραματίζουν και οι ανθρωπογενείς πηγές θερμότητας, όπως η κυκλοφορία των οχημάτων και η ενεργειακή δραστηριότητα η οποία είναι εντονότερη στα αστικά κέντρα. Επομένως, κατά την ερμηνεία των αποτελεσμάτων είναι απαραίτητο να λαμβάνεται υπόψη η συνδυασμένη επίδραση όλων αυτών των παραγόντων.



Γράφημα 1 Μ.Ο. θερμοκρασιών ημέρας ανά σταθμό και εποχή

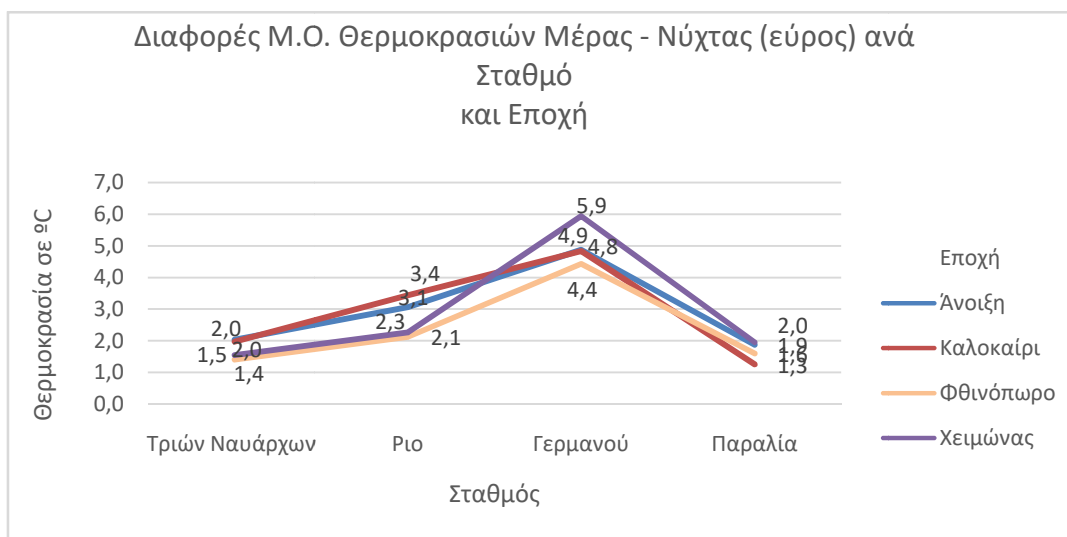
➤ Στη θερμοκρασία νύχτας, οι εποχικές καμπύλες είναι πιο «παράλληλες». Κατά το καλοκαίρι, ο σταθμός Γερμανού υπερτερεί σταθερά όλων των σταθμών, ενώ την άνοιξη οι διαφορές

μεταξύ των υπολοίπων σταθμών είναι πιο σταθερές χωρίς έντονες διακυμάνσεις μεταξύ τους. Τον χειμώνα, οι μέσες νυχτερινές θερμοκρασίες μειώνονται σε όλους τους σταθμούς, ενώ ο σταθμός Γερμανού εμφανίζει την υψηλότερη εποχική μέση τιμή σε σχέση με τις άλλες τρεις θέσεις μέτρησης.



Γράφημα 2. Μ.Ο. θερμοκρασιών νύχτας ανά σταθμό και εποχή

➤ Ακόμη πιο έντονα διαφοροποιημένο είναι το μοτίβο στο ημερήσιο θερμοκρασιακό εύρος (διαφορά μεταξύ ημέρας και νύχτας). Σε όλες τις εποχές, ο σταθμός Γερμανού εμφανίζει τη μεγαλύτερη θερμοκρασιακή διαφορά, με τις τιμές να κορυφώνονται συστηματικά σε αυτόν τον σταθμό, αν και η ένταση του εύρους διαφοροποιείται εποχικά. Κατά τη χειμερινή περίοδο, το εύρος στον σταθμό Γερμανού φτάνει περίπου τους 5,9 °C, ενώ στο Ρίο είναι περίπου 2,3 °C, στην Παραλία περίπου 2,0 °C και στον Τριών Ναυάρχων περίπου 1,5–2,0 °C. Το μοτίβο αυτό αναδεικνύει ένα έντονο θερμοκρασιακό χάσμα μεταξύ του αστικού και των παράκτιων/περιφερειακών σταθμών. Κατά την άνοιξη και το καλοκαίρι, το ημερήσιο θερμοκρασιακό εύρος στον σταθμό Γερμανού παραμένει υψηλό (περίπου 4,8–4,9 °C). Παράλληλα, ο σταθμός Ρίο εμφανίζει επίσης σχετικά αυξημένο εύρος σε σύγκριση με τους σταθμούς Παραλία και Τριών Ναυάρχων. Το συνολικό μοτίβο υποδεικνύει ότι οι περιφερειακοί και παράκτιοι σταθμοί παρουσιάζουν γενικά μικρότερο ημερήσιο θερμοκρασιακό εύρος σε σχέση με τον αστικό σταθμό Γερμανού, γεγονός που συνδέεται με διαφοροποιήσεις στο αστικό περιβάλλον και στις τοπικές μικροκλιματικές συνθήκες.

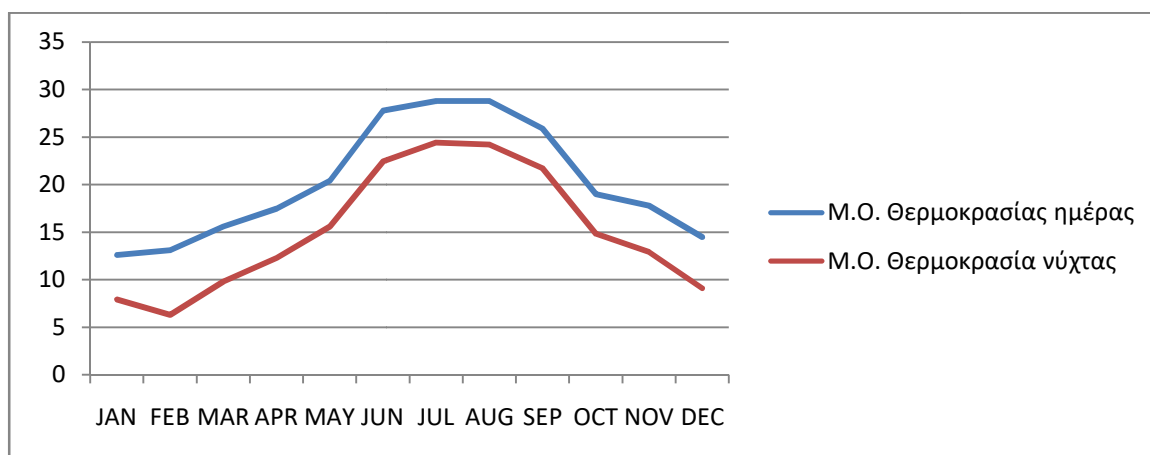


Γράφημα 3 Διαφορές Μ.Ο. θερμοκρασιών ημέρας-νύχτας ανά σταθμό και εποχή

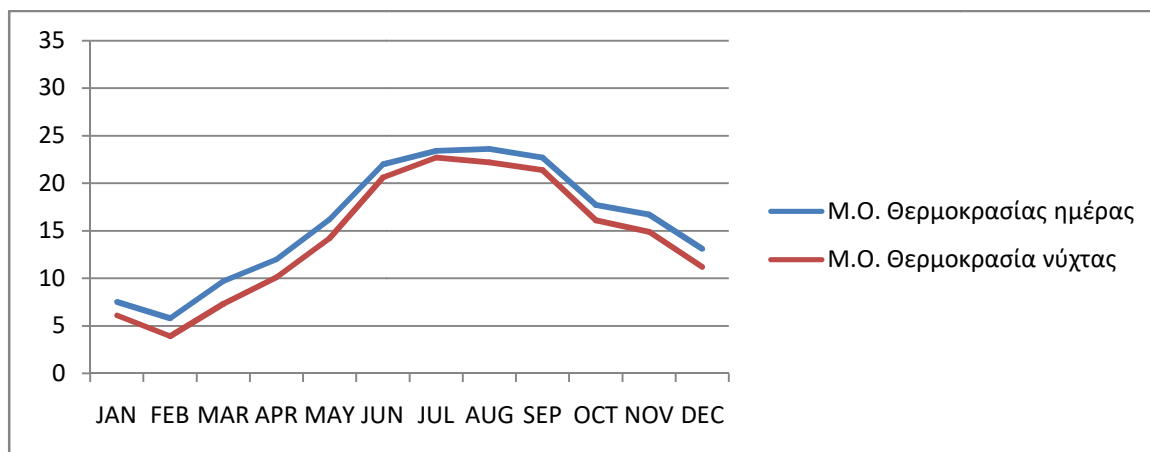
Συνολικά, τα προφίλ των καμπυλών δείχνουν ότι η ΑΘΝ δεν εκδηλώνεται ως σταθερή διαφορά ενός σταθμού από τους υπόλοιπους, αλλά ως ένα δυναμικό φαινόμενο. Ο σταθμός Γερμανού είναι μεν σταθερά ο θερμότερος και παρουσιάζει το μεγαλύτερο ημερήσιο θερμοκρασιακό εύρος, ωστόσο το μέγεθος της «αστικής θερμικής υπεροχής» του διαφοροποιείται ανά εποχή και περίοδο της ημέρας, με εντονότερη έκφραση στη θερμοκρασία ημέρας και στο θερμοκρασιακό εύρος κατά τη θερινή και χειμερινή περίοδο. Το ιδιαίτερα μεγάλο ημερήσιο εύρος στον σταθμό Γερμανού αποτυπώνει την έντονη επίδραση του αστικού περιβάλλοντος: συνδυάζει υψηλές θερμοκρασίες κατά τη διάρκεια της ημέρας, αλλά και σχετικά χαμηλότερες νυχτερινές τιμές σε σύγκριση με την ημέρα. Κατά τη διάρκεια της ημέρας, τα δομικά υλικά της πόλης (σκυρόδεμα, ασφαλτος και πυκνή δόμηση) ενδέχεται να απορροφούν και να αποθηκεύουν μεγαλύτερη ποσότητα ηλιακής ακτινοβολίας, με αποτέλεσμα οι μέσες θερμοκρασίες ημέρας στον Γερμανού να είναι υψηλότερες σε σχέση με τους υπόλοιπους σταθμούς σε όλες τις εποχές. Τη νύχτα, αν και οι θερμοκρασίες μειώνονται, η ψύξη στον αστικό ιστό είναι πιο αργή σε σχέση με τους περιφερειακούς και παράκτιους σταθμούς, καθώς η αποθηκευμένη θερμότητα επανεκπέμπεται σταδιακά και η γεωμετρία του αστικού περιβάλλοντος περιορίζει την ακτινοβολιακή απώλεια θερμότητας. Έτσι, οι νυχτερινές τιμές στον Γερμανού παραμένουν συστηματικά υψηλότερες από εκείνες των άλλων σταθμών. Αντίθετα, στην Παραλία και στους λοιπούς παράκτιους/περιφερειακούς σταθμούς, η θαλάσσια επίδραση ενδέχεται να λειτουργεί εξισορροπητικά, περιορίζοντας τόσο τις υψηλές θερμοκρασίες κατά τη διάρκεια της ημέρας όσο και τις χαμηλές θερμοκρασίες τη νύχτα. Ως αποτέλεσμα, οι ημερήσιες θερμοκρασιακές διακυμάνσεις είναι σαφώς μικρότερες. Συνεπώς, ο

σταθμός Γερμανού εμφανίζει το πιο έντονο ημερήσιο θερμοκρασιακό εύρος λόγω της αυξημένης θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια της ημέρας, ιδιαίτερα κατά τον χειμώνα και το καλοκαίρι, όταν οι διαφοροποιήσεις μεταξύ αστικού και παράκτιου περιβάλλοντος είναι εντονότερες.

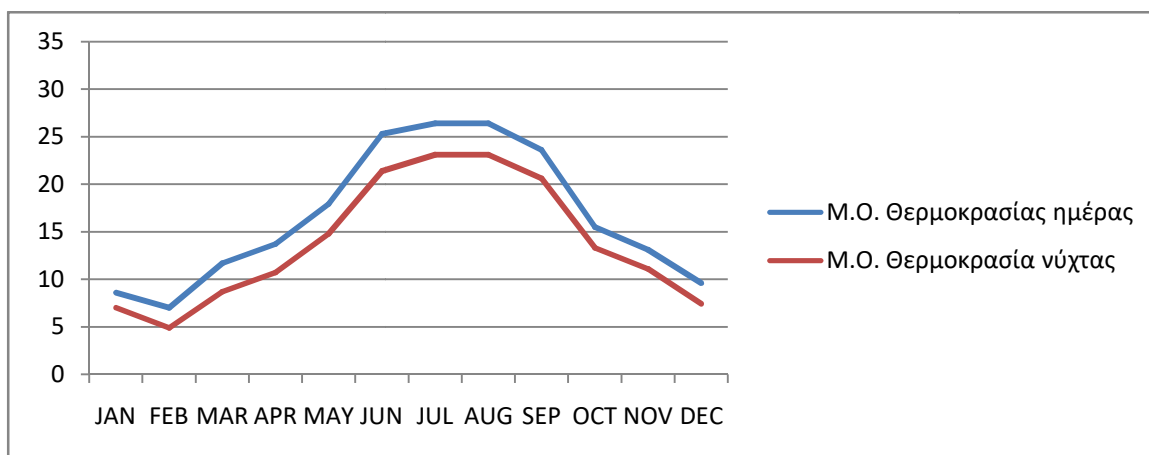
Τέλος, από τα διαγράμματα των μέσων όρων των θερμοκρασιών για κάθε μήνα και σε κάθε έναν από τους 4 σταθμούς διακρίνεται η αρκετά σαφής μικροκλιματική διαφοροποίηση μεταξύ τους.



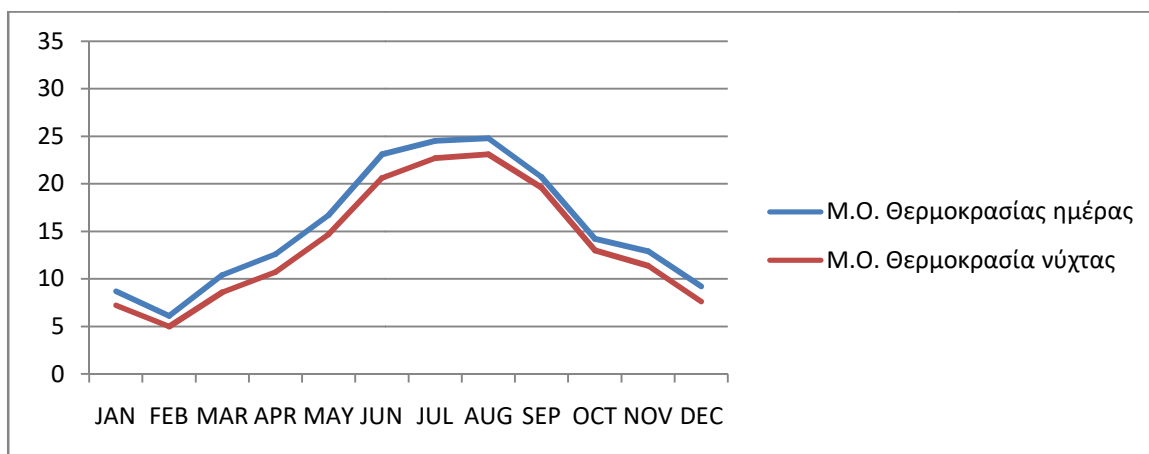
Γράφημα 4 M.O. θερμοκρασίας ημέρας και νύχτας για κάθε μήνα στον σταθμό Γερμανού



Γράφημα 5 M.O. θερμοκρασίας ημέρας και νύχτας για κάθε μήνα στον σταθμό Παραλία



Γράφημα 6 Μ.Ο. θερμοκρασίας ημέρας και νύχτας για κάθε μήνα στον σταθμό Ρίο



Γράφημα 7 θερμοκρασίας ημέρας και νύχτας για κάθε μήνα στον σταθμό Τριών Ναυάρχων

Και στους τέσσερις σταθμούς παρατηρείται σαφής εποχική μεταβολή της θερμοκρασίας, με τις υψηλότερες τιμές να εμφανίζονται κατά τη θερινή περίοδο (Ιούλιος – Αύγουστος). Στους περισσότερους μήνες και στους περισσότερους σταθμούς, οι μέσες θερμοκρασίες ημέρας είναι υψηλότερες από τις αντίστοιχες μέσες νυχτερινές θερμοκρασίες. Ωστόσο, στον σταθμό Παραλία παρατηρούνται εξαιρέσεις, όπως τον Οκτώβριο και τον Νοέμβριο, όταν η μέση νυχτερινή θερμοκρασία είναι υψηλότερη από τη μέση ημερήσια (σύμφωνα με τον Πίνακα 4 η Παραλία έχει τον Οκτώβριο 16,1 °C τη νύχτα έναντι 15,5 °C την ημέρα και τον Νοέμβριο 14,9 °C τη νύχτα έναντι 13,1 °C την ημέρα).

Τα γραφήματα των μηνιαίων μέσων όρων θερμοκρασίας ημέρας και νύχτας επιβεβαιώνουν τα αποτελέσματα των αναλύσεων ANOVA και αναδεικνύουν σαφείς διαφοροποιήσεις μεταξύ των σταθμών. Σύμφωνα με τα διαγράμματα και τα εποχικά δεδομένα, ο σταθμός Γερμανού

παρουσιάζει σταθερά το μεγαλύτερο εύρος θερμοκρασίας μεταξύ ημέρας και νύχτας. Αντίθετα, οι σταθμοί Παραλία και Τριών Ναυάρχων παρουσιάζουν γενικά μικρότερα θερμοκρασιακά εύρη, ενώ το Ρίο βρίσκεται σε ενδιάμεση θέση με σχετικά αυξημένο εύρος σε σύγκριση με αυτούς τους δύο σταθμούς. Το εύρημα αυτό διαφοροποιείται από το κλασικό θεωρητικό πρότυπο της ΑΘΝ, σύμφωνα με το οποίο τα περισσότερα αστικοποιημένα τμήματα της πόλης εμφανίζουν συνήθως μικρότερο ημερήσιο θερμοκρασιακό εύρος σε σχέση με τις περιφερειακές ή αγροτικές περιοχές.

Ο σταθμός Γερμανού εμφανίζει επίσης τις υψηλότερες θερμοκρασίες τόσο κατά τη διάρκεια της ημέρας όσο και της νύχτας, γεγονός που υποδηλώνει εντονότερη εκδήλωση του φαινομένου της ΑΘΝ. Αντίθετα, οι σταθμοί Ρίο και Παραλία παρουσιάζουν μικρότερες διαφορές μεταξύ ημερήσιων και νυχτερινών θερμοκρασιών και γενικά πιο εξισορροπημένη θερμική συμπεριφορά, πιθανόν λόγω της θαλάσσιας επίδρασης.

Ο σταθμός Τριών Ναυάρχων δεν εμφανίζει τόσο έντονα αστικά χαρακτηριστικά όσο ο Γερμανού, καθώς οι θερμοκρασιακές του μεταβολές προσεγγίζουν περισσότερο εκείνες των περιφερειακών σταθμών. Οι σημαντικές αλληλεπιδράσεις Σταθμού × Εποχής υποδεικνύουν ότι οι διαφορές μεταξύ των θέσεων μεταβάλλονται εποχικά. Ωστόσο, η παρούσα ανάλυση δεν περιλαμβάνει αναλυτικές συγκρίσεις ανά εποχή και, επομένως, δεν επιτρέπει ασφαλή εξειδίκευση ως προς συγκεκριμένους μήνες ή σταθμούς.

Επιπλέον, η μεταβολή της απόστασης μεταξύ των καμπυλών ημέρας και νύχτας ανά εποχή υποστηρίζει την ύπαρξη εποχικής διαφοροποίησης του φαινομένου, σε συμφωνία με τις σημαντικές αλληλεπιδράσεις Σταθμού × Εποχής που προέκυψαν από τις αναλύσεις ANOVA.

Η ένταση της ΑΘΝ υπολογίστηκε ως η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ του αστικού σταθμού Γερμανού και του περιφερειακού/παράκτιου σταθμού Παραλία, σύμφωνα με τον τύπο που ορίζεται από τη θεωρία $UHI = T_{urban} - T_{rural}$.

Η σύγκριση μεταξύ του σταθμού Γερμανού και της Παραλία επιλέχθηκε επειδή αντιπροσωπεύουν δύο διαφορετικά μικροκλιματικά περιβάλλοντα μέσα στην ίδια γεωγραφική περιοχή. Ο σταθμός Γερμανού χαρακτηρίζεται ως πιο αστικός, με υψηλή δόμηση, περιορισμένο πράσινο και αυξημένη απορρόφηση ηλιακής ακτινοβολίας από τα δομικά υλικά. Αντίθετα, η Παραλία αποτελεί έναν πιο παράκτιο και περιφερειακό σταθμό, όπου η θαλάσσια επίδραση συμβάλλει στη μείωση των ακραίων θερμοκρασιών.

Για τον υπολογισμό της μέσης μηνιαίας έντασης της ΑΘΝ χρησιμοποιήθηκαν οι μέσες τιμές θερμοκρασίας ανά μήνα. Οι θετικές τιμές δείχνουν ότι ο σταθμός Γερμανού ήταν θερμότερος από τον σταθμό Παραλία, ενώ οι αρνητικές ότι στον σταθμό Παραλία είχαμε υψηλότερες θερμοκρασίες.

Μήνας	Κοινές έγκυρες ώρες	Μέση Τ Γερμανού (°C)	Μέση Τ Παραλίας (°C)	Μέση ένταση ΔΤ (°C)
Ιανουάριος	136	10,1	6	4,1
Φεβρουάριος	266	9,5	4,6	4,8
Μάρτιος	687	12,6	8,3	4,3
Απρίλιος	527	15,4	11,8	3,6
Μάιος	738	18,6	15,2	3,4
Ιούνιος	648	25,6	21,2	4,4
Ιούλιος	368	26,8	23	3,8
Αύγουστος	532	26,9	22,7	4,1
Σεπτέμβριος	487	23,6	21,6	1,9
Οκτώβριος	140	17,4	16,5	0,9
Νοέμβριος	706	14,7	15,6	-0,9
Δεκέμβριος	732	11,1	11,9	-0,8

Πίνακας 9 Ένταση ΑΘΝ ανά μήνα στην Πόλη της Πάτρας

Οι τιμές του δείκτη εκφράζουν τη διαφορά των μέσων θερμοκρασιών μεταξύ του σταθμού Γερμανού και του σταθμού Παραλία για τους αντίστοιχους μήνες του 2025 και, επομένως, αφορούν αποκλειστικά αυτή τη σύγκριση των δύο θέσεων. Τα βασικά συμπεράσματα συνοψίζονται ως ακολούθως:

- Η μεγαλύτερη μέση διαφορά εμφανίζεται τον **Φεβρουάριο**, με **+4,8 °C** στον σταθμό Γερμανού.
- Ακολουθούν ο **Ιούνιος** με **+4,4 °C** και ο **Μάρτιος** με **+4,3 °C**.
- Από Ιανουάριο έως και Οκτώβριο, η μέση διαφορά είναι θετική, δηλαδή ο σταθμός Γερμανού είναι θερμότερός από τον σταθμό Παραλία.
- Τον **Νοέμβριο** και τον **Δεκέμβριο** η μέση διαφορά αντιστρέφεται : στον σταθμό Παραλία έχουμε υψηλότερες θερμοκρασίες κατά **0,9 °C** και **0,8 °C**, αντίστοιχα.
- Οι μήνες Οκτώβριος και Ιανουάριος έχουν σχετικά λίγες κοινές μετρήσεις, 140 και 136 ώρες αντίστοιχα, οπότε χρειάζεται μεγαλύτερη επιφύλαξη στην ερμηνεία τους.

Στη σύγκριση μεταξύ του σταθμού Γερμανού και του σταθμού Παραλία, οι μηνιαίες μέσες τιμές του δείκτη UHI είναι θετικές από Ιανουάριο έως Οκτώβριο ενώ για Νοέμβριο και Δεκέμβριο παρατηρούνται αρνητικές τιμές. Τα διαθέσιμα δεδομένα θερμοκρασίας από τους δύο επιφανειακούς σταθμούς, Γερμανού και Παραλίας, δεν επαρκούν για την τεκμηρίωση κατακόρυφης θερμοκρασιακής αναστροφής. Η θερμοκρασιακή αναστροφή αποτελεί κατακόρυφο ατμοσφαιρικό φαινόμενο, κατά το οποίο η θερμοκρασία αυξάνεται με το ύψος, και η διερεύνησή της προϋποθέτει ταυτόχρονες μετρήσεις θερμοκρασίας σε διαφορετικά υψόμετρα ή την ύπαρξη κατακόρυφου θερμοκρασιακού προφίλ. Συνεπώς, η σύγκριση δύο σταθμών που βρίσκονται σε διαφορετικές οριζόντιες θέσεις αποδίδει τη χωρική θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ δύο τοπικών μικροκλιμάτων και όχι την κατακόρυφη θερμοβαθμίδα της ατμόσφαιρας.

Αντίστοιχα, τα δεδομένα δεν επιτρέπουν από μόνα τους την οριστική επιβεβαίωση εμφάνισης Αστικής Ψυχρής Νησίδας. Μια τέτοια ερμηνεία θα απαιτούσε τεκμηρίωση της αντιπροσωπευτικότητας της Γερμανού ως αστικής θέσης και της Παραλίας ως κατάλληλης θέσης αναφοράς, καθώς και έλεγχο παραγόντων όπως η τοπογραφία, το υψόμετρο, η απόσταση από τη θάλασσα, η κάλυψη γης, η σκίαση, ο αερισμός και η εγκατάσταση των αισθητήρων. Αρνητικές τιμές της διαφοράς δείχνουν ότι ο σταθμός Παραλία ήταν θερμότερος από τον σταθμό Γερμανού στις αντίστοιχες χρονικές στιγμές, χωρίς όμως αυτό να αποδεικνύει αυτομάτως την ύπαρξη Αστικής Ψυχρής Νησίδας.

Σύμφωνα με τον Tawrat (2025), σε μελέτη περίπτωσης στο Ντουμπάι, η εμφάνιση φαινομένων τοπικής μείωσης της θερμοκρασίας συνδέεται με την εφαρμογή βιώσιμων πρακτικών αστικού σχεδιασμού, όπως η χρήση πράσινων υποδομών, υλικών υψηλής ανακλαστικότητας, σκίασης και καινοτόμων αρχιτεκτονικών λύσεων. Ωστόσο, η εργασία αυτή αφορά το Ντουμπάι και δεν αποτελεί άμεση τεκμηρίωση για την Πάτρα. Επιπλέον, στην παρούσα έρευνα δεν έχουν αναλυθεί ειδικά στοιχεία βιώσιμου σχεδιασμού στις θέσεις των σταθμών· συνεπώς, η πιθανή συμβολή τους μπορεί να αναφερθεί μόνο ως ερμηνευτική υπόθεση και όχι ως βέβαιη αιτία των παρατηρούμενων διαφορών.

Όπως προαναφέρθηκε, τα συμπεράσματα της παρούσας ανάλυσης αφορούν τις τέσσερις συγκεκριμένες θέσεις μέτρησης και το έτος 2025. Η χωρική κάλυψη από τέσσερις σταθμούς και η χρονική κάλυψη ενός μόνο έτους δεν επιτρέπουν γενίκευση των ευρημάτων για το σύνολο της πόλης της Πάτρας ή για όλες τις χρονικές περιόδους. Για ισχυρότερη τεκμηρίωση απαιτούνται δεδομένα από περισσότερες θέσεις και από περισσότερα έτη, καθώς και

αναλυτικότερη διερεύνηση των τοπικών γεωγραφικών, μετεωρολογικών και πολεοδομικών παραγόντων.

Τέλος υπολογίσθηκε και το ετήσιο μέσο της έντασης μεταξύ Γερμανού και Παραλίας για το 2025. Χρησιμοποιήθηκαν 5.967 ταυτόχρονες έγκυρες ωριαίες μετρήσεις και προέκυψε το παρακάτω αποτέλεσμα:

$$\overline{U_{HII}}_{2025} = \frac{1}{5967} \sum_{i=1}^{5967} (T_{\text{Γερμανού},i} - T_{\text{Παραλίας},i}) = +2,6 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Η μέση ετήσια θερμοκρασία, χρησιμοποιώντας μόνο τις ίδιες κοινές έγκυρες ωριαίες εγγραφές, ήταν:

Σταθμός	Μέση ετήσια θερμοκρασία
Γερμανού	17,8 °C
Παραλία	15,2 °C
Ετήσια μέση ένταση U _{HII}	+2,6 °C

Πίνακας 10 Μέση ετήσια U_{HII} μεταξύ σταθμού Γερμανού και Παραλίας

Συνεπώς, για το έτος 2025, η ετήσια μέση ένταση της θερμοκρασιακής διαφοράς μεταξύ των σταθμών Γερμανού και Παραλίας υπολογίσθηκε σε +2,6 °C . Η θετική τιμή υποδεικνύει ότι ο σταθμός Γερμανού κατέγραψε, κατά μέσο όρο, υψηλότερες θερμοκρασίες από τον σταθμό Παραλία στις κοινές διαθέσιμες ωριαίες παρατηρήσεις.

5.7 Συζήτηση

Τα αποτελέσματα αναδεικνύουν σημαντική μικροκλιματική διαφοροποίηση μεταξύ των τεσσάρων θέσεων μέτρησης. Ο σταθμός Γερμανού παρουσίασε υψηλότερες μέσες θερμοκρασίες ημέρας και νύχτας, καθώς και μεγαλύτερο ημερήσιο θερμοκρασιακό εύρος, σε σχέση με τους υπόλοιπους σταθμούς. Το εύρημα αυτό συμφωνεί μόνο εν μέρει με το κλασικό θεωρητικό πρότυπο της ΑΘΝ, σύμφωνα με το οποίο οι περισσότερο αστικοποιημένες περιοχές εμφανίζουν συνήθως υψηλότερες θερμοκρασίες, ιδίως κατά τη διάρκεια της νύχτας, και συχνά μικρότερο ημερήσιο θερμοκρασιακό εύρος. Στην παρούσα μελέτη, η υψηλή ημερήσια

θερμοκρασία του Γερμανού είναι συμβατή με το πρότυπο της ΑΘΝ, αλλά το αυξημένο εύρος ημέρας–νύχτας διαφοροποιείται από την αρχική θεωρητική προσδοκία.

Η παρατηρούμενη διαφοροποίηση ενδέχεται να σχετίζεται με συνδυασμό τοπικών παραγόντων. Η επιφανειακή κάλυψη, η πυκνότητα της δόμησης, η σκίαση, η κυκλοφορία του αέρα, το υψόμετρο, η τοπογραφία και η απόσταση από τη θάλασσα μπορούν να επηρεάζουν τη θερμοκρασία σε μικρή χωρική κλίμακα. Ειδικότερα, η θέση του σταθμού Γερμανού στην Άνω Πόλη και η υψομετρική/τοπογραφική του διαφοροποίηση ενδέχεται να επηρεάζουν τον νυχτερινό αερισμό και την ψύξη. Η ερμηνεία αυτή παραμένει υποθετική, καθώς οι συγκεκριμένοι παράγοντες δεν μετρήθηκαν άμεσα στην παρούσα ανάλυση.

Η συμπεριφορά του σταθμού Παραλία υποδηλώνει ότι η παράκτια θέση μπορεί σε ορισμένες περιόδους να επηρεάζει τις νυχτερινές θερμοκρασίες. Η υψηλή θερμοχωρητικότητα και η θερμική αδράνεια της θάλασσας μπορούν γενικότερα να συμβάλλουν στη διατήρηση σχετικά υψηλότερων νυχτερινών θερμοκρασιών σε παράκτιες περιοχές, ιδιαίτερα κατά το φθινόπωρο, όταν η θερμοκρασία του θαλάσσιου νερού παραμένει υψηλή. Ωστόσο, η συγκεκριμένη επίδραση δεν μετρήθηκε άμεσα και απαιτεί πρόσθετη διερεύνηση με δεδομένα ανέμου, υγρασίας, θερμοκρασίας θαλάσσιας επιφάνειας και λεπτομερέστερη χωρική καταγραφή των τοπικών χαρακτηριστικών.

Ο υπολογισμένος δείκτης έντασης της ΑΘΝ εκφράζει τη σχετική θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ των συγκεκριμένων σταθμών Γερμανού και Παραλίας και δεν αποτελεί άμεση μέτρηση της έντασης της ΑΘΝ για το σύνολο της πόλης. Οι αρνητικές νυχτερινές τιμές, δείχνουν ότι Παραλία ήταν θερμότερη από τον Γερμανού στις αντίστοιχες περιόδους. Το εύρημα αυτό δεν τεκμηριώνει κατακόρυφη θερμοκρασιακή αναστροφή ούτε επιτρέπει από μόνο του οριστικό χαρακτηρισμό Αστικής Ψυχρής Νησίδας.

5.8 Περιορισμοί της μελέτης

Η παρούσα μελέτη υπόκειται σε ορισμένους περιορισμούς που πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά την ερμηνεία των ευρημάτων. Πρώτον, η ανάλυση βασίστηκε σε τέσσερις μόνο σταθμούς, οι οποίοι αντιπροσωπεύουν συγκεκριμένες θέσεις μέτρησης και δεν καλύπτουν πλήρως τη χωρική ετερογένεια του μικροκλίματος της Πάτρας. Δεύτερον, τα δεδομένα αφορούν ένα μόνο έτος, το 2025, και συνεπώς δεν είναι δυνατόν να εκτιμηθεί η διαχρονική σταθερότητα των

παρατηρούμενων μοτίβων ή η επίδραση διαφορετικών κλιματικών συνθηκών από έτος σε έτος. Τρίτον, καταγράφηκαν απώλειες δεδομένων σε ορισμένες ημέρες και ώρες, οι οποίες, αν και δεν φαίνεται να μεταβάλλουν ουσιαστικά τη γενική εικόνα, αποτελούν παράγοντα αβεβαιότητας. Τέταρτον, δεν μετρήθηκαν άμεσα σημαντικοί τοπικοί παράγοντες, όπως η ταχύτητα και διεύθυνση του ανέμου, η υγρασία, η νεφοκάλυψη, η σκίαση, η επιφανειακή κάλυψη, η πυκνότητα δόμησης, η παρουσία βλάστησης και οι ανθρωπογενείς εκπομπές θερμότητας. Επομένως, οι αιτιώδεις ερμηνείες για τις διαφορές μεταξύ των σταθμών πρέπει να αντιμετωπίζονται ως υποθέσεις που απαιτούν περαιτέρω διερεύνηση.

5.9 Συμπεράσματα και προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Η μελέτη κατέγραψε σημαντικές διαφοροποιήσεις της θερμοκρασίας μεταξύ των τεσσάρων θέσεων μέτρησης στην Πάτρα κατά το 2025. Ο σταθμός Γερμανού παρουσίασε τις υψηλότερες μέσες θερμοκρασίες ημέρας και νύχτας, καθώς και το μεγαλύτερο ημερήσιο θερμοκρασιακό εύρος, ενώ οι σταθμοί Παραλία και Τριών Ναυάρχων εμφάνισαν γενικά μικρότερα εύρη και το Ρίο ενδιάμεσες τιμές. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η εποχικότητα επηρεάζει έντονα τις απόλυτες θερμοκρασίες και ότι οι διαφορές μεταξύ των σταθμών μεταβάλλονται ανάλογα με την εποχή και την περίοδο της ημέρας. Η εικόνα αυτή υποστηρίζει την ύπαρξη μικροκλιματικής διαφοροποίησης στις συγκεκριμένες θέσεις, χωρίς όμως να επιτρέπει γενικεύσεις για το σύνολο της Πάτρας.

Μελλοντική έρευνα θα μπορούσε να επεκτείνει το δίκτυο μέτρησης σε περισσότερες αστικές, περιαστικές και παράκτιες θέσεις και να καλύψει περισσότερα έτη. Επιπλέον, θα ήταν χρήσιμη η ταυτόχρονη καταγραφή μετεωρολογικών και μορφολογικών παραμέτρων, όπως άνεμος, υγρασία, νεφοκάλυψη, υψόμετρο, βλάστηση, σκίαση, πυκνότητα δόμησης και υλικά επιφανειών. Η χρήση τυποποιημένης ταξινόμησης των θέσεων, όπως οι Τοπικές Κλιματικές Ζώνες, καθώς και ο υπολογισμός του δείκτη έντασης της ΑΘΝ με τεκμηριωμένη επιλογή σταθμών αναφοράς, θα ενίσχυαν την αξιοπιστία και τη συγκρισιμότητα των μελλοντικών αποτελεσμάτων.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Kolokotroni, M., & Giridharan, R. (2008). Urban heat island intensity in London: An investigation of the impact of physical characteristics on changes in outdoor air temperature during summer. *Solar Energy*, 82, 986–998.

Oke, T. R. (1982). The energetic basis of the urban heat island. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 108(455), 1–24.

Arifwidodo, S. D., Abdulharis, R., & Kubota, T. (2016). *Understanding urban heat island effect and its implications to climate change adaptation strategies in major Southeast Asian cities* (CAF2016-RR12-CMY-Arifwidodo, Final Technical Report). Asia-Pacific Network for Global Change Research. <https://www.apn-gcr.org/wp-content/uploads/2020/09/bca1fac6f3e698096c445f3133a23f70.pdf>

Stull, R. B. (1988). *An introduction to boundary layer meteorology*. Kluwer Academic Publishers. https://ftp.soest.hawaii.edu/kelvin/OCN665/OCN665_full/An+Introduction+to+Boundary+Layer+Meteor.pdf

U.S. Environmental Protection Agency (EPA). (n.d.). *What are heat islands?* <https://www.epa.gov/heatlands/what-are-heat-islands>

Cichowicz, R., & Bochenek, A. D. (2024). *Assessing the effects of urban heat islands and air pollution on human quality of life*. *Anthropocene*, 46, 100433. <https://doi.org/10.1016/j.ancene.2024.100433>

Whan, K. (2019). *Urban heat island (UHI)* [Course lecture notes]. University of Colorado. https://atoc.colorado.edu/~whan/ATOC4800_5000/Materials/UHI_2019.pdf

Yang, Q., Xu, Y., Chakraborty, T., Du, M., Hu, T., & Zhang, L. (2024). A global urban heat island intensity dataset: Generation, comparison, and analysis. *Remote Sensing of Environment*, 312, 114343. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2024.114343>

Tzavali, A., Paravantis, J. P., Mihalakakou, G., Fotiadi, A., & Stigka, E. (2015). *Urban Heat Island Intensity: A Literature Review. Fresenius Environmental Bulletin*, 24(12b), 4537–4554.

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), 1–26. <https://doi.org/10.1002/joc.859>

Harde, H. (2013). Radiation and heat transfer in the atmosphere: A comprehensive approach on a molecular basis. *International Journal of Atmospheric Sciences*, 2013, 503727. <https://doi.org/10.1155/2013/503727>

Παυλάκης, Κ. (χ.χ.). *Ενεργειακό ισοζύγιο του πλανήτη και κλιματικές αλλαγές*. https://elke.hmu.gr/LinkClick.aspx?fileticket=wM7Zu_IbE38%3D&tabid=893

National Council of Educational Research and Training (NCERT). (2006). *Fundamentals of physical geography* (Class XI Geography textbook, Unit: Atmosphere). NCERT. <https://ncert.nic.in/textbook/pdf/kegy208.pdf>

Δαλέζιος, Ν. (2015). *Γεωργική μικρομετεωρολογία* [Κεφάλαιο]. Στο Ν. Δαλέζιος, *Αγρομετεωρολογία* [Προπτυχιακό εγχειρίδιο]. Κάλλιπος, Ανοικτές Ακαδημαϊκές Εκδόσεις. <https://hdl.handle.net/11419/3732>

National Aeronautics and Space Administration. (n.d.). Climate and Earth's energy budget. NASA Earth Observatory. <https://science.nasa.gov/earth/earth-observatory/climate-and-earths-energy-budget/>

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2021). *Climate change 2021: The physical science basis. Chapter 7: Earth's energy budget, climate feedbacks and climate sensitivity*. In V. Masson-Delmotte et al. (Eds.), *Sixth Assessment Report (AR6), Working Group I*. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/chapter/chapter-7/>

Bousse, Y. S. (2009). *Mitigating the urban heat island effect with an intensive green roof during summer in Reading, UK* [Master's dissertation, University of Reading]. Reading

International Solidarity Centre. <https://risc.org.uk/wp-content/uploads/2024/10/permaculture-yannick-bousse-dissertation.pdf>

Hellenic National Meteorological Service (HNMS). (n.d.). *Climatology*. <https://newportal.hnms.gr/emv/el/climatology/climatology>

Wiseman, T. (2025). *Urban heat island effect vs. rural climate effect: Understanding key differences in climate change*. GardenDif. <https://gardendif.com/climate/urban-heat-island-effect-vs-rural-climate-effect>

American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE). (2023). *ANSI/ASHRAE standard 55-2023: Thermal environmental conditions for human occupancy*. ASHRAE.

Nuruzzaman, M. (2015). *Urban heat island: Causes, effects and mitigation measures – A review*. *International Journal of Environmental Monitoring and Analysis*, 3(2), 67–73. <https://doi.org/10.11648/j.ijema.20150302.15>

Lopez-Cabeza, V. P., Alzate-Gaviria, S., Diz-Mellado, E., Rivera-Gomez, C., & Galan-Marin, C. (2022). *Albedo influence on the microclimate and thermal comfort of courtyards under Mediterranean hot summer climate conditions*. *Sustainable Cities and Society*, 81, 103872. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.103872>

Ampatzidis, P., & Kershaw, T. (2020). *A review of the impact of blue space on the urban microclimate*. *Science of the Total Environment*, 750, 139068. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139068>

Yang, X., Zhao, L., Bruse, M., & Meng, Q. (2013). *Evaluation of a microclimate model for predicting the thermal behavior of different ground surfaces*. *Building and Environment*, 60, 93–104. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.11.008>

Salata, F., Golasi, I., De Lieto Vollaro, A., & De Lieto Vollaro, R. (2015). *How high albedo and traditional buildings' materials and vegetation affect the quality of urban microclimate: A case study. Energy and Buildings*, 99, 32–49. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.04.010>

Louiza, H., Zéroutal, A., & Djamel, H. (2015). *Impact of transport on the urban heat island. International Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 5(3), 252–263. <https://doi.org/10.5281/zenodo.1108334>

Stewart, I. D., & Oke, T. R. (2012). *Local climate zones for urban temperature studies. Bulletin of the American Meteorological Society*, 93(12), 1879–1900. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00019.1>

Rizwan, A. M., Dennis, L. Y. C., & Liu, C. (2008). *A review on the generation, determination and mitigation of urban heat island. Journal of Environmental Sciences*, 20, 120–128. [https://doi.org/10.1016/S1001-0742\(08\)60019-4](https://doi.org/10.1016/S1001-0742(08)60019-4)

Sobstyl, J. M., Emig, T., Abdolhosseini Qomi, M. J., Pellenq, R. J.-M., & Ulm, F.-J. (2015). *Role of structural morphology in urban heat islands. Journal of Sustainable Building Technology and Urban Development*, 6(3), 172–186. <https://doi.org/10.1080/2093761X.2015.1075353>

Bittencourt, L., & Candido, C. (2010). *Air movement acceptability limits and thermal comfort in Brazil's hot humid climate zone. Building and Environment*, 45(1), 222–229. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.06.005>

Saadallah, D. M. (2018). *Modelling the interactions between urban heat island and urban geometry. BAU Journal: Health & Well-Being*.

Ruddell, D. (2019). *The urban heat island effect and sustainability science: Causes, impacts, and solutions*. University of Southern California. <https://sustainabilitysolutions.usc.edu/wp-content/uploads/2019/04/The-Urban-Heat-Island-Effect-and-Sustainability-Science-Causes-Impacts-and-Solutions-Ruddell-Darren.pdf>

Jabbar, H. K., Hamoodi, M. N., & Al-Hameedawi, A. N. (2023). Urban heat islands: A review of contributing factors, effects and data. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1129(1), 012038. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1129/1/012038>

Fan J., Chen X., Zhang W., Zhao M., & Yang X., (2025). Comparison of mediating effects of air pollutants on urban morphology and urban heat island intensity at block scale. *Scientific Reports*, 15(1), 18433.

U.S. Environmental Protection Agency. (2008). *Reducing urban heat islands: Compendium of strategies*. <https://www.epa.gov/heat-islands/heat-island-compendium>

Ritter, M. E. (2007). *The physical environment: An introduction to physical geography*. <https://www.e-booksdirectory.com/details.php?ebook=1502> Cancino K., (2010). *The urban heat island: Causes and effects – Focusing on urban forestry as a key mitigation strategy*. University of British Columbia, Faculty of Forestry.

Rosenzweig C., Solecki W., & Slosberg R., (2006). *Mitigating New York City's heat island effect with urban forestry, living roofs and light surfaces*. New York City Regional Heat Island Initiative, Final Report 06-06. New York State Energy Research and Development Authority.

Ghoniem, M., Fahmy, A., & Kamel, T. M. (2025). Evaluating urban surface materials: Albedo optimization and shading for pedestrian thermal comfort in hot-arid environments. *Civil Engineering and Architecture*, 13(6), 4331–4352. <https://doi.org/10.13189/cea.2025.130616>

Keller HCW., (2010). *Emissivity: Definition and influence in non-contact temperature measurement* (pp. 1–3). In *Industrial measurement guide: System and automation for temperature, humidity and weight*. Keller HCW.

Beardmore, R. (2010). *Designing engineers' reference*. RoyMech. <https://www.roymech.co.uk/>
U.S. Environmental Protection Agency. (n.d.). Benefits of trees and vegetation. <https://www.epa.gov/heatislands/benefits-trees-and-vegetation>

Akbari H., Pomerantz M., & 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. [https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(00\)00089-X](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(00)00089-X)

Campbell Scientific, Inc., (n.d.). *Bowen ratio instrumentation manual*. <https://s.campbellsci.com/documents/au/manuals/bowen.pdf>

Wong N. H., & Yu C., (2005). Study of green areas and urban heat island in a tropical city. *Habitat International*, 29(3), 547–558. <https://doi.org/10.1016/j.habitatint.2004.04.008>

Mohammed H., & Mohammed S. H., (n.d.). *Role of urban forests in mitigating the urban heat island effect: A comprehensive review*. In *Advances in Geographical Research* (ISBN: 978-93-94819-25-2). Forest Research Institute & National Institute of Advanced Studies.

Heaviside C., Macintyre H., & Vardoulakis S., (2017). The urban heat island: Implications for health in a changing environment. In M. J. Nieuwenhuijsen & A. J. de Nazelle (Eds.), *Built environment and health*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/s40572-017-0150-3>

Tong, S., Prior, J., McGregor, G., Shi, X., & Kinney, P. (2021). Urban heat: An increasing threat to global health. *BMJ*, 375, n2467. <https://doi.org/10.1136/bmj.n2467>

Ελληνικό Ινστιτούτο Υγιεινής και Ασφάλειας της Εργασίας (ΕΛΙΝΥΑΕ). (n.d.). *Θερμική καταπόνηση*. <https://www.elinyae.gr/themata-yae/thermiki-kataponis>

Heaviside C., (2020). *Urban heat islands and their associated impacts on health* (Accepted manuscript). UCL Discovery. <https://discovery.ucl.ac.uk/id/eprint/10106446/>

Shi, H., Xian, G., Auch, R. F., Gallo, K., & Zhou, Q. (2021). Urban heat island and its regional impacts using remotely sensed thermal data: A review of recent developments and methodology. *Land*, 10(8), 867. <https://doi.org/10.3390/land10080867>

Obradovich N., Migliorini R., Mednick S. C., & Fowler J. H., (2017). Nighttime temperature and human sleep loss in a changing climate. *Science Advances*, 3(5), e1601555. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1601555>

Sustainability Directory. (n.d.). *What are the health impacts of urban heat islands (UHI)?* Climate Sustainability Directory. <https://climate.sustainability-directory.com/question/what-are-the-health-impacts-of-uhi/>

Polidori C., Ferrari A., Ronchetti F., Tommasi N., & Nalini E., (2023). Warming up through buildings and roads: what we know and should know about the urban heat island effect on bees. *Frontiers in Bee Science*, 1, 1269600. <https://doi.org/10.3389/frbee.2023.1269600>

MyGeoQuest. (n.d.). *Urban heat island effect: Impact on water*. <https://www.mygeoquest.com/urban-heat-island-effect-impact-on-water/>

Harper P., (2024). Thermal pollution: Causes, effects, and management techniques for environmental conservation. *Journal of Industrial Pollution Control*. <https://doi.org/10.4172/0970-2083.007>

Abdullah, A. J. (2024). Human activities and their impact on the city's climate (Hillah city as a model). *International Journal of Geography, Geology and Environment*, 6(2), 250–259.

Rosenzweig C., Solecki W., Romero-Lankao P., Mehrotra S., Dhakal S., & Ali Ibrahim S., (Eds.). (2018). *Urban climate science*. In *Climate change and cities: Second assessment report of the Urban Climate Change Research Network (ARC3.2)*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781316563878.009>

Imran H. M., Shammass M. I., Rahman A., Jacobs S. J., & Ng A., (2022). Understanding urban heat island effect: Causes, impacts, factors, and strategies for better livability and climate change mitigation and adaptation. *International Journal of Geography, Geology and Environment*, 4(1), 202–205.

López, M., & Pérez, I. (2022). Impact of urban heat islands on local climate patterns. *International Journal of Geography, Geology and Environment*, 4(1), 202–205. <https://www.geojournal.net/uploads/archives/6-2-4-570.pdf>

Bader, D. A., Blake, R., Grimm, A., Hamdi, R., Kim, Y., Horton, R., Rosenzweig, C., Alverson, K., Gaffin, S., & Crane, S. (2018). Urban climate science. In C. Rosenzweig, W. D. Solecki, P. Romero-Lankao, S. Mehrotra, S. Dhakal, & S. A. Ibrahim (Eds.), *Climate change and cities: Second assessment report of the Urban Climate Change Research Network (ARC3.2)* (pp. 27–60). Cambridge University Press. <https://uccrn.ei.columbia.edu/sites/uccrn.ei.columbia.edu/files/content/pubs/ARC3.2-PDF-Chapter-2-Urban-Climate-Science-compressed.pdf>

Abdullah, S. A., & Hassan, A. S. (2020). Urban heat island mitigation strategies: A review of current approaches. *Energy and Buildings*, 216, 109950. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.109950>

Κατσάμπουλας, Α. (2011). *Η πολεοδομική εξέλιξη της Πάτρας* (Διπλωματική εργασία). Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο. <https://dspace.lib.ntua.gr/xmlui/handle/123456789/4574>

Δήμος Πατρέων. (χ.χ.). *Γεωγραφικά χαρακτηριστικά*. <https://e-patras.gr/el/geografika-haraktiristika>

Zahn, E., Welty, C., Smith, J. A., Kemp, S. J., Baeck, M.-L., & Bou-Zeid, E. (2021). The hydrological urban heat island: Determinants of acute and chronic heat stress in urban streams. *Journal of the American Water Resources Association*, 57(6), 941–955. <https://doi.org/10.1111/1752-1688.12963>

Ministry of Physical Planning, Construction and State Assets. (n.d.). *Handbook on mitigating urban heat island effects*. https://mpgi.gov.hr/UserDocsImages/dokumenti/NPOO/ZIKGP_NPOO/UHI_Handbook.pdf

Ampatzidis, P., Cintolesi, C., & Kershaw, T. (2023). Impact of blue space geometry on urban heat island mitigation. *Climate*, 11(2), 28. <https://doi.org/10.3390/cli11020028>

Chang, H.-S., & Su, Y.-C. (n.d.). *A study on the dual impacts of high-albedo surfaces on building energy performance and urban microclimate in Tainan, Taiwan*. Department of Urban Planning, National Cheng Kung University.

Vizzari, D., Leiva-Padilla, P., & Hu, H. (2025). Cool pavements for the mitigation of urban heat island (UHI): A global perspective. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.1012755>

Falasca, S., Ciancio, V., Salata, F., Golasi, I., Rosso, F., & Curci, G. (2019). High albedo materials to counteract heat waves in cities: An assessment of meteorology, buildings energy needs and pedestrian thermal comfort. *Building and Environment*, 163, 106242. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106242>

Mihalakakou, G., Souliotis, M., Papadaki, M., Menounou, P., Dimopoulos, P., Kolokotsa, D., Paravantis, J. A., Tsangrassoulis, A., Panaras, G., Giannakopoulos, E., & Papaefthimiou, S. (2023). *Green roofs as a nature-based solution for improving urban sustainability: Progress and perspectives*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 180, 113306. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113306>

Talaei, M., & Azari, R. (2024). Smart building skins for urban heat island mitigation: A review. *Journal of Architectural Engineering*, 30(4), 03124005. <https://doi.org/10.1061/JAEEZ.ASENG-4962>

Kotsias, G., Lolis, C. J., Hatzianastassiou, N., Lionello, P., & Bartzokas, A. (2022). *A comparison of different approaches for the definition of seasons in the Mediterranean region*. *International Journal of Climatology*, 42(3), 1954–1974. <https://doi.org/10.1002/joc.7345>

SunriseSunset.org. (n.d.). *Sunrise and sunset times in Municipality of Patras, Achaia Regional Unit, Western Greece, Peloponnese, Western Greece and the Ionian, Greece*. Retrieved August 30, 2026, from <https://sunrise-sunset.org/search?location=Patras%2C%20Greece%26year=2025%26month=12>

U.S. Naval Observatory, Astronomical Applications Department. (n.d.). *Rise, set, and twilight definitions*. Retrieved August 30, 2026, from https://aa.usno.navy.mil/faq/RST_defs

Houpert, L., Testor, P., Durrieu de Madron, X., Somot, S., D’Ortenzio, F., Estournel, C., & Lavigne, H. (2015). *Seasonal cycle of the mixed layer, the seasonal thermocline and the upper-ocean heat storage rate in the Mediterranean Sea derived from observations*. *Progress in Oceanography*, 132, 333–352. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2014.11.004>

Tawrat, M. R. (2025). *Urban Cool Island effect through innovative architecture and sustainable urban design*. *Renewable and Sustainable Energy Transition*, 8, 100123. <https://doi.org/10.1016/j.rset.2025.100123>

Υπεύθυνη Δήλωση Συγγραφέα:

Δηλώνω ρητά ότι, σύμφωνα με το άρθρο 8 του Ν.1599/1986, η παρούσα εργασία αποτελεί αποκλειστικά προϊόν προσωπικής μου εργασίας, δεν προσβάλλει κάθε μορφής δικαιώματα διανοητικής ιδιοκτησίας, προσωπικότητας και προσωπικών δεδομένων τρίτων, δεν περιέχει έργα/εισφορές τρίτων για τα οποία απαιτείται άδεια των δημιουργών/δικαιούχων και δεν είναι προϊόν μερικής ή ολικής αντιγραφής, οι πηγές δε που χρησιμοποιήθηκαν περιορίζονται στις βιβλιογραφικές αναφορές και μόνον και πληρούν τους κανόνες της επιστημονικής παράθεσης.