Οι Κλιματικοί Κίνδυνοι Στις Ελληνικές Πόλεις

2026

Αποτύπωση της παρούσας κατάστασης και προβλέψεις για το μέλλον

DIMAND
REAL ESTATE DEVELOPMENT



Μια έρευνα της 1830 lab για την DIMAND S.A.

Υλοποίηση:
Ηλίας Αγαθαγγελίδης, Μεταδιδακτορικός Ερευνητής, ΕΚΠΑ
Κωνσταντίνος Καρτάλης, Καθηγητής, ΕΚΠΑ
Μελιτίνη Οικονόμου, Φυσικός
Αναστάσιος Πολύδωρος, Ερευνητής, ΕΚΠΑ
Η 1830 lab δεν χρησιμοποιεί εργαλεία AI για την εκπόνηση των μελετών της.
Το κείμενο που διαβάζετε έχει γραφτεί από ανθρώπους.

Εκδοση: 01-21012026

Περιεχόμενα

		Εισαγωγή μελέτης	8
		ΜΕΡΟΣ Ι - Το θερμικό αποτύπωμα των ελληνικών πόλεων	10
[1.0]		Το κλίμα των πόλεων	11
[2.0]		Η θερμική υπογραφή της πόλης	13
[2.1]		Αστική μορφολογία και λειτουργία	13
[2.2]		Ύψος δόμησης και γεωμετρία αστικού χώρου	13
[2.3]		Ανθρωπογενείς πηγές θερμότητας	18
[2.4]		Κάλυψη γης, αστικές τυπολογίες και τοπικά κλίματα	22
[3.0]		Μικροκλιματική ανάλυση στην πράξη: Προσομοιώσεις και σενάρια αστικών παρεμβάσεων	27
[3.1]		Εισαγωγή	27
[3.2]		Περιοχές μελέτης	28
[3.3]		Σενάρια παρεμβάσεων και αστικές αναπλάσεις	29
	[3.3.1]	Πλατεία Ομονοίας	29
	[3.3.2]	Πλατεία Κοτζιά	31
	[3.3.3]	Άγιος Διονύσιος Πειραιά	32
	[3.3.4]	Μαρούσι (ΤΕΕ)	34
	[3.3.5]	Δυτική Είσοδος Θεσσαλονίκη (ΦΙΞ)	35
	[3.3.6]	Γκύζη	36
[4.0]		Συμπεράσματα	38
		ΜΕΡΟΣ ΙΙ - Προβλέψεις κλιματικών κινδύνων για Αθήνα, Θεσσαλονίκη και Γούρνες Ηρακλείου	40
[1.0]		Εισαγωγή	41
[2.0]		Στοιχεία κλίματος-μικροκλίματος και προβλημάτων (κλιματικοί κίνδυνοι) που οφείλονται στην κλιματική αλλαγή κατά την παρούσα και μελλοντική περίοδο	4
[2.1]		Ιστορική περίοδος	3
	[2.1.1]	ΑΘΗΝΑ	4
	[2.1.2]	ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ	4
	[2.1.3]	ΓΟΎΡΝΕΣ	4
[2.2]		Προβλέψεις μελλοντικής περιόδου	5
	[2.2.1]	ΑΘΗΝΑ	5
	[2.2.2]	ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ	1
	[2.2.3]	ΓΟΎΡΝΕΣ	5
[2.3]		Αξιολόγηση ακραίων κλιματικών συνθηκών	7
			6
			3
			6
			4

[3.0]	Γεωγραφική φυσιογνωμία και κλίμα – κλιματική αλλαγή	91
	ΑΘΗΝΑ	92
[3.1.1]	Γεωμορφολογία και τοπογραφία	93
	ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ	102
[3.1.2]	Γεωμορφολογία και τοπογραφία	104
	ΓΟΎΡΝΕΣ	112
[4.1]	Μορφολογικά δεδομένα	112
[4.1.1]	Αξιολόγηση τρωτότητας αστικών περιοχών σε θερμική καταπόνηση	119
[3.1.3]	Μεθοδολογικό πλαίσιο και ρόλος των δεικτών	119
[4.1.2]	Παράμετροι που επηρεάζουν την αστική τρωτότητα	120
[4.1.3]	Κανονικοποίηση μεταβλητών και δημιουργία σύνθετου δείκτη	120
	Τρωτότητα στις περιοχές ενδιαφέροντος	121
[4.2]	ΑΘΗΝΑ	121
[4.1.4]	ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ	124
	Αξιολόγηση τρωτότητας της περιοχής των Γουρνών λόγω κλιματικών κινδύνων	125
[4.2.1]	Δασική πυρκαγιά	126
[4.2.2]	Πλημμύρα	131
[4.2.3]	Ξηρασία	135
[4.2.4]	Καύσωνες	139
	Βιβλιογραφία 1ου μέρους	145
	Βιβλιογραφία 2ου μέρους	145
	Κατάλογος πινάκων 1ου μέρους	147
	Κατάλογος σχημάτων 1ου μέρους	147
	Κατάλογος πινάκων 2ου μέρους	149
	Κατάλογος σχημάτων και εικόνων 2ου μέρους	149



ΕΙΣΑΓΩΓΉ ΜΕΛΕΤΉΣ

Ηεταιρεία ερευνών 1830 lab, σεσυνεργασία με την πανεπιστημιακή ομάδα του καθηγητή Κωνσταντίνου Καρτάλη, του τμήματος Φυσικής Περιβάλλοντος και Κλίματος του Εθνικού και Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών (ΕΚΠΑ), εκπόνησε μια έρευνα για το υφιστάμενο κλιματικό αποτύπωμα και τους μελλοντικούς κλιματικούς κινδύνους που αντιμετωπίζουν συγκεκριμένες περιοχές της Ελλάδας (σε Αθήνα, Θεσσαλονίκη και Γούρνες Ηρακλείου) για λογαριασμό της εταιρείας ανάπτυξης ακινήτων Dimand.

Στο ΜΕΡΟΣ Ι αναπτύσσεται η υφιστάμενη κλιματική κατάσταση στην Αθήνα και τη Θεσσαλονίκη, με έμφαση στον αντίκτυπο της γεωμορφολογίας κάθε πόλης, της δόμησης, της ανθρώπινης δραστηριότητας και της παρουσία βλάστησης και υδάτινων πόρων στην ανάπτυξη της αστικής θερμικής νησίδας. Επίσης, εξετάζεται λεπτομερώς το μικροκλίμα έξι σημείων στην Αθήνα και στη Θεσσαλονίκη, και με τη βοήθεια προσομοιώσεων διατυπώνονται πρακτικές προτάσεις παρεμβάσεων για την άμβλυνση της μικροκλιματικής πίεσης στις συγκεκριμένες περιοχές.

Στο ΜΕΡΟΣ ΙΙ παρατίθεται η εξέλιξη της κλιματικής μεταβολής στην Αθήνα, στη Θεσσαλονίκη και στις Γούρνες Ηρακλείου σε ένα ιστορικό βάθος πρόσφατων δεκαετιών – από το 1971 ως το 2022 (πιο πρόσφατα στοιχεία). Μετέπειτα παρουσιάζονται προβλέψεις κλιματικού κινδύνου, έκθεσης και τρωτότητας των τριών αυτών περιοχών με ορίζοντα το 2060, σύμφωνα με προσομοιώσεις που βασίζονται στα σενάρια κλιματικής αλλαγής RCP 4.5 (μετριοπαθές) και RCP 8.5 (δυσμενές) της Διακυβερνητικής Επιτροπής για την Αλλαγή του Κλίματος του Οργανισμού Ηνωμένων Εθνών.

Συντακτική ομάδα 1ου μέρους

Ηλίας Αγαθαγγελίδης ΕΚΠΑ
Κωνσταντίνος Καρτάλης ΕΚΠΑ
Μελιτίνη Οικονόμου ΕΚΠΑ

Συντακτική ομάδα 2ου μέρους

Αναστάσιος Πολύδωρος ΕΚΠΑ
Κωνσταντίνος Καρτάλης ΕΚΠΑ



ΜΕΡΟΣ Ι
ΤΟ ΘΕΡΜΙΚΟ ΑΠΟΤΎΠΩΜΑ ΤΩΝ ΕΛΛΗΝΙΚΩΝ ΠΟΛΕΩΝ

[1.0] ΤΟ ΚΛΙΜΑ ΤΩΝ ΠΟΛΕΩΝ

Οιθερμοκρασιακές παρατηρήσεις σε παγκόσμια κλίμακα καταδεικνύουν σαφή και συστηματική αύξηση της μέσης θερμοκρασίας του πλανήτη τις τελευταίες δεκαετίες, ως αποτέλεσμα της ανθρώπινης δραστηριότητας. Οι μελλοντικές προβλέψεις των κλιματικών μοντέλων επιβεβαιώνουν αυτή την τάση, μιλώντας για περαιτέρω άνοδο των θερμοκρασιών κατά τον 21ο αιώνα. Παράλληλα, τα ακραία θερμικά φαινόμενα εμφανίζονται ολοένα και συχνότερα, έχουν μεγαλύτερη ένταση και διάρκεια, καθώς και σημαντικές επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία, στα οικοσυστήματα και στην οικονομία.[1] Τα τελευταία έτη η χώρα μας έχει βιώσει πολλούς επαναλαμβανόμενους και παρατεταμένους καύσωνες. Χαρακτηριστικά παραδείγματα αποτελούν οι δύο ιδιαίτερα ισχυροί καύσωνες του 2021, ενώ κατά τα τελευταία τρία καλοκαίρια σημειώθηκαν καύσωνες πολύ μεγάλης διάρκειας και έντασης, με θερμικά επεισόδια που ξεπέρασαν, αρκετές φορές κατά πολύ, τις δέκα συνεχόμενες ημέρες.

Οι πόλεις αποτελούν περιοχές ιδιαίτερα ευάλωτες στις επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής,[2] καθώς παράλληλα εκδηλώνεται σε αυτές το φαινόμενο της «αστικής θερμικής νησίδας», σύμ- φωνα με το οποίο οι αστικές περιοχές παρουσιάζουν κατά κανόνα υψηλότερες θερμοκρασίες σε σχέση με τις γειτονικές αγροτικές ή φυσικές περιοχές.[3] Η αστική θερμική νησίδα οφείλεται σε έναν πολύπλοκο συνδυασμό παραγόντων, όπως η μειωμένη παρουσία βλάστησης και υδάτινων επιφανειών, η αυξημένη απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας από τα υλικά των κτιρίων και του οδοστρώματος, η τρισδιάστατη γεωμετρία της πόλης, που παγιδεύει τη θερμότητα κοντά στην επιφάνεια, καθώς και οι ανθρωπογενείς εκπομπές θερμότητας από την κυκλοφορία οχη- μάτων και τα συστήματα ψύξης των κτιρίων.[4]

Η ένταση του φαινομένου της αστικής θερμικής νησίδας είναι συνήθως μεγαλύτερη κατά τις νυχτερινές ώρες, όταν οι αστικές επιφάνειες ψύχονται βραδύτερα σε σχέση με την ύπαιθρο και, ως εκ τούτου, διατηρούν υψηλές θερμοκρασίες για μεγάλο μέρος της νύχτας. Ωστόσο σε αρκετά τμήματα του αστικού ιστού παρατηρούνται συνθήκες υπερθέρμανσης κυρίως κατά τη διάρκεια της ημέρας, ιδιαίτερα σε περιοχές με έντονη έκθεση στην ηλιακή ακτινοβολία, περιορισμένη βλάστηση ή αυξημένες ανθρωπογενείς πηγές θερμότητας[5].

Η θερμική επιβάρυνση δεν είναι ομοιόμορφη μέσα σε μια πόλη· επηρεάζεται από τις χρήσεις γης, τη μορφολογία, τα υλικά και τη διαθεσιμότητα πρασίνου, οδηγώντας στην εμφάνιση ενδοα- στικών θερμικών νησίδων.[6] Επομένως η κλασική διχοτόμηση «πόλη / ύπαιθρος» θεωρείται σή- μερα σε έναν βαθμό ανεπαρκής, και το ενδιαφέρον στρέφεται πλέον στον εντοπισμό συνοικιών και δρόμων με έντονη θερμική επιβάρυνση στο εσωτερικό της ίδιας της πόλης. Οι συνέπειες ανά περιοχή είναι ποικίλες και σημαντικές: επιδείνωση της θερμικής δυσφορίας, αύξηση της κατανάλωσης ενέργειας για δροσισμό, ενίσχυση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης και τελικά μείωση της ποιότητας ζωής των κατοίκων.[7,8] Οι ευάλωτες κοινωνικές ομάδες, οι ηλικιωμένοι, τα παιδιά και τα άτομα με προβλήματα υγείας πλήττονται περισσότερο, καθώς η έκθεσή τους σε υψηλές θερμοκρασίες αυξάνει τον κίνδυνο θερμικού στρες ή ακόμα και θνησιμότητας.

Οι επιπτώσεις του φαινομένου της αστικής υπερθέρμανσης είναι ιδιαίτερα έντονες στην περιοχή της Μεσογείου, όπου οι κλιματικές συνθήκες χαρακτηρίζονται τους θερινούς μήνες από υψη- λές θερμοκρασίες και έντονη ηλιακή ακτινοβολία, συχνά επεισόδια παρατεταμένων καυσώνων και σταδιακή μείωση των υδατικών αποθεμάτων. Οι ελληνικές πόλεις, και ιδίως η Αθήνα και η Θεσσαλονίκη, συνδυάζουν υψηλή πληθυσμιακή πυκνότητα με περιορισμένους ελεύθερους χώρους και υψηλά ποσοστά δόμησης, γεγονός που τις καθιστά ιδιαίτερα ευάλωτες στην υπερ- θέρμανση.[9] Η ένταση του φαινομένου εξαρτάται περαιτέρω από την τοπογραφία, την εγγύτητα στη θάλασσα και τις τοπικές ατμοσφαιρικές συνθήκες, οι οποίες επηρεάζουν τη ροή του αέρα και την αποβολή της θερμότητας.

[1] Dosio, A., Mentaschi, L., Fischer, E.M. και Wyser, K. (2018). Extreme heat waves under 1.5°C and 2°C global warming. *Environmental Research Letters*, 13 (5), 054006.

[2] Masson, V., Lemonsu, A., Hidalgo, J. και Voogt, J. (2020). Urban climates and climate change. *Annual Review of Environment and Resources*, 45, 411-444.

[3] Oke, T.R., Mills, G., Christen, A. και Voogt, J.A. (2017). *Urban climates*. Cambridge University Press.

[4] Nazarian, N., Krayenhoff, E.S., Bechtel, B., Hondula, D.M., Paolini, R., Vanos, J., Cheung, T., Chow, W.T.L., de Dear, R., Jay, O. κ.ά. (2022). Integrated assessment of urban overheating impacts on human life. *Earth's Future*, 10, e2022EF002682.

[5] Martilli, A., Krayenhoff, E.S. & Nazarian, N. (2020). Is the urban heat island intensity relevant for heat mitigation studies? *Urban Climate*, 31, 100541.

[6] Stewart, I.D. & Oke, T.R. (2012). Local climate zones for urban temperature studies. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93, 1879-1900.

[7] Santamouris, M. (2014). On the energy impact of urban heat island and global warming on buildings. *Energy and Buildings*, 82, 100-113.

[8] Paravantis, J., Santamouris, M., Cartalis, C., Efthymiou, C. & Kontoulis, N. (2017). Mortality associated with high ambient temperatures, heatwaves, and the urban heat island in Athens, Greece. *Sustainability*, 9, 606.

[9] Agathangelidis, I., Cartalis, C. και Santamouris, M. (2019). Integrating urban form, function, and energy fluxes in a heat exposure indicator in view of intra-urban heat island assessment and climate change adaptation. *Climate*, 7, 75.

Η κατανόηση των μηχανισμών που διέπουν το κλίμα των πόλεων αποτελεί βασική προϋπόθεση για την ανάπτυξη στρατηγικών μετριασμού και προσαρμογής. Η μελέτη της θερμικής συμπεριφοράς του αστικού ιστού, τόσο σε τοπική κλίμακα όσο και σε μικροκλίμακα, είναι κρίσιμη για την κατανόηση αυτών των μηχανισμών. Η ένταση της θερμικής επιβάρυνσης διαφοροποιείται σημαντικά τόσο μεταξύ πόλεων όσο και στο εσωτερικό τους, οδηγώντας στη διαμόρφωση τοπικών κλιματικών συνθηκών και σημείων ιδιαίτερα υψηλών θερμοκρασιών και χαμηλής θερμικής άνεσης (hot spots). Για τον συνολικό προσδιορισμό αυτών των διαφορών απαιτείται ο συνδυασμός λεπτομερών δεδομένων αστικής μορφολογίας, μετεωρολογικών παρατηρήσεων, δορυφορικών δεδομένων και μοντέλων αριθμητικών προσομοιώσεων. Μέσα από μια τέτοια συνδυαστική προσέγγιση του αστικού περιβάλλοντος καθίσταται δυνατή η αναγνώριση των κυρίαρχων θερμικών μοτίβων, η κατανόηση των αιτίων που τα διαμορφώνουν και τελικά ο σχεδιασμός στοχευμένων μέτρων προσαρμογής για κάθε αστική τυπολογία.

Η παρούσα μελέτη εστιάζει στη διερεύνηση του αστικού θερμικού περιβάλλοντος και της έντασης της αστικής θερμικής νησίδας σε επιλεγμένες αστικές ενότητες της Αθήνας και της Θεσσαλονίκης, συνδυάζοντας μορφολογικά δεδομένα με δορυφορικές παρατηρήσεις και προσομοιώσεις πολλαπλών χωρικών κλιμάκων. Στόχος είναι να αναλυθούν οι μηχανισμοί που διαμορφώνουν τη θερμική συμπεριφορά του αστικού χώρου και να καθοριστεί ένα αξιόπιστο υπόβαθρο για ανθεκτικό και κλιματικά ευαίσθητο αστικό σχεδιασμό.



[2.0] Η ΘΕΡΜΙΚΉ ΎΠΟΓΡΑΦΉ ΤΗΣ ΠΟΛΉΣ

[2.1] Αστική μορφολογία και λειτουργία

Οι αστικές περιοχές αποτελούν ιδιαίτερα σύνθετα συστήματα, όπου η μορφολογία της δόμησης, οι χρήσεις γης και τα υλικά των επιφανειών μεταβάλλονται απότομα, ακόμα και σε πολύ μικρές αποστάσεις. Η χωρική αυτή ετερογένεια οδηγεί στη διαμόρφωση μέσα στην ίδια πόλη διακριτών μικροκλιματικών συνθηκών, με κάθε περιοχή να παρουσιάζει τα δικά της θερμικά χαρακτηριστικά. Πριν από τον σχεδιασμό και την εφαρμογή μέτρων μετριασμού της θερμικής επιβάρυνσης, είναι, συνεπώς, απαραίτητη η λεπτομερής κατανόηση της αστικής μορφολογίας και των λειτουργικών γνωρισμάτων της πόλης. Η γνώση αυτών των παραμέτρων επιτρέπει τον εντοπισμό των πιο ευπαθών ζωνών και τη στοχευμένη υιοθέτηση βιοκλιματικών παρεμβάσεων, προσαρμοσμένων στα χαρακτηριστικά της εκάστοτε αστικής ενότητας. Αν συνοψίσουμε τη συνδυαστική επίδραση του αστικού περιβάλλοντος, μπορούμε να πούμε ότι επηρεάζει καθοριστικά τις κλιματικές παραμέτρους μέσω δύο βασικών κατηγοριών (οι οποίες θα αναλυθούν στις επόμενες ενότητες):[10]

1. της αστικής μορφολογίας, δηλαδή της γεωμετρίας, των υλικών και της κάλυψης γης μιας πόλης, και
2. της αστικής λειτουργίας, η οποία περιλαμβάνει το σύνολο των ανθρωπογενών δραστηριοτήτων και πηγών θερμότητας στον αστικό ιστό.

[10] Oke, T.R., Mills, G., Christen, A. και Voogt, J.A. (2017). *Urban climates*. Cambridge University Press.

[2.2] Ύψος δόμησης και γεωμετρία αστικού χώρου

Το ύψος των κτιρίων αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους μορφολογικούς παράγοντες που διαμορφώνουν το μικροκλίμα της πόλης, επηρεάζοντας τη σκίαση, τη ροή του αέρα, τις ανταλλαγές ακτινοβολίας μεταξύ των επιφανειών και τον ρυθμό αποθήκευσης και αποβολής θερμότητας. Παρά την υψηλή πυκνότητα δόμησης που χαρακτηρίζει τις ελληνικές πόλεις, το δομημένο περιβάλλον παραμένει κυρίως χαμηλού και μέσου ύψους (δύο ως πέντε όροφοι).[11] Ακόμα και στα κεντρικά τμήματα των μεγάλων πόλεων, τα κτίρια με ύψος άνω των 40 μέτρων αποτελούν την εξαίρεση. Το γεγονός αυτό σχετίζεται με πολεοδομικούς περιορισμούς, καθώς και με ιστορικές και κοινωνικές συνθήκες που διαμόρφωσαν τον οικιστικό ιστό των ελληνικών πόλεων.

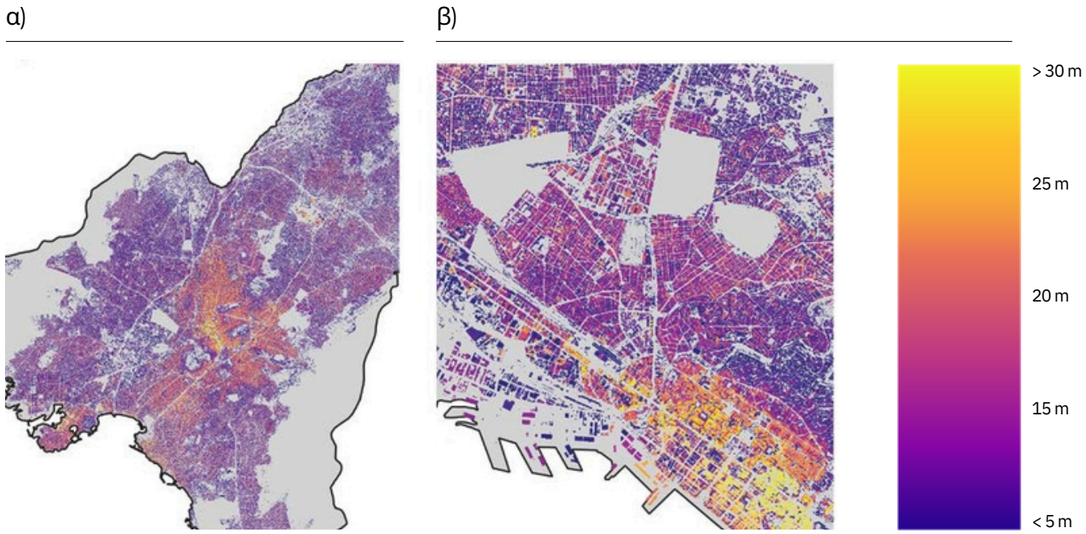
Στο πολεοδομικό συγκρότημα της Αθήνας (Σχήμα 2.1α),[12] οι μεγαλύτερες τιμές ύψους κτιρίων εντοπίζονται κυρίως στο ιστορικό και εμπορικό κέντρο της πόλης, στο κέντρο του Πειραιά, καθώς και κατά μήκος μεγάλων οδικών αξόνων, όπως οι Λεωφόροι Συγγρού και Κηφισίας. Οι περιοχές αυτές χαρακτηρίζονται από συνεχή δόμηση, περιορισμένους χώρους πρασίνου και υψηλή πυ- κνότητα κτιρίων κατοικίας ή συγκροτημάτων γραφείων. Αντίθετα, χαμηλότερα ύψη δόμησης καταγράφονται σε περιοχές των βόρειων προαστίων, όπως η Κηφισιά και η Πεντέλη, όπου η δόμηση είναι αραιότερη και το ποσοστό κάλυψης από βλάστηση μεγαλύτερο. Επιπλέον, σχετικά χαμηλές τιμές ύψους κτιρίων συναντώνται στο μεγαλύτερο μέρος των δυτικών προαστίων, αν και με περιορισμένη παρουσία δέντρων.

[11] ΕΛΣΤΑΤ, 2025. Τα κτίρια μέσα από την Απογραφή Κτιρίων 2021. Διαθέσιμο στο https://www.statistics.gr/2021-kt (ανακτήθηκε στις 9 Ιανουαρίου 2026).

[12] Agathangelidis, I., Giannaros, C., Cartalis, C., Kotroni, V. και Lagouvardos, K. (2025). Local climate zones and urban morphology dataset to support numerical modelling in Greece, utilizing GIS, multispectral, and SAR data. *Data in Brief*, 111784.

Σχήμα 2.1: Χωρική κατανομή του ύψους των κτιρίων (σε μέτρα) για: α) το πολεοδομικό συγκρότημα της Αθήνας και β) το πολεοδομικό συγκρότημα της Θεσσαλονίκης. Πηγή δεδομένων: Agathangelidis κ.ά. (2025).

Στη Θεσσαλονίκη (Σχήμα 2.1β), η χωρική κατανομή του ύψους κτιρίων παρουσιάζει ανάλογες διακυμάνσεις. Οι μεγαλύτερες τιμές παρατηρούνται στο ιστορικό κέντρο και κατά μήκος της παραλιακής Λεωφόρου Νίκης, όπου ο υψηλός βαθμός αστικοποίησης και η πυκνή ανάπτυξη δημιουργούν στενές αστικές χαράδρες. Χαμηλότερα ύψη εμφανίζονται στα προάστια του πολεοδομικού ιστού, όπως η Πολίχνη και η Σταυρούπολη, όπου η δόμηση είναι χαμηλότερης κλίμακας και η θερμική συμπεριφορά διαφοροποιείται σημαντικά μεταξύ ημέρας και νύχτας. Σχετικά περιορισμένη δόμηση καθ' ύψος παρατηρείται, επίσης, σε ορισμένες κεντρικές συνοικίες, όπως η 'Ανω Πόλη.



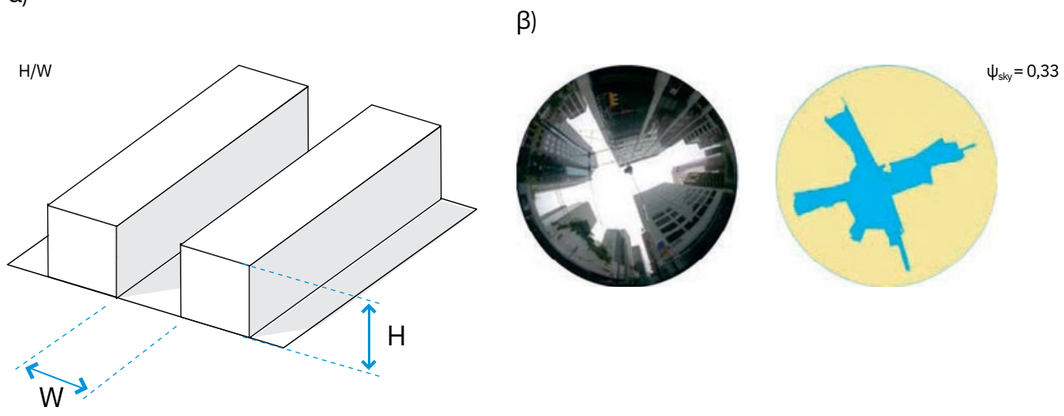
Η κατανομή του ύψους των κτιρίων συνδέεται στενά με συνδυαστικούς μορφολογικούς δείκτες, οι οποίοι περιγράφουν όχι μόνο τις κατακόρυφες, αλλά και τις οριζόντιες διαστάσεις του αστικού χώρου. Δύο από τους σημαντικότερους δείκτες για την αποτύπωση της τρισδιάστατης γεωμετρίας των αστικών περιοχών είναι οι εξής (Σχήμα 2.2):

- η «αναλογία διαστάσεων αστικής χαράδρας» H/W, δηλαδή ο λόγος του μέσου ύψους των κτιρίων (H) προς το πλάτος του δρόμου (W), και
- ο «συντελεστής θέασης ουρανού» (ψ_{sky}), ο οποίος περιγράφει το ποσοστό του ουρανού το οποίο είναι ορατό από την επιφάνεια του δρόμου.

[13] Stewart, I.D. & Mills, G. (2021). The urban heat island. Elsevier.

Οι δύο αυτοί δείκτες προσφέρουν μια πιο ολοκληρωμένη περιγραφή της κτιριακής μορφολογίας, καθώς αποτυπώνουν ταυτόχρονα το ύψος και την πυκνότητα του αστικού ιστού. Η από κοινού εξέτασή τους επιτρέπει την ακριβέστερη αποτύπωση των ενδοαστικών διαφοροποιήσεων και τη στοχευμένη αναγνώριση περιοχών με αυξημένη ευπάθεια σε υψηλές θερμοκρασίες. Σε αστικές περιοχές πυκνής δόμησης, το H/W κυμαίνεται συνήθως στο εύρος 0,75-2, ενώ το ψ_{sky} λαμβάνει τιμές περίπου 0,3 ως 0,6. Τιμές του H/W μεγαλύτερες του 2 και, αντίστοιχα, τιμές του ψ_{sky} μικρότερες του 0,3 παρατηρούνται κατά κανόνα μόνο στα κεντρικά τμήματα μεγάλων μητροπολιτικών πόλεων, όπου το μέσο ύψος των κτιρίων υπερβαίνει τα 25 μέτρα.[13] 'Οπως θα περιγραφεί αναλυτικά στη συνέχεια, υψηλές τιμές του H/W συνεπάγονται αυξημένη σκίαση του δρόμου αλλά και περιορισμό των διαδρόμων αερισμού, καθώς και παρεμπόδιση της ψύξης των αστικών χαραδρών μέσω ακτινοβολίας. Αντίθετα, αραιοδομημένες συνοικίες με χαμηλό H/W και υψηλό ψ_{sky} ευνοούν τον φυσικό αερισμό και τη διαφυγή της θερμότητας, οδηγώντας, γενικά, σε χαμηλότερες θερμοκρασίες, υπό την προϋπόθεση παροχής σκίασης μέσω επαρκούς παρουσίας δέντρων.

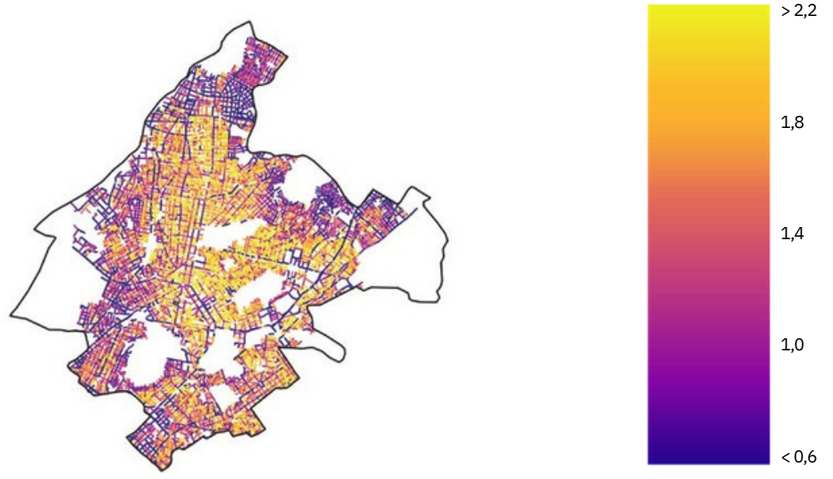
Σχήμα 2.2: Σχηματική απεικόνιση α) της αναλογίας διαστάσεων αστικής χαράδρας (H/W) και β) του συντελεστή θέασης ουρανού (ψ_{sky}). Προσαρμογή από Oke κ.ά. (2017).



[14] Agathangelidis, I., Cartalis, C. και Santamouris, M. (2019). Integrating urban form, function, and energy fluxes in a heat exposure indicator in view of intra-urban heat island assessment and climate change adaptation. *Climate*, 7, 75.

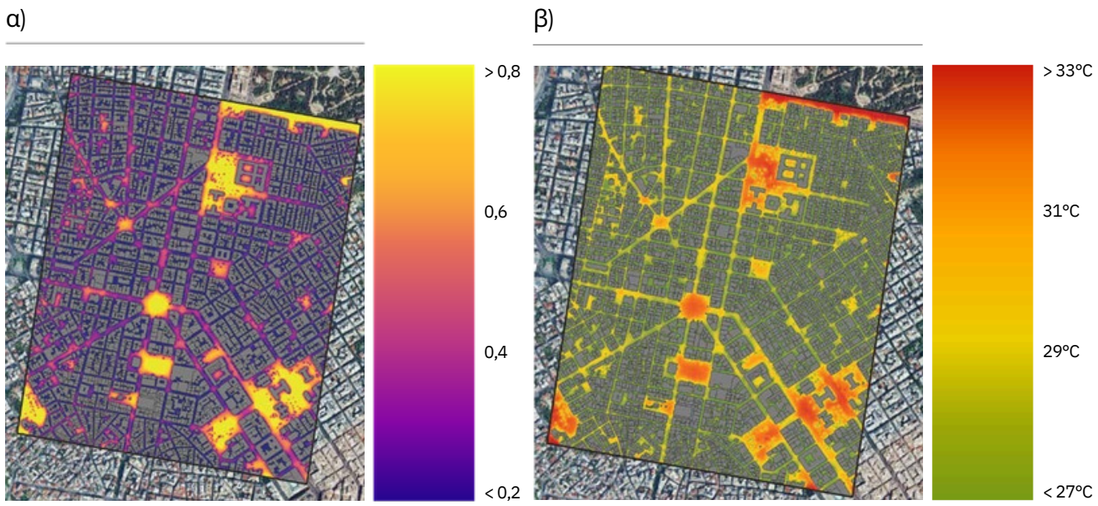
Στο Σχήμα 2.3 παρουσιάζεται η χωρική κατανομή των τιμών H/W στην Αθήνα.[14] Παρότι, όπως είδαμε, η πόλη δεν χαρακτηρίζεται από ιδιαίτερα μεγάλα ύψη κτιρίων, η πολύ υψηλή πυκνότητα δόμησης, ιδίως στον κεντρικό πυρήνα της πόλης, έχει οδηγήσει στη διαμόρφωση πολύ στενών δρόμων με ιδιαίτερα υψηλές τιμές H/W, συχνά μεγαλύτερες του 2. Με άλλα λόγια, το ύψος των κτιρίων της πόλης είναι συχνά δυσανάλογο σε σχέση με το πλάτος των δρόμων που τα χωρίζουν. Χαρακτηριστικά παραδείγματα αποτελούν τμήματα του ιστορικού και εμπορικού κέντρου, καθώς και συνοικίες όπως τα Σεπόλια, όπου η γεωμετρία του δομημένου περιβάλλοντος σχηματίζει πολύ στενές αστικές χαράδρες.

Σχήμα 2.3: Χωρική αποτύπωση του λόγου της αναλογίας διαστάσεων αστικής χαράδρας (H/W) για τον Δήμο Αθηναίων. Πηγή δεδομένων: Agathangelidis κ.ά. (2019).



Αντίστοιχα, ο συντελεστής θέασης ουρανού (ψ_{sky}), ο οποίος εν γένει μεταβάλλεται αντιστρόφως ανάλογα προς τον δείκτη H/W, αποτυπώνει με συνεχή και λεπτομερή τρόπο τον βαθμό της αστικής πυκνότητας σε κάθε σημείο της πόλης. Για παράδειγμα, στο κέντρο της Αθήνας (Σχήμα 2.4α), δρόμοι όπως η Σόλωνος ή αρκετοί δρόμοι στην περιοχή των Εξαρχείων εμφανίζουν εξαιρετικά χαμηλές τιμές ψ_{sky}, ακόμα και κάτω από 0,15, γεγονός που σημαίνει ότι από το επίπεδο του δρόμου είναι ορατό μόνο πολύ μικρό τμήμα του ουρανού.

Σχήμα 2.4: Αποτύπωση α) του συντελεστή θέασης ουρανού (ψ_{sky}) και β) της Μέσης Θερμοκρασίας Ακτινοβολίας (T_{MRT}, σε °C) στις 14:00 κατά τυπική θερινή ημέρα στην περιοχή του κέντρου της Αθήνας, με χωρική ανάλυση 1 μέτρο.



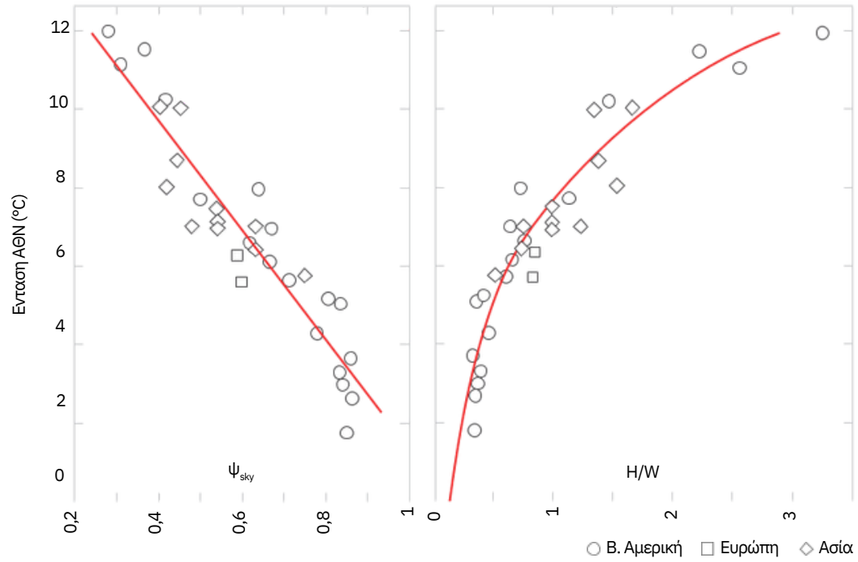
Πώς μεταφράζονται όλα αυτά σε όρους θερμικής επιβάρυνσης; Όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.5, παρατηρήσεις από μεγάλο δείγμα πόλεων παγκοσμίως καταδεικνύουν, με υψηλό βαθμό αξιοπιστίας, ότι οι υψηλές τιμές του H/W και, αντίστοιχα, οι χαμηλές του ψ_{sky} συνδέονται άμεσα με τον σχηματισμό ενδοαστικών θερμικών νησίδων κατά τη διάρκεια της νύχτας. Το φαινόμε- νο αυτό οφείλεται στην παρεμπόδιση της διαφυγής της εκπεμπόμενης θερμικής ακτινοβολίας, του κυριότερου φυσικού μηχανισμού ψύξης των επιφανειών τις νυχτερινές ώρες, από τις στε- νές αστικές χαράδρες. Σε συνδυασμό με ιδιότητες των δομικών υλικών που σχετίζονται με την ικανότητα αποβολής θερμότητας (όπως η θερμοχωρητικότητα και ο συντελεστής εκπομπής), η αστική γεωμετρία αποτελεί τον καθοριστικό παράγοντα διαμόρφωσης του νυχτερινού θερμικού περιβάλλοντος (Πίνακας 2.1).

Κατά τη διάρκεια της ημέρας, παρότι στενοί δρόμοι με ψηλά κτίρια μπορούν να προσφέρουν αυξημένη σκίαση, η τελική θερμική κατάσταση είναι σαφώς πιο σύνθετη. Όπως θα αναλυθεί στη συνέχεια, η θερμική επιβάρυνση εξαρτάται σημαντικά από την παρουσία ανθρωπογενών πηγών θερμότητας, το ποσοστό και το είδος του πρασίνου, τον προσανατολισμό του δρόμου, καθώς και την ύπαρξη ή μη διαδρόμων αερισμού. Οι παράγοντες αυτοί καθορίζουν τελικά τον τρόπο με τον οποίο η αστική γεωμετρία μεταφράζεται στην αισθητή θερμική εμπειρία των κατοίκων..

Πίνακας 2.1: Οι κυριότεροι αστικοί παράγοντες που διαμορφώνουν, εν γένει, το θερμικό περιβάλλον των πόλεων κατά τη διάρκεια της ημέρας και της νύχτας, υπό δεδομένες καιρικές συνθήκες και τοπογραφία. Η σειρά των παραγόντων ακολουθεί φθίνουσα σημαν τικότητα.

Κατά τη διάρκεια της ημέρας	**Κατά τη διάρκεια της νύχτας**
Παρουσία πρασίνου (σκίαση, εξατμισοδιαπνοή) και υδάτινων επιφανειών (εξάτμιση)	Δυνατότητα διαφυγής της εκπεμπόμενης θερμικής ακτινοβολίας (H/W, ψ_{sky})
Ιδιότητες υλικών (ανακλαστικότητα, θερμοχωρητικότητα, συντελεστής εκπομπής)	Ιδιότητες υλικών (θερμοχωρητικότητα, συντελεστής εκπομπής)
Ανθρωπογενείς ροές θερμότητας (κυρίως κίνηση οχημάτων, χρήση κλιματιστικών)	Ανθρωπογενείς ροές θερμότητας (κυρίως χρήση κλιματιστικών)
Σκίαση από κτίρια (H/W, ψ_{sky})	Διάδρομοι αερισμού
Διάδρομοι αερισμού	Παρουσία πρασίνου και υδάτινων επιφανειών
Προσανατολισμός δρόμου	
Εγγύτητα σε πάρκα	

Σχήμα 2.5: Σύνδεση α) του συντελεστή θέασης ουρανού (ψ_{sky}) και β) της αναλογίας διαστάσεων αστικής χαράδρας (H/W) με την ένταση της νυχτερινής αστικής θερμικής νησίδας (ΑΘΝ) για διάφορες πόλεις παγκοσμίως. Προσαρμογή από Oke κ.ά. (2017).



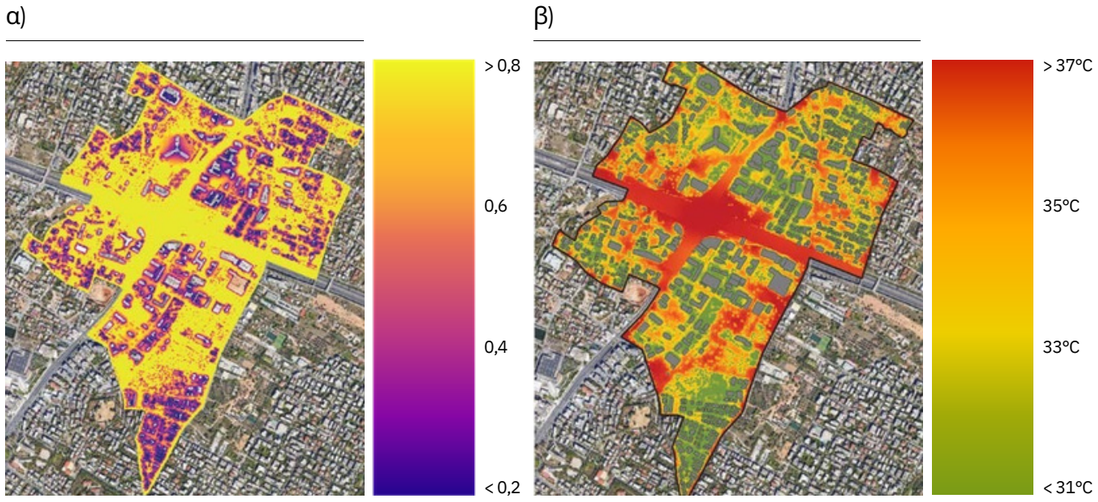
Ακόμα και στα πλέον πυκνοδομημένα τμήματα του αστικού ιστού συνυπάρχουν εκτεταμένοι ανοιχτοί χώροι. Μεγάλες πλατείες και δημόσιοι χώροι, όπως η Πλατεία Ομονοίας και η Πλατεία Κοτζιά, παρουσιάζουν υψηλές τιμές ψ_{sky}, δημιουργώντας τοπικές ζώνες ιδιαίτερα εκτεθειμένες στην ηλιακή ακτινοβολία, οι οποίες διαφοροποιούνται εντόνως μικροκλιματικά από τα γύρω οι- κοδομικά τετράγωνα όπου η σκίαση των κτιρίων κυριαρχεί (Σχήμα 2.4α). Αντιστοίχως, παρόμοια μοτίβα παρατηρούνται και κατά μήκος των κεντρικών λεωφόρων, όπως, για παράδειγμα, στον επιχειρηματικό κόμβο του Αμαρουσίου (Σχήμα 2.6α), όπου οι μεγάλοι ανοιχτοί χώροι ανάμεσα στα συγκροτήματα γραφείων οδηγούν σε αυξημένες τιμές ψ_{sky}.

Η γεωμετρία του αστικού χώρου, όπως αποτυπώνεται από τον συντελεστή θέασης ουρανού, καθορίζει σε μεγάλο βαθμό τη θερμική άνεση ή, αντίστοιχα, τη δυσφορία που βιώνει ένας πεζός. Σε μια τυπική αστική ενότητα, πέρα από την προσπίπτουσα και ανακλώμενη ηλιακή ακτινοβολία, συνυπάρχουν, επίσης, πηγές ακτινοβολίας τόσο από θερμές επιφάνειες (οδοστρώματα, τοίχους εκτεθειμένους στην ηλιακή ακτινοβολία) όσο και από ψυχρότερες επιφάνειες υπό σκιά. Το απο- τέλεσμα είναι ένα έντονα ανομοιογενές πεδίο ακτινοβολιών, όπου η έκθεση ενός ατόμου μπορεί να μεταβληθεί σημαντικά ακόμα και σε λίγα μέτρα. Για τη συνδυαστική αποτύπωση του συνόλου των ακτινοβολιών που δέχεται ένα άτομο χρησιμοποιείται η Μέση Θερμοκρασία Ακτινοβολίας (Mean Radiant Temperature, T_{MRT}). Η T_{MRT}, εκφρασμένη σε βαθμούς θερμοκρασίας, αποτελεί κρίσιμο μέγεθος για την αξιολόγηση της θερμικής άνεσης και καταπόνησης σε υπαίθριους αστι- κούς χώρους.

Προσομοιώσεις με το μοντέλο προσομοίωσης της ακτινοβολίας SOLWEIG (SOLar and LongWave Environmental Irradiance Geometry) επιτρέπουν την άμεση σύνδεση της αστικής μορφολογίας με τη θερμική δυσφορία, όπως αυτή αποτυπώνεται από την παράμετρο T_{MRT} (Σχήματα 2.4β, 2.6β). Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι περιοχές με υψηλό H/W και χαμηλό ψ_{sky} παρουσιάζουν αυξημένη σκίαση από κτίρια ή/και δέντρα και, επακολούθως, χαμηλότερες τιμές T_{MRT} κατά τις μεσημβρινές ώρες. Αντίθετα, περιοχές με υψηλό ψ_{sky}, όπως πλατείες ή μεγάλοι αστικοί κόμβοι, εμφανίζουν υψηλές τιμές T_{MRT} και αυξημένη θερμική καταπόνηση. Ο προσανατολισμός της αστι- κής χαράδρας αποτελεί επίσης κρίσιμο παράγοντα, καθώς δρόμοι με παρόμοιες τιμές H/W και ψ_{sky} μπορεί να εμφανίζουν διαφορετική θερμική συμπεριφορά, ανάλογα με τη σκίαση που δέχονται σε συνάρτηση με τη θέση του ήλιου.

Συνολικά, η σχέση μεταξύ H, H/W, ψ_{sky} και T_{MRT} αναδεικνύει ότι η τρισδιάστατη γεωμετρία μιας πόλης δεν αποτελεί απλώς μορφολογικό ή αρχιτεκτονικό χαρακτηριστικό, αλλά θεμελιώδη πα- ράγοντα που καθορίζει τη θερμική κατάσταση και την ποιότητα ζωής των κατοίκων. Η κατανόηση και αξιοποίηση αυτών των δεικτών αποτελεί, επομένως, βασική προϋπόθεση για τον σχεδιασμό στοχευμένων και αποτελεσματικών παρεμβάσεων στον αστικό χώρο.

Σχήμα 2.6: Αποτύπωση α) του συντελεστή θέασης ουρανού (ψ_{sky}) και β) της Μέσης Θερμοκρασίας Ακτινοβολίας (T_{MRT}, σε °C) στις 14:00 κατά τυπική θερινή ημέρα στην περιοχή του Δήμου Αμαρουσίου (Κόμβος Δαχτυλίδι), με χωρική ανάλυση 1 μέτρο. ↓



[2.3]

Ανθρωπογενείς πηγές θερμότητας

Η θερμική επιβάρυνση του αστικού περιβάλλοντος δεν καθορίζεται μόνο από φυσικές διεργασίες που σχετίζονται με την απορρόφηση και εκπομπή ακτινοβολίας, αλλά επηρεάζεται σημαντικά από την παρουσία ανθρωπογενών πηγών θερμότητας. Αν και συνολικά, σε επίπεδο πόλης, οι ανθρωπογενείς ροές θερμότητας (Q_F) έχουν μικρότερη επίδραση από τις παραμέτρους της αστικής μορφολογίας και την κάλυψη γης, στη μικροκλίμακα τείνουν, ωστόσο, να εμφανίζουν σημαντική επίδραση.[15]

Στην παράμετρο Q_F αντιστοιχεί η ροή θερμότητας που απελευθερώνεται στην ατμόσφαιρα από τη λειτουργία των κτιρίων (ψύξη, θέρμανση, ηλεκτρικές συσκευές), τις μετακινήσεις και τη βιομηχανική δραστηριότητα. Ο προσδιορισμός των ανθρωπογενών εκπομπών βασίζεται συχνά, ανάλογα με τη διαθεσιμότητα δεδομένων, σε συνδυασμό δύο προσεγγίσεων: α) της "top-down", όπου το Q_F υπολογίζεται από συγκεντρωτικά δεδομένα ενεργειακής κατανάλωσης σε επίπεδο πολεοδομικού συγκροτήματος και επιμερίζεται με δείκτες όπως η πληθυσμιακή πυκνότητα, και β) της "bottom-up", όπου το Q_F υπολογίζεται ξεκινώντας από επιμέρους αστικά στοιχεία (π.χ., κτίρια, οδικό δίκτυο).[16]

Το εύρος των μέσων τιμών των ανθρωπογενών ροών θερμότητας κυμαίνεται από 5 ως 150 W/m^2, με τις περισσότερες πόλεις να εντάσσονται στο εύρος των 20-60 W/m^2, και διαμορφώνεται από τη γεωγραφική τους θέση, την πληθυσμιακή πυκνότητα και την ενεργειακή κατανάλωση ανά κάτοικο.[17] Για πόλεις με παρόμοια κλιματικά χαρακτηριστικά και πληθυσμιακή πυκνότητα, ο περιορισμός της χρήσης αυτοκινήτων και η ύπαρξη ενεργειακά αποδοτικών κτιρίων οδηγούν σε χαμηλότερες τιμές του Q_F.

Οι ανθρωπογενείς ροές θερμότητας αποτελούν έναν διαρκώς παρόντα και δύσκολα ελεγχόμενο παράγοντα, που επιδρά άμεσα στο ενεργειακό ισοζύγιο της πόλης και εντείνει την αστική θερμική επιβάρυνση. Αν και η τελική επίδραση των ανθρωπογενών εκπομπών εξαρτάται από πλήθος παραμέτρων (π.χ., διάδρομοι αερισμού) έχει υπολογιστεί ότι 100 W/m^2 σε έναν δρόμο μπορεί να οδηγήσουν σε αύξηση της θερμοκρασίας αέρα κατά 1°C.[17]

[15] Oke, T.R., Mills, G., Christen, A. και Voogt, J.A. (2017). *Urban climates*. Cambridge University Press.

[16] Agathangelidis, I., Cartalis, C. και Santamouris, M. (2019). Integrating urban form, function, and energy fluxes in a heat exposure indicator in view of intra-urban heat island assessment and climate change adaptation. *Climate*, 7, 75.

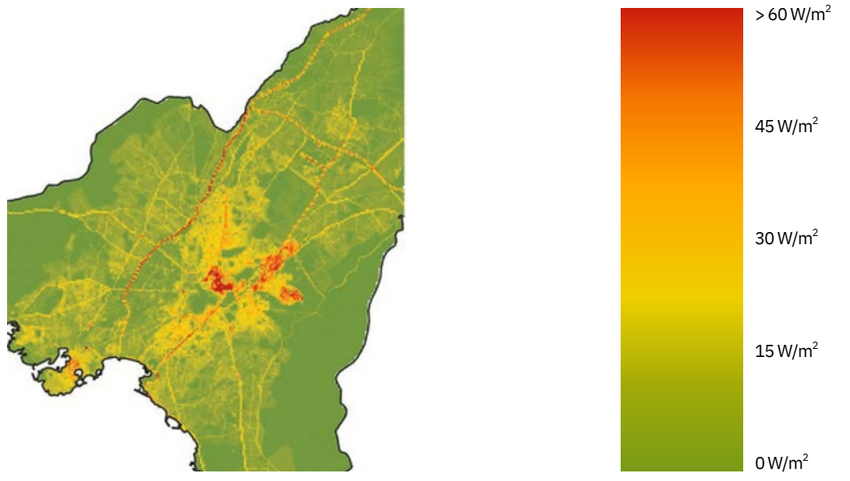
[17] Oke, T.R., Mills, G., Christen, A. και Voogt, J.A. (2017). *Urban climates*. Cambridge University Press.

Γενικότερα, η αστική λειτουργία μιας πόλης, δηλαδή οι ανθρωπογενείς εκπομπές, δρα συνδυαστικά με τις παραμέτρους της αστικής μορφολογίας. Ενα χαρακτηριστικό παράδειγμα για την Αθή- να αποτελεί η οδός Πανεπιστημίου, όπου το σχετικά μεγάλο πλάτος του δρόμου συνεπάγεται υψηλή έκθεση στην ηλιακή ακτινοβολία. Σε συνδυασμό με τη χαμηλή ανακλαστικότητα του οδοστρώματος και τις έντονες θερμικές εκπομπές από την κυκλοφορία και τα κτίρια, διαμορ- φώνονται σημαντικά υψηλές θερμοκρασίες αέρα κατά τις θερμές ημέρες, παρά τη δυνατότητα αερισμού της οδού λόγω του χαμηλού H/W. Οι ανθρωπογενείς πηγές θερμότητας επηρεάζουν και τους στενότερους κάθετους δρόμους, πολλοί από τους οποίους παρουσιάζουν τιμές H/W μεγαλύτερες του 2, ενισχύοντας περαιτέρω την παγίδευση θερμότητας. Επιπρόσθετα, δρόμοι με υψηλή κτιριακή πυκνότητα και σημαντικές ανθρωπογενείς πηγές θερμότητας, όπως, για πα- ράδειγμα, η Σόλωνος, εμφανίζουν ιδιαίτερα επιβαρυμένες θερμικές συνθήκες λόγω του εγκλω- βισμού θερμού αέρα και ρύπων μέσα στην αστική χαράδρα, παρά τη σημαντική σκίαση από τα παρακείμενα ψηλά κτίρια. Αντίθετα, σε δρόμους με υψηλές τιμές H/W, αλλά χωρίς έντονες θερμικές πηγές και με ικανοποιητικό αερισμό, η αυξημένη σκίαση μπορεί να συμβάλει θετικά στη μείωση της αισθητής θερμικής δυσφορίας κατά τη διάρκεια της ημέρας.

Η τυπική μέση κατανομή των τιμών του Q_F για την Αθήνα κατά τον μήνα Ιούλιο (Σχήμα 2.7) απο- καλύπτει ένα χαρακτηριστικό μοτίβο: οι υψηλότερες εκπομπές συγκεντρώνονται γύρω από το εμπορικό και ιστορικό κέντρο της πόλης, σχηματίζοντας μια ακτινωτή κατανομή που μειώνεται σταδιακά προς τις συνοικίες των προαστίων του πολεοδομικού συγκροτήματος. Οι υψηλές τιμές συνδέονται με την αυξημένη ενεργειακή κατανάλωση των χώρων με εμπορικές χρήσεις και των συγκροτημάτων γραφείων, ενώ στις περιοχές κατοικίας, ακόμα και στις πιο πυκνοδομημένες, το Q

F παραμένει αισθητά χαμηλότερο, παρά την αυξημένη ζήτηση για ψύξη κατά τη θερινή περίοδο. Αντίστοιχα, κατά μήκος των κύριων οδικών αξόνων παρατηρούνται υψηλές εκπομπές θερμότητας λόγω της έντονης κυκλοφορίας οχημάτων.

→
Σχήμα 2.7: Τυπική χωρική κατανομή των ανθρωπογενών πηγών θερμότητας (Q_F, σε W/m^2) στο πολεοδομικό συγκρότημα της Αθήνας για τον μήνα Ιούλιο (μέση τιμή 24ώρου). Πηγή δεδομένων: Agathangelidis κ.ά. 2019.



Για να αποτυπωθεί καλύτερα η ημερήσια διακύμανση του Q_F και οι έντονες χωρικές ετερογένειές του, παρουσιάζονται μέσες ημερήσιες καμπύλες για έξι αντιπροσωπευτικά σημεία της Αθήνας (Σχήμα 2.8). Στο Εμπορικό Τρίγωνο του κέντρου της πόλης (Σχήμα 2.8α), το Q_F παρουσιάζει μια έντονα κωνοειδή ημερήσια κατανομή, με υψηλότερες τιμές μεταξύ 9:00 και 17:00, που αντα- νακλούν τη συνδυασμένη επίδραση της χρήσης κλιματιστικών συστημάτων, της κυκλοφορίας οχημάτων και των ενεργειακών απαιτήσεων των γραφείων και των καταστημάτων. Οι μέσες ημε- ρήσιες τιμές είναι αρκετά υψηλές, της τάξης των 75 W/m^2, με τα μέγιστα να υπερβαίνουν τα 100 W/m^2. Μια δευτερεύουσα, εξασθενημένη κορυφή κατά τις πρώτες βραδινές ώρες αντανακλά τη θερμότητα που εκλύεται από τους χώρους ψυχαγωγίας.

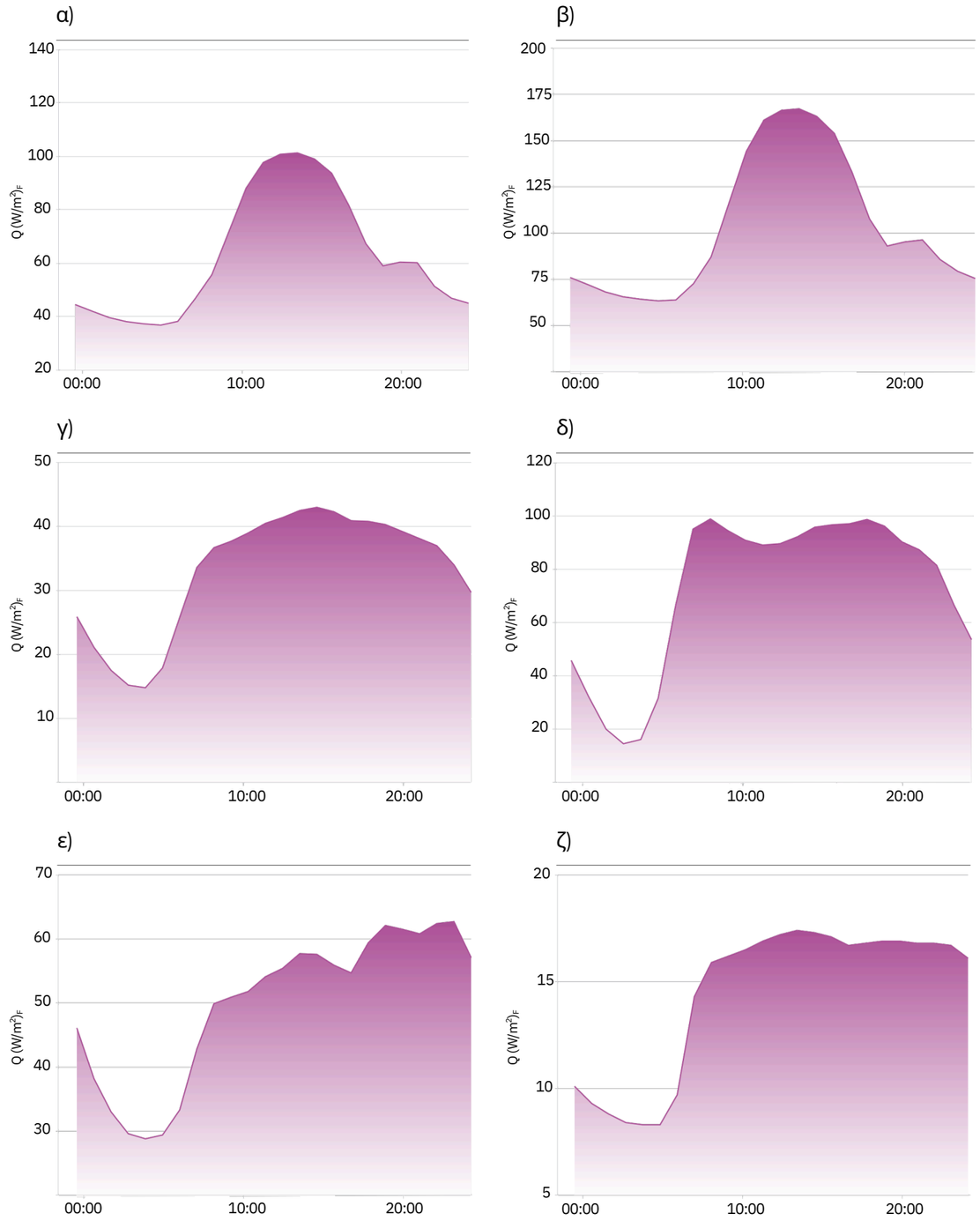
Ακόμα υψηλότερες εκπομπές εμφανίζονται στο σημείο εμπορικής αιχμής επί της οδού Σταδίου (Σχήμα 2.8β), όπου οι μέσες ημερήσιες τιμές ανέρχονται στα 125 W/m^2 και τα μέγιστα φτάνουν στα 170 W/m^2. Η οδός Πατησίων στο ύψος του Αγίου Παντελεήμονα (Σχήμα 2.8γ) παρουσιάζει μεν χαμηλότερες τιμές, αλλά με ημερήσια κατανομή που διαφοροποιείται από εκείνη του Κέ- ντρου, καθώς η συμβολή των εκπομπών από οχήματα και κτίρια κατοικίας είναι εντονότερη σε σχέση με αυτές του εμπορικού τομέα.

Διαφορετική συμπεριφορά παρουσιάζει η Λεωφόρος Κηφισού (Σχήμα 2.8δ), όπου το Q_F κυριαρχείται από δύο διακριτές κορυφές, απόρροια των πρωινών και απογευματινών ωρών αιχμής της κυκλοφορίας. Οι τιμές τείνουν να υπερβούν τα 100 W/m^2, ενώ κατά τη διάρκεια της νύχτας η εκπομπή θερμότητας ελαττώνεται σημαντικά. Αντίθετα, σε πυκνοδομημένες περιοχές κατοικίας όπως στου Ζωγράφου (Σχήμα 2.8ε), οι υψηλότερες τιμές καταγράφονται το απόγευμα και το βράδυ, όταν ο πληθυσμός βρίσκεται στα σπίτια του και η ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας για ψύξη αυξάνεται. Η μέση ημερήσια τιμή ανέρχεται στα 55 W/m^2, με τα μέγιστα να ξεπερνούν τα 75 W/m^2. Στις πιο αραιοδομημένες οικιστικές περιοχές, όπως τα Βριλήσσια (Σχήμα 2.8ζ), οι ανθρωπογενείς εκπομπές είναι σαφώς χαμηλότερες και οι ενδοημερήσιες διακυμάνσεις λιγότερο έντονες.

Συνολικά, η χωρική και χρονική ανάλυση του Q_F καταδεικνύει ότι οι εμπορικές χρήσεις παράγουν τις υψηλότερες ανθρωπογενείς εκπομπές θερμότητας, οι εκπομπές από οδικές μεταφορές αποτελούν τον κυρίαρχο παράγοντα σε μεγάλους οδικούς άξονες, ενώ οι κατοικίες συμβάλλουν κυρίως τις απογευματινές και βραδινές ώρες, ιδίως σε πυκνοδομημένες γειτονιές. Η κατανόηση αυτών των χωρικών και χρονικών προτύπων είναι κρίσιμη για την αξιολόγηση της αστικής θερμικής επιβάρυνσης και για τον σχεδιασμό αποτελεσματικών μέτρων μετριασμού της.



Σχήμα 2.8: Χρονική κατανομή του μέσου ωριαίου QF για τον μήνα Ιούλιο σε έξι επιλεγμένα σημεία της Αθήνας: α) Εμπορικό Τρίγωνο, β) σημείο αιχμής ανθρωπογενών εκπομπών (ευρύτερη περιοχή Ομόνοιας), γ) οδός Πατησίων-Αγιος Παντελεήμονας, δ) σημείο υψηλής κυκλοφορίας οχημάτων (Λεωφόρος Κηφισού), ε) τυπική πυκνοκατοικημένη συνοικία (Ζωγράφου) και ζ) τυπική αραιοδομημένη συνοικία (Βριλήσσια). Πηγή δεδομένων: Agathangelidis κ.ά. (2019). ↓



[2.4]

Κάλυψη γης, αστικές τυπολογίες και τοπικά κλίματα

'Οπως είδαμε στις προηγούμενες ενότητες, τα αστικά κέντρα αποτελούν έντονα ανομοιογενή περιβάλλοντα, όπου τα χαρακτηριστικά της αστικής μορφολογίας και λειτουργίας μεταβάλλονται απότομα ακόμα και μεταξύ γειτονικών περιοχών. Οι διαφοροποιήσεις αυτές οδηγούν στη διαμόρφωση διακριτών ζωνών στο εσωτερικό των πόλεων, καθεμιά από τις οποίες χαρακτηρίζεται από το δικό της τοπικό θερμικό περιβάλλον. Η ανάγκη για μια συστηματική και συγκρίσιμη αποτύπωση αυτής της εσωτερικής ανομοιογένειας οδήγησε, το 2012, στην ανάπτυξη του συστήματος των Τοπικών Κλιματικών Ζωνών (Local Climate Zones, LCZ)[18]. Το σύστημα LCZ περιλαμβάνει συνολικά 17 τάξεις, εκ των οποίων 11 αντιστοιχούν σε δομημένο περιβάλλον, και βασίζεται σε χαρακτηριστικά της αστικής μορφολογίας, της κάλυψης γης και των δομικών υλικών.

Παρότι στο παρελθόν είχαν προταθεί διάφορες ταξινομήσεις αστικών ενοτήτων με βάση τα μορφολογικά τους χαρακτηριστικά, ο συνδυασμός ισχυρού θεωρητικού υποβάθρου, πληρότητας και ταυτόχρονα απλότητας καθιστά σήμερα το σύστημα των LCZ την πλέον διαδεδομένη και επικρατούσα προσέγγιση για την κλιματική κατηγοριοποίηση των αστικών περιοχών. Η χαρτογράφηση μιας αστικής περιοχής σε LCZ παρέχει πολύτιμες πληροφορίες σχετικά με τη χωρική κατανομή των πολεοδομικών και θερμικών χαρακτηριστικών στο εσωτερικό μιας πόλης. Στον Πίνακα 2.2 παρουσιάζονται οι διαφορετικές κατηγορίες των αστικών LCZ μαζί με τις τιμές των σημαντικότερων παραμέτρων τους, οι οποίες λαμβάνονται υπόψη κατά την εφαρμογή της ταξινόμησης.

Η ταξινόμηση μιας πόλης σε Τοπικές Κλιματικές Ζώνες (LCZ) παρέχει ένα συνεκτικό πλαίσιο για την ερμηνεία των θερμικών διαφοροποιήσεων εντός του αστικού περιβάλλοντος. Η σύνδεση της ταξινόμησης LCZ με παρατηρήσεις της θερμοκρασίας αέρα και της επιφανειακής θερμοκρασίας (Land Surface Temperature, LST), όπως αυτές καταγράφονται από δορυφορικούς αισθητήρες, καθιστά εφικτή την ανάδειξη των κυρίαρχων χωρικών προτύπων υπερθέρμανσης που συνδέονται άμεσα με τα μορφολογικά γνωρίσματα και την κάλυψη γης κάθε ζώνης, καθώς και τον εντοπισμό περιοχών με ιδιαίτερα υψηλή θερμική επιβάρυνση (hot spots).

[18]Stewart, I.D. και Oke, T.R. (2012). Local climate zones for urban temperature studies. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93, 1879-1900.

Πίνακας 2.2: Το σύστημα των Τοπικών Κλιματικών Ζωνών (Local Climate Zones, LCZ), όπου: ψ_{sky} ο συντελεστής θέασης ουρανού, H/W ο λόγος του ύψους προς το πλάτος των κτιρίων ενός δρόμου, λ_b το ποσοστό κάλυψης από κτίρια, λ_r το ποσοστό κάλυψης από δρόμους, λ_v το ποσοστό βλάστησης, H το ύψος κτιρίων (m) και Q_F οι ανθρωπογενείς ροές θερμότητας (W/m^2). Πηγή: Stewart & Oke (2012). ↓

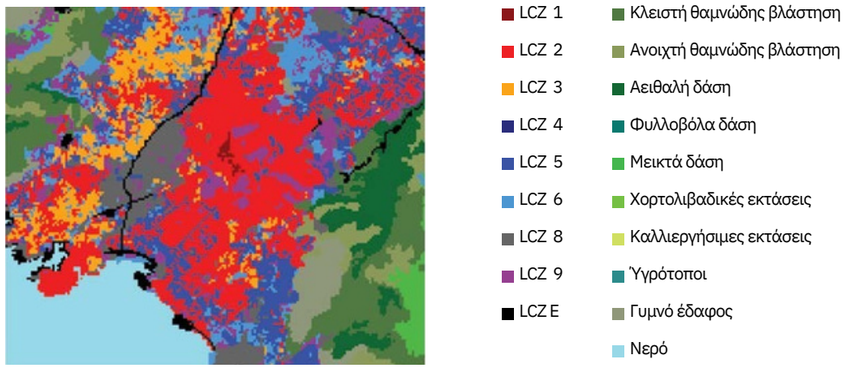
LCZ	ψ_{sky}	H/W	λ_b	λ_r	λ_v	H	Q_F
LCZ 1 Compact highrise	0,2-0,4	> 2	40-60	40-60	< 10	> 25	50-300
LCZ 2 Compact midrise	0,3-0,6	0,75-2	40-70	30-50	< 20	10-25	< 75
LCZ 3 Compact lowrise	0,2-0,6	0,75-1,5	40-70	20-50	< 30	3-10	< 75
LCZ 4 Open highrise	0,5-0,7	0,75-1,25	20-40	30-40	30-40	> 25	< 50
LCZ 5 Open midrise	0,5-0,8	0,3-0,75	20-40	30-50	20-40	10-25	< 25
LCZ 6 Open lowrise	0,6-0,9	0,3-0,75	20-40	20-50	30-60	3-10	< 25
LCZ 7 Lightweight lowrise	0,2-0,5	1-2	60-90	< 20	< 30	2-4	< 35
LCZ 8 Large lowrise	> 0,7	0,1-0,3	30-50	40-50	< 20	3-10	< 50
LCZ 9 Sparsely built	> 0,8	0,1-0,25	10-20	< 20	60-80	3-10	< 10
LCZ 10 Heavy industry	0,6-0,9	0,2-0,5	20-30	20-40	40-50	5-15	> 300
LCZ E Bare rock or paved	> 0,9	< 0,1	< 10	> 90	< 10	< 0,25	–

[19]Agathangelidis, I., Giannaros, C., Cartalis, C., Kotroni, V. και Lagouvardos, K. (2025). Local climate zones and urban morphology dataset to support numerical modelling in Greece, utilizing GIS, multispectral, and SAR data. *Data in Brief*, 111784.

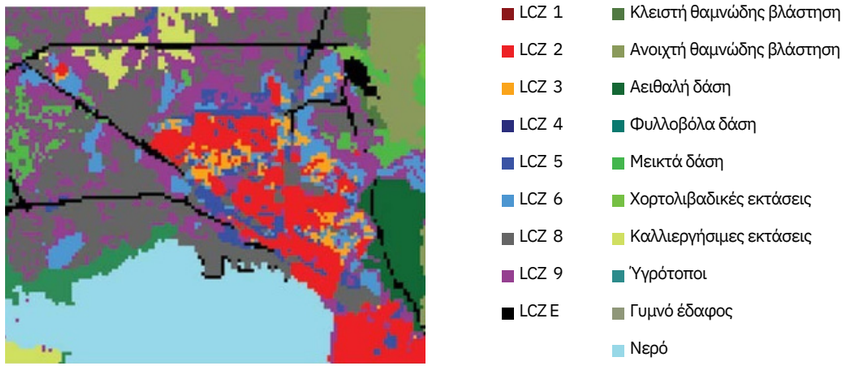
Στο Σχήμα 2.9 αποτυπώνεται η κατηγοριοποίηση σε Τοπικές Κλιματικές Ζώνες για τα πολεοδομικά συγκροτήματα της Αθήνας και της Θεσσαλονίκης.[19] 'Οπως παρατηρείται, για την περίπτωσης της Αθήνας (Σχήμα 2.9α), η κατηγορία της πυκνής δόμησης με κτίρια μέσου ύψους μικρότερου των 25 μέτρων (LCZ 2) αποτελεί τον κυρίαρχο μορφολογικό τύπο της πόλης. Ο τύπος LCZ 2 καλύπτει σχεδόν εξ ολοκλήρου τον Δήμο Αθηναίων και εκτείνεται σε μεγάλο μέρος των όμορων δήμων. Το κέντρο του Πειραιά ταξινομείται επίσης ως LCZ 2, όπως και ορισμένες περιοχές των δυτικών προαστίων όπου η αστική ανάπτυξη έχει ενταθεί τα τελευταία χρόνια (π.χ., Περιστέρι, Κορυδαλλός). Το χαμηλότερο μέσο ύψος της συμπαγούς δόμησης στα δυτικά προάστια της Αθήνας (περιλαμβανομένων των περισσοτέρων δήμων του ευρύτερου Πειραιά) οδηγεί στην τα- ξινόμησή τους στη ζώνη LCZ 3. Στις αραιοδομημένες οικιστικές ζώνες, κυρίως στα βορειοα- νατολικά και νοτιοδυτικά προάστια, επικρατούν οι κατηγορίες ανοιχτής δόμησης μέσου ύψους (LCZ 5) και ανοιχτής δόμησης χαμηλού ύψους (LCZ 6). Η περιοχή του Ελαιώνα, ανάμεσα στα κέντρα Αθήνας και Πειραιά, αντιστοιχεί στη ζώνη LCZ 8, η οποία χαρακτηρίζεται από εκτεταμένες χαμηλές κτιριακές κατασκευές (π.χ., βιοτεχνίες, αποθήκες) και σημαντική έλλειψη πρασίνου.

'Οπως και στην Αθήνα, έτσι και στη Θεσσαλονίκη κυριαρχεί η τάξη της πυκνής δόμησης με μέσο ύψος κτιρίων (LCZ 2). Το ιστορικό και εμπορικό κέντρο αντιστοιχεί στην παραπάνω κατηγορία, με υψηλή πυκνότητα δόμησης και ελάχιστους χώρους πρασίνου. Στην LCZ 2 εντάσσονται, επίσης, πολλές οικιστικές συνοικίες προς όλες τις κατευθύνσεις ανάπτυξης της πόλης (π.χ., Εύοσμος, Τούμπα, Ελευθέριο-Κορδελιό). Το σχετικά χαμηλότερο ύψος των κτιρίων στην Πολίχνη οδηγεί στην ταξινόμηση της ως LCZ 3, ενώ η πιο αραιή δόμηση συνοικιών, όπως η Ευκαρπία, αντιστοι- χεί σε LCZ 6. Τέλος, στη δυτική είσοδο της Θεσσαλονίκης, όπου επικρατούν εκτεταμένες αδια- πέρατες επιφάνειες, περιορισμένο πράσινο και υψηλές ανθρωπογενείς εκπομπές θερμότητας, οι επικρατέστεροι τύποι είναι οι LCZ 8 και LCZ 6, ανάλογα με το αν υπερισχύουν κτίρια χαμηλού ή μεγαλύτερου ύψους.

α)

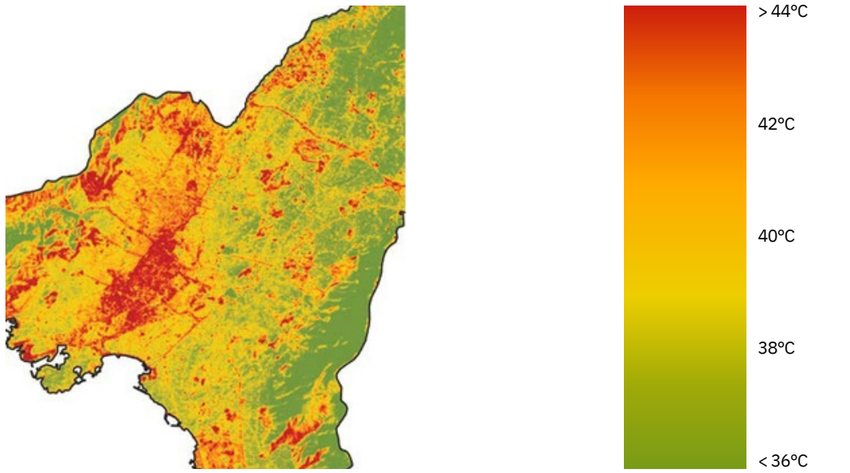


β)

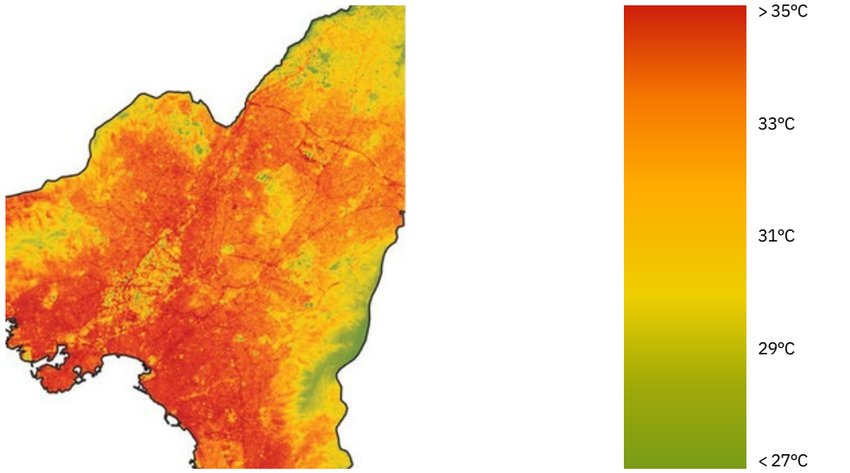


→
Σχήμα 2.9: Χαρτογράφηση α) της αστικής περιοχής της Αθήνας και β) της Θεσσαλονίκης σε Τοπικές Κλιματικές Ζώνες (LCZ). Η ταξινόμηση των φυσικών περιοχών ακολουθεί το πρότυπο ταξινόμησης του International Geosphere-Biosphere Programme (IGBP). Πηγή δεδομένων: Agathangelidis κ.ά. (2025).

'Οπως προκύπτει από τις δορυφορικές παρατηρήσεις LST υψηλής χωρικής ανάλυσης (30 μέτρα) για την Αθήνα, κατά τη διάρκεια της ημέρας (Σχήμα 2.10) η εκτεταμένη βιομηχανική περιοχή του Ελαιώνα, χαρακτηριστική περίπτωση ανοιχτής δόμησης χαμηλού ύψους (LCZ 8), παρουσιάζει σημαντικά υψηλότερες επιφανειακές θερμοκρασίες από τις γύρω περιοχές. Συγκεκριμένα, η διαφορά της θερμοκρασίας ανέρχεται ως και πάνω από 5°C σε σύγκριση με τις γειτονικές πυκνοδομημένες συνοικίες και το κέντρο της πόλης (LCZ 1 και LCZ 2). Το φαινόμενο αυτό οφείλεται στην ανεμπόδιστη έκθεση επιφανειών χαμηλής ανακλαστικότητας στην ηλιακή ακτινοβολία, καθώς και στη μειωμένη θερμική αδράνεια της περιοχής, τόσο εξαιτίας του τύπου των υλικών κατασκευής (με συχνή παρουσία μεταλλικών επιφανειών) όσο και λόγω του μικρότερου κτιριακού όγκου σε σύγκριση με το κέντρο της πόλης. Αντίθετα, τη νύχτα (Σχήμα 2.11) τα χωρικά μοτίβα αντιστρέφονται. Η τάξη LCZ 8 ψύχεται ταχύτερα, ενώ ο πυκνός αστικός ιστός του ευρύτερου κέντρου της Αθήνας και του Πειραιά παρουσιάζει υψηλές τιμές LST. Το παραπάνω είναι αποτέλεσμα του ρυθμού της σταδιακής απελευθέρωσης της θερμότητας που έχει αποθηκευτεί στα υλικά κατά τη διάρκεια της ημέρας, καθώς και της παρεμπόδισης της διαφυγής ακτινοβολίας λόγω της πυκνής δόμησης και των χαμηλών τιμών ψ_{sky}. Τέλος, οι Τοπικές Κλιματικές Ζώνες που αντιστοιχούν σε μεγαλύτερα ποσοστά πρασίνου, τα οποία εντοπίζονται κυρίως στα βόρεια προάστια (LCZ 5, 6 και 9), εμφανίζουν συστηματικά χαμηλότερο LST σε σχέση με τις υπόλοιπες τάξεις.



→
Σχήμα 2.10: Χωρική αποτύπωση της επιφανειακής θερμοκρασίας (LST) από τον δορυφόρο SDGSAT-1 για την Αθήνα, για τις 25 Αυγούστου 2024, 11:15.



→
Σχήμα 2.11: Χωρική αποτύπωση της επιφανειακής θερμοκρασίας (LST) από τον δορυφόρο SDGSAT-1 για την Αθήνα, για τις 23 Αυγούστου 2024, 22:30.

Παρότι η δορυφορική αποτύπωση του LST προσφέρει κρίσιμες πληροφορίες για τη θερμοκρα- σία των αστικών υλικών και τις χωρικές αντιθέσεις που δημιουργεί η μορφολογία της πόλης, η θερμική εμπειρία των κατοίκων καθορίζεται τελικά από τη θερμοκρασία του αέρα στο επίπεδο του δρόμου. Στο Σχήμα 2.12 παρουσιάζεται η κατανομή των μέσων μέγιστων και ελάχιστων θερ- μοκρασιών αέρα για το καλοκαίρι του 2021, σε ευρύτερες ζώνες ακτίνας περίπου 3 χιλιομέτρων γύρω από τα κέντρα της Αθήνας, του Πειραιά, του Δήμου Αμαρουσίου και της Θεσσαλονίκης. Το 2021 επιλέχτηκε ως αντιπροσωπευτικό για τη μέση θερμοκρασία και τη συχνότητα καυσωνικών επεισοδίων της τελευταίας δεκαετίας. Οι χάρτες θερμοκρασίας προέκυψαν από τοπικής κλίμακας προσομοιώσεις υψηλής χωρικής ανάλυσης (100 μέτρα), με το αστικό μοντέλο SUEWS (Surface Urban Energy and Water balance Scheme), το οποίο είναι από τα πιο προηγμένα μοντέλα αστικού τοπικού κλίματος. Το συγκεκριμένο μοντέλο επιλύει το επιφανειακό ενεργειακό και υδατικό ισοζύγιο της πόλης, λαμβάνοντας υπόψη τα χαρακτηριστικά των κύριων στοιχείων της επιφάνειας (δρόμους, κτίρια, δέντρα, χαμηλή βλάστηση, γυμνό έδαφος, υδάτινες επιφάνειες), και υπολογίζει τις ροές ακτινοβολίας, τις ανθρωπογενείς πηγές θερμότητας, καθώς και τις ροές θερμότητας από και προς τα υλικά του αστικού ιστού.

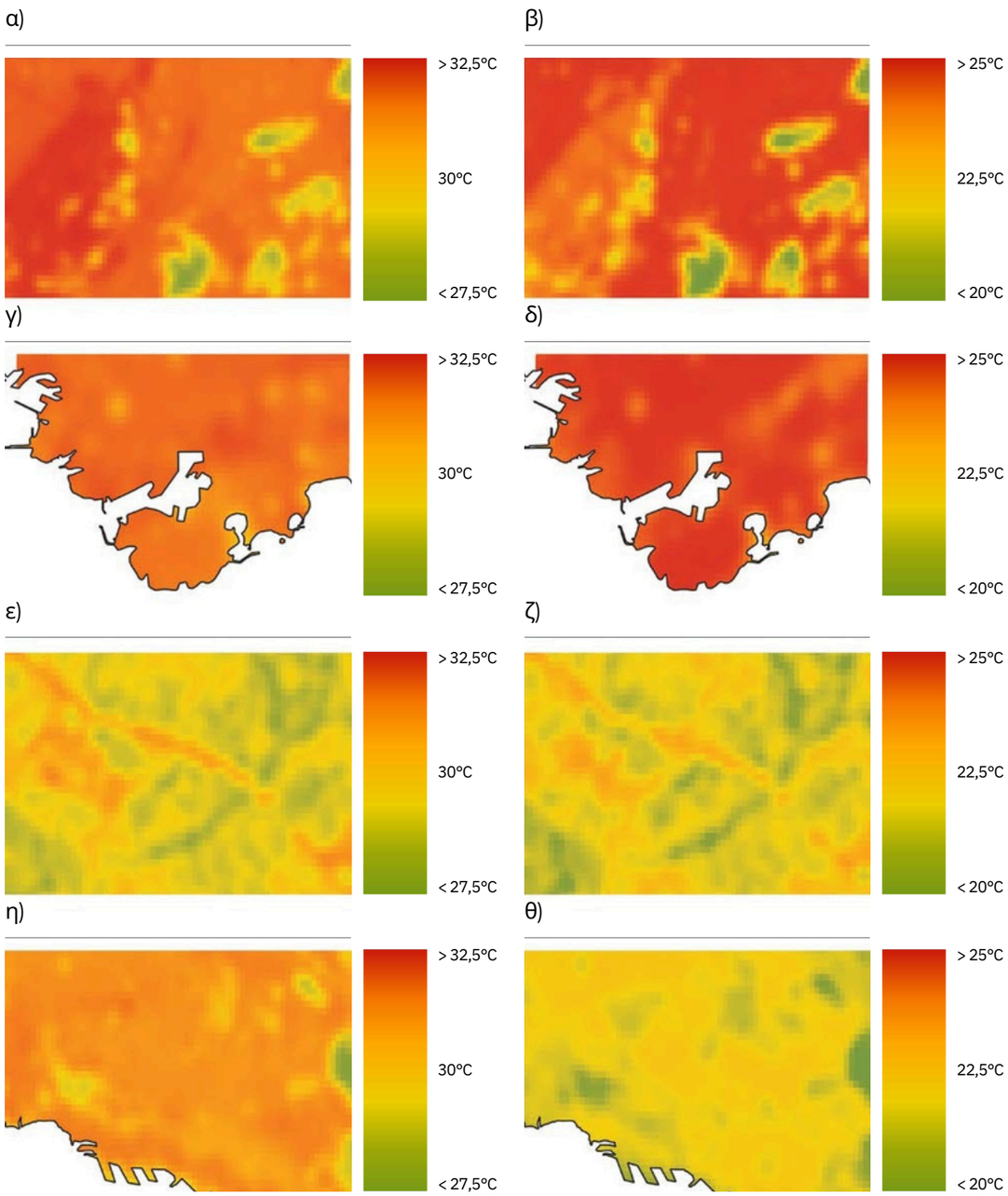
Σε συμφωνία με τις δορυφορικές παρατηρήσεις LST που παρουσιάστηκαν προηγουμένως, και λειτουργούν ως proxies για τη θερμοκρασία του αέρα, τα Σχήματα 2.12α και 2.12β καταδεικνύουν ότι η ευρύτερη περιοχή του Ελαιώνα (LCZ 8) καταγράφει τις υψηλότερες θερμοκρασίες αέρα κατά τη διάρκεια της ημέρας, ενώ τη νύχτα θερμότερος εμφανίζεται ο πυκνός αστικός ιστός του Κέντρου. Οι διαφορές αυτές αποδίδονται κυρίως στη διαφορετική θερμική αδράνεια των περιοχών, δηλαδή στον διαφορετικό ρυθμό με τον οποίο τα υλικά θερμαίνονται και ψύχονται. Παρ' όλα αυτά, οι απόλυτες διαφοροποιήσεις στη θερμοκρασία αέρα μεταξύ LCZ 8 και LCZ 2 είναι πιο μετριασμένες σε σχέση με τις αντίστοιχες της επιφανειακής θερμοκρασίας, καθώς η ανάμειξη και μεταφορά του ατμοσφαιρικού αέρα μέσω της ροής τείνει να εξομαλύνει τις χωρικές αντιθέσεις.

Επιπλέον, τα μεγάλα αστικά πάρκα της Αθήνας, όπως ο Εθνικός Κήπος και ο Λόφος Φιλοπάπ- που, αλλά και μικρότεροι χώροι πρασίνου αποτυπώνονται ως διακριτές «ψυχρές νησίδες» μέσα στον αστικό ιστό, με θερμοκρασίες αέρα ως και 4°C χαμηλότερες από τις περιοχές δόμησης. Η βλάστηση μειώνει αποτελεσματικά τη θερμική επιβάρυνση. Η σκίαση που προσφέρουν τα δέντρα περιορίζει την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία, ενώ η εξατμισοδιαπνοή αφαιρεί θερμότητα από το περιβάλλον, συμβάλλοντας στη μείωση τόσο της θερμοκρασίας του φυλλώματος όσο και του αέρα. Οσον αφορά τον Πειραιά και τη Θεσσαλονίκη, η απουσία εκτεταμένων αστικών πάρκων οδηγεί σε μια πιο ομοιογενή θερμική εικόνα, με υψηλές θερμοκρασίες αέρα να επικρατούν στο μεγαλύτερο μέρος του αστικού ιστού. Αξίζει να παρατηρηθεί ότι τα δύο υπό ανάπλαση υπερτοπικά πάρκα της Θεσσαλονίκης (πρώην Στρατόπεδο Μεγάλου Αλεξάνδρου και Μητροπολιτικό Πάρκο Παύλου Μελά) παρουσιάζουν προς το παρόν περιορισμένη δροσιστική επίδραση κατά τη διάρκεια της ημέρας, ενώ η θερμική τους διαφοροποίηση από τις γύρω περιοχές ενισχύεται τη νύχτα, λόγω της αυξημένης δυνατότητας διαφυγής της θερμικής ακτινοβολίας (Σχήματα 2.12η και 2.12θ).

Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων τοπικής κλίμακας καταδεικνύουν ότι η Αθήνα, ο Πειραιάς και η Θεσσαλονίκη συνιστούν από τα πλέον πυκνοδομημένα μητροπολιτικά περιβάλλοντα της Ευρώπης. Η πυκνή δόμηση (LCZ 2) καταλαμβάνει το μεγαλύτερο μέρος του πολεοδομικού συγκροτήματος της Αθήνας, με εκτεταμένες αδιαπέρατες επιφάνειες και ελάχιστους συνεχείς χώρους πρασίνου ή υδάτινες εκτάσεις. Η υπερκάλυψη του εδάφους από ανθρωπογενή υλικά περιορίζει δραστικά τους φυσικούς μηχανισμούς ψύξης, όπως η σκίαση, η εξατμισοδιαπνοή και η απορρόφηση νερού, εντείνοντας τις θερμικές πιέσεις κατά τη θερινή περίοδο. Αντίστοιχα, και η Θεσσαλονίκη εμφανίζει υψηλή πυκνότητα αδιαπέρατων επιφανειών και έλλειψη εκτεταμένων χώρων πρασίνου, ιδιαίτερα στο ιστορικό και εμπορικό της κέντρο. Οι πράσινοι χώροι είναι μικροί, διάσπαρτοι και άνισα κατανεμημένοι. Ως αποτέλεσμα, η θερμική επιβάρυνση στις κεντρικές αστικές ζώνες των δύο πόλεων είναι ιδιαίτερα αυξημένη, ειδικά κατά τη διάρκεια παρατεταμένων θερινών καυσώνων.

Τέλος, η περιοχή του Αμαρουσίου (Σχήματα 2.12ε και 2.12ζ) εμφανίζει συνολικά χαμηλότερες θερμοκρασίες αέρα σε σχέση με τις πιο πυκνοδομημένες περιοχές, γεγονός που οφείλεται στο υψηλότερο ποσοστό πρασίνου και στην παρουσία περισσότερων διαδρόμων δροσισμού από τους επικρατούντες ανέμους στα βόρεια του λεκανοπεδίου. Ωστόσο η παραπάνω αποτύπωση της θερμοκρασίας αέρα σε τοπική κλίμακα δεν συνεπάγεται απουσία μικροκλιματικών επιβαρύνσεων ούτε αποκλείει υψηλότερα επίπεδα αισθητής θερμοκρασίας όταν συνυπολογίζεται λεπτομερώς η προσλαμβάνουσα ακτινοβολία (παράμετρος TMRT), όπως φάνηκε προηγουμένως στο Σχήμα 2.6β.

Σχήμα 2.12: Χωρική αποτύπωση της μέσης μέγιστης και μέσης ελάχιστης θερμοκρασίας αέρα τους θερινούς μήνες του 2021 για: α) και β) την Αθήνα, γ) και δ) τον Πειραιά, ε) και ζ) τον Δήμο Αμαρουσίου, η) και θ) τη Θεσσαλονίκη, αντίστοιχα, με χρήση του αστικού μοντέλου προσομοίωσης SUEWS σε χωρική ανάλυση 100 μέτρα. ↓



[3.0] ΜΙΚΡΟΚΛΙΜΑΤΙΚΉ ΑΝΑΛΎΣΉ ΣΤΗΝ ΠΡΑΞΉ: ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ ΚΑΙ ΣΕΝΑΡΙΑ ΑΣΤΙΚΩΝ ΠΑΡΕΜΒΑΣΕΩΝ

[3.1] Εισαγωγή

Η προηγούμενη ενότητα, αξιοποιώντας ευρύ φάσμα δεδομένων και δεικτών, ανέδειξε την επιτακτική ανάγκη ουσιαστικής αναβάθμισης του αστικού περιβάλλοντος, με στόχο τον περιορισμό της θερμικής επιβάρυνσης και τη βελτίωση της ποιότητας ζωής στις ελληνικές πόλεις.

Πώς θα μπορούσε να επιτευχθεί αυτό; Διεθνώς, οι προσεγγίσεις μετριασμού εστιάζουν κυρίως σε δύο άξονες: α) στην ενίσχυση του φυσικού δροσισμού μέσω «λύσεων που βασίζονται στη φύση» (nature based solutions), δηλαδή της βλάστησης και των υδάτινων στοιχείων και β) στην αύξηση της ανακλαστικότητας των αστικών επιφανειών, ώστε να περιορίζεται η απορρόφηση ηλιακής ακτινοβολίας.

Η ενίσχυση του αστικού πρασίνου αποτελεί μια από τις πιο αποτελεσματικές λύσεις για τη μείωση του θερμικού φορτίου των αστικών επιφανειών, μέσω της σκίασης και της εξατμισοδιαπνοής, δηλαδή μέσω του συνδυασμού της εξάτμισης του νερού και της διαπνοής των φυτών, όπου το νερό απορροφάται από τις ρίζες και αποβάλλεται στην ατμόσφαιρα μέσω των πόρων των φύλλων τους, οδηγώντας σε μείωση της θερμοκρασίας αέρα και επιφάνειας και στη δημιουρ- γία ψυχρών νησίδων εντός της πόλης. Οι χώροι πρασίνου, από μεγάλα πάρκα ως δέντρα μέσα στις αστικές χαράδρες, μπορούν να μειώσουν τις θερμοκρασίες κατά αρκετούς βαθμούς και να βελτιώσουν αισθητά το μικροκλίμα. Σημαντική συμβολή έχουν, επίσης, τα πράσινα δώματα και οι φυτεμένες όψεις, που ενισχύουν τον δροσισμό και μειώνουν τα θερμικά φορτία των κτιρίων. Παράλληλα, σύγχρονες βιοκλιματικές πρακτικές, όπως τα «πάρκα τσέπης», μικρής κλίμακας πράσινοι χώροι περίπου 500 τ.μ., και οι διαμορφώσεις τύπου superblocks, που δημιουργούν δίκτυα πεζοδρόμων και πράσινων διασταυρώσεων, προσφέρουν ευέλικτες και άμεσα εφαρμό- σιμες λύσεις για τη βελτίωση του θερμικού περιβάλλοντος σε πυκνοδομημένες γειτονιές.

Ιδιαίτερα αποδοτική είναι η χρήση «ψυχρών υλικών», δηλαδή υλικών με υψηλή ανακλαστικότητα και συντελεστή εκπομπής. Τα υλικά αυτά μπορούν να εφαρμοστούν σε στέγες, δρόμους και όψεις κτιρίων, αυξάνοντας την ανάκλαση της ηλιακής ακτινοβολίας και συμβάλλοντας στη μείωση της αποθηκευόμενης θερμότητας. Ενδεικτικά παραδείγματα ψυχρών υλικών είναι ειδικά ανακλαστικά επιχρίσματα και βαφές για στέγες και όψεις, ψυχρά ασφαλτικά ή τσιμεντοειδή υλικά για οδοστρώματα, καθώς και προηγμένα κεραμικά υλικά. Παράλληλα, τα τελευταία έτη έχουν αναπτυχθεί έγχρωμα ψυχρά υλικά, επιφάνειες με υψηλή ανακλαστικότητα στο εγγύς υπέρυθρο, καθώς και θερμοχρωμικά υλικά, υλικά τα οποία αλλάζουν τις ιδιότητές τους ανάλογα με τη θερ- μοκρασία του εξωτερικού περιβάλλοντος, για στοχευμένη βελτίωση των θερμικών ιδιοτήτων του κτιριακού κελύφους. Αξίζει να σημειωθεί ότι ένα υλικό δεν χαρακτηρίζεται ως «ψυχρό» απλώς λόγω χρώματος ή σύστασης, αλλά βάσει μετρήσιμων οπτικών και θερμικών ιδιοτήτων.

Παρά τις πολύτιμες πληροφορίες που προσφέρουν οι αναλύσεις σε πιο μακροσκοπική κλίμακα και η ταξινόμηση των αστικών περιοχών σε τυπολογίες όπως οι LCZ, η θερμική επιβάρυνση που τελικά βιώνει ο κάτοικος μιας πόλης διαμορφώνεται σε μεγάλο βαθμό από φαινόμενα που εξελίσ- σονται σε χωρικές κλίμακες λίγων μόλις μέτρων, δηλαδή στο επίπεδο του αστικού μικροκλίματος. Για τον λόγο αυτό, απαιτούνται εξειδικευμένα μοντέλα πολύ υψηλής ανάλυσης, ικανά να αποδώ- σουν με μεγάλη λεπτομέρεια την αλληλεπίδραση της αστικής γεωμετρίας, της ροής του αέρα και της βλάστησης. Μοντέλα αυτού του τύπου επιτρέπουν, επίσης, τη διερεύνηση του αναμενόμενου οφέλους από βιοκλιματικές παρεμβάσεις προτού αυτές υλοποιηθούν στον πραγματικό χώρο.

Συνεπώς οι προηγούμενες ενότητες ανέδειξαν τον καθοριστικό ρόλο της αστικής μορφολογίας στη διαμόρφωση του θερμικού περιβάλλοντος των πόλεων. Για να αξιολογηθεί ο τρόπος με τον οποίο οι παράγοντες αυτοί αλληλοεπιδρούν σε επίπεδο μικροκλίμακας, πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις πολύ υψηλής χωρικής ανάλυσης (3 μέτρα) με το τρισδιάστατο αστικό μοντέλο ENVI-met. Το ENVI-met αποτελεί το πλέον διαδεδομένο μικροκλιματικό μοντέλο υπολογιστικής ρευστοδυναμικής (CFD), επιλύοντας σύνθετες μαθηματικές εξισώσεις και αποδίδοντας με ρεαλιστικό τρόπο τη δυναμική αλληλεπίδραση μεταξύ του δομημένου περιβάλλοντος, της βλάστησης και της ατμοσφαιρικής ροής.

[3.2] Περιοχές μελέτης

Οι μικροκλιματικές προσομοιώσεις πραγματοποιήθηκαν σε αντιπροσωπευτικές περιοχές της Αθήνας και της Θεσσαλονίκης, οι οποίες καλύπτουν διαφορετικές τυπολογίες αστικού ιστού, επίπεδα πυκνότητας δόμησης, γεωμετρίες δρόμων και λειτουργικά χαρακτηριστικά. Η επιλογή τους επιτρέπει μια ολοκληρωμένη και συγκριτική διερεύνηση της μικροκλιματικής συμπεριφοράς των ελληνικών πόλεων, από ιδιαίτερα πυκνές αστικές χαράδρες έως πρώην βιομηχανικές ζώνες σε φάση ανάπλασης, επιχειρηματικούς κόμβους και τυπικές οικιστικές συνοικίες. Η προσέγγιση αυτή παρέχει ένα αξιόπιστο υπόβαθρο για την αξιολόγηση στοχευμένων παρεμβάσεων μέσω προσομοιώσεων ENVI met πολύ υψηλής χωρικής ανάλυσης. Πιο συγκεκριμένα, οι περιοχές μελέτης είναι οι εξής:

- Κέντρο Αθήνας: Πλατεία Ομονοίας και Πλατεία Κοτζιά: Δύο γειτονικές χωρικές ενότητες με παρόμοια μορφολογικά χαρακτηριστικά, αλλά διαφορετικό προφίλ θερμικής επιβάρυνσης. Η περιοχή Ομόνοιας-Πατησίων αποτελεί μια από τις πλέον θερμικά επιβαρυμένες ζώνες της πόλης, λόγω των υψηλών ανθρωπογενών εκπομπών θερμότητας (κλιματισμός, κυκλοφορία), των υλικών χαμηλής ανακλαστικότητας και της σχεδόν πλήρους απουσίας δέντρων. Αντίστοιχα, η περιοχή της Πλατείας Κοτζιά, παρότι με λιγότερες άμεσες πηγές θερμότητας, εμφανίζει επίσης έντονη θερμική καταπόνηση, εξαιτίας της περιορισμένης σκίασης και της υψηλής ηλιακής έκθεσης. Και στις δύο περιπτώσεις, η συνύπαρξη μεγάλων ανοιχτών χώρων και στενών αστικών χαραδρών με υψηλές τιμές της αναλογίας διαστάσεων αστικής χαράδρας (H/W > 2) οδηγεί σε παγίδευση θερμότητας και μειωμένη ανανέωση αέρα.
- 'Αγιος Διονύσιος στον Πειραιά: Πρώην βιομηχανική ζώνη σε φάση ταχείας αναμόρφωσης, με περιορισμένο πράσινο, ύπαρξη ελεύθερων οικοπέδων και σχετικά χαμηλό ύψος κτιρίων. Η σημαντική ποικιλία στις μορφολογικές παραμέτρους H/W και ψ_{sky} δημιουργεί ετερογενείς μικροκλιματικές συνθήκες. Η περιοχή αποτελεί χαρακτηριστικό παράδειγμα για τη διερεύνηση του μικροκλίματος σε ζώνες που εντάσσονται εκ νέου στον αστικό ιστό και προσφέρεται για την αξιολόγηση διαφορετικών σεναρίων αστικού ανασχεδιασμού.
- Αστικός επιχειρηματικός κόμβος στο Μαρούσι (περιοχή νέου συγκροτήματος ΤΕΕ): Περιοχή έντονης επιχειρηματικής δραστηριότητας, με μεγάλα συγκροτήματα γραφείων, εκτεταμένο οδικό δίκτυο και περιορισμένη βλάστηση. Οι μεγάλες, ανοιχτές εκτάσεις επιτρέπουν υψηλή ηλιακή έκθεση, ενώ η Αττική Οδός, λόγω χαμηλής ανακλαστικότητας, απορροφά σημαντικό μέρος της ακτινοβολίας. Η διάταξη των κτιρίων επιτρέπει τη διέλευση του ανέμου σε συγκεκριμένες διευθύνσεις, όπως αυτές σχετίζονται, επίσης, με την επικρατούσα διεύθυνση του ανέμου. Η ανάλυση επικεντρώνεται στο οικόπεδο ανέγερσης του νέου κτιρίου του Τεχνικού Επιμελητηρίου Ελλάδας (ΤΕΕ), συμπεριλαμβανομένης μιας ευρύτερης περιμετρικής ζώνης, ώστε να αποτυπωθούν οι υφιστάμενες μικροκλιματικές συνθήκες.

- Δυτική Είσοδος στη Θεσσαλονίκη (πρώην εργοστάσιο ΦΙΞ): Ζώνη βιομηχανικής κληρονομιάς που αναδιαμορφώνεται σε ολοκληρωμένο σύγχρονο αστικό σύνολο. Το εκτεταμένο οικόπεδο του πρώην ΦΙΞ χαρακτηρίζεται σήμερα από μεγάλες, ανοιχτές επιφάνειες, περιορισμένη σκίαση και ελάχιστο πράσινο, με αποτέλεσμα τις αυξημένες θερμοκρασίες και την έντονη ηλιακή έκθεση. Η προσομοίωση επικεντρώνεται στη σύγκριση με την τελική μορφή του έργου μετά την ολοκλήρωση της ανάπλασης: ένα πλήρως αναβαθμισμένο αστικό σύνολο με νέες μεικτές χρήσεις, βιοκλιματικά κτίρια με εκτεταμένες πράσινες οροφές και σημαντικά
- Πυκνοδομημένη οικιστική περιοχή του Γκύζη: Τυπική αθηναϊκή συνοικία υψηλής πυκνότητας δόμησης με στενούς δρόμους, μικρές αποστάσεις μεταξύ κτιρίων και ελάχιστο πράσινο. Οι υψηλές τιμές H/W ενισχύουν την παγίδευση θερμότητας και περιορίζουν τη φυσική ανανέωση του αέρα, ιδιαίτερα γύρω από μεγάλα οικοδομικά τετράγωνα. Στο κέντρο της περιοχής μελέτης βρίσκεται το 40ο Δημοτικό Σχολείο Αθηνών, το οποίο περιβάλλεται από συνεχόμενη δόμηση και περιορισμένους ανοιχτούς χώρους, στοιχείο που το καθιστά αντιπροσωπευτική περίπτωση για αξιολόγηση παρεμβάσεων μικροκλιματικής βελτίωσης.

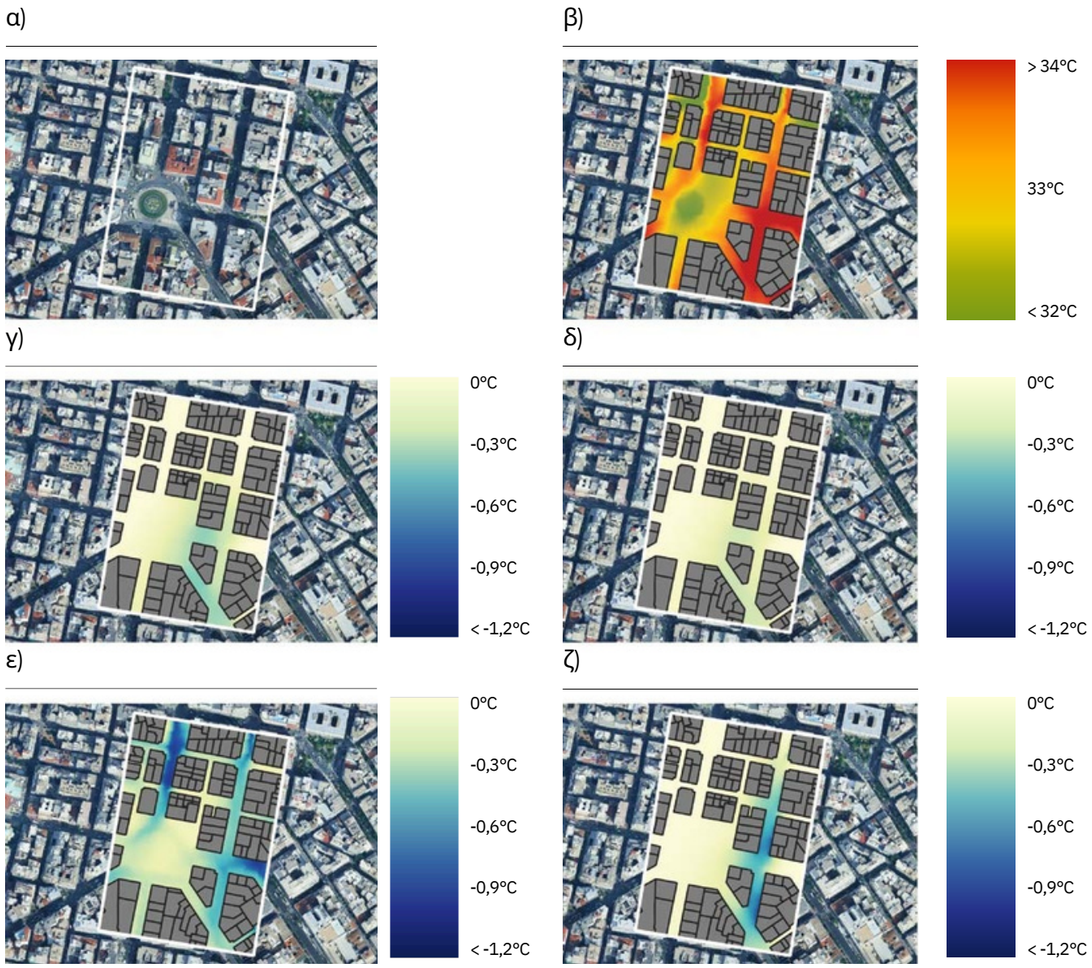
[3.3] Σενάρια παρεμβάσεων και αστικές αναπλάσεις

[3.3.1] Πλατεία Ομονοίας

Η μικροκλιματική αποτύπωση της περιοχής παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.1, όπου απεικονίζονται η υφιστάμενη κατάσταση και τέσσερα διαφορετικά σενάρια βιοκλιματικών παρεμβάσεων. Η προσομοίωση της υφιστάμενης κατάστασης (Σχήμα 3.1β) επιβεβαιώνει την έντονη θερμική καταπόνηση που χαρακτηρίζει την ευρύτερη περιοχή. Η μεγάλη κτιριακή πυκνότητα, οι υψηλές τιμές του δείκτη H/W και η επικράτηση αδιαπέραστων ανθρωπογενών επιφανειών οδηγούν σε αυξημένες θερμοκρασίες αέρα, ιδιαίτερα στα σημεία συμβολής της Πατησίων με τις οδούς Πανεπιστημίου και Σταδίου, όπου ο θερμός αέρας παγιδεύεται στον «πυθμένα» των αστικών χαραδρών. Αντί- θετα, η παρουσία της υδάτινης επιφάνειας και του γρασιδιού στο κεντρικό τμήμα της πλατείας συμβάλλει σε μερική αποκλιμάκωση της θερμοκρασίας αέρα, αλλά η θερμική δυσφορία που αισθάνονται οι πεζοί παραμένει υψηλή λόγω της απουσίας σκίασης και της έντονης έκθεσης στην ηλιακή ακτινοβολία. Η χρήση ψυχρών υλικών στο οδόστρωμα και στα πεζοδρόμια (Σχήμα 3.1ε) για το σύνολο της περιοχής οδηγεί σε μείωση της ηλιακής ακτινοβολίας που απορροφούν οι επιφάνειες και κατά συνέπεια προκαλεί σημαντική ελάττωση της θερμοκρασίας αέρα, της τά- ξης των 0,3 έως 1°C. Για τη συγκεκριμένη παρέμβαση πρέπει, ωστόσο, να λαμβάνεται υπόψη πιθανή ελάττωση της θερμικής άνεσης των πεζών λόγω της αύξησης της ανακλώμενης ακτινο- βολίας, καθώς και το φαινόμενο της θάμβωσης. Οι παρεμβάσεις στις οροφές των κτιρίων κατά μήκος της Πατησίων (στο τμήμα της προσομοίωσης), τόσο με ψυχρά υλικά (Σχήμα 3.1γ) όσο και με πράσινες οροφές (Σχήμα 3.1δ), παρουσιάζουν πιο περιορισμένη επίδραση στο επίπεδο του δρόμου (στις περισσότερες περιπτώσεις, κάτω των 0,4°C), καθώς το μεγάλο ύψος των κτιρίων μειώνει τη θερμική αλληλεπίδραση των οροφών με τα χαμηλότερα στρώματα του αέρα. Αξίζει, βέβαια, να σημειωθεί ότι η εισαγωγή πράσινων και ψυχρών οροφών στα κτίρια οδηγεί, σε κάθε περίπτωση, σε βελτίωση της θερμικής και ενεργειακής συμπεριφοράς τους, μειώνοντας τις ανά- γκες για ψύξη κατά τους θερινούς μήνες. Η δημιουργία πράσινων τοίχων στις πλευρικές όψεις των κτιρίων της Πατησίων (Σχήμα 3.1ζ) προσφέρει σαφώς μεγαλύτερο όφελος στη θερμοκρασία αέρα σε επίπεδο δρόμου, αξιοποιώντας την ηλιακή ακτινοβολία μέσω της εξατμισοδιαπνοής και ενισχύοντας τον άμεσο δροσισμό στα κατώτερα στρώματα της αστικής χαράδρας.



Σχήμα 3.1: Μικροκλιματική αποτύπωση και σενάρια παρεμβάσεων για την περιοχή Ομόνοιας-Πατησίων: α) δορυφορική απεικόνιση της περιοχής, β) υφιστάμενη κατάσταση, γ) σενάριο πράσινων οροφών στην οδό Πατησίων, δ) σενάριο ψυχρών οροφών στην οδό Πατησίων, ε) σενάριο ψυχρών υλικών σε οδόστρωμα και πεζοδρόμια, ζ) σενάριο πράσινων τοίχων στην οδό Πατησίων. Θερμοκρασία αέρα (°C) στα 2 μέτρα, απόλυτη τιμή για την υφιστάμενη κατάσταση και μεταβολή συγκριτικά με την υφιστάμενη κατάσταση για τα σενάρια, στις 15:00 κατά τυπική αίθρια θερινή ημέρα (10 Ιουλίου 2021). ↓



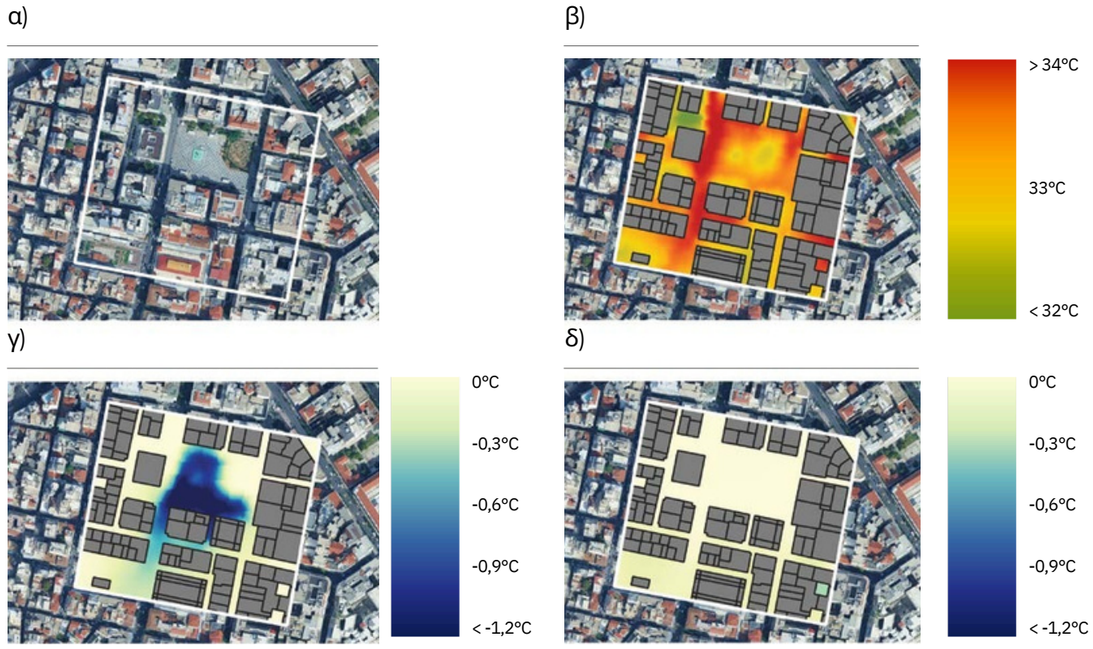
[3.3.2]

Πλατεία Κοτζιά

Στο Σχήμα 3.2 παρουσιάζεται η μικροκλιματική αποτύπωση της Πλατείας Κοτζιά, όπου η υφιστάμενη κατάσταση (Σχήμα 3.2β) αναδεικνύει το θερμικό περιβάλλον που διαμορφώνεται λόγω της περιορισμένης σκίασης και της έλλειψης πράσινων χώρων, με τη μεγαλύτερη θερμική επιβάρυν- ση να εντοπίζεται κατά μήκος της οδού Αθηνάς και στη διασταύρωσή της με τη Σοφοκλέους. Η μετατροπή της πλατείας, εκτός του αρχαιολογικού χώρου, σε χώρο πρασίνου με γρασίδι και δέ- ντρα (Σχήμα 3.2γ) αποτελεί ένα από τα πιο αποτελεσματικά σενάρια, μειώνοντας τη θερμοκρασία αέρα κατά περίπου 1,5°C και δημιουργώντας μια σαφή ψυχρή νησίδα στο κέντρο της περιοχής. Σημαντικό στοιχείο είναι, επίσης, ότι η δροσιστική επίδραση του πάρκου επεκτείνεται και στη Σοφοκλέους, μέσω της ενίσχυσης της τοπικής ροής αέρα. Όπως και στην περίπτωση της Πατη- σίων προηγουμένως, παρά τη μείωση της θερμικής επιβάρυνσης των κτιρίων, οι παρεμβάσεις στις οροφές της οδού Σοφοκλέους, τόσο οι ψυχρές (Σχήμα 3.2δ) όσο και οι πράσινες οροφές (Σχήμα 3.2ε), εμφανίζουν αρκετά περιορισμένη επίδραση στο επίπεδο του δρόμου, λόγω του μεγάλου ύψους των κτιρίων και της μειωμένης θερμικής σύνδεσης με τα κατώτερα στρώματα του αέρα. Αντίθετα, ο συνδυασμός δέντρων και ψυχρών/πράσινων οροφών κατά μήκος της οδού Αθηνάς (Σχήμα 3.2ζ) προσφέρει ουσιαστική βελτίωση της θερμικής άνεσης, καθώς η σκίαση από τη δενδροφύτευση επενεργεί άμεσα στο επίπεδο του δρόμου. Στο σημείο φύτευσης, η θερμοκρασία στα 2 μέτρα μειώνεται τοπικά ως και κατά 2°C. Τέλος, το σενάριο δημιουργίας superblock με επίκεντρο τη Σοφοκλέους (Σχήμα 3.2η) επιφέρει ανάλογη μείωση θερμοκρασίας, ενώ παράλληλα δημιουργεί έναν αναβαθμισμένο, ενιαίο χώρο δημόσιας χρήσης, προσφέροντας μικροκλιματικά αλλά και κοινωνικά οφέλη.



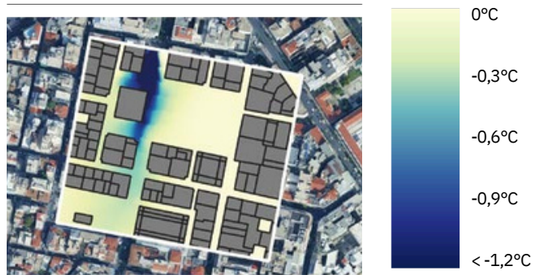
Σχήμα 3.2: Μικροκλιματική αποτύπωση και σενάρια παρεμβάσεων για την περιοχή Πλατείας Κοτζιά: α) δορυφορική απεικόνιση της περιοχής, β) υφιστάμενη κατάσταση, γ) σενάριο μετατροπής της πλατείας σε πάρκο με γρασίδι και δέντρα, δ) σενάριο ψυχρών οροφών στη Σοφοκλέους, ε) σενάριο πράσινων οροφών στη Σοφοκλέους, ζ) σενάριο δέντρων, ψυχρών οροφών και πράσινων οροφών στην Αθηνάς, η) σενάριο superblock στη Σοφοκλέους. Θερμοκρασία αέρα (°C) στα 2 μέτρα, απόλυτη τιμή για την υφιστάμενη κατάσταση και μεταβολή συγκριτικά με την υφιστάμενη κατάσταση για τα σενάρια, στις 15:00 κατά τυπική αίθρια θερινή ημέρα (10 Ιουλίου 2021). ↓



ε)



ζ)



η)

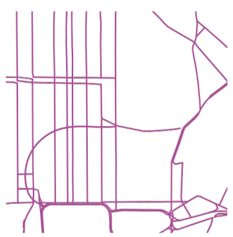


[3.3.3]

'Αγιος Διονύσιος Πειραιά

Οι προσομοιώσεις για την πρώην βιομηχανική ζώνη του Αγίου Διονυσίου αποτυπώνονται στο Σχήμα 3.3. Η υφιστάμενη κατάσταση (Σχήμα 3.3β) χαρακτηρίζεται από αυξημένες θερμοκρασίες αέρα, ιδιαίτερα στις ανοιχτές και εκτεθειμένες στην ηλιακή ακτινοβολία επιφάνειες στη διασταύ- ρωση των οδών Παπαστράτου και Αντιπλοιάρχου Παν. Βλαχάκου, όπου, επιπλέον, η γεωμετρία του χώρου ευνοεί τον εγκλωβισμό θερμού αέρα. Αντίθετα, η παρουσία βλάστησης κατά μήκος της οδού Μαυρομιχάλη και παρακείμενων ανοιχτών χώρων συμβάλλει σε χαμηλότερες θερμο- κρασίες, αναδεικνύοντας την τοπική δροσιστική επίδραση της βλάστησης ακόμη και όταν αυτή καταλαμβάνει μικρό ποσοστό της συνολικής έκτασης.

Η αξιολόγηση των παρεμβάσεων για τη βελτίωση του θερμικού περιβάλλοντος δείχνει ότι το σύνολο των εξεταζόμενων σεναρίων επιφέρει ουσιαστική θερμική εκτόνωση. Σε αντίθεση με τις προηγούμενες περιοχές μελέτης, το σχετικά χαμηλό ύψος των κτιρίων στον Αγιο Διονύσιο επι- τρέπει στις παρεμβάσεις στις οροφές να επιδρούν πιο αποτελεσματικά στη θερμοκρασία αέρα στο επίπεδο του δρόμου. Η εφαρμογή ψυχρών οροφών στο 50% των κτιρίων οδηγεί σε μεί- ωση της θερμοκρασίας κατά περίπου 0,5°C σε μεγάλο τμήμα της περιοχής (Σχήμα 3.3γ), ενώ η χρήση πράσινων οροφών (Σχήμα 3.3δ) προσφέρει ακόμα μεγαλύτερη βελτίωση, με τοπικές μειώσεις που προσεγγίζουν τον 1°C. Σε μια περιοχή όπου απουσιάζουν μεγάλοι χώροι πρασίνου, η αξιοποίηση των διαθέσιμων μικρών ελεύθερων χώρων και των αυλών των σχολείων για τη δημιουργία «πάρκων τσέπης» αποτελεί μια ιδιαίτερα στοχευμένη προσέγγιση. 'Οπως φαίνεται στο Σχήμα 3.3ε, η συνδυαστική λειτουργία πέντε γειτονικών πάρκων τσέπης βελτιώνει αισθητά το μικροκλίμα της περιοχής. Ειδικά η δημιουργία ενός νέου μικρού πάρκου στον αύλειο χώρο του 13ου Γυμνασίου Πειραιά μειώνει τη θερμοκρασία τοπικά ως και κατά 2°C, με το όφελος να επεκτείνεται και στους γειτονικούς δρόμους μέσω της τοπικής κυκλοφορίας του αέρα. Τέλος, η εφαρμογή ψυχρών υλικών στο οδόστρωμα και στα πεζοδρόμια (Σχήμα 3.3ζ) μειώνει τη θερμο- κρασία κατά περίπου 0,5°C σε ολόκληρη την περιοχή.



Σχήμα 3.3: Μικροκλιματική αποτύπωση και σενάρια παρεμβάσεων για την περιοχή Αγίου Διονυσίου Πειραιά: α) δορυφορική απεικόνιση της περιοχής, β) υφιστάμενη κατάσταση, γ) σενάριο ψυχρών οροφών στο 50% των κτιρίων, δ) σενάριο πράσινων οροφών στο 50% των κτιρίων, ε) σενάριο πάρκων τσέπης, συμπεριλαμβανομένου του αύλειου χώρου σχολείου, ζ) σενάριο ψυχρών υλικών στο οδόστρωμα και στα πεζοδρόμια. Θερμοκρασία αέρα (°C) στα 2 μέτρα, απόλυτη τιμή για την υφιστάμενη κατάσταση και μεταβολή συγκριτικά με την υφιστάμενη κατάσταση για τα σενάρια, στις 15:00 κατά τυπική αίθρια θερινή ημέρα (11 Ιουλίου 2021).

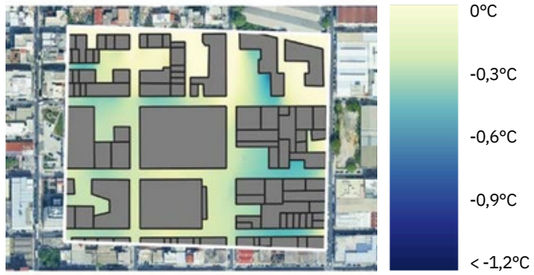
α)



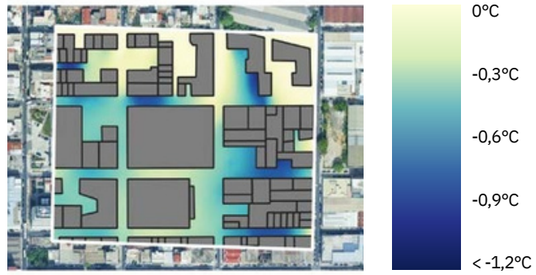
β)



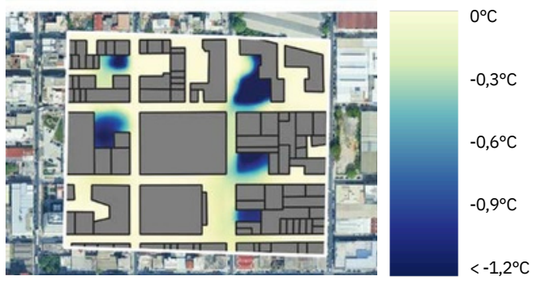
γ)



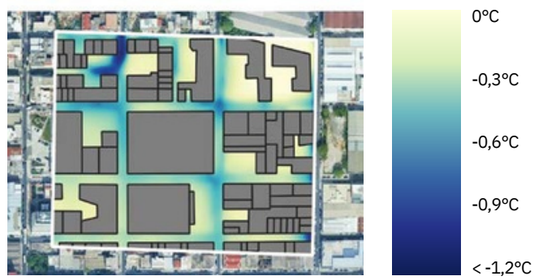
δ)



ε)



ζ)



[3.3.4]

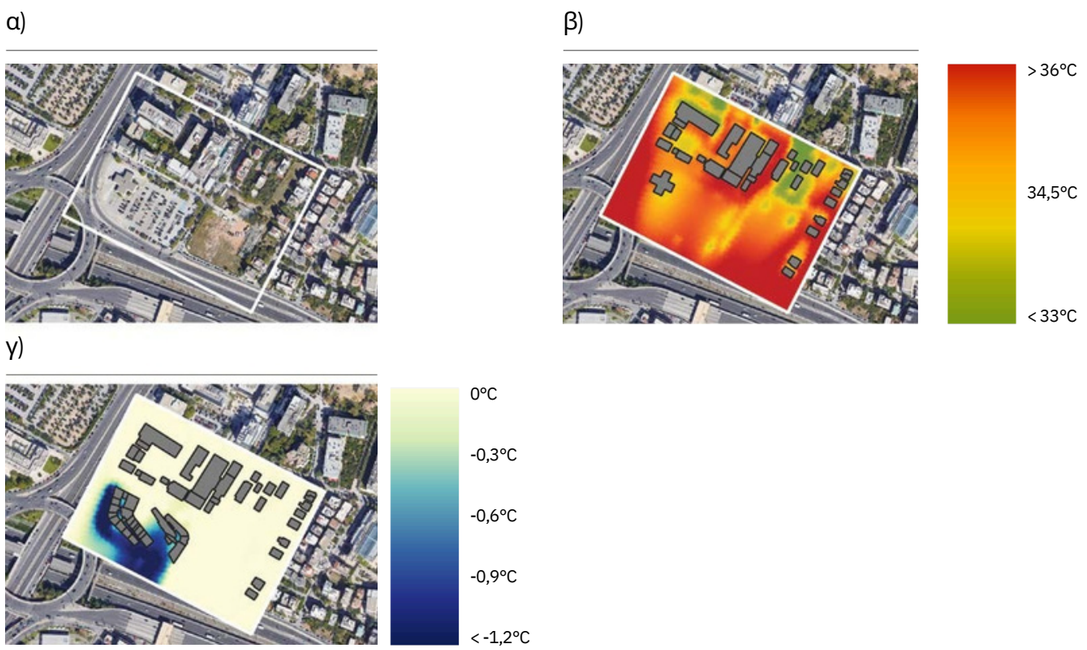
Μαρούσι (ΤΕΕ)

Για την περιοχή του Αμαρουσίου αξιολογήθηκε το θερμικό αποτύπωμα της νέας βιοκλιματικής ανάπτυξης ακινήτου ιδιοκτησίας του Τεχνικού Επιμελητηρίου Ελλάδας, με την ανέγερση νέου κτιριακού συγκροτήματος γραφείων. Η υφιστάμενη κατάσταση (Σχήμα 3.4β) καταδεικνύει έντονη θερμική επιβάρυνση, με την Αττική Οδό και το οικόπεδο του ΤΕΕ να λειτουργούν ως εκτεταμένες επιφάνειες ανθρωπογενών υλικών, υψηλής απορρόφησης ηλιακής ακτινοβολίας και ελάχιστης σκίασης, σχηματίζοντας έναν θερμό σημείο (hot spot) που επηρεάζει αρνητικά το τοπικό μικρο- κλίμα.

Το νέο συγκρότημα αποτελείται από δύο κτιριακούς όγκους σε διάταξη «Γ», που ορίζουν έναν εσωτερικό κήπο και αναπτύσσονται με σταδιακή υποχώρηση στους ανώτερους ορόφους, δη- μιουργώντας διαδοχικές πράσινες οροφές (Σχήμα 3.5). Το σενάριο συνολικής ανάπλασης του οικοπέδου (Σχήμα 3.4γ), με τις πράσινες οροφές στα δύο νέα κτίρια, νέες δενδροστοιχίες και εκτεταμένη χαμηλή βλάστηση παρουσιάζει ουσιαστική βελτίωση του μικροκλίματος. Οι προσο- μοιώσεις δείχνουν μείωση της θερμοκρασίας αέρα κατά 1-1,5°C συγκριτικά με την προηγούμενη κατάσταση, με την ψυχρή επίδραση να εκτείνεται πέρα από τα όρια του οικοπέδου. Η μείω- ση αυτή οφείλεται στον συνδυασμό σκίασης, αύξησης της εξατμισοδιαπνοής και μείωσης της απορροφούμενης ηλιακής ενέργειας από τις νέες πράσινες επιφάνειες. Συνολικά, η παρέμβα- ση αναδεικνύει τον καθοριστικό ρόλο των εκτεταμένων πράσινων οροφών και των νέων χώρων πρασίνου στη βελτίωση του μικροκλίματος, αποδεικνύοντας ότι ακόμα και μεγάλοι κτιριακοί όγκοι μπορούν, μέσω βιοκλιματικού σχεδιασμού, να βελτιώσουν αντί να επιβαρύνουν το θερμικό περιβάλλον.t



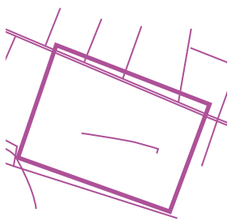
Σχήμα 3.4: Μικροκλιματική αποτύπωση και σενάριο παρέμβασης για την περιοχή του Αμαρουσίου (νέο συγκρότημα ΤΕΕ): α) δορυφορική απεικόνιση της περιοχής, β) υφιστάμενη κατάσταση, γ) σενάριο ανάπλασης με γρασίδι, δέντρα και δύο νέα κτίρια με εκτεταμένες πράσινες οροφές. Θερμοκρασία αέρα (°C) στα 2 μέτρα, απόλυτη τιμή για την υφιστάμενη κατάσταση και μεταβολή συγκριτικά με την υφιστάμενη κατάσταση για το σενάριο, στις 15:00 κατά τυπική αίθρια θερινή ημέρα (14 Ιουλίου 2021). ↓



Σχήμα 3.5: Αρχιτεκτονικό σχέδιο του συγκροτήματος γραφείων στο ακίνητο ιδιοκτησίας του Τεχνικού Επιμελητηρίου Ελλάδας στο Μαρούσι. ↓



[3.3.5]

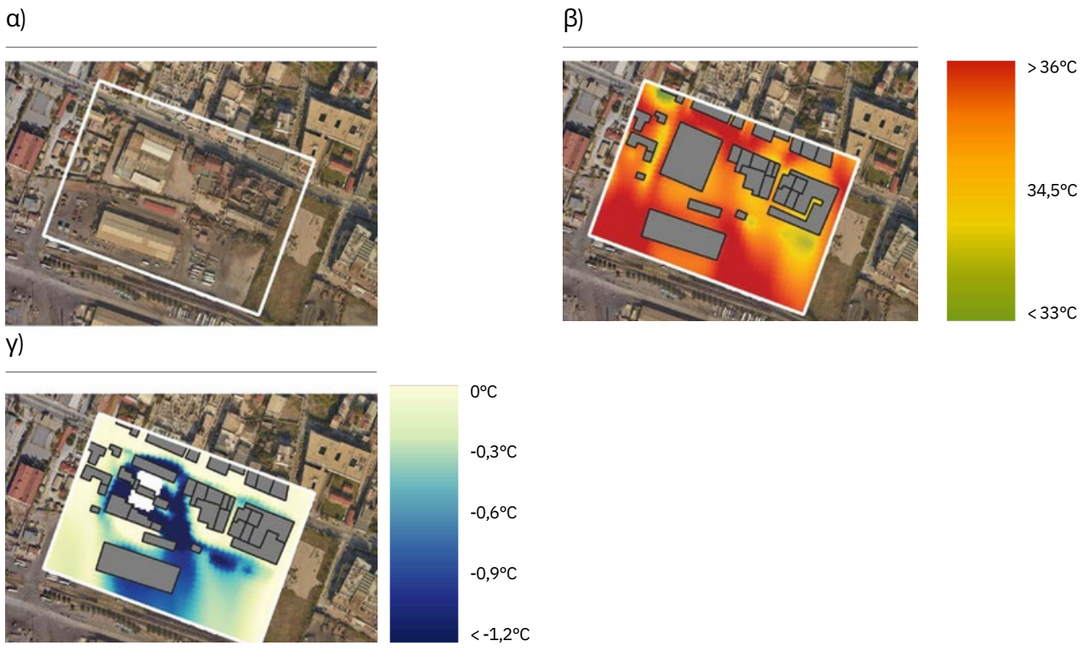


Δυτική Είσοδος Θεσσαλονίκη (ΦΙΞ)

Στο Σχήμα 3.6 παρουσιάζεται η μικροκλιματική αποτύπωση της περιοχής του πρώην εργοστα- σίου ΦΙΞ, όπου συγκρίνεται η προηγούμενη κατάσταση με την τελική μορφή της μετά την ολο- κλήρωση της ανάπλασης. Κατά την υφιστάμενη κατάσταση (Σχήμα 3.6β) παρατηρούνται εκτετα- μένες θερμές ζώνες λόγω μεγάλων, ανοιχτών και εκτεθειμένων επιφανειών, της περιορισμένης σκίασης και της απουσίας πρασίνου, παραγόντων που οδηγούν σε υψηλές θερμοκρασίες αέρα κατά τις μεσημβρινές ώρες.

Το σενάριο ανάπλασης (Σχήμα 3.6γ) προσομοιώνει τη διαμορφωμένη τελική κατάσταση του έρ- γου, η οποία περιλαμβάνει δύο νέα κτίρια μεικτής χρήσης με εκτεταμένες πράσινες οροφές, την αποκατάσταση των διατηρητέων κτιρίων και την εφαρμογή συστηματικών δενδροφυτεύσεων και εισαγωγής χαμηλής φύτευσης στον περιβάλλοντα χώρο. Η συνδυασμένη δράση των πρά- σινων οροφών, των δέντρων και των φυτεμένων επιφανειών δημιουργεί ένα πεδίο δροσισμού που μειώνει σημαντικά τη θερμική καταπόνηση. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων ENVI- met καταδεικνύουν μείωση της θερμοκρασίας αέρα κατά 0,5-1,5°C στο μεγαλύτερο μέρος του οικοπέδου, με ακόμα μεγαλύτερες τοπικές μειώσεις σε ζώνες υψηλής φύτευσης. Οι πράσινες οροφές συμβάλλουν στη σταδιακή αποφόρτιση της αποθηκευμένης θερμότητας, ενώ οι δεν- δροφυτεύσεις παρέχουν άμεσο δροσισμό μέσω σκίασης και εξατμισοδιαπνοής. Συνολικά, η τε- λική ανάπλαση του ΦΙΞ μετατρέπει μια ιδιαίτερα θερμική βιομηχανική έκταση σε έναν σύγχρονο αστικό κόμβο με σαφώς βελτιωμένη θερμική άνεση για εργαζόμενους και επισκέπτες.

Σχήμα 3.6: Μικροκλιματική αποτύπωση και σενάριο παρέμβασης για τη Δυτική Είσοδο Θεσσαλονίκης (πρώην εργοστάσιο ΦΙΞ): α) δορυφορική απεικόνιση της περιοχής, β) υφιστάμενη κατάσταση, γ) σενάριο συνολικής ανάπλασης με δέντρα, γρασίδι και πράσινες οροφές στα νέα κτίρια. Θερμοκρασία αέρα (°C) στα 2 μέτρα, απόλυτη τιμή για την υφιστάμενη κατάσταση και μεταβολή συγκριτικά με την υφιστάμενη κατάσταση για το σενάριο, στις 15:00 κατά τυπική αίθρια θερινή ημέρα (4 Ιουλίου 2021).

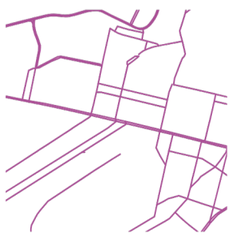


[3.3.6]

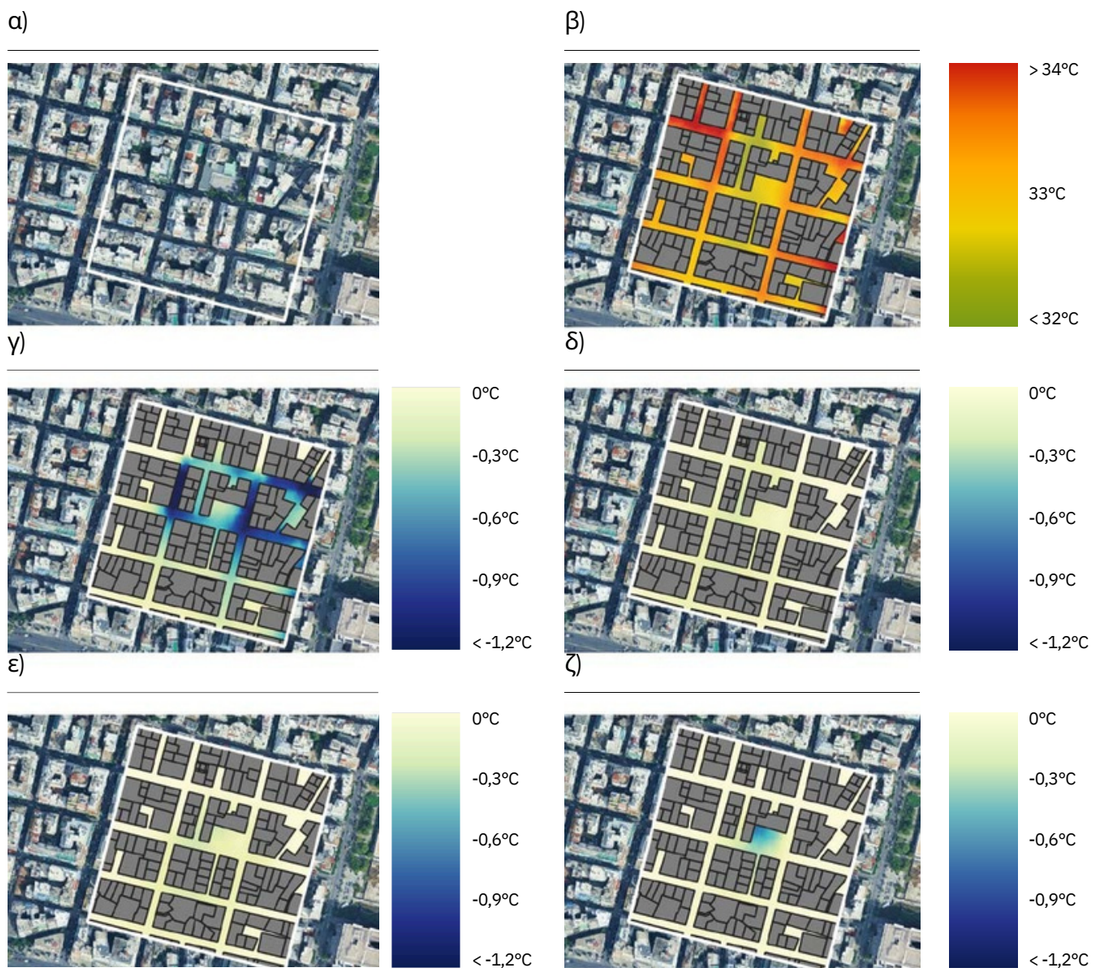
Γκύζη

Η μικροκλιματική αποτύπωση της πυκνοδομημένης οικιστικής περιοχής του Γκύζη παρουσιάζε- ται στο Σχήμα 3.7. Η υφιστάμενη κατάσταση (Σχήμα 3.7β) αναδεικνύει τις υψηλές θερμοκρασίες αέρα που επικρατούν γύρω από το σχολικό συγκρότημα του 40ού Δημοτικού Σχολείου Αθηνών, λόγω της συνεχούς δόμησης, των στενών δρόμων και της περιορισμένης παρουσίας βλάστη- σης. Οι υψηλές τιμές H/W ευνοούν την παγίδευση θερμότητας, δημιουργώντας ένα περιβάλλον αυξημένης θερμικής καταπόνησης.

Το σενάριο δημιουργίας superblock γύρω από το σχολείο (Σχήμα 3.7γ) αποτελεί την πιο στοχευ- μένη παρέμβαση σε επίπεδο δημόσιου δρόμου, καθώς περιορίζει την κυκλοφορία οχημάτων, αυξάνει τον διαθέσιμο χώρο για πεζούς και επιτρέπει την εισαγωγή σκίασης και φύτευσης στις διασταυρώσεις. Το αποτέλεσμα είναι μια αισθητή μείωση της θερμοκρασίας αέρα της τάξης του 1°C κατά μήκος των γύρω οδών και περίπου 0,5°C στον κεντρικό πυρήνα του σχολείου. Οι πα- ρεμβάσεις στις οροφές των γειτονικών κτιρίων, τόσο οι ψυχρές (Σχήμα 3.7δ) όσο και οι πράσινες (Σχήμα 3.7ε), παρουσιάζουν περιορισμένο μικροκλιματικό όφελος στο επίπεδο του δρόμου, με τις μειώσεις θερμοκρασίας να κυμαίνονται κάτω από 0,3-0,4°C. Το τελευταίο σενάριο αφορά τον ανασχεδιασμό του σχολικού αύλειου χώρου (Σχήμα 3.7ζ), ο οποίος συνδυάζει πράσινες οροφές στο σχολικό συγκρότημα, πράσινο τοίχο στην πλευρική όψη και τη δημιουργία ενός νέου πάρκου τσέπης εντός του σχολείου. Ο συνδυασμός αυτός επιφέρει μείωση της θερμοκρασίας αέρα που υπερβαίνει τα 0,5°C σε σχέση με την υφιστάμενη κατάσταση, βελτιώνοντας τις θερμικές συνθή- κες τόσο για τους μαθητές όσο και για τους κατοίκους της γειτονιάς.



Σχήμα 3.7: Μικροκλιματική αποτύπωση και σενάρια παρεμβάσεων για την περιοχή Γκύζη γύρω από το 40ό Δημοτικό Σχολείο: α) δορυφορική απεικόνιση της περιοχής, β) υφιστάμενη κατάσταση, γ) σενάριο δημιουργίας superblock γύρω από το σχολείο, δ) σενάριο ψυχρών οροφών, ε) σενάριο πράσινων οροφών, ζ) σενάριο συνδυασμένων παρεμβάσεων στον σχολικό αύλειο χώρο (πράσινες οροφές, πράσινος τοίχος, πάρκο τσέπης). Θερμοκρασία αέρα (°C) στα 2 μέτρα, απόλυτη τιμή για την υφιστάμενη κατάσταση και μεταβολή συγκριτικά με την υφιστάμενη κατάσταση για τα σενάρια, στις 15:00 κατά τυπική αίθρια θερινή ημέρα (10 Ιουλίου 2021).



[4.0] ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η ανάλυση της μελέτης ανέδειξε με σαφήνεια ότι η θερμική συμπεριφορά των πόλεων στην Ελλάδα χαρακτηρίζεται από έντονη χωρική διαφοροποίηση, η οποία προκύπτει από τον συνδυασμό μορφολογικών χαρακτηριστικών, κάλυψης γης, είδους υλικών και ανθρωπογενών πηγών θερμότητας. Η συσχέτιση των δορυφορικών δεδομένων, των μορφολογικών δεικτών και των αριθμητικών προσομοιώσεων υψηλής ανάλυσης επιτρέπει μια ολοκληρωμένη κατανόηση του πώς η δομή και η λειτουργία της πόλης διαμορφώνουν το αστικό μικροκλίμα, από τις πυκνές αστικές χαράδρες με υψηλό H/W και χαμηλό ψ_{sky} ως τους ανοιχτούς χώρους σε βιομηχανικές ζώνες και τα σημεία υψηλής κυκλοφορίας οχημάτων.

Η αξιολόγηση των παρεμβάσεων μέσω μικροκλιματικών προσομοιώσεων καταδεικνύει ότι η ενίσχυση του πρασίνου και «λύσεων που βασίζονται στη φύση» (nature based solutions) αποτε- λεί τη βασική στρατηγική για τη μείωση της θερμοκρασίας, προσφέροντας σημαντική βελτίωση των συνθηκών ακόμα και σε ιδιαίτερα πυκνοδομημένες αστικές περιοχές. Οι παρεμβάσεις στην ανακλαστικότητα των αστικών επιφανειών, όπως τα ψυχρά υλικά, παρουσιάζουν επίσης θετικά αποτελέσματα, αλλά απαιτούν προσεκτική εφαρμογή, ώστε να αποφευχθούν φαινόμενα μείωσης της θερμικής άνεσης και θάμβωσης, λόγω αυξημένης ανακλώμενης ακτινοβολίας, κάτι που αντιμετωπίζεται από τη νέα γενιά υλικών, η οποία εστιάζει στο μη ορατό κομμάτι του φάσματος. Τόσο οι ψυχρές όσο και οι πράσινες οροφές αποδεικνύονται αποτελεσματικές σε περιοχές μεσαίου ύψους κτιρίων, ενώ οι συνδυαστικές αναπλάσεις, που ενσωματώνουν νέα υλικά, σκίαση, βιοκλιματικά κτίρια και νέους χώρους πρασίνου, παρουσιάζουν τις μεγαλύτερες και πιο σταθε- ρές βελτιώσεις του θερμικού περιβάλλοντος.

Η μετάβαση από τα δεδομένα και τα αποτελέσματα στη λήψη αποφάσεων στηρίζεται στην ιεράρχηση των περιοχών με τη μεγαλύτερη θερμική επιβάρυνση, όπως αυτές προκύπτουν από τη χωρική ανάλυση της θερμοκρασίας και των μορφολογικών δεικτών. Η τεκμηρίωση αυτή προσφέρει ένα σαφές πλαίσιο για την προτεραιοποίηση έργων αναβάθμισης σε πυκνοδομημένες αστικές χαράδρες, κύριους εμπορικούς άξονες, σχολικά συγκροτήματα και υποβαθμισμένες συνοικίες πρώην βιομηχανικών χρήσεων. Παράλληλα αναδεικνύει την ανάγκη διατήρησης ή ενίσχυ- σης διαδρόμων αερισμού, την αναβάθμιση υφιστάμενων δημόσιων χώρων και τη δημιουργία νέων πράσινων υποδομών, όπως πάρκα τσέπης και superblocks.

Οι μέθοδοι που εφαρμόστηκαν στη μελέτη –δορυφορικές επιφανειακές θερμοκρασίες, υπολογισμός μορφολογικών δεικτών, εξειδικευμένα αστικά μοντέλα προσομοίωσης για τον υπολογι- σμό της θερμοκρασίας αέρα– προσφέρουν τη δυνατότητα τόσο για την αξιολόγηση της υφιστά- μενης κατάστασης όσο και για τον έλεγχο της αποτελεσματικότητας των παρεμβάσεων πριν από την υλοποίησή τους, συμβάλλοντας σε έναν σχεδιασμό πιο στοχευμένο, οικονομικά αποδοτικό και σε έναν περιβαλλοντικά βιώσιμο αστικό χώρο. Η γνώση αυτή μπορεί να αξιοποιηθεί τόσο από δημόσιους φορείς όσο και από ιδιωτικούς οργανισμούς για την υλοποίηση έργων με μειωμένο θερμικό αποτύπωμα και αυξημένη κοινωνική υπεραξία.



ΜΕΡΟΣ ΙΙ
ΠΡΟΒΛΕΨΕΙΣ ΚΛΙΜΑΤΙΚΩΝ ΚΙΝΔΎΝΩΝ ΓΙΑ ΑΘΉΝΑ, ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΉ ΚΑΙ ΓΟΎΡΝΕΣ ΉΡΑΚΛΕΙΟΎ

[1.0] ΕΙΣΑΓΩΓΉ

Στο ΜΕΡΟΣ Ι παρουσιάστηκε η υφιστάμενη κλιματική φόρτιση στην Αθήνα και στη Θεσσαλονίκη, με έμφαση στην ανάπτυξη της αστικής θερμικής νησίδας σε έξι υποπεριοχές, ενώ παρατέθηκαν προτάσεις παρεμβάσεων για την άμβλυνση της παρούσας κλιματικής πίεσης στο επίπεδο του μικροκλίματος αυτών των περιοχών. Στο ΜΕΡΟΣ ΙΙ θα εξεταστεί η εξέλιξη της κλιματικής μεταβολής σε Αθήνα, Θεσσαλονίκη και Γούρνες Ηρακλείου, από το 1971 ως το 2022, και θα παρουσιαστούν προβλέψεις κλιματικού κινδύνου, έκθεσης και τρωτότητας των συγκεκριμένων περιοχών με ορίζοντα το 2060 σύμφωνα με δύο πιθανά σενάρια εξέλιξης της κλιματικής κρίσης: το σενάριο κλιματικής αλλαγής RCP4.5 (μετριοπαθές) και το RCP8.5 (δυσμενές) της Διακυβερνητικής Επιτροπής για την Αλλαγή του Κλίματος του Οργανισμού Ηνωμένων Εθνών. Στα παρακάτω κεφάλαια θα επαναληφθούν, για λόγους πληρότητας και σαφήνειας, πολλοί από τους ορισμούς που γνωρίσαμε στο ΜΕΡΟΣ Ι.

Οι κλιματικές μεταβολές και τα ακραία φαινόμενα επιδρούν με διαφορετικό τρόπο σε κάθε περιοχή, ανάλογα με τα εκάστοτε γεωμορφολογικά, μικροκλιματικά και ανθρωπογενή χαρακτηριστικά της, γεγονός που καθιστά αναγκαία την τοπικά εξειδικευμένη αξιολόγηση των κλιματικών κινδύνων. Η συστηματική κατανόηση της διαχρονικής εξέλιξης των βασικών κλιματικών παραμέτρων και των μελλοντικών μεταβολών του κλίματος αποτελεί απαραίτητη βάση για κάθε μορφή σχεδιασμού που επηρεάζεται από τις μεταβαλλόμενες κλιματικές συνθήκες.

Η παρούσα μελέτη εξετάζει τις υφιστάμενες και μελλοντικές κλιματικές συνθήκες σε τρεις περιοχές: την ευρύτερη περιοχή της Αθήνας, την ευρύτερη περιοχή της Θεσσαλονίκης και την περιοχή των Γουρνών Ηρακλείου. Η ανάλυση εστιάζει τόσο στη γενική πορεία των κλιματικών μεταβολών όσο και στις ιδιαιτερότητες του μικροκλίματος της εκάστοτε περιοχής. Μεταβλητές όπως η γεωμορφολογία (υψόμετρο, κλίση κ.ά.), η δόμηση και ανθρώπινη δραστηριότητα, οι άνεμοι, η βροχόπτωση, οι καύσωνες, η ξηρασία, οι υδατικοί πόροι και η βλάστηση διαμορφώνουν την ευαλωτότητα κάθε περιοχής σε κλιματικούς κινδύνους. Οι περιοχές ενδιαφέροντος θα βρεθούν αντιμέτωπες, σε διαφορετικό βαθμό, με υψηλές θερμοκρασίες και καύσωνες, ξηρασία, άνοδο της στάθμης της θάλασσας και πλημμύρες.

Σκοπός της μελέτης είναι η παροχή επιστημονικά τεκμηριωμένης πληροφόρησης σχετικά με τη διαχρονική εξέλιξη των βασικών κλιματικών παραμέτρων στην εκάστοτε περιοχή, τις προβλεπόμενες μεταβολές του κλίματος με βάση διεθνή σενάρια εκπομπών και την εξειδικευμένη αξιολόγηση του θερμικού κινδύνου στα συγκεκριμένα περιβάλλοντα. Η ανάλυση αποσκοπεί στη στήριξη κάθε μορφής σχεδιασμού ή ανάπτυξης που προϋποθέτει κατανόηση των κλιματικών συνθηκών και των πιθανών επιπτώσεών τους, συμβάλλοντας στην ενίσχυση της ανθεκτικότητας και της προσαρμοστικότητας των μελλοντικών έργων και υποδομών.

Η μεθοδολογία της μελέτης βασίζεται στο πλαίσιο αξιολόγησης της έκτης μελέτης αξιολόγησης (AR6) της Διακυβερνητικής Επιτροπής για την Αλλαγή του Κλίματος (IPCC)[20] και της Ευρωπαϊκής Ένωσης (μέσω του EUCRA Framework),[21] με ανάλυση τριών βασικών συνιστωσών:

α) του κλιματικού κινδύνου (hazard), που αναφέρεται στην πιθανή εμφάνιση ενός φαινομένου ή μιας τάσης λόγω κλιματικής αλλαγής τα οποία μπορεί να έχουν αρνητικές επιπτώσεις,
β) της έκθεσης (exposure), που αναφέρεται στην παρουσία συστημάτων, πληθυσμών, υποδομών ή δραστηριοτήτων τα οποία ενδέχεται να επηρεαστούν αρνητικά και
γ) της τρωτότητας (vulnerability), που αναφέρεται στον βαθμό στον οποίο τα εκτεθειμένα στοιχεία είναι ευάλωτα και αδυνατούν να αντιμετωπίσουν τις αρνητικές επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής. Η «τρωτότητα» εμπεριέχει εύρος εννοιών, συμπεριλαμβανομένης της «ευαισθησίας» (ή ευπάθειας) στις ζημίες και της ικανότητας αντιμετώπισης και προσαρμογής στην κλιματική αλλαγή.

[20] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Sixth Assessment Report (AR6): Climate Change 2021 – The Physical Science Basis: Climate Change 2022 – Impacts, Adaptation and Vulnerability: Climate Change 2022 – Mitigation of Climate Change. Γενεύη: IPCC, 2021-2022

[21] European Commission, “European Climate Risk Assessment (EUCRA): Advancing climate resilience in the EU,” Publications Office of the European Union, Λουξεμβούργο 2024.

Η αξιολόγηση περιλαμβάνει:

- Ανάλυση ιστορικής περιόδου (1981-2022) με δεδομένα της βάσης δεδομένων ERA5-Land που διαχειρίζεται το Ευρωπαϊκό Κέντρο Μεσοπρόθεσμων Προγνώσεων (ECMWF) και συλλέγονται μέσω του δορυφορικού προγράμματος Copernicus.
- Κλιματικές προβολές για τις περιόδους 2026-2045 και 2046-2065, βάσει των κλιματικών σεναρίων της IPCC RCP4.5 (μετριοπαθές σενάριο) και RCP8.5 (δυσμενές σενάριο).[22]
- Ύπολογισμός ακραίων συνθηκών μέσω της Θεωρίας Ακραίων Τιμών (Generalized Extreme Value, GEV) για θερμοκρασία και βροχόπτωση. Γεωχωρική
- αποτίμηση των χαρακτηριστικών της περιοχής (μορφολογία, κάλυψη γης, βλάστηση, αδιαπερατότητα) για την κατανόηση των παραμέτρων που επηρεάζουν την τρωτότητα.
- Στοχευμένη ανάλυση του θερμικού κινδύνου στην αστική περιοχή της Αθήνας, με αξιοποίηση δεδομένων τηλεπισκόπησης και δεικτών αστικής δομής, όπως η επιφανειακή θερμοκρασία εδάφους (Land Surface Temperature, LST), ο δείκτης βλάστησης (Normalized Difference Vegetation Index, NDVI), το ποσοστό αδιαπέρατων επιφανειών (Impreviousness Density, IMD), το ύψος κτιρίων κ.ά.

Η μελέτη οργανώνεται σε τρεις κύριες ενότητες:

i. Στοιχεία κλίματος και μικροκλίματος: Ανάλυση ιστορικών και μελλοντικών κλιματικών δεδομένων.
ii. Φυσικογεωγραφικά χαρακτηριστικά: Εξέταση της γεωμορφολογίας, της κάλυψης γης και των παραμέτρων που επηρεάζουν την έκθεση και τρωτότητα.
iii. Αξιολόγηση θερμικού κινδύνου: 'Ερευνα του θερμικού κινδύνου για την εκάστοτε περιοχή, με αξιοποίηση χωρικών και κλιματικών δεικτών και παραγωγή χαρτών διακινδύνευσης. Εντοπίζονται θερμικά “hotspots” και περιοχές αυξημένης ευαλωτότητας.

Η μελέτη σκοπεύει να συμβάλλει όχι μόνο στην τεχνική κατανόηση των κλιματικών κινδύνων, αλλά και στη δημιουργία μιας κοινής βάσης γνώσης για μια πιο ανθεκτική και περιβαλλοντικά υπεύθυνη ανάπτυξη. Τα ευρήματα δύνανται να χρησιμοποιηθούν ως τεχνικό υπόβαθρο για τον αστικό σχεδιασμό, ως επιστημονικό εργαλείο τεκμηρίωσης σε διαδικασίες περιβαλλοντικής αδειοδότησης ή αξιολόγησης επιπτώσεων και ως υποστήριξη για δράσεις κλιματικής προσαρμογής και πολιτικής προστασίας. Η ανάλυση προσφέρει μια σαφή και πρακτική βάση για τον σχεδιασμό τέτοιων δράσεων και πολιτικών, ενισχύοντας την ικανότητα της εκάστοτε περιοχής να προσαρμοστεί σταδιακά στις μεταβαλλόμενες συνθήκες. Με σκοπό τη μεγιστοποίηση του κοινωνικού οφέλους, τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων και προβλέψεων, οι χάρτες κινδύνου και τα μεθοδολογικά εργαλεία της μελέτης διατίθενται προς ανοιχτή διάχυση. Η μελέτη θα βοηθήσει τους τοπικούς φορείς αυτοδιοίκησης στην κατανόηση και διαχείριση των κλιματικών κινδύνων, τους μηχανικούς και μελετητές στην υιοθέτηση σχεδιαστικών πρακτικών ανθεκτικότητας και το κοινό στην ενημέρωση και ευαισθητοποίηση για την προσαρμογή στην κλιματική αλλαγή.

[22] Τα Representative Concentration Pathways ή, αλλιώς, RCPs, είναι τέσσερα σενάρια εξέλιξης της κλιματικής αλλαγής τα οποία εκπονούν επιστήμονες υπό την αιγίδα της IPCC του ΟΗΕ και περιγράφουν τέσσερις διαφορετικές εκδοχές για τα επίπεδα συγκέντρωσης εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου (ΕΑΘ) στη Γη. Συγκεκριμένα, τα σενάρια αποτυπώνουν την προβλεπόμενη διαφορά ανάμεσα στα επίπεδα συγκέντρωσης ΕΑΘ το 1750 (έτος βάση για την περίοδο της προβιομηχανικής επανάστασης) και στις επόμενες δεκαετίες έως το 2100. Παράλληλα περιγράφουν τις συνοδευόμενες κλιματικές συνέπειες της εκάστοτε συγκέντρωσης, όπως η αύξηση της θερμοκρασίας. Τα σενάρια επικαιροποιούνται ανά τακτά χρονικά διαστήματα· η πιο πρόσφατη έκθεση ολοκληρώθηκε τον Μάρτιο του 2023.

[2.0] ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΚΛΙΜΑΤΟΣ-ΜΙΚΡΟΚΛΙΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΠΡΟΒΛΉΜΑΤΩΝ (ΚΛΙΜΑΤΙΚΟΙ ΚΙΝΔΎΝΟΙ) ΠΟΎ ΟΦΕΙΛΟΝΤΑΙ ΣΤΉΝ ΚΛΙΜΑΤΙΚΉ ΑΛΛΑΓΉ ΚΑΤΑ ΤΉΝ ΠΑΡΟΎΣΑ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΉ ΠΕΡΙΟΔΟ

Ηπαρούσαενότητα στοχεύει στηνανάλυσητων κλιματικώνσυνθηκώνκαιτουμικροκλίματος τηςεκάστοτεπεριοχής, χρησιμοποιώνταςκλιματικάδεδομένα υψηλήςποιότητας, στατιστικές μοντελοποιήσειςκαι κλιματικές προσομοιώσεις.Οι κύριοιστόχοι καιοιμεθοδολογίες που εφαρμόστηκαν στην ανάλυση είναι οι παρακάτω:

i. Ανάλυση και εντοπισμός τάσεων του παρόντος κλίματος (ιστορική περίοδος): Μελετήθηκε η εξέλιξη χαρακτηριστικών κλιματικών δεικτών με τη χρήση ιστορικών δεδομένων. Η ανάλυση στοχεύει στον εντοπισμό και στην κατανόηση των τάσεων στα δεδομένα, επιβεβαιώνοντας τις κλιματικές αλλαγές που έχουν λάβει χώρα στην περιοχή.
ii. Αξιολόγηση ακραίων κλιματικών συνθηκών: Πραγματοποιήθηκε αξιολόγηση των τιμών της θερμοκρασίας και του ύψους βροχής που αναμένεται να ξεπεραστούν μία φορά κάθε 10, 20 και 50 έτη, με βάση τη θεωρία ακραίων τιμών, υποδεικνύοντας την πιθανότητα εμφάνισης ακραίων κλιματικών συνθηκών. Αξίζει αναφοράς μια σημείωση. Η περίοδος επιστροφής 50 ετών δεν σημαίνει ότι ένα τέτοιο επεισόδιο συμβαίνει μία φορά κάθε πενήντα χρόνια, αλλά ότι υπάρχει περίπου 2% πιθανότητα να ξεπεραστεί το συγκεκριμένο όριο βροχόπτωσης σε κάθε έτος. Αρα μπορεί να εμφανιστεί περισσότερες από μία φορές μέσα σε λίγα χρόνια ή να απουσιάσει για δεκαετίες, καθώς τα ακραία φαινόμενα δεν ακολουθούν χρονοδιάγραμμα, αλλά πιθανότητες.
iii. Ανάλυση και εντοπισμός τάσεων του μελλοντικού κλίματος (μελλοντική περίοδος): Παράλληλα με τη μελέτη της ιστορικής περιόδου εξετάστηκε η εξέλιξη χαρακτηριστικών κλιματικών δεικτών με τη χρήση δεδομένων από κλιματικές προσομοιώσεις.

[2.1]

Ιστορική περίοδος

Η αξιολόγηση της ιστορικής περιόδου αποτελεί τη βάση για την κατανόηση της κλιματικής δυναμικής της περιοχής και των τάσεων που διαμορφώνουν ήδη το τοπικό περιβάλλον. Οι αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν για την περίοδο 1981-2022 με χρήση των δεδομένων ERA5-Land του Ευρωπαϊκού Κέντρου Μεσοπρόθεσμων Προγνώσεων (ECMWF), τα οποία παρέχουν συνεπείς και χωρικά ομοιόμορφες χρονοσειρές θερμοκρασίας, βροχόπτωσης και άλλων κλιματικών μεταβλητών. Η κλιματική περίοδος αναφοράς στις τρέχουσες μελέτες διεθνών οργανισμών για την κλιματική αλλαγή είναι η τριακονταετία 1981-2010. Για τον λόγο αυτό, η μελέτη υιοθέτησε το 1981 ως αρχική χρονολογία και κατέληξε στο έτος με τα πιο πρόσφατα διαθέσιμα δεδομένα, το 2022.

Για την αποτύπωση της εξέλιξης του κλίματος χρησιμοποιήθηκαν συγκεκριμένοι κλιματικοί δείκτες, οι οποίοι είναι ποσοτικά μέτρα που δείχνουν πώς αλλάζει το κλίμα μέσα στον χρόνο – για παράδειγμα, πόσες θερμές ημέρες ή πόσες έντονες βροχές σημειώνονται κάθε έτος. Η ανάλυσή τους βοηθάει να εντοπιστούν οι διακυμάνσεις και οι μεταβολές στη συχνότητα ή στην ένταση των φαινομένων που επηρεάζουν άμεσα την καθημερινότητα, το περιβάλλον και τις υποδομές. Για κάθε δείκτη υπολογίστηκαν οι ετήσιες αποκλίσεις από τη μέση τιμή της περιόδου 1981–2020, δηλαδή πόσο θερμότερο ή ψυχρότερο, πιο υγρό ή πιο ξηρό ήταν κάθε έτος σε σχέση με το «μέσο» κλίμα της περιοχής. Η εξέταση αυτών των αποκλίσεων επιτρέπει την αναγνώριση γενικών τάσεων θέρμανσης ή μεταβολών της βροχόπτωσης μέσα στις τελευταίες δεκαετίες χωρίς να απαιτείται πλήρης στατιστική μοντελοποίηση.

Οι δείκτες που αναλύθηκαν συνοψίζονται στον Πίνακα 2.1.

Πίνακας 2.1: Συγκεντρωτική λίστα του συνόλου των κλιματικών δεικτών. ↓

Κλιματικοί δείκτες	Συν τομογραφία	Περιγραφή δεικτών
Μέση ετήσια θερμοκρασία	TMM	Μέση ετήσια θερμοκρασία σε °C
Αριθμός θερινών ημερών	SU	Αριθμός ημερών με μέγιστη ημερήσια θερμοκρασία μεγαλύτερη των 25°C
Αριθμός τροπικών νυχτών	TR	Αριθμός ημερών με ελάχιστη ημερήσια θερμοκρασία μεγαλύτερη των 20°C
Βαθμοημέρες ψύξης	CDDCOLD18	Δείκτης υπολογισμού των ενεργειακών αναγκών ψύξης των κτιρίων, ο οποίος υπολογίζεται ως το ετήσιο άθροισμα των θετικών διαφορών μεταξύ της μέσης ημερήσιας θερμοκρασίας και της θερμοκρασίας βάσης των 18°C
Αριθμός επεισοδίων καύσωνα	HWN_TX90	Πλήθος επεισοδίων όπου η μέγιστη ημερήσια θερμοκρασία είναι μεγαλύτερη από το 90ό εκατοστημόριό της για 3 ή περισσότερες διαδοχικές ημέρες. Ο δείκτης υπολογίζεται για την περίοδο Μαΐου-Σεπτεμβρίου
Αριθμός ημερών με καύσωνα	HWF_TX90	Συνολικό πλήθος ημερών που ανήκουν στα επεισόδια καύσωνα, όπως αυτά ορίζονται στον δείκτη hwn_tx90, κατά την περίοδο Μαΐου-Σεπτεμβρίου
Ετήσια βροχόπτωση	PRCPTOT	Συνολικό ύψος βροχής
Αριθμός ημερών υψηλής βροχόπτωσης	R20MM	Αριθμός ημερών με ύψος βροχής μεγαλύτερο των 20 χιλιοστόμετρων (milimetre, mm)

[2.1.1]

ΑΘΗΝΑ

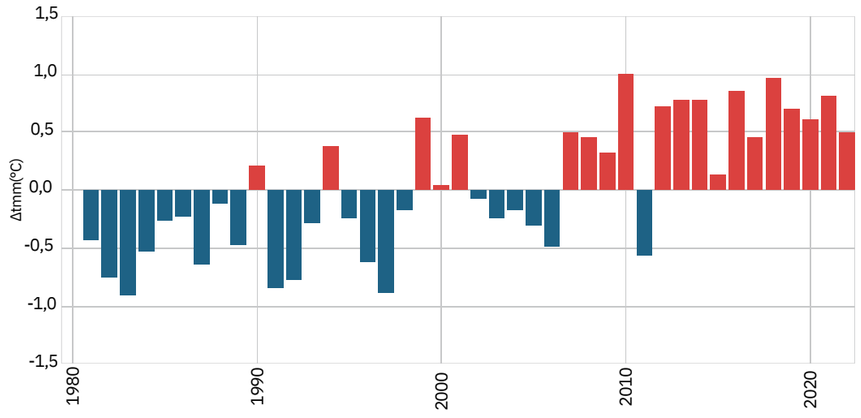
Η περιοχή αποτελεί το μεγαλύτερο αστικό και οικονομικό κέντρο της χώρας, με έντονη ανθρωπογενή δραστηριότητα και περιορισμένο περιθώριο μικροκλιματικής ανάσχεσης, γεγονός που την καθιστά πιο ευάλωτη στις θερμικές μεταβολές και στα ακραία θερμικά επεισόδια. Η χρονοσειρά των αποκλίσεων της μέσης ετήσιας θερμοκρασίας για το λεκανοπέδιο της Αθήνας (1981-2022) δείχνει μια σαφή μετάβαση σε θερμότερο κλιματικό υπόβαθρο (Σχήμα 2.1). Οι τιμές εκφράζονται ως αποκλίσεις από τη μέση τιμή της περιόδου 1981-2020, οπότε τα θετικά έτη αντιστοιχούν σε θερμότερες και τα αρνητικά σε ψυχρότερες χρονιές σε σχέση με το «παλιό κλίμα» της πόλης.

Τις πρώτες δεκαετίες της περιόδου, οι θερμοκρασίες ήταν γενικά χαμηλότερες από τον μέσο όρο. Η πρώτη δεκαετία εμφανίζει μέση απόκλιση περίπου −0,4°C, με χαρακτηριστικά ψυχρό έτος το 1983 (−0,91°C). Αντίθετα, στη σύγχρονη περίοδο οι θερμοκρασίες έχουν μετατοπιστεί σαφώς προς υψηλότερες τιμές. Την τελευταία δεκαετία η μέση απόκλιση φτάνει περίπου τους +0,66°C, με ιδιαίτερα θερμό έτος το 2010 (+1,01°C).

Μετά το 2000, σχεδόν 3 στα 4 έτη είναι θερμότερα από τον κλιματικό μέσο όρο, γεγονός που δείχνει ότι η Αθήνα δεν βιώνει πια «τυχαία» θερμά χρόνια, αλλά ένα συστηματικά θερμότερο καθεστώς. Η μέση τιμή της περιόδου (περίπου +0,03°C) κρύβει αυτή τη μετατόπιση, καθώς προκύπτει από τον συνδυασμό ψυχρότερων δεκαετιών στην αρχή και σαφώς θερμότερων στη συνέχεια.

Σε ένα ήδη επιβαρυμένο αστικό περιβάλλον όπως το κέντρο της Αθήνας, αυτή η άνοδος δεν λειτουργεί απομονωμένα. Προστίθεται στην αστική θερμική νησίδα, στην υψηλή πυκνότητα δόμησης και κυκλοφορίας και στην περιορισμένη παρουσία πρασίνου και υδάτινων επιφανειών, ενισχύοντας τα φαινόμενα θερμικής δυσφορίας, ιδίως στις κεντρικές και πυκνοδομημένες γειτονιές. Η μεταβολή της μέσης ετήσιας θερμοκρασίας λειτουργεί, έτσι, ως «θερμικό υπόβαθρο», πάνω στο οποίο «χτίζονται» οι συχνότερες θερμές ημέρες, οι τροπικές νύχτες και τα επεισόδια καύσωνα που αναλύονται στους επόμενους δείκτες.

Μεταβολή μέσης ετήσιας θερμοκρασίας

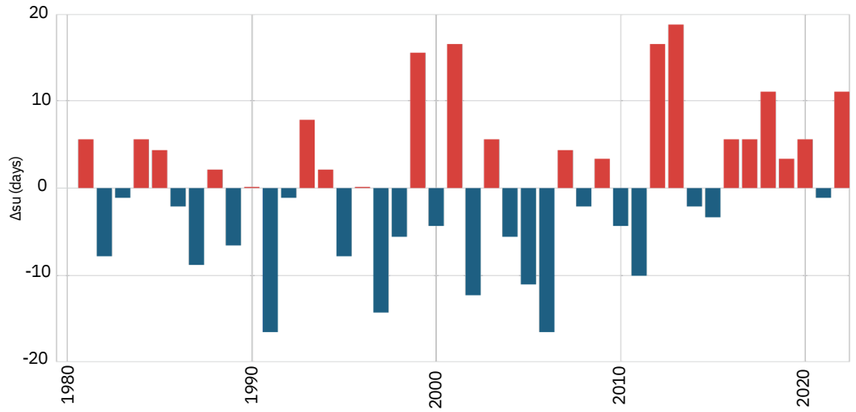


Σχήμα 2.1: Χρονική εξέλιξη των μεταβολών της μέσης ετήσιας θερμοκρασίας (°C) της Αθήνας σε σύγκριση με τη μέση τιμή της περιόδου 1981-2020, από δεδομένα ERA5-Land

Στα Σχήματα 2.2, 2.3 και 2.4 παρουσιάζονται οι αποκλίσεις του αριθμού των θερινών ημερών, τροπικών νυχτών και βαθμοημερών ψύξης, αντίστοιχα, από τη μέση τιμή της περιόδου 1981-2020. Η εξέλιξη των θερμικών δεικτών στην περιοχή μελέτης αποτυπώνει μια πόλη που έχει μεταβεί σε ένα θερμότερο, πιο επίμονο και ενεργειακά απαιτητικό θερμικό καθεστώς. Τα δεδομένα από το 1981 ως το 2022 δείχνουν μια εικόνα συνεχούς ενίσχυσης της θερμικής επιβάρυνσης, με σαφή μετάβαση σε ένα νέο, πυκνότερα θερμικό μικροκλίμα.

Ο δείκτης των θερινών ημερών (SU) παρουσιάζει τις αποκλίσεις του αριθμού των θερινών ημερών ανά έτος. Η πρώτη δεκαετία (1981-1990) είχε ελαφρώς αρνητικές αποκλίσεις (–0,7), ενώ η τελευταία δεκαετία φτάνει στην εντυπωσιακή απόκλιση των +5 ημερών, στοιχείο που δείχνει καθαρά την επέκταση της θερμής περιόδου. Παράλληλα, τα θερμά έτη μετά το 2000 ξεπερνούν τον μέσο όρο στο 52% των περιπτώσεων, σηματοδοτώντας ένα νέο θερμικό υπόβαθρο.

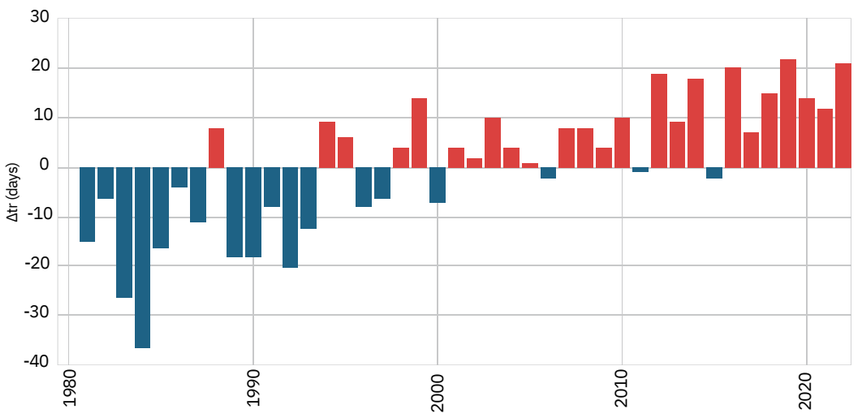
Μεταβολή αριθμού θερινών ημερών



Σχήμα 2.2: Χρονική εξέλιξη των μεταβολών του πλήθους των θερινών ημερών της Αθήνας σε σύγκριση με τη μέση τιμή της περιόδου 1981-2020, από δεδομένα ERA5-Land

Ο δείκτης των τροπικών νυχτών (TR) είναι ακόμα πιο αποκαλυπτικός για το αθηναϊκό μικροκλίμα. Οι ακραίες τιμές φτάνουν έως και +22 νύχτες πέραν του μέσου όρου, κάτι που αποτυπώνει την επίμονη νυχτερινή θερμότητα η οποία χαρακτηρίζει πλέον το κέντρο της πόλης. Οι πρώτες δεκαετίες εμφανίζουν καθαρά αρνητικές αποκλίσεις (π.χ., –14 νύχτες στις αρχές της περιόδου), ενώ η τελευταία δεκαετία καταγράφει θεαματική άνοδο (+13,6 νύχτες). Από το 2000 έως το 2022, περισσότερα από 8 στα 10 χρόνια παρουσιάζουν θετική απόκλιση, κάτι που αναδεικνύει τον ρόλο της αστικής θερμικής νησίδας και της μειωμένης νυχτερινής αποφόρτισης.

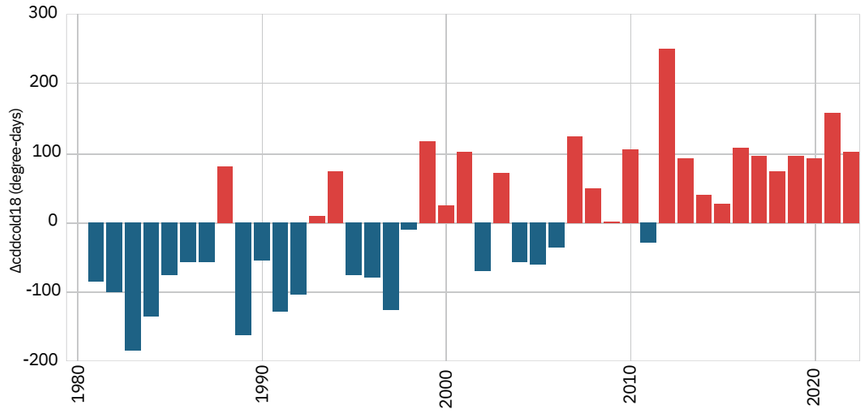
Μεταβολή αριθμού τροπικών νυχτών



Σχήμα 2.3: Χρονική εξέλιξη των μεταβολών του πλήθους των τροπικών νυχτών της Αθήνας σε σύγκριση με τη μέση τιμή της περιόδου 1981-2020, από δεδομένα ERA5-Land

Ο δείκτης CDDCOLD18, ο οποίος εκφράζει το συνολικό θερμικό φορτίο που πρέπει να απομακρυνθεί για να επιτευχθεί άνεση, καταγράφει τη μεγάλη εικόνα (Σχήμα 2.4). Με ελάχιστες τιμές που φτάνουν έως –184 (στην ψυχρότερη περίοδο του ιστορικού) και μέγιστες έως +253 στις θερμότερες, ο δείκτης αποτυπώνει μια συσσωρευτική τάση επιβάρυνσης. Οι πρώτες δεκαετίες εμφανίζουν έντονα αρνητικές αποκλίσεις (περίπου –82 μονάδες), ενώ η τελευταία δεκαετία φτάνει σε μέση απόκλιση σχεδόν +90 μονάδων, δηλαδή μεταβολή άνω των +170 μονάδων σε σχέση με το θερμικό υπόβαθρο της δεκαετίας του 1980. Περίπου 8 στα 10 έτη μετά το 2000 (78%) είναι πλέον, από θερμικής άποψης, πιο απαιτητικά από τον κλιματικό μέσο όρο.

Μεταβολή βαθμοημερών ψύξης



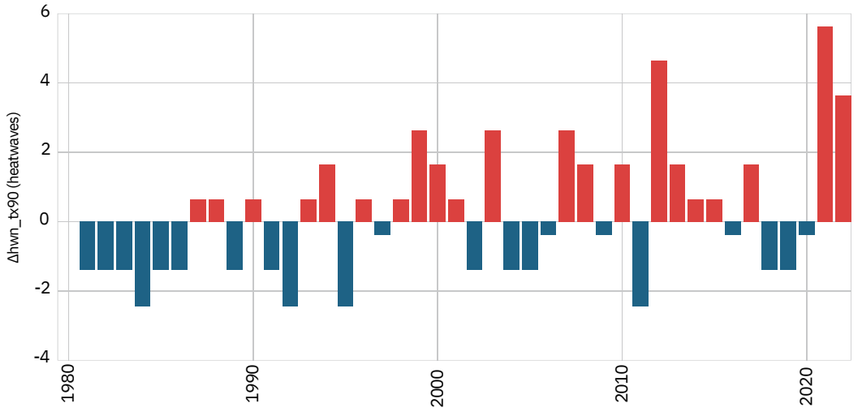
Σχήμα 2.4: Χρονική εξέλιξη των μεταβολών των βαθμοημερών ψύξης της Αθήνας σε σύγκριση με τη μέση τιμή της περιόδου 1981-2020, από δεδομένα ERA5-Land

Συνολικά, οι τρεις δείκτες συνθέτουν μια συνεπή και επιστημονικά καθαρή εικόνα: οι θερμές ημέρες πληθαίνουν, οι θερμές νύχτες πολλαπλασιάζονται, και η πόλη συσσωρεύει θερμότητα από ημέρα σε ημέρα, με τον δείκτη cddcold18 να καταγράφει την ενεργειακή συνέπεια αυτής της μεταβολής. Αυτές δεν είναι μεμονωμένες διακυμάνσεις, αλλά αποτυπώνουν μια σταθερή μετατόπιση του αστικού μικροκλίματος της Αθήνας, η οποία αντικατοπτρίζεται στατιστικά στις αποκλίσεις, επιβεβαιώνεται από τις μέσες τιμές και αποκαλύπτεται έντονα στις διαφορές μεταξύ των πρώτων και των τελευταίων δεκαετιών. Οι δείκτες λειτουργούν συμπληρωματικά και περι- γράφουν έναν πολεοδομικό χώρο που γίνεται θερμότερος, πιο επίμονος θερμικά και περισσότε- ρο εξαρτημένος από την ενεργειακή ψύξη.

Οι δείκτες καύσωνα για την περιοχή μελέτης δείχνουν σαφή και σταθερή ενίσχυση των ακραίων θερμικών επεισοδίων τις τελευταίες δεκαετίες. Η τάση αυτή δεν είναι αποσπασματική, αλλά αποτελεί μέρος μιας συνολικής αλλαγής του θερμικού καθεστώτος της πόλης, που ενισχύεται από την αστική θερμική νησίδα και τη συσσώρευση θερμότητας στα υλικά επιφανειών.

Ο δείκτης HWN, που αποτυπώνει τον αριθμό των επεισοδίων καύσωνα ανά έτος, εμφανίζει έντονη διαφοροποίηση μεταξύ των αρχικών και των πρόσφατων δεκαετιών της περιόδου μελέτης (Σχήμα 2.5). Συγκεκριμένα, η πρώτη δεκαετία (1981-1990) χαρακτηρίζεται από κυρίως αρνητικές αποκλίσεις (μέση τιμή –0,88 επεισόδια), ενώ η τελευταία δεκαετία (2013-2022) παρουσιάζει σαφή υπεροχή θετικών αποκλίσεων, με μέση τιμή +1,02 επεισόδια. Με άλλα λόγια, η πόλη έχει μεταβεί από μια περίοδο όπου τα επεισόδια καύσωνα ήταν εν συνόλω λιγότερα από τον μέσο όρο σε μια περίοδο κατά την οποία εμφανίζονται σταθερά πιο πολλά από τον μέσο όρο. Μετά το 2000, πε- ρίπου 6 στις 10 χρονιές (56%) καταγράφουν περισσότερα επεισόδια καύσωνα από την κλιματική περίοδο αναφοράς.

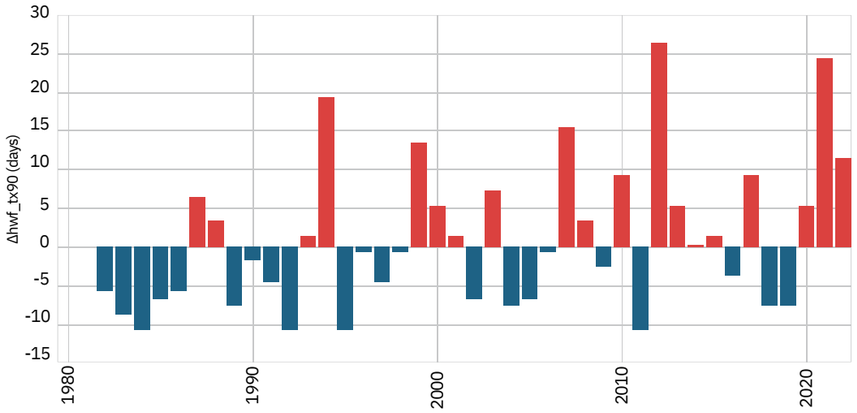
Μεταβολή αριθμού επεισοδίων καύσωνα



Σχήμα 2.5: Χρονική εξέλιξη των μεταβολών του αριθμού επεισοδίων καύσωνα της Αθήνας σε σύγκριση με τη μέση τιμή της περιόδου 1981-2020, από δεδομένα ERA5-Land

Ακόμα πιο χαρακτηριστικός είναι ο δείκτης HWF, που αποτυπώνει τον συνολικό αριθμό των ημερών καύσωνα ανά έτος (Σχήμα 2.6). Εδώ η μεταβολή είναι πολύ πιο έντονη. Η πρώτη δεκαετία παρουσιάζει μέση απόκλιση –4,3 ημέρες, ενώ η τελευταία φτάνει τις +4 ημέρες, δηλαδή μια μεταβολή περίπου 8,5 ημερών. Το εύρος των τιμών δείχνει την κλίμακα του φαινομένου: από –10,5 (σε ψυχρότερες δεκαετίες) έως και +26,5 ημέρες σε θερμές χρονιές. Μετά το 2000, περίπου το 61% των ετών εμφανίζει θετικές αποκλίσεις, επιβεβαιώνοντας τη συστηματική ενίσχυση των καυσώνων.

Μεταβολή αριθμού ημερών με καύσωνα



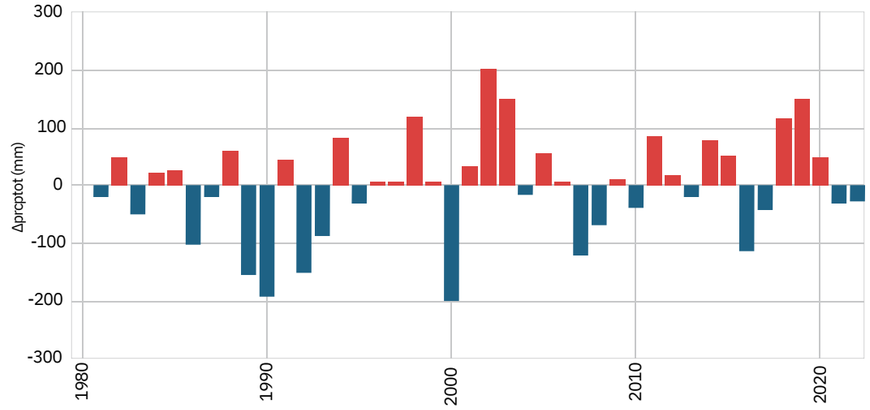
Σχήμα 2.6: Χρονική εξέλιξη των μεταβολών του αριθμού ημερών με καύσωνα της Αθήνας σε σύγκριση με τη μέση τιμή της περιόδου 1981-2020, από δεδομένα ERA5-Land

Η συνδυαστική ανάγνωση των δύο δεικτών δείχνει ότι η αλλαγή δεν αφορά μόνο τη συχνότητα των επεισοδίων, αλλά κυρίως τη διάρκεια και τη συσσώρευση θερμότητας μέσα στο καλοκαίρι. Η αύξηση των τροπικών νυχτών και η επιμήκυνση των θερμών περιόδων (όπως φάνηκε στους δείκτες TR και SU) δημιουργούν τις συνθήκες ώστε τα επεισόδια καύσωνα να γίνονται πιο επίμονα και να διαρκούν περισσότερο. Αυτό φαίνεται καθαρά στον δείκτη HWF, ο οποίος καταγράφει πλέον χρονιές στη διάρκεια των οποίων οι ημέρες καύσωνα αυξάνονται κατά πάνω από 20 σε σχέση με το ιστορικό μέσο.

Στην πράξη, για το κέντρο της Αθήνας αυτό σημαίνει ότι οι καύσωνες δεν αποτελούν πλέον σπάνια εξάρσεις, αλλά ένα όλο και πιο συχνό και δομικό χαρακτηριστικό του θερινού κλίματος. Η προοδευτική αύξηση τόσο των επεισοδίων (HWN) όσο και των συνολικών ημερών καύσωνα (HWF) συνδέεται άμεσα με τη μείωση της νυχτερινής αποφόρτισης, την αύξηση των τροπικών νυχτών και τη συνεχόμενη ενίσχυση του θερμικού φορτίου στο αστικό τοπίο. Σε αντίθεση με τις φυσικές περιοχές, το αστικό περιβάλλον της Αθήνας λειτουργεί ως πολλαπλασιαστής της θερμικής πίεσης, με αποτέλεσμα οι καύσωνες να εμφανίζουν μεγαλύτερη διάρκεια, πιο έντονο μικροκλιματικό αποτύπωμα και αυξημένο συνολικό θερμικό φορτίο ανά επεισόδιο.

Τα Σχήματα 2.7 και 2.8 παρουσιάζουν τις μεταβολές του ετήσιου συνολικού ύψους βροχής και του αριθμού ημερών με υψηλή βροχόπτωση, αντίστοιχα. Η ανάλυση δείχνει ένα υδρολογικό καθεστώς που δεν αλλάζει τόσο ως προς τη συνολική ποσότητα νερού, αλλά κυρίως ως προς τη μεταβλητότητα και την ένταση των επεισοδίων. Ο δείκτης PRCPTOT, που εκφράζει το συνολικό ετήσιο ύψος βροχής, χαρακτηρίζεται από έντονη ετήσια μεταβλητότητα. Η σύγκριση των δεκαετιών αναδεικνύει διαφοροποίηση στη χρονική κατανομή των αποκλίσεων: η πρώτη δεκαετία της σειράς εμφανίζει κυρίως αρνητικές αποκλίσεις (μέση τιμή –38 mm), ενώ η τελευταία δεκαετία κυριαρχείται από θετικές αποκλίσεις (+20,7 mm). Παρά το μεγάλο εύρος τιμών (από –199,5 mm ως +201,3 mm), τα πρόσφατα έτη υποδηλώνουν μερική ανάκαμψη του συνολικού ύψους βροχής, χωρίς ωστόσο να διαμορφώνεται σταθερό ή προβλέψιμο υδρολογικό καθεστώς. Μετά το 2000, περίπου το 56% των ετών είναι υγρότερο από τη μέση τιμή. Αυτό όμως δεν μεταφράζεται σε σταθερά αυξημένη βροχόπτωση· περισσότερο δείχνει μια ανάκαμψη έπειτα από μια ξηρή περίοδο από το 1981 ως το 1995.

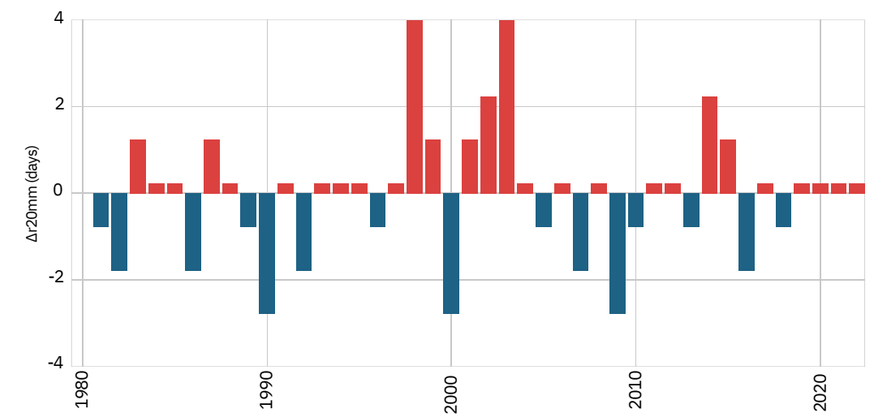
Μεταβολή ετήσιας βροχόπτωσης



Σχήμα 2.7: Χρονική εξέλιξη των μεταβολών της ετήσιας βροχόπτωσης της Αθήνας σε σύγκριση με τη μέση τιμή της περιόδου 1981-2020, από δεδομένα ERA5-Land

Ο δείκτης R20mm, που καταγράφει τον αριθμό ημερών με έντονη βροχόπτωση (>20 mm), χαρακτηρίζεται από περιορισμένη διαχρονική μεταβολή και μικρό εύρος αποκλίσεων (Σχήμα 2.8). Οι αρχικές δεκαετίες της περιόδου μελέτης κυριαρχούνται από αρνητικές αποκλίσεις (μέση τιμή –0,47 ημέρες), ενώ η τελευταία δεκαετία εμφανίζει ήπιες θετικές αποκλίσεις (+0,13 ημέρες). Παρό- τι οι τιμές κυμαίνονται σε σχετικά στενό εύρος (από –2,78 ως +4,22 ημέρες), η εικόνα υποδηλώνει ελαφρά μετατόπιση προς συχνότερη εμφάνιση ημερών έντονης βροχόπτωσης στα πρόσφατα έτη, χωρίς όμως να εμφανίζεται σαφής τάση. Μετά το 2000, περίπου το 65% των ετών παρουσι- άζει θετική απόκλιση, δηλαδή λίγο περισσότερες έντονες βροχές σε σχέση με το παρελθόν.

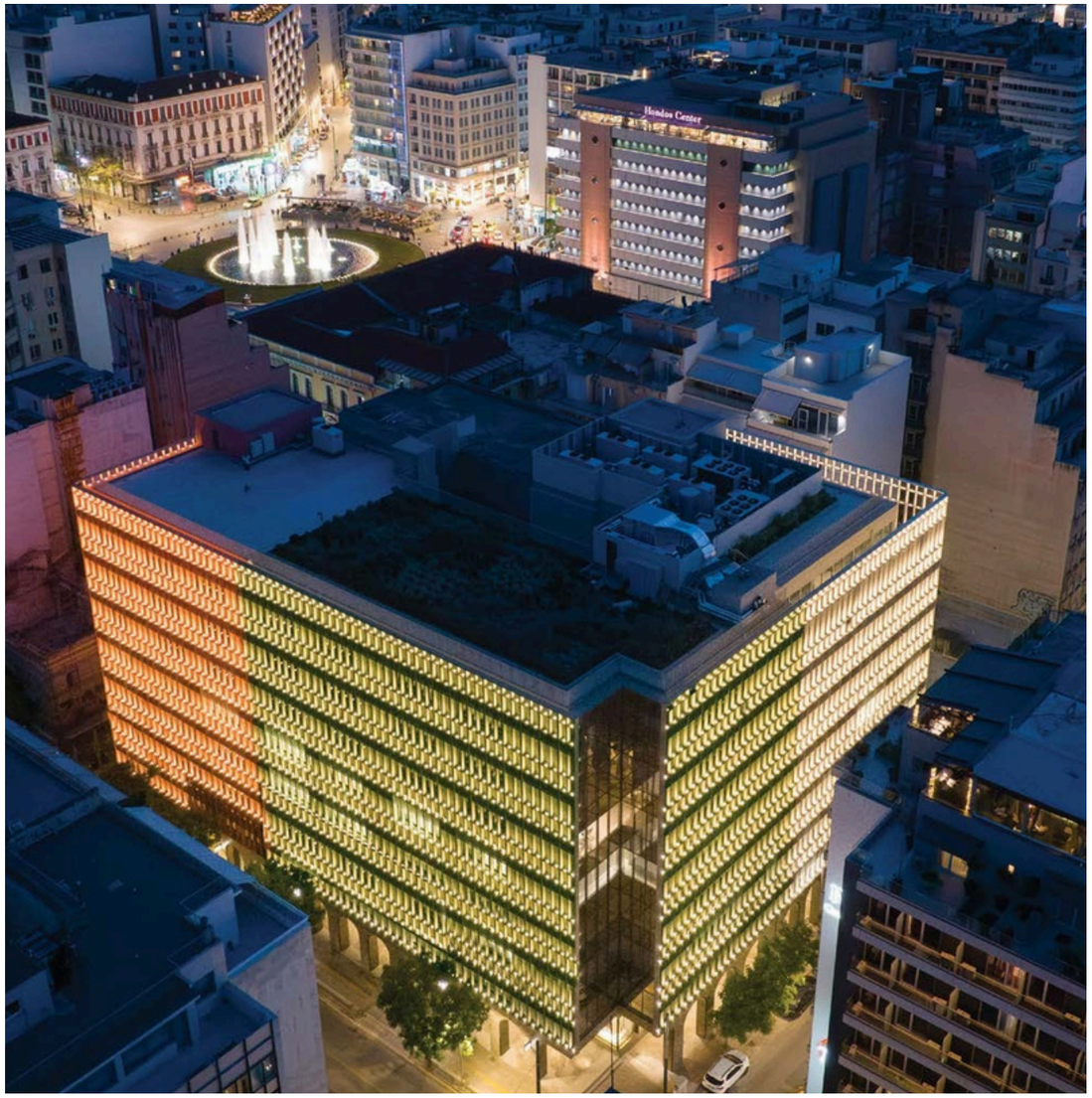
Μεταβολή αριθμού ημερών υψηλής βροχόπτωσης



Σχήμα 2.8: Χρονική εξέλιξη των μεταβολών του αριθμού των ημερών υψηλής βροχόπτωσης της Αθήνας σε σύγκριση με τη μέση τιμή της περιόδου 1981-2020, από δεδομένα ERA5-Land

Η συνδυαστική εξέταση των δύο δεικτών υποδηλώνει ότι το υδρολογικό καθεστώς της Αθήνας δεν μετατοπίζεται μονοσήμαντα προς πιο υγρές ή πιο ξηρές συνθήκες, αλλά χαρακτηρίζεται από αυξημένη αστάθεια. Παρότι οι ετήσιες ποσότητες βροχόπτωσης παραμένουν κοντά στη μέση τιμή της περιόδου αναφοράς, η κατανομή της βροχής εμφανίζει τάση προς πιο σποραδικά και εντονότερα επεισόδια. Στο αστικό περιβάλλον, αυτό έχει ιδιαίτερη σημασία, καθώς η πόλη έχει μεγάλο ποσοστό αδιαπέραστων επιφανειών, περιορισμένους χώρους απορρόφησης και μικρές λεκάνες απορροής. Ετσι, ακόμα και μια ήπια αύξηση στα επεισόδια έντονης βροχόπτωσης (>20 mm) λειτουργεί ως ενισχυτικός παράγοντας αστικών πλημμυρών, ειδικά σε περιοχές με γερασμένες υποδομές ή ανεπαρκή δίκτυα ομβρίων.

Συνολικά, οι δείκτες PRCPTOT και R20mm δείχνουν ότι η Αθήνα δεν αντιμετωπίζει ένα «ποσοτικό» πρόβλημα βροχής, αλλά ένα ποιοτικό: μεγαλύτερη μεταβλητότητα, λιγότερη κανονικότητα και ήπια ενίσχυση εντονότερων επεισοδίων, που επιβαρύνουν τον αστικό ιστό. Η κλιματική αλλαγή εδώ εμφανίζεται όχι μέσα από τη μέση τιμή, αλλά μέσα από τη μετατόπιση της βροχής προς πιο απότομα και συμπυκνωμένα γεγονότα, ένα μοτίβο που είναι πλέον τυπικό στις μεσογειακές πόλεις.

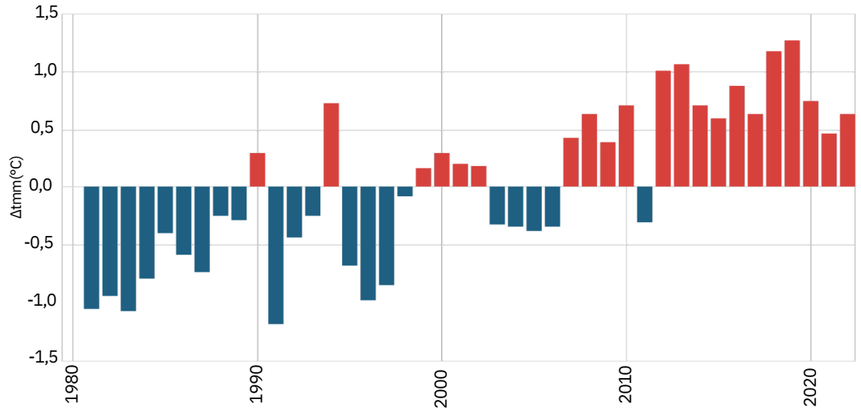


[2.1.2] ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ

Η πορεία της μέσης ημερήσιας θερμοκρασίας στην περιοχή της Θεσσαλονίκης –τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν αφορούν συγκεκριμένα τη δυτική Θεσσαλονίκη– δείχνει μια σταθερή και διαχρονική άνοδο, η οποία αποτυπώνει τον τρόπο με τον οποίο έχει μεταβληθεί το βασικό θερμικό καθεστώς της πόλης κατά τις τελευταίες δεκαετίες (Σχήμα 2.9). Παρότι ο δείκτης TMM δεν εκφράζει ακραία γεγονότα, αποτελεί τον πιο αξιόπιστο «θεμέλιο δείκτη» για την κατανόηση της συνολικής θερμικής μεταβολής.

Η ανάλυση δείχνει ότι η πρώτη δεκαπενταετία της περιόδου χαρακτηρίζεται από αρνητικές αποκλίσεις (μέση τιμή –0,51°C), ενώ η τελευταία δεκαπενταετία εμφανίζει σαφώς θετικές αποκλίσεις, με μέση τιμή +0,71°C. Η μετατόπιση αυτή αντιστοιχεί σε αύξηση της μέσης θερμοκρασίας κατά περίπου +1,2°C σε βάθος τεσσάρων δεκαετιών, υποδεικνύοντας ουσιαστική και συστηματική θέρμανση της περιοχής, με σαφή ανοδική πορεία της θερμοκρασίας κάθε δεκαπενταετία σε σχέση με την προηγούμενη.

Μεταβολή μέσης ετήσιας θερμοκρασίας



Σχήμα 2.9: Χρονική εξέλιξη των μεταβολών της μέσης ετήσιας θερμοκρασίας (°C) της Θεσσαλονίκης σε σύγκριση με τη μέση τιμή της περιόδου 1981-2020, από δεδομένα ERA5-Land

Η μεταβολή αυτή αντικατοπτρίζεται και στο εύρος τιμών του δείκτη: οι ετήσιες αποκλίσεις κυμαίνονται από –1,18°C ως +1,27°C, με τις υψηλές θετικές τιμές να συγκεντρώνονται κυρίως στα τελευταία χρόνια της σειράς. Στο κλιματικό παρελθόν, τα ψυχρότερα έτη ήταν συχνότερα, ενώ οι θερμές αποκλίσεις αποτελούν πλέον τη νέα κανονικότητα.

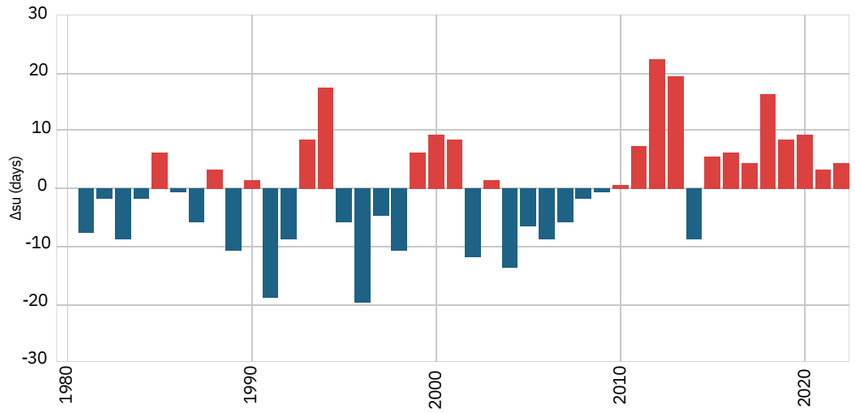
Η θέρμανση αυτή αποκτά ιδιαίτερη σημασία για το μικροκλίμα της Θεσσαλονίκης. Η πόλη επηρεάζεται τόσο από τις θαλάσσιες συνθήκες του Θερμαϊκού όσο και από τον τοπογραφικό εγκλωβισμό προς τα βόρεια και τα ανατολικά. Η επίδραση του Βαρδάρη οδηγεί συχνά σε χειμερινή ψύξη, αλλά κατά τους θερμούς μήνες ο συνδυασμός υψηλών θερμοκρασιών, υγρασίας και περιορισμένης νυχτερινής αποφόρτισης στο κέντρο δημιουργεί συνθήκες έντονης θερμικής δυσφορίας. Σε αυτό το πλαίσιο, ακόμα και μια θερμική άνοδος της τάξης των 1,2°C μεταφράζε- ται σε σημαντική ενίσχυση των ημερήσιων και νυχτερινών θερμικών επεισοδίων.

Συνολικά, ο δείκτης TMM δείχνει ότι το κλίμα στη Θεσσαλονίκη έχει μεταβεί από ένα πιο ήπιο προφίλ κατά τις δεκαετίες του 1980 και 1990 σε ένα σαφώς θερμότερο καθεστώς. Το εύρημα αυτό αποτελεί τη βάση για την ερμηνεία των υπόλοιπων δεικτών θερμικού κινδύνου και υπογραμμίζει τη σημασία της προσαρμογής, καθώς η αύξηση της μέσης θερμοκρασίας επηρεάζει τόσο την εντατικοποίηση των ακραίων φαινομένων όσο και τη συσσώρευση θερμικού φορτίου στο πυκνοδομημένο αστικό περιβάλλον.

Στα Σχήματα 2.10, 2.11 και 2.12 παρουσιάζονται οι αποκλίσεις του αριθμού των θερινών ημερών, τροπικών νυχτών (δείκτης SU) και βαθμοημερών ψύξης (δείκτης CDDCOLD18), αντίστοιχα, από τη μέση τιμή της περιόδου 1981-2020. Η εξέλιξη των θερμικών δεικτών στην περιοχή της Θεσσαλονίκης καταγράφει μια σαφή και διαχρονική ενίσχυση του θερμικού φορτίου κατά τις τελευταίες τέσσερις δεκαετίες. Παρά το σχετικά ηπιότερο θερινό κλίμα σε σύγκριση με τη νότια Ελλάδα, η Θεσσαλονίκη παρουσιάζει σημαντική αύξηση στη διάρκεια της θερμής περιόδου, καθώς και εντυπωσιακή επιδείνωση της νυχτερινής θερμικής επιβάρυνσης, δύο παράγοντες που επηρεάζουν άμεσα την ποιότητα ζωής, την ενεργειακή ζήτηση και την ανθρώπινη υγεία, σύμφωνα με τη διεθνή βιβλιογραφία.[23,24]

Ο αριθμός των ημερών με μέγιστη θερμοκρασία πάνω από 25°C εμφανίζει καθαρή ανοδική τάση. Την πρώτη δεκαπενταετία της περιόδου, οι αποκλίσεις είναι αρνητικές (–2,18 ημέρες), ενώ την τελευταία δεκαπενταετία φτάνουν τις +6,42 ημέρες, μια συνολική μεταβολή περίπου +8,6 επιπλέον θερινών ημερών τον χρόνο. Η αύξηση αυτή αποτυπώνει την επιμήκυνση της θερμής περιόδου, η οποία ξεκινάει νωρίτερα και διαρκεί περισσότερο μέσα στο έτος. Σε μια πόλη με έντονη αστική θερμική νησίδα στο κέντρο και περιορισμένη παρουσία πρασίνου στις δυτικές συνοικίες, ακόμα και αυτή η αύξηση των ~9 ημερών μεταφράζεται σε δυσανάλογη επιβάρυνση για τον αστικό ιστό.

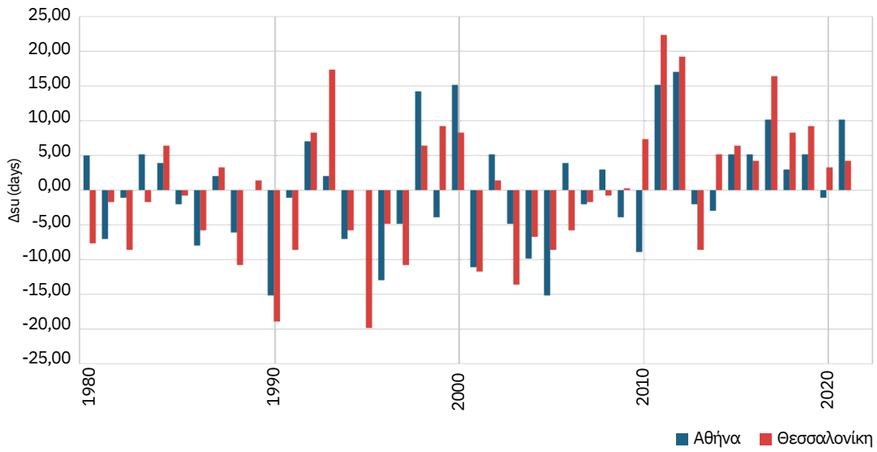
Μεταβολή αριθμού θερινών ημερών



Σχήμα 2.10: Χρονική εξέλιξη των μεταβολών του πλήθους των θερινών ημερών της Θεσσαλονίκης σε σύγκριση με τη μέση τιμή της περιόδου 1981-2020, από δεδομένα ERA5-Land

Το Σχήμα 2.11 παρουσιάζει συγκριτικά τις αποκλίσεις στον αριθμό θερινών ημερών (SU) για την Αθήνα και τη Θεσσαλονίκη, ως προς τη μέση τιμή της περιόδου 1981-2020. Η παράλληλη απεικόνιση επιτρέπει την άμεση οπτική σύγκριση των δύο μεγαλύτερων αστικών περιοχών της χώρας και δείχνει ότι η Θεσσαλονίκη παρουσιάζει υψηλότερες και πιο επίμονες θετικές αποκλίσεις τα τελευταία χρόνια.

Απόκλιση πλήθους θερινών ημερών Αθήνας και Θεσσαλονίκης σε σχέση με μέση τιμή περιόδου 1981-2020



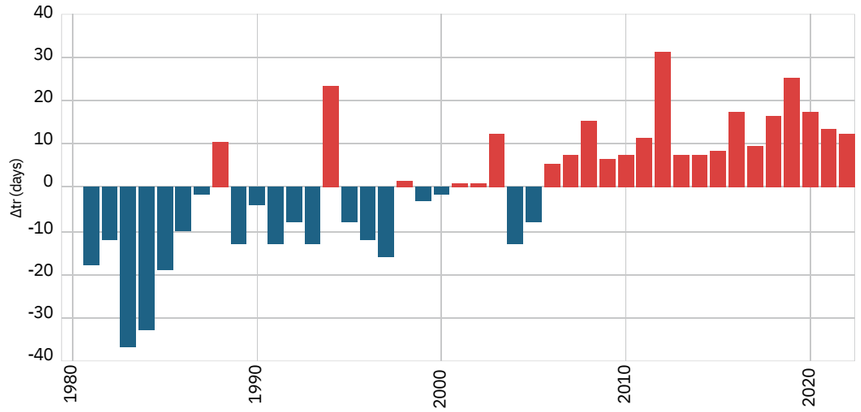
Σχήμα 2.11: Συγκριτική αποτύπωση των αποκλίσεων των μεταβολών του πλήθους των θερινών ημερών σε σχέση με τη μέση τιμή της περιόδου 1981-2020 για Αθήνα και Θεσσαλονίκη.

[23] Intergovernmental Panel on Climate Change. (2023). Climate Change 2023: The Physical Science Basis (WGI) & Impacts, Adaptation and Vulnerability (WGII). IPCC.

[24] Ebi, Kristie L. κ.ά. "Hot weather and heat extremes: health risks." *The lancet* 398.10301 (2021): 698-708.

Η μεταβολή των τροπικών νυχτών αποτελεί το πιο χαρακτηριστικό εύρημα για τη Θεσσαλονίκη (Σχήμα 2.12). Ενώ την πρώτη δεκαπενταετία της χρονοσειράς οι τιμές είναι έντονα αρνητικές (–10,22 νύχτες), την τελευταία δεκαπενταετία διαμορφώνονται στις +13,65 νύχτες – μια εντυπω- σιακή συνολική μεταβολή περίπου +24 τροπικών νυχτών. Η αύξηση αυτή έχει ιδιαίτερη σημασία για το μικροκλίμα και την υγεία. Οι νύχτες με θερμοκρασία πάνω από 20°C (τροπικές νύχτες) μειώνουν την ικανότητα του σώματος να αποβάλλει θερμότητα, αυξάνουν το καρδιαγγειακό και αναπνευστικό φορτίο και περιορίζουν την αποκατάσταση του οργανισμού.[25] Σε συνδυασμό με την αυξημένη υγρασία που χαρακτηρίζει το παράκτιο περιβάλλον της πόλης και την περιορι- σμένη νυχτερινή ψύξη στο πυκνοδομημένο κέντρο, η αύξηση των τροπικών νυχτών δημιουργεί συνθήκες θερμικής δυσφορίας χωρίς επαρκή νυχτερινή ανακούφιση – γεγονός που επιδεινώνει ιδιαίτερα την ανθεκτικότητα ευάλωτων ομάδων του πληθυσμού.

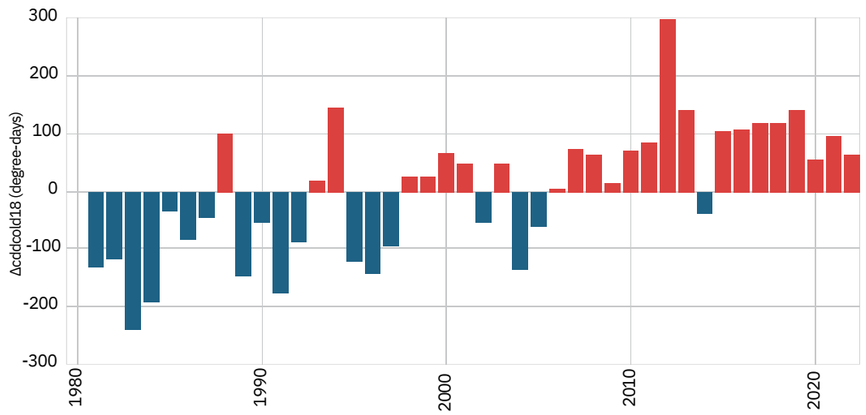
Μεταβολή αριθμού τροπικών νυχτών



Σχήμα 2.12: Χρονική εξέλιξη των μεταβολών του πλήθους των τροπικών νυχτών της Θεσσαλονίκης σε σύγκριση με τη μέση τιμή της περιόδου 1981-2020, από δεδομένα ERA5-Land

Ο δείκτης cddcold18, που εκφράζει το ενεργειακό φορτίο ψύξης, ενισχύει περαιτέρω την εικόνα της θερμικής συσσώρευσης (Σχήμα 2.13). Από την πρώτη δεκαπενταετία, στη διάρκεια της οποίας οι τιμές είναι αρνητικές (–76,1 μονάδες), η περιοχή μεταβαίνει σε μια τελευταία δεκαπενταετία με +98,98 μονάδες, μια συνολική μεταβολή περίπου +175 μονάδων. Αυτό αποτελεί ένδειξη ότι η περιοχή όχι μόνο θερμαίνεται μεμονωμένες ημέρες ή νύχτες, αλλά το θερμικό φορτίο της πόλης συσσωρεύεται, παρατείνοντας την ανάγκη για ψύξη κατά τους θερμούς μήνες και αυξάνοντας σημαντικά την ενεργειακή κατανάλωση των κτιρίων.

Μεταβολή βαθμοημερών ψύξης



Σχήμα 2.13: Χρονική εξέλιξη των μεταβολών των βαθμοημερών ψύξης της Θεσσαλονίκης σε σύγκριση με τη μέση τιμή της περιόδου 1981-2020, από δεδομένα ERA5-Land

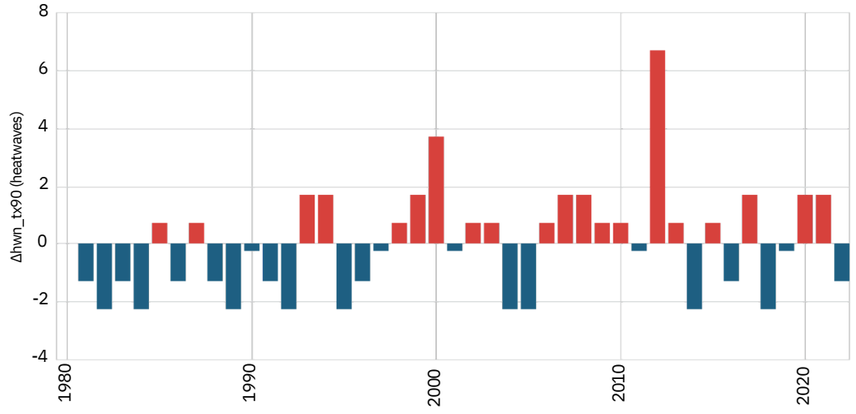
[25] European Climate Adaptation Platform Climate-ADAPT, Database, Indicators, Tropical Nights. Διαθέσιμο στο https://climate-adapt.eea.europa.eu/en/metadata/indicators/ tropical-nights (ανακτήθηκε στις 3 Φεβρουαρίου 2026).

Οι τρεις δείκτες συνδυαστικά περιγράφουν μια πόλη που βρίσκεται πλέον σε θερμικό καθεστώς διαφορετικό από αυτό των δεκαετιών του 1980 και του 1990. Η Θεσσαλονίκη παρουσιάζει αύξηση της διάρκειας της θερμής περιόδου (SU), έντονη επιδείνωση της νυχτερινής θερμικής καταπόνησης (TR) και σημαντική ενίσχυση του σωρευτικού θερμικού φορτίου (CDDCOLD18). Η μεταβολή αυτή δεν αποτελεί μόνο κλιματική ένδειξη, αλλά αντικατοπτρίζει την πραγματική επιβάρυνση ενός πολεοδομικού συγκροτήματος με μεγάλο θερμοχωρητικό αποτύπωμα, υψηλή υγρα- σία και περιορισμένες υποδομές νυχτερινού αερισμού. Ως αποτέλεσμα, η Θεσσαλονίκη εμφανίζει αυξημένη ανάγκη για σχεδιαστικές, ενεργειακές και χωρικές παρεμβάσεις που θα μειώσουν τη θερμική επιβάρυνση και θα ενισχύσουν τη συνολική ανθεκτικότητα της πόλης.

Η εξέλιξη των καυσώνων στη Θεσσαλονίκη κατά την περίοδο 1981-2022 παρουσιάζει μια καθαρή, αλλά σχετικά ήπια ενίσχυση στον αριθμό των θερμικών επεισοδίων (Σχήμα 2.14) και μια πιο σαφή και ουσιαστική αύξηση στη συνολική διάρκειά τους (Σχήμα 2.15). Ο συνδυασμός των δύο δεικτών HWN –ο οποίος καταγράφει τα διακριτά επεισόδια καύσωνα κάθε έτους– και HWF –ο οποίος αποτυπώνει τη συνολική διάρκεια των θερμικών επεισοδίων μέσα στο έτος– αναδεικνύει ότι το πολεοδομικό συγκρότημα της πόλης έχει μεταβεί ήδη σε ένα θερμότερο καθεστώς, όπου οι καύσωνες δεν είναι πλέον σπάνιες εξάρσεις, αλλά συγκροτημένα γεγονότα με μεγαλύτερη διάρκεια.

Ο δείκτης HWN παρουσιάζει μια ήπια, αλλά σταθερή ανοδική τάση. Κατά την πρώτη δεκαπενταετία της χρονοσειράς, οι τιμές είναι αρνητικές (–0,85 επεισόδια), ενώ τη σύγχρονη δεκαπενταετία ανέρχονται σε +0,62 επεισόδια. Αυτό αντιστοιχεί σε συνολική μεταβολή περίπου +1,5 επεισοδίων καύσωνα ανά έτος μεταξύ των δύο περιόδων. Παρά το γεγονός ότι ο αριθμός των επεισοδίων δεν αυξάνεται δραματικά, η τάση δείχνει ότι η Θεσσαλονίκη βιώνει πλέον καύσωνες πιο συχνά σε σχέση με τις δεκαετίες του 1980. Το εύρος των τιμών, από –2,25 ως +6,75 επεισόδια, αποτυπώνει την αυξημένη μεταβλητότητα αλλά και την κλιματική μετάβαση προς πιο συχνές υπερβάσεις των θερμοκρασιακών ορίων που χαρακτηρίζουν έναν καύσωνα.

Μεταβολή αριθμού επεισοδίων καύσωνα

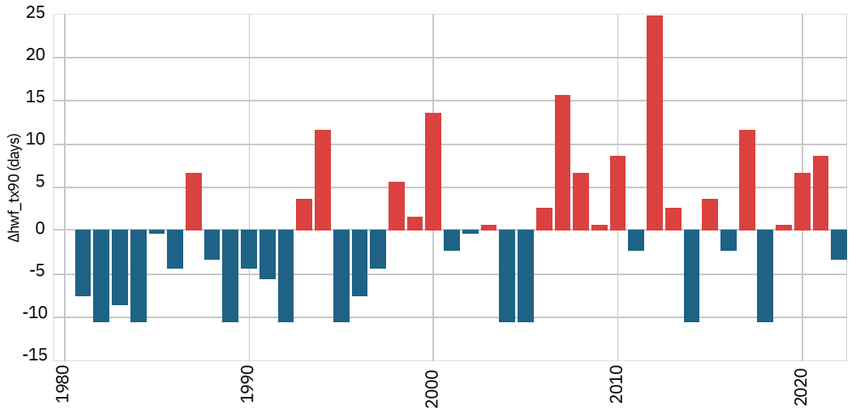


Σχήμα 2.14: Χρονική εξέλιξη των μεταβολών του αριθμού επεισοδίων καύσωνα της Θεσσαλονίκης σε σύγκριση με τη μέση τιμή της περιόδου 1981-2020, από δεδομένα ERA5-Land

Ακόμη πιο σημαντική είναι η μεταβολή του δείκτη HWF. Η πρώτη 15ετία της περιόδου εμφανίζει έντονα αρνητικές τιμές (–4.34 ημέρες), ενώ η τελευταία 15ετία φτάνει τις +4.46 ημέρες, που μεταφράζεται σε συνολική αύξηση περίπου +8,8 ημερών καύσωνα ανά έτος. Το εύρος του δείκτη, από –10.48 έως +47.52 ημέρες, υποδηλώνει ότι υπάρχουν χρονιές όπου οι θερμικές εξάρσεις είναι ιδιαίτερα εκτεταμένες. Παρότι η Θεσσαλονίκη δεν εμφανίζει τον ίδιο αριθμό ή την ίδια έντα- ση καυσώνων με την Αθήνα, η διάρκεια των επεισοδίων στη σύγχρονη περίοδο είναι σαφώς μεγαλύτερη και αποκαλύπτει μια μεσογειακή πόλη που διατηρεί την υψηλή θερμότητα για περισσότερες συνεχόμενες ημέρες.

Ακόμα πιο σημαντική είναι η μεταβολή του δείκτη HWF. Η πρώτη δεκαπενταετία της περιόδου εμφανίζει έντονα αρνητικές τιμές (–4,34 ημέρες), ενώ η τελευταία δεκαπενταετία φτάνει τις +4,46 ημέρες, που μεταφράζεται σε συνολική αύξηση περίπου +8,8 ημερών καύσωνα ανά έτος. Το εύρος του δείκτη, από –10,48 ως +47,52 ημέρες, υποδηλώνει ότι υπάρχουν χρονιές κατά τις οποίες οι θερμικές εξάρσεις είναι ιδιαίτερα εκτεταμένες. Παρότι η Θεσσαλονίκη δεν εμφανίζει τον ίδιο αριθμό ή την ίδια ένταση καυσώνων με την Αθήνα, η διάρκεια των επεισοδίων τη σύγχρονη περίοδο είναι σαφώς μεγαλύτερη και αποκαλύπτει μια μεσογειακή πόλη που διατηρεί την υψηλή θερμότητα για περισσότερες συνεχόμενες ημέρες.

Μεταβολή αριθμού ημερών με καύσωνα



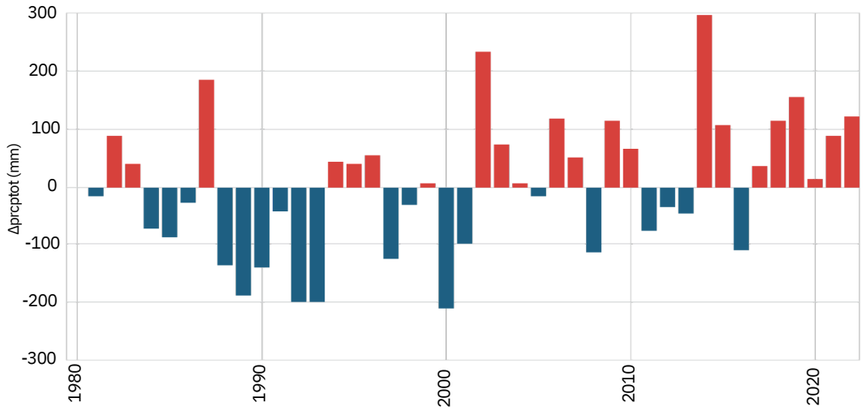
Σχήμα 2.15: Χρονική εξέλιξη των μεταβολών του αριθμού ημερών με καύσωνα της Θεσσαλονίκης σε σύγκριση με τη μέση τιμή της περιόδου 1981-2020, από δεδομένα ERA5-Land

Σε συνδυασμό, οι δύο δείκτες δείχνουν ότι η Θεσσαλονίκη έχει εισέλθει σε μια περίοδο κατά την οποία οι καύσωνες είναι πιο συχνοί (υπάρχει, δηλαδή, αύξηση στον αριθμό επεισοδίων), πιο εκτεταμένοι χρονικά (με αύξηση ημερών καύσωνα), και είναι πιο πιθανό να συνεχίζονται χωρίς μεγάλα διαλείμματα, λόγω της συσσώρευσης θερμικού φορτίου που καταγράφηκε και στον δείκτη CDDCOLD18. Οι μεταβολές αυτές συνδέονται με τη συνολική θερμική επιβάρυνση που κατέγραψε η μέση θερμοκρασία (tmm) και ενισχύονται από τις ιδιαιτερότητες του αστικού μικροκλίματος της Θεσσαλονίκης: τη μειωμένη νυχτερινή ψύξη στις πυκνοδομημένες περιοχές, την αυξημένη υγρασία από τον Θερμαϊκό και τη θερμική παγίδευση στις δυτικές και κεντρικές συνοικίες. Η ζωή στην πόλη χαρακτηρίζεται πλέον από μια γενικευμένη επιδείνωση της ποιότητας ζωής ως αποτέλεσμα της κλιματικής κρίσης.

Τα Σχήματα 2.16 και 2.17 παρουσιάζουν τις μεταβολές του ετήσιου συνολικού ύψους βροχής και του αριθμού ημερών με υψηλή βροχόπτωση, αντίστοιχα. Η εξέλιξη της βροχόπτωσης στη Θεσσαλονίκη τα τελευταία σαράντα χρόνια παρουσιάζει ένα συνεκτικό μοτίβο. Το κλίμα δεν μεταβάλλεται τόσο ως προς τη συνολική ποσότητα, όσο ως προς τη μεταβλητότητα, την αστάθεια και τη συχνότητα των έντονων επεισοδίων. Ο δείκτης PRCPTOT –ο οποίος αποτυπώνει το συνολικό ετήσιο ύψος βροχής– και ο δείκτης R20mm –ο οποίος υποδηλώνει τον αριθμό ημερών με ύψος βροχής μεγαλύτερο των 20 mm– καταγράφουν μια πόλη που, ενώ παραμένει εντός του τυπικού μεσογειακού εύρους βροχοπτώσεων, εμφανίζει μετατόπιση της υετικής κατανομής προς μεγαλύτερη μεταβλητότητα και συχνότερη εμφάνιση έντονων επεισοδίων βροχόπτωσης, επηρεάζοντας άμεσα τον αστικό ιστό και τη λειτουργία των υποδομών.

Ο δείκτης PRCPTOT για τη Θεσσαλονίκη χαρακτηρίζεται από έντονη διαχρονική μεταβλητότητα, χωρίς να προκύπτει σαφής τάση από τη μέση τιμή των αποκλίσεων. Η σύγκριση των δύο άκρων της χρονοσειράς αναδεικνύει σαφή διαφοροποίηση μεταξύ των περιόδων. Την πρώτη δεκαπε- νταετία οι τιμές απόκλισης είναι καθαρά αρνητικές (–45,6 mm), ενώ την τελευταία δεκαπενταετία διαμορφώνονται στις +54,3 mm. Δηλαδή η Θεσσαλονίκη καταγράφει περίπου +100 mm μεταβολή μεταξύ 1980 και 2010-2020. Οι τιμές κυμαίνονται από –209 mm ως +349 mm, ένα εξαιρετικά μεγάλο εύρος που αποτυπώνει την αυξημένη μεταβλητότητα του υδρολογικού καθεστώτος.

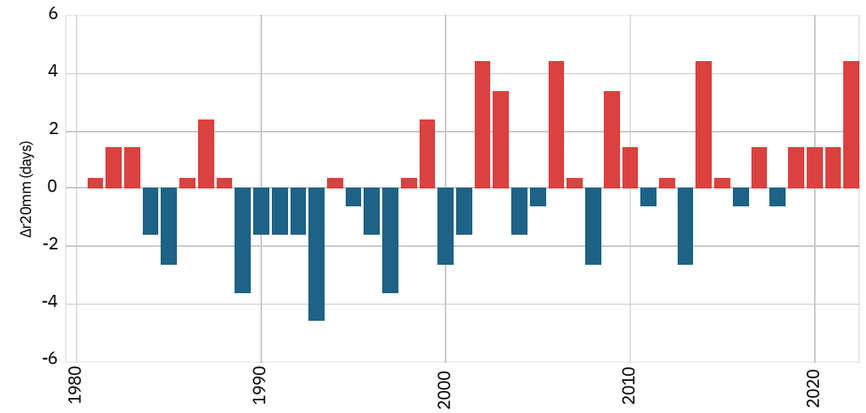
Μεταβολή ετήσιας βροχόπτωσης



Σχήμα 2.16: Χρονική εξέλιξη των μεταβολών της ετήσιας βροχόπτωσης της Θεσσαλονίκης σε σύγκριση με τη μέση τιμή της περιόδου 1981-2020, από δεδομένα ERA5-Land

Παράλληλα, ο δείκτης R20mm υποδεικνύει ήπια ενίσχυση των έντονων επεισοδίων. Από μια πρώτη δεκαπενταετία με τιμές –0,73 ημέρες, η περιοχή μεταβαίνει σε μια τελευταία δεκαπενταετία με +0,87 ημέρες, συνολική μεταβολή περίπου +1,6 ημερών με ισχυρή βροχόπτωση. Το εύρος του δείκτη (από –4,6 ως +4,4 ημέρες) φανερώνει ότι υπάρχουν έτη κατά τα οποία οι έντονες καταιγί- δες είναι πολλαπλάσιες σε σχέση με τις ξηρές περιόδους του παρελθόντος.

Μεταβολή αριθμού ημερών υψηλής βροχόπτωσης



Σχήμα 2.17: Χρονική εξέλιξη των μεταβολών του αριθμού των ημερών υψηλής βροχόπτωσης της Θεσσαλονίκης σε σύγκριση με τη μέση τιμή της περιόδου 1981-2020, από δεδομένα ERA5-Land

Οι αλλαγές αυτές είναι ιδιαίτερα σημαντικές για μια πόλη όπως η Θεσσαλονίκη, όπου η χωρική κλιμάκωση από την παραλία προς τα δυτικά χαρακτηρίζεται από υψηλή αδιαπερατότητα, έντονη πυκνότητα δόμησης και περιορισμένη φυσική αποστράγγιση. Ακόμα και μια μικρή αύξηση στον αριθμό επεισοδίων με ημερήσια βροχόπτωση μεγαλύτερη των 20 mm αρκεί για να ενισχύσει τον κίνδυνο αστικών πλημμυρών, ειδικά στα δυτικά τμήματα της πόλης, στους χειμάρρους που διασχίζουν τον αστικό ιστό και στις περιοχές χαμηλού υψομέτρου προς τον Θερμαϊκό.

Συνολικά, η ανάλυση της ιστορικής περιόδου υποδηλώνει ότι στη Θεσσαλονίκη αυξάνεται η υδρολογική μεταβλητότητα, με συχνότερη εμφάνιση θετικών αποκλίσεων στο συνολικό ύψος βροχής και ήπια ενίσχυση της συχνότητας ημερών με έντονη βροχόπτωση σε σύγκριση με τις δεκαετίες του 1980-1990.

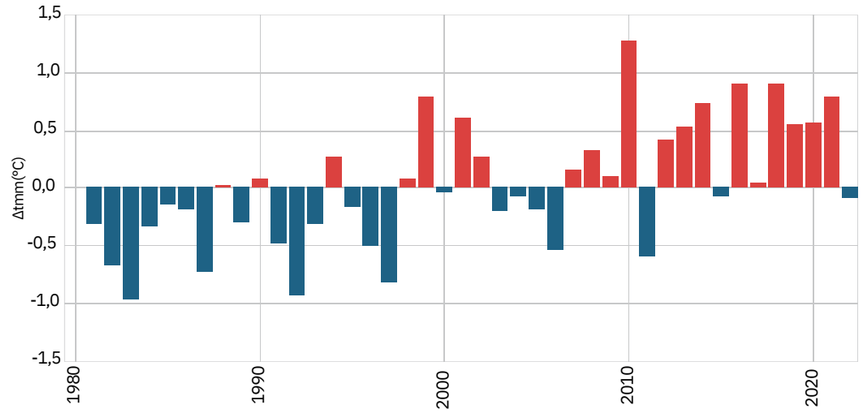
[2.1.3]

ΓΟΎΡΝΕΣ

Κατά την περίοδο 1981-2022 η μέση ετήσια θερμοκρασία στην περιοχή των Γουρνών παρουσιάζει σταθερή ανοδική πορεία, με συχνότερες θετικές αποκλίσεις μετά το έτος 2000. Η πρώτη δεκαετία (1981-1990) χαρακτηρίζεται από αρνητικές αποκλίσεις (μέση τιμή περίπου –0,35°C), δηλαδή από ελαφρώς ψυχρότερες συνθήκες σε σχέση με τον μακροχρόνιο μέσο όρο (Σχήμα 2.18). Αντίθετα, την τελευταία δεκαετία (2013-2022) η μέση απόκλιση φτάνει τους +0,48°C, κατα- δεικνύοντας αύξηση θερμοκρασίας σχεδόν κατά 0,8°C σε σύγκριση με τις αρχές της περιόδου. Αξιοσημείωτα θερμά έτη είναι το 2010, το 2017 και το 2021, στη διάρκεια των οποίων οι αποκλί- σεις υπερέβησαν το +1°C, ενώ τα πιο ψυχρά έτη εντοπίζονται στις αρχές της δεκαετίας του 1980 (με ελάχιστο το 1983: –0,98°C).

Η σταδιακή αυτή μετατόπιση των ετήσιων θερμοκρασιών προς υψηλότερες τιμές αποτελεί σαφή ένδειξη μεταβολής του θερμικού υποβάθρου της περιοχής. Η αυξημένη συχνότητα θετικών αποκλίσεων μετά το 2000 δείχνει ότι το «νέο κανονικό» κλίμα των Γουρνών τείνει να είναι θερμότερο σχεδόν κάθε έτος σε σχέση με τη μακροχρόνια περίοδο αναφοράς. Σε πρακτικό επίπεδο, η μεταβολή αυτή συνεπάγεται επιμήκυνση της θερμής περιόδου, με μεγαλύτερη διάρκεια θερι- νών συνθηκών, αύξηση ενεργειακής ζήτησης για ψύξη και εντονότερη θερμική καταπόνηση των υποδομών και του πληθυσμού.

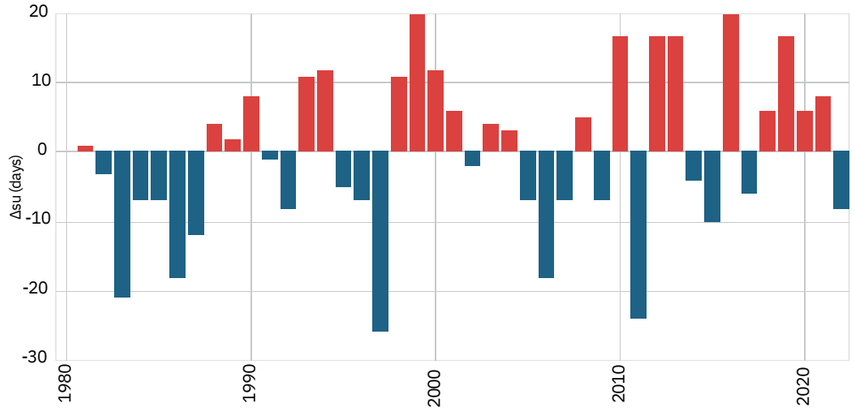
Μεταβολή μέσης ετήσιας θερμοκρασίας



Σχήμα 2.18: Χρονική εξέλιξη των μεταβολών της μέσης ετήσιας θερμοκρασίας (°C) των Γουρνών σε σύγκριση με τη μέση τιμή της περιόδου 1981-2020, από δεδομένα ERA5-Land

Η συνδυαστική εξέταση των δεικτών θερινών ημερών (SU) και τροπικών νυχτών (TR) προσφέρει μια πιο ολοκληρωμένη εικόνα της θερμικής μεταβολής που συντελείται στην περιοχή των Γουρνών. Οι δύο δείκτες περιγράφουν διαφορετικές, αλλά συμπληρωματικές πτυχές του θερμικού περιβάλλοντος: ο SU αποτυπώνει τη διάρκεια των ημερών με υψηλές θερμοκρασίες, ενώ ο TR δείχνει τον βαθμό νυχτερινής ανακούφισης ή, αντίστροφα, τη συσσώρευση θερμότητας στο τοπικό μικροκλίμα. Κατά την περίοδο 1981-2022, και οι δύο δείκτες παρουσιάζουν αύξηση, αλλά με διαφορετικό ρυθμό. Οι θερινές ημέρες (Σχήμα 2.19) αυξήθηκαν κατά περίπου 10 ημέρες σε σχέση με τις πρώτες δεκαετίες, ενώ οι τροπικές νύχτες (Σχήμα 2.20) αυξήθηκαν πολύ εντονότερα, κατά περίπου 30 ημέρες.

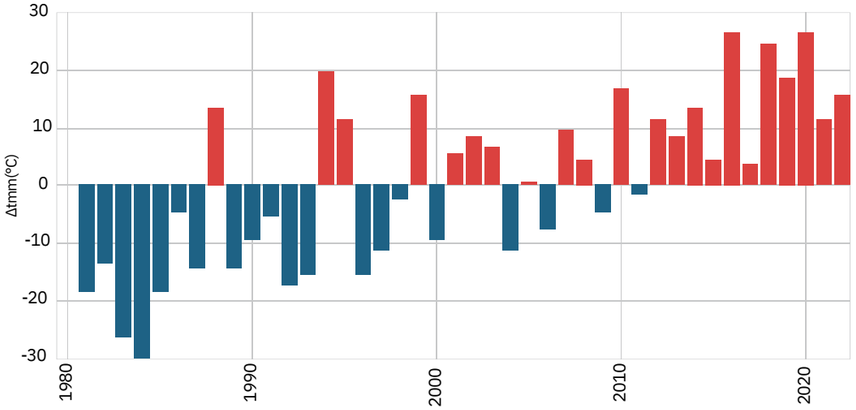
Μεταβολή αριθμού θερινών ημερών



Σχήμα 2.19: Χρονική εξέλιξη των μεταβολών του αριθμού θερινών ημερών των Γουρνών, σε σύγκριση με τη μέση τιμή της περιόδου 1981-2020, από δεδομένα ERA5-Land

Αυτό σημαίνει ότι η περιοχή δεν βιώνει μόνο περισσότερες θερμές ημέρες, αλλά και πολύ θερμότερες νύχτες, με ολοένα και μικρότερη πτώση της θερμοκρασίας μετά τη δύση του ήλιου. Η ένταση των τροπικών νυχτών μετά το 2005 αποτελεί σαφή ένδειξη θερμικής παγίδευσης στην παράκτια ζώνη, λόγω της αυξημένης θερμοκρασίας της θάλασσας, της εκτεταμένης αστικοποίησης και των αδιαπέραστων επιφανειών και της μειωμένης παρουσίας φυσικής βλάστησης.

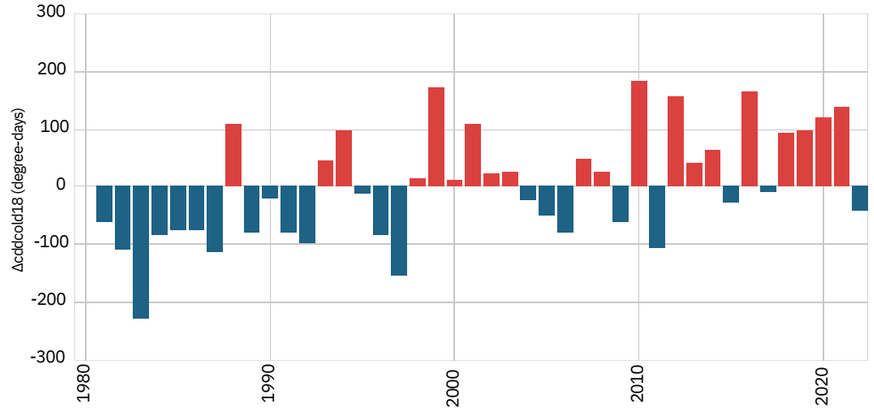
Μεταβολή αριθμού τροπικών νυχτών



Σχήμα 2.20: Χρονική εξέλιξη των μεταβολών του αριθμού τροπικών νυχτών των Γουρνών, σε σύγκριση με τη μέση τιμή της περιόδου 1981-2020, από δεδομένα ERA5-Land

Πρακτικά, η σύμπτωση των δύο φαινομένων συνεπάγεται παρατεταμένη θερμική καταπόνηση. Η περιορισμένη νυχτερινή ψύξη αυξάνει τη θερμική δυσφορία των κατοίκων και των επισκε- πτών, ενώ αυξάνεται και η ενεργειακή καταπόνηση των κτιρίων, καθώς τα συστήματα ψύξης λειτουργούν πλέον περισσότερες ώρες. Συνολικά, το μικροκλίμα αλλάζει προς ένα θερμότερο και ξηρότερο καθεστώς, χαρακτηριστικό των παράκτιων περιοχών της Ανατολικής Μεσογείου, που επηρεάζονται εντονότερα από την κλιματική αλλαγή. Οι τάσεις που αναδείχθηκαν μέσω των προηγούμενων δεικτών αποτυπώνονται με ακόμα πιο έντονο τρόπο στον δείκτη βαθμοημερών ψύξης (CDDCOLD18), ο οποίος συνδέει άμεσα τις θερμοκρασιακές συνθήκες με τις ενεργειακές ανάγκες για ψύξη (Σχήμα 2.21). Η σταθερή αύξηση των θερμών ημερών και η σημαντική αύξηση των τροπικών νυχτών συνεπάγονται ότι η περίοδος κατά την οποία απαιτείται τεχνητή ψύξη επεκτείνεται χρονικά και εντείνεται θερμικά. Αυτό αποτυπώνεται στον δείκτη CDDCOLD18, ο οποίος αυξάνεται μετά το 2000, καταγράφοντας τιμές άνω των 60 μονάδων την τελευταία δεκαετία, έναντι αρνητικών τιμών τις πρώτες δεκαετίες της περιόδου (1981-1990).

Μεταβολή βαθμοημερών ψύξης



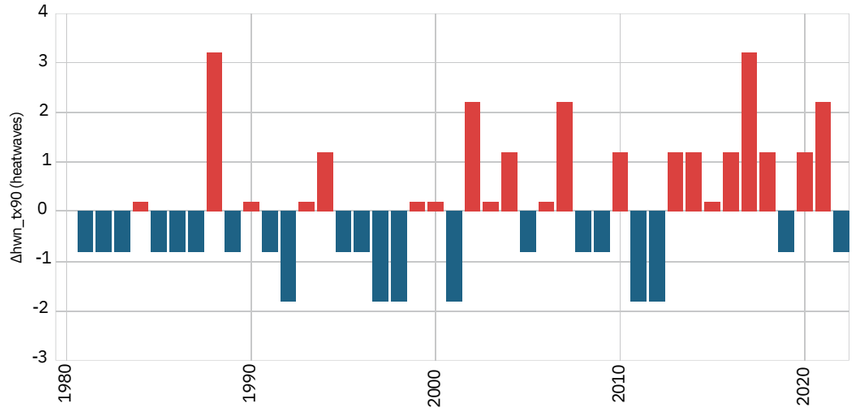
Σχήμα 2.21: Χρονική εξέλιξη των μεταβολών των βαθμοημερών ψύξης των Γουρνών, σε σύγκριση με τη μέση τιμή της περιόδου 1981-2020, από δεδομένα ERA5-Land

Η μεταβολή αυτή, περίπου +140 μονάδες μεταξύ των δύο άκρων της χρονοσειράς, σημαίνει ότι τα κτίρια της περιοχής χρειάζονται πολλαπλάσια ενέργεια για ψύξη απ' ό,τι στο παρελθόν, όχι επειδή οι ακραίες θερμοκρασίες είναι απλώς υψηλότερες, αλλά επειδή η διάρκεια και η ένταση της θερμικής φόρτισης έχουν αυξηθεί σημαντικά. Η αύξηση των βαθμοημερών ψύξης επιβε- βαιώνει ότι το θερμικό φορτίο συσσωρεύεται τόσο κατά τη διάρκεια της ημέρας (λόγω περισσό- τερων θερινών ημερών) όσο και της νύχτας (λόγω τροπικών νυχτών), οδηγώντας σε αδιάλειπτη ανάγκη ψύξης για μεγάλα χρονικά διαστήματα του έτους.

Πέρα από την ενεργειακή διάσταση, ο δείκτης CDDCOLD18 λειτουργεί και ως ένδειξη θερμικής πίεσης στο δομημένο περιβάλλον, η οποία αυξάνει το λειτουργικό κόστος, επιβαρύνει τις υποδομές ηλεκτρικής ενέργειας και καθιστά απαραίτητο τον βιοκλιματικό και ενεργειακά αποδοτικό σχεδιασμό των νέων κτιρίων και δημόσιων χώρων.

Η συχνότητα (Σχήμα 2.22) και η διάρκεια (Σχήμα 2.23) των επεισοδίων καύσωνα παρουσιάζουν σαφή αυξητική πορεία από το 1981 ως το 2022, επιβεβαιώνοντας ότι οι ακραίες θερμικές συνθήκες γίνονται πιο συχνές και παρατεταμένες. Ο αριθμός των επεισοδίων καύσωνα (HWN), δηλαδή των περιόδων με τρεις ή περισσότερες συνεχόμενες ημέρες εξαιρετικά υψηλών θερμοκρασιών, αυξάνεται σταθερά, με τα πιο έντονα επεισόδια να εμφανίζονται μετά το 2010. Παράλληλα, ο δείκτης HWF, που εκφράζει τον συνολικό αριθμό των ημερών καύσωνα ανά έτος, δείχνει ότι όχι μόνο τα επεισόδια γίνονται συχνότερα, αλλά και διαρκούν περισσότερο.

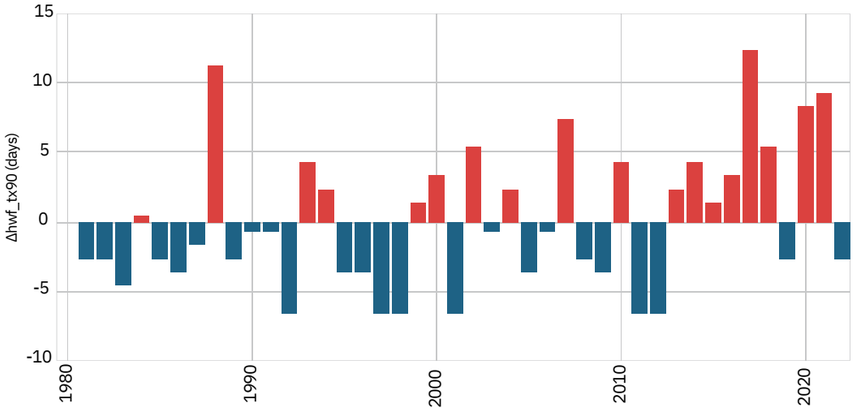
Μεταβολή αριθμού επεισοδίων καύσωνα



Σχήμα 2.22: Χρονική εξέλιξη των μεταβολών του αριθμού επεισοδίων καύσωνα των Γουρνών σε σύγκριση με τη μέση τιμή της περιόδου 1981-2020, από δεδομένα ERA5-Land

Συγκριτικά με τις πρώτες δεκαετίες της περιόδου, ο μέσος αριθμός ημερών καύσωνα έχει αυξηθεί κατά περίπου 5 ημέρες ανά έτος, ενώ τα ισχυρότερα έτη (όπως το 2007, 2017 και 2021) παρουσιάζουν τιμές άνω των +10 ημερών σε σχέση με τον μέσο όρο της περιόδου 1981-2020. Οι τάσεις αυτές συνδέονται άμεσα με τα προηγούμενα ευρήματα των δεικτών θερινών ημερών (SU) και τροπικών νυχτών (TR): η θερμή περίοδος δεν είναι μόνο μακρύτερη, αλλά διανθίζεται πλέον από ακραίες θερμοκρασιακές εξάρσεις, οι οποίες παρατείνουν τις υψηλές θερμοκρασίες τόσο κατά τη διάρκεια της ημέρας όσο και της νύχτας.

Μεταβολή αριθμού ημερών με καύσωνα



Σχήμα 2.23: Χρονική εξέλιξη των μεταβολών του αριθμού των ημερών με επεισόδιο καύσωνα των Γουρνών σε σύγκριση με τη μέση τιμή της περιόδου 1981-2020, από δεδομένα ERA5-Land

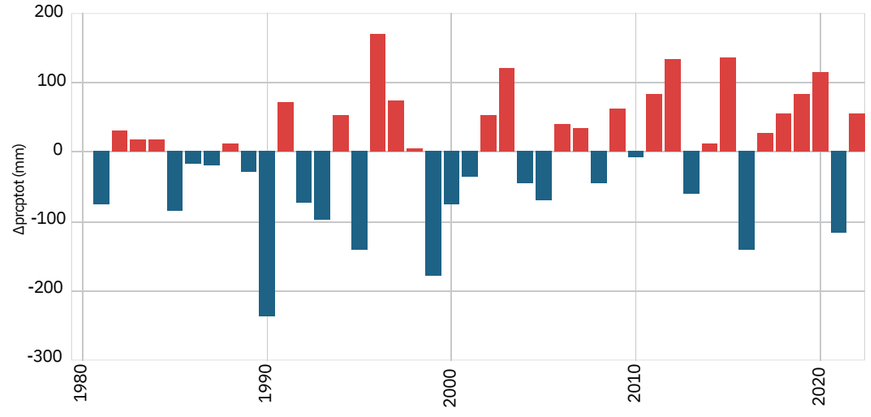
Η αυξανόμενη συχνότητα καυσώνων συνεπάγεται μεγαλύτερη θερμική πίεση στο αστικό και φυσικό περιβάλλον, κίνδυνο για την υγεία των ευπαθών ομάδων (μια μελέτη καταδεικνύει αύξηση της καρδιαγγειακής και αναπνευστικής θνησιμότητας σε άτομα άνω των 65 ετών, τα οποία τις ημέρες υψηλών θερμοκρασιών εμφανίζουν αύξηση των ημερήσιων θανάτων κατά περίπου 20-35%),[26] αύξηση ενεργειακής κατανάλωσης για ψύξη και επιτάχυνση της φθοράς των υποδομών (οδοστρώματα, δίκτυα ενέργειας, υλικά κατασκευής).[27]

[26] Paravantis, J., Santamouris, M., Cartalis, C., Efthymiou, C. και Kontoulis, N. (2017). Mortality associated with high ambient temperatures, heatwaves, and the urban heat island in Athens, Greece. *Sustainability*, 9 (4), 606.

[27] Global Center on Adaptation, Climate-Resilient Infrastructure Handbook. Ρότερνταμ, Ολλανδία, 2021. Διαθέσιμο στο https://gca.org/reports/climate-resilient-infrastructure-officer-handbook/ (ανακτήθηκε στις 3 Φεβρουαρίου 2026).

Η ανάλυση των δεικτών συνολικής ετήσιας βροχόπτωσης (PRCPTOT) και ημερών υψηλής βροχόπτωσης (R20mm) δείχνει ότι το κλίμα της περιοχής των Γουρνών δεν έχει μεταβληθεί τόσο ως προς το ποσοτικό ύψος των βροχών, όσο ως προς τον τρόπο με τον οποίο αυτές εκδηλώνονται. Η χρονοσειρά χαρακτηρίζεται από έντονη εσωτερική μεταβλητότητα, με περιόδους μειωμένων βροχοπτώσεων (όπως 1985-1995 και 2005-2010) να εναλλάσσονται με έτη ιδιαίτερα αυξημένων υετικών ποσών (π.χ., 2010 και 2020). Η εναλλαγή αυτή υποδηλώνει ότι το υδρολογικό καθεστώς γίνεται πιο ασταθές και λιγότερο προβλέψιμο, ακόμη και όταν το συνολικό ετήσιο ύψος βροχής παραμένει κοντά στις μακροχρόνιες μέσες τιμές (Σχήμα 2.24).

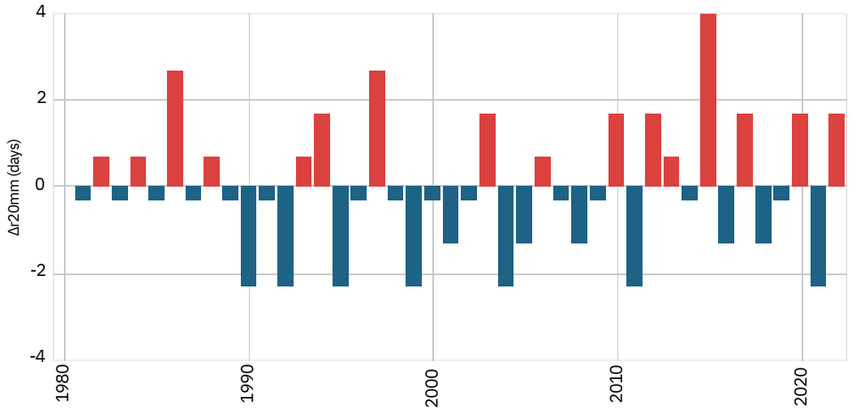
Μεταβολή ετήσιας βροχόπ τωσης



Σχήμα 2.24: Χρονική εξέλιξη των μεταβολών της αθροιστικής ετήσιας βροχόπτωσης (mm) των Γουρνών σε σύγκριση με τη μέση τιμή της περιόδου 1981-2020, από δεδομένα ERA5-Land

Ο δείκτης R20mm (Σχήμα 2.26) υποδηλώνει ήπια αύξηση της συχνότητας έντονων βροχοπτώσεων την τελευταία δεκαετία, καταγράφοντας όμως έντονες διακυμάνσεις από έτος σε έτος στη συχνότητα των επεισοδίων υψηλής βροχόπτωσης. Με άλλα λόγια, η βροχόπτωση δεν γίνεται συνολικά περισσότερη ή λιγότερη, αλλά πιο απρόβλεπτη στη χρονική της κατανομή.

Μεταβολή αριθμού ημερών υψηλής βροχόπτωσης



Σχήμα 2.25: Χρονική εξέλιξη των μεταβολών του αριθμού ημερών υψηλής βροχόπτωσης των Γουρνών σε σύγκριση με τη μέση τιμή της περιόδου 1981-2020, από δεδομένα ERA5-Land

Αυτή η μεταβλητότητα έχει σημαντικές πρακτικές συνέπειες:

- Οι διαδοχικές ξηρές περίοδοι επιβαρύνουν τη φυσική βλάστηση και την αναπλήρωση του υδροφόρου ορίζοντα.
- Οι έντονες, σύντομες καταιγίδες αυξάνουν τον κίνδυνο επιφανειακής απορροής και πλημμύρας, ειδικά στις χαμηλές και αδιαπέραστες περιοχές κοντά στο παράκτιο μέτωπο.
- Το σύνολο του υδρολογικού συστήματος εμφανίζει αυξημένη ευαισθησία στην εναλλαγή ξηρών και υγρών ετών, γεγονός που ενισχύει την ανάγκη για προσαρμοσμένο σχεδιασμό.

Η συνδυαστική αξιολόγηση των PRCPTOT και R20mm δείχνει ότι η περιοχή των Γουρνών χαρακτηρίζεται από αυξημένη μεταβλητότητα στη χρονική κατανομή των βροχοπτώσεων. Παρότι το συνολικό ετήσιο ύψος βροχής δεν εμφανίζει σημαντική μεταβολή, η εναλλαγή ετών με περιορισμένες βροχοπτώσεις και ετών με μεμονωμένα επεισόδια υψηλής έντασης ενισχύει την αβεβαιότητα του υδρολογικού κύκλου. Η εξέλιξη αυτή καθιστά αναγκαία την ενσωμάτωση μέτρων ανθεκτικότητας στην υδρολογική αβεβαιότητα, όπως συστήματα αποθήκευσης και επαναχρησιμοποίησης ομβρίων, διαπερατά δάπεδα και πράσινες υποδομές και τοπικές παρεμβάσεις μικρής κλίμακας για τον έλεγχο της απορροής και τη μείωση του πλημμυρικού κινδύνου.

Στον Πίνακα 2.2 παρέχεται μια συγκριτική ανάλυση των τιμών των βασικών κλιματικών παραμέτρων και δεικτών, ώστε να αναδειχθούν οι διαφοροποιήσεις στο θερμικό και υδρολογικό καθεστώς των τριών περιοχών, οι οποίες σχετίζονται με τη γεωγραφική θέση, τη θαλάσσια επίδραση και τον βαθμό αστικοποίησης.

Πίνακας 2.2: Συγκριτικά κλιματικά χαρακτηριστικά για τις τρεις περιοχές μελέτης. Μέσες τιμές της περιόδου 1981-2010 και σε παρένθεση η μέση απόκλιση της περιόδου 2011-2022. ↓

Περιοχή	Μέση ετήσια θερμοκρασία (°C)	Θερινές ημέρες	Τροπικές νύχτες	Ετήσια βροχόπτωση (mm)
Αθήνα	17,07 (+0,74)	139,3 (+6,3)	67 (+16,9)	354 (+38)
Θεσσαλονίκη	14,84 (+0,99)	114,6 (+11,2)	54,7 (+19,7)	548 (+79)
Γούρνες	18,02 (+0,52)	143,7 (+4,6)	67 (+18,3)	421 (+48)

Οι Γούρνες Ηρακλείου εμφανίζουν τη υψηλότερη μέση ετήσια θερμοκρασία και τον μεγαλύτερο αριθμό θερινών ημερών, επιβεβαιώνοντας τον θερμό χαρακτήρα της νότιας Ελλάδας. Παράλληλα, οι τροπικές νύχτες είναι εξίσου αυξημένες με την Αθήνα, γεγονός που υποδηλώνει έντονη νυχτερινή θερμική επιβάρυνση. Ωστόσο η μικρότερη θετική απόκλιση θερμοκρασίας την πε- ρίοδο 2011-2022 σε σύγκριση με τις άλλες δύο περιοχές δείχνει ότι, παρόλο που το κλίμα είναι ήδη θερμό, ο ρυθμός πρόσφατης θέρμανσης είναι ηπιότερος, ίσως λόγω της εξομαλυντικής επίδρασης της θάλασσας.

Η Αθήνα παρουσιάζει έντονο θερμικό φορτίο, με πολύ υψηλό αριθμό θερινών ημερών και τροπικών νυχτών. Οι θετικές αποκλίσεις μετά το 2010 αποτυπώνουν τη συνδυασμένη επίδραση της γενικής κλιματικής θέρμανσης και της αστικής θερμικής νησίδας, η οποία ενισχύει κυρίως τη νυχτερινή θερμοκρασία. Η χαμηλή ετήσια βροχόπτωση κατατάσσει το μέρος σε πιο ξηρό υδρολογικό καθεστώς σε σχέση με τις άλλες δύο περιοχές.

Η Θεσσαλονίκη, αν και εμφανίζει χαμηλότερες απόλυτες θερμοκρασίες, παρουσιάζει τις μεγαλύτερες θετικές αποκλίσεις στη μέση θερμοκρασία, στις θερινές ημέρες και στις τροπικές νύχτες, την περίοδο 2011-2022. Αυτό υποδηλώνει ότι η περιοχή βιώνει ταχύτερη σχετική μεταβολή του κλίματος σε σύγκριση με το ιστορικό της υπόβαθρο. Παράλληλα, η σημαντικά υψηλότερη ετήσια βροχόπτωση αντανακλά τον πιο υγρό χαρακτήρα της βόρειας Ελλάδας.

Συνολικά, οι Γούρνες και η Αθήνα χαρακτηρίζονται από θερμό και ξηρό κλιματικό προφίλ, με έντονη νυχτερινή θερμική καταπόνηση, ενώ η Θεσσαλονίκη διατηρεί πιο υγρές συνθήκες, αλλά εμφανίζει εντονότερη πρόσφατη κλιματική μεταβολή. Η σύγκριση αυτή καταδεικνύει ότι η κλιμα- τική αλλαγή δεν εκδηλώνεται ομοιόμορφα, αλλά διαφοροποιείται τόσο ως προς τις απόλυτες τιμές όσο και ως προς τον ρυθμό μεταβολής μεταξύ των περιοχών.

[2.2] Προβλέψεις μελλοντικής περιόδου

Η ανάλυση της μελλοντικής περιόδου αποσκοπεί στη θεώρηση του τρόπου με τον οποίο οι βασικές κλιματικές παράμετροι αναμένεται να μεταβληθούν στις περιοχές ενδιαφέροντος τις επόμενες δεκαετίες, υπό το ενδεχόμενο συνέχισης των σημερινών ανθρωπογενών πιέσεων στο κλιματικό σύστημα.

Για τον σκοπό αυτό, χρησιμοποιήθηκαν κλιματικές προσομοιώσεις υψηλής χωρικής ανάλυσης (περίπου 12,5 χλμ. για την Ευρώπη), οι οποίες προέρχονται από τη συνεργασία μοντέλων γενικής κυκλοφορίας (General Circulation Models, GCMs) και περιοχικών κλιματικών μοντέλων (Regional Climate Models, RCMs). Τα περιοχικά μοντέλα λειτουργούν ως «υποβιβασμός κλίμακας» των παγκόσμιων προσομοιώσεων, προσαρμόζοντας τα αποτελέσματα στα τοπικά χαρακτηριστικά της Μεσογείου και των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών των αστικών περιβαλλόντων της Αθήνας και της Θεσσαλονίκης, όπου η γεωμορφολογία, η γειτνίαση με τη θάλασσα, η πυκνή δόμηση και οι μικροκλιματικές συνθήκες επιδρούν σημαντικά στη θερμοκρασία και στη βροχόπτωση, αλλά και στις ιδιαιτερότητες του ανάγλυφου και του μικροκλίματος των Γουρνών. Η χρήση συνδυα- σμών παγκόσμιων (Global Climate Models, GCMs) και περιοχικών κλιματικών μοντέλων (Regional Climate Models, RCMs) είναι απαραίτητη, καθώς τα GCMs προσομοιώνουν τις μεγάλες κλίμακες της ατμοσφαιρικής κυκλοφορίας και της κλιματικής δυναμικής, αλλά δεν έχουν επαρκή χωρι- κή ανάλυση για την αξιόπιστη αποτύπωση τοπικών και αστικών φαινομένων. Τα RCMs λειτουρ- γούν ως δυναμικός υποβιβασμός κλίμακας (dynamical downscaling), λαμβάνοντας ως οριακές συνθήκες τις εξόδους των GCMs και αναπαράγοντας με μεγαλύτερη ακρίβεια τις χωρικές διαφοροποιήσεις που σχετίζονται με τη γεωμορφολογία, τη γειτνίαση με τη θάλασσα και τη δομή του αστικού περιβάλλοντος. Οι προσομοιώσεις πραγματοποιήθηκαν με βάση τα σενάρια συγκεντρώσεων RCP (representative concentration pathways) που έχει θεσπίσει η Διακυβερνητική Επιτροπή για την Αλλαγή του Κλίματος (IPCC).

Χρησιμοποιήθηκαν δύο κλιματικά σενάρια:

- το RCP4.5, ένα μετριοπαθές σενάριο, στο οποίο οι εκπομπές αερίων θερμοκηπίου κορυφώνονται γύρω στο 2040 και στη συνέχεια μειώνονται και
- το RCP8.5, ένα δυσμενές σενάριο, όπου οι εκπομπές συνεχίζουν να αυξάνονται καθ' όλη τη διάρκεια του 21ου αιώνα.

Κάθε κλιματική προσομοίωση βασίζεται, επομένως, σε ένα ζεύγος GCM–RCM, όπου το παγκόσμιο μοντέλο καθορίζει τη μακροκλιματική εξέλιξη υπό το εκάστοτε σενάριο εκπομπών, ενώ το περιοχικό μοντέλο εξειδικεύει την πληροφορία αυτή σε περιφερειακή και τοπική κλίμακα. Η χρήση πολλαπλών συνδυασμών επιτρέπει τον υπολογισμό της αβεβαιότητας που σχετίζεται τόσο με τη δομή των μοντέλων όσο και με τις διαφορετικές παραδοχές φυσικών διεργασιών. Οι προσομοιώσεις που αξιοποιήθηκαν προέρχονται από πέντε συνδυασμούς μοντέλων GCM–RCM, όπου το αριστερό μοντέλο παρέχει την παγκόσμια εικόνα και το δεξί την περιφερειακή:

- EC-EARTH και RACMO22E
- EC-EARTH και RCA4
- HadGEM2-ES και RACMO22E
- HadGEM2-ES και RCA4
- MPI-ESM-LR και RCA4

Για τη μείωση της αβεβαιότητας των αποτελεσμάτων εφαρμόστηκε η τεχνική του «σμήνους προσομοιώσεων» (ensemble), σύμφωνα με την οποία υπολογίζεται η μέση τιμή από το σύνολο των παραπάνω διαθέσιμων προσομοιώσεων. Με τον τρόπο αυτό, εξομαλύνονται οι αποκλίσεις που παρουσιάζουν τα επιμέρους μοντέλα και προκύπτει μια πιο αξιόπιστη θεώρηση της μελ- λοντικής τάσης. Επιπλέον, χρησιμοποιήθηκε διόρθωση μεροληψίας (bias correction), ώστε να ευθυγραμμιστούν τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων με τα στατιστικά χαρακτηριστικά των παρατηρήσεων. Η διόρθωση αυτή είναι απαραίτητη και για τις τρεις περιοχές ενδιαφέροντος, όπου, αναλόγως, η τοπική γεωμορφολογία και η επιρροή της ανθρώπινης δραστηριότητας δη- μιουργούν μικροκλιματικές συνθήκες που τα κλιματικά μοντέλα δεν αποδίδουν με ακρίβεια χω- ρίς κατάλληλη μετεπεξεργασία. Πιο συγκεκριμένα, δίχως αυτή τη διόρθωση, τα κλιματικά μοντέ- λα θα υπερεκτιμούσαν ή θα υποεκτιμούσαν τις απόλυτες τιμές θερμοκρασίας και βροχόπτωσης στην εκάστοτε περιοχή.

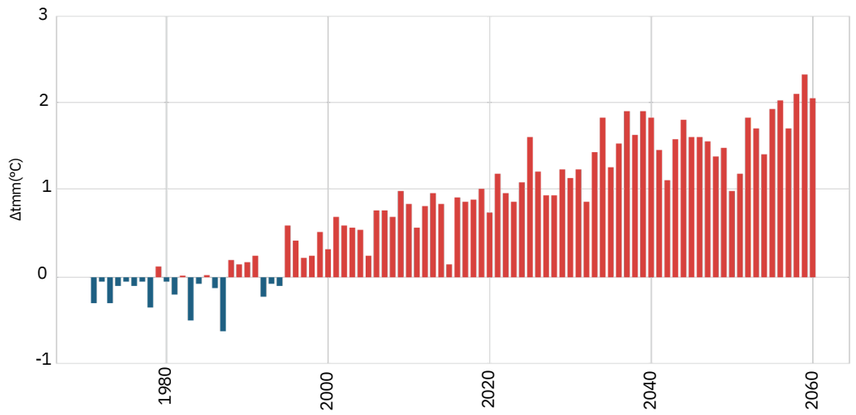
Η ανάλυση επικεντρώνεται στην περίοδο 1971-2060, με περίοδο αναφοράς το 1971-2000, και καλύπτει τις εξής μεταβολές βασικών μεταβλητών: α) τη μέγιστη ημερήσια θερμοκρασία, β) την ελάχιστη ημερήσια θερμοκρασία και γ) το ημερήσιο ύψος βροχής. Από αυτές τις μεταβλητές υπολογίστηκαν οι κλιματικοί δείκτες του Πίνακα 2.1, ώστε να προσεγγιστούν οι μεταβολές της θερμικής και υδρολογικής συμπεριφοράς της περιοχής έως το 2060 για τα δύο σενάρια RCP4.5 και RCP8.5. Η επιλογή της περιόδου αναφοράς 1971-2000 υπαγορεύεται από τη διαθεσιμότητα και τη δομή των κλιματικών προσομοιώσεων περιοχικής κλίμακας, οι οποίες ξεκινούν το 1971, εξασφαλίζοντας, έτσι, μια πλήρη και συνεπή τριακονταετή κλιματική βάση αναφοράς 1971-2000. Η επιλογή αυτή επιτρέπει την αποτύπωση του μέγιστου δυνατού εύρους μελλοντικών μεταβολών έως το 2060, χωρίς περιορισμούς από τη χρονική κάλυψη των δεδομένων. Η διαφοροποίηση από την περίοδο 1981-2022, που χρησιμοποιήθηκε στην Ενότητα 2.1 (Ιστορική περίοδος), αντανακλά τη διαφορετική φύση και τον διαφορετικό σκοπό των δύο συνόλων δεδομένων.

[2.2.1] ΑΘΗΝΑ

Οι κλιματικές προβολές, όπως παρουσιάζονται στα Σχήματα 2.26 και 2.27, συγκλίνουν σε μια σταθερή και προοδευτική άνοδο της μέσης ετήσιας θερμοκρασίας στην Αθήνα, η οποία γίνεται ιδιαίτερα εμφανής όσο προχωράμε προς τα μέσα και τα τέλη του αιώνα. Η θερμική μεταβολή είναι καθαρή και συστηματική, καθώς η Αθήνα μετακινείται από ένα κλιματικό υπόβαθρο με μικρές ή αρνητικές αποκλίσεις προς ένα καθεστώς σταθερά θετικών θερμοκρασιακών ανωμαλιών.

Στο μετριοπαθές σενάριο RCP4.5, η μέση μελλοντική απόκλιση φτάνει περίπου τους +0,83°C, με τις θερμές χρονιές να αυξάνονται προοδευτικά και τις ψυχρότερες να εκλείπουν μετά το 1995. Η πρώτη περίοδος της προσομοίωσης εμφανίζει αποκλίσεις από τη μέση τιμή της τριακονταετί- ας 1971-2000 κοντά στο –0,13°C, ενώ προς το τέλος οι μέσες αποκλίσεις αγγίζουν τους +1,70°C, υποδεικνύοντας μια καθαρή μεταβολή της τάξης των +1,8°C. Τονίζεται ότι η περίοδος 1971-2000 ήταν ήδη θερμότερη από την προβιομηχανική περίοδο (1850-1900), με τη μέση παγκόσμια επιφανειακή θερμοκρασία να υπολογίζεται ότι βρισκόταν περίπου κατά 0,6-0,7°C υψηλότερα, σύμφωνα με συνθετικές αξιολογήσεις των κύριων παγκόσμιων βάσεων δεδομένων και τις θέσεις της IPCC. Παρά το γεγονός ότι το RCP4.5 θεωρείται σενάριο σταθεροποίησης των εκπομπών, η θερμική άνοδος παραμένει σημαντική για μια πόλη ήδη επιβαρυμένη από την αστική θερμική νησίδα.

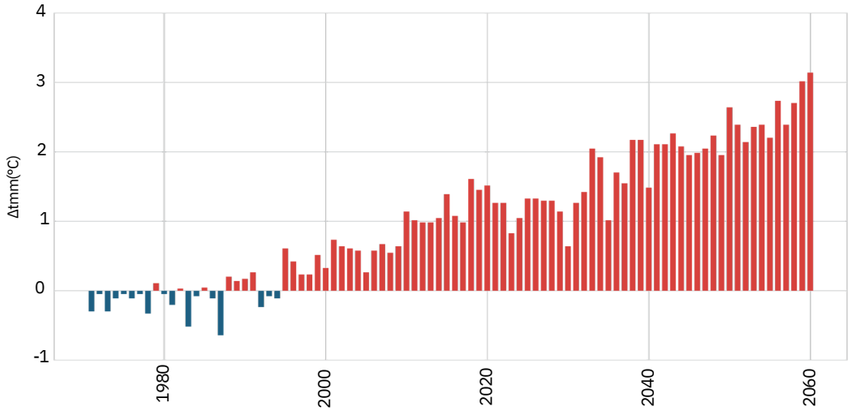
Μεταβολή μέσης ετήσιας θερμοκρασίας (RCP4.5)



Σχήμα 2.26: Χρονική εξέλιξη των μεταβολών της μέσης ετήσιας θερμοκρασίας (°C) σε σύγκριση με τη μέση τιμή της περιόδου 1971-2000, από δεδομένα κλιματικών προσομοιώσεων σύμφωνα με το σενάριο RCP4.5

Στο δυσμενές σενάριο RCP8.5, η εικόνα είναι ποιοτικά πιο έντονη. Η μέση απόκλιση διαμορφώνεται στους +1,04°C, αλλά τα άκρα της χρονοσειράς δείχνουν την πραγματική επιτάχυνση: από –0,13°C στο ξεκίνημα σε +2,42°C προς το τέλος, δηλαδή μια συνολική αύξηση περίπου +2,55°C. Επιπλέον, οι μέγιστες ετήσιες αποκλίσεις φτάνουν έως τους +3,15°C σε σχέση με την περίοδο 1971-2000 (και άρα ακόμα υψηλότερη απόκλιση σε σχέση με την προβιομηχανική περίοδο), τιμή που αποτελεί σαφή ένδειξη ενός θερμικά «φορτισμένου» μελλοντικού αστικού περιβάλλοντος.

Μεταβολή μέσης ετήσιας θερμοκρασίας (RCP8.5)



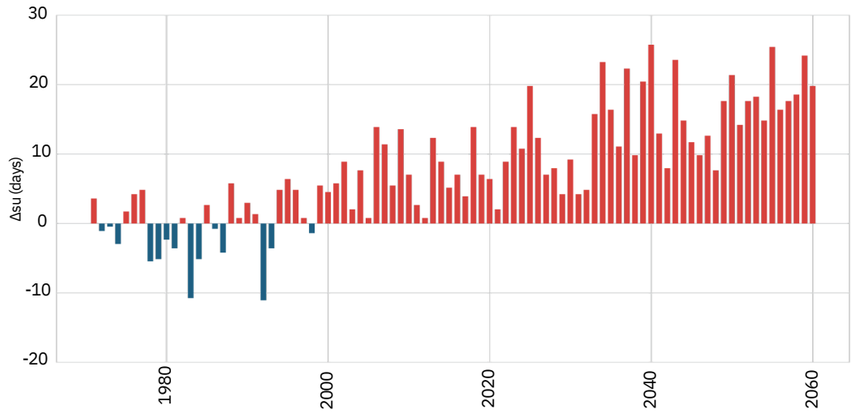
Σχήμα 2.27: Χρονική εξέλιξη των μεταβολών της μέσης ετήσιας θερμοκρασίας (°C) σε σύγκριση με τη μέση τιμή της περιόδου 1971-2000, από δεδομένα κλιματικών προσομοιώσεων σύμφωνα με το σενάριο RCP8.5

Και στα δύο σενάρια, τα ψυχρότερα έτη (–0,63°C) παραμένουν στην αρχή της προσομοίωσης και δεν επαναλαμβάνονται στα τέλη της περιόδου, κάτι που επιβεβαιώνει ότι το κλιματικό υπόβαθρο της πόλης μετατοπίζεται οριστικά προς θερμότερες συνθήκες. Η διαφορά μεταξύ RCP4.5 και RCP8.5 δεν αφορά μόνο το μέγεθος της ανόδου, αλλά και τον ρυθμό με τον οποίο αυτή συμβαί- νει: στο RCP4.5 η αύξηση είναι σταθερή και σχετικά ομαλή, ενώ στο RCP8.5 είναι ταχύτερη, πιο έντονη και χωρίς τάσεις σταθεροποίησης.

Για μια πόλη με υψηλή πυκνότητα δόμησης, μεγάλα αποθέματα θερμοχωρητικότητας και περιορισμένη νυχτερινή αποφόρτιση, ακόμα και οι πιο ήπιες αυξήσεις της μέσης θερμοκρασίας μεταφράζονται σε περισσότερες θερμές ημέρες, πυκνότερες τροπικές νύχτες, παρατεταμένα θερμά επεισόδια και αυξημένη ενεργειακή ζήτηση. Συνολικά, η προβλεπόμενη μελλοντική άνοδος της μέσης θερμοκρασίας, +1,8°C στο RCP4.5 και +2,5°C στο RCP8.5, σε σχέση με την περίοδο 1971-2000 σηματοδοτεί έναν δομικό μετασχηματισμό του αθηναϊκού μικροκλίματος, ο οποίος αποτελεί τη βάση για όλες τις υπόλοιπες θερμικές μεταβολές που εξετάζονται στους επόμενους δείκτες.

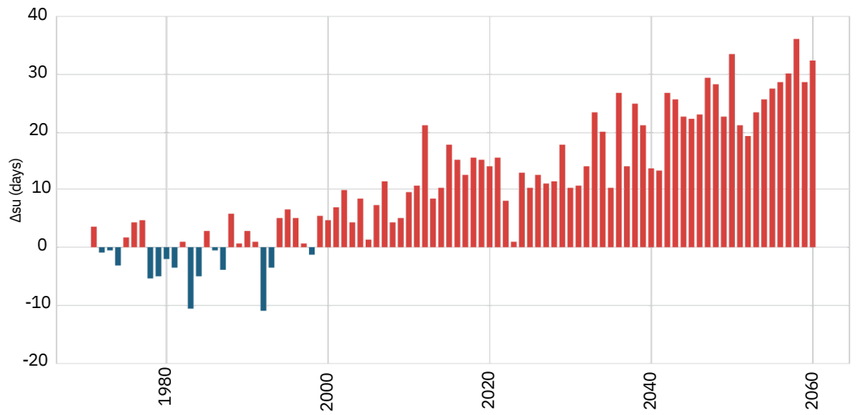
Στα Σχήματα 2.28, 2.30 και 2.32 παρουσιάζονται οι μεταβολές των θερινών ημερών (SU), τροπικών νυχτών (TR) και βαθμοημερών ψύξης (cddcold18) για το μετριοπαθές σενάριο RCP4.5, ενώ στα Σχήματα 2.29, 2.31 και 2.33 παρουσιάζονται οι αντίστοιχες μεταβολές για το δυσμενές σενάριο RCP8.5.

Μεταβολή αριθμού θερινών ημερών (RCP4.5)



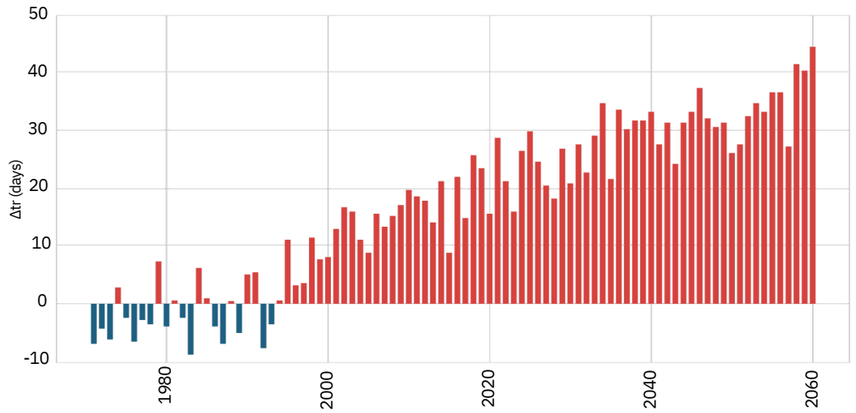
Σχήμα 2.28: Χρονική εξέλιξη των μεταβολών των θερινών ημερών σε σύγκριση με τη μέση τιμή της περιόδου 1971-2000, από δεδομένα κλιματικών προσομοιώσεων σύμφωνα με το σενάριο RCP4.5

Μεταβολή αριθμού θερινών ημερών (RCP8.5)



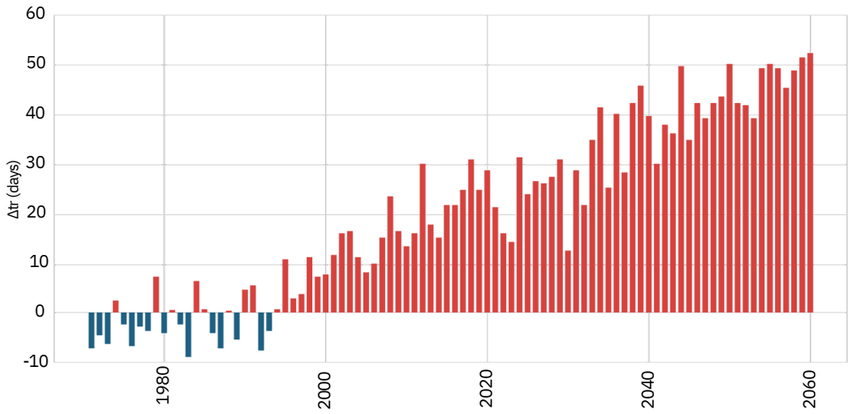
Σχήμα 2.29: Χρονική εξέλιξη των μεταβολών των θερινών ημερών σε σύγκριση με τη μέση τιμή της περιόδου 1971-2000, από δεδομένα κλιματικών προσομοιώσεων σύμφωνα με το σενάριο RCP8.5

Μεταβολή αριθμού τροπικών νυχτών (RCP4.5)



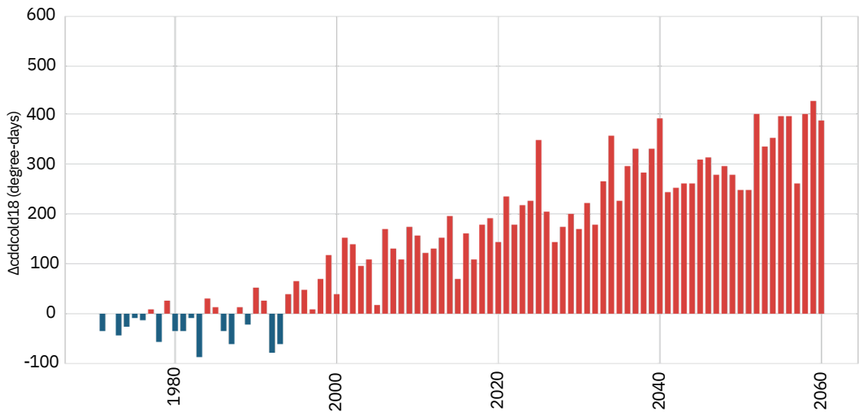
Σχήμα 2.30: Χρονική εξέλιξη των μεταβολών των τροπικών νυχτών σε σύγκριση με τη μέση τιμή της περιόδου 1971-2000, από δεδομένα κλιματικών προσομοιώσεων σύμφωνα με το σενάριο RCP4.5

Μεταβολή αριθμού τροπικών νυχτών (RCP8.5)



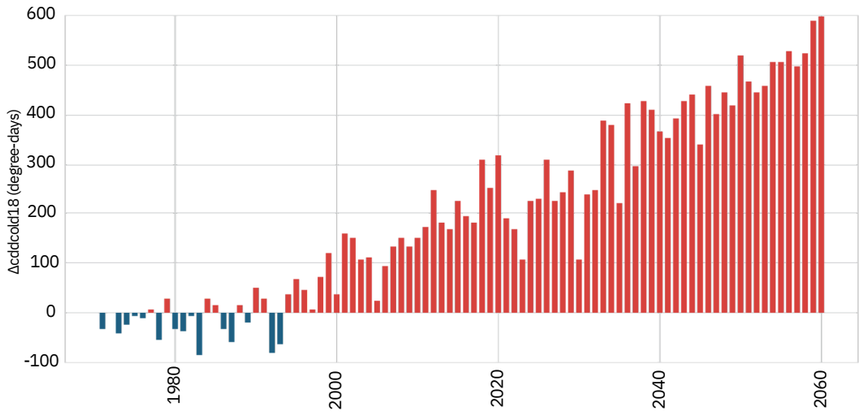
Σχήμα 2.31: Χρονική εξέλιξη των μεταβολών των τροπικών νυχτών σε σύγκριση με τη μέση τιμή της περιόδου 1971-2000, από δεδομένα κλιματικών προσομοιώσεων σύμφωνα με το σενάριο RCP8.5

Μεταβολή βαθμοημερών ψύξης (RCP4.5)



Σχήμα 2.32: Χρονική εξέλιξη των μεταβολών των βαθμοημερών ψύξης σε σύγκριση με τη μέση τιμή της περιόδου 1971-2000, από δεδομένα κλιματικών προσομοιώσεων σύμφωνα με το σενάριο RCP4.5

Μεταβολή βαθμοημερών ψύξης (RCP8.5)



Σχήμα 2.33: Χρονική εξέλιξη των μεταβολών των βαθμοημερών ψύξης σε σύγκριση με τη μέση τιμή της περιόδου 1971-2000, από δεδομένα κλιματικών προσομοιώσεων σύμφωνα με το σενάριο RCP8.5

Οι μελλοντικές προβολές συγκλίνουν στο συμπέρασμα πως η Αθήνα μεταβαίνει σε ένα περιβάλλον όπου η θερμότητα διαρκεί περισσότερο (αυξάνονται οι θερμές ημέρες), αποφορτίζεται δυσκολότερα (αυξάνονται οι τροπικές νύχτες) και συσσωρεύεται εντονότερα (αυξάνονται οι βαθ- μοημέρες ψύξης). Τα τρία σενάρια λειτουργούν συμπληρωματικά και αποτυπώνουν έναν θερμικό μετασχηματισμό με σημαντικές επιπτώσεις για τον αστικό ιστό. Οι θερινές ημέρες (SU) αυξάνο- νται σημαντικά σε όλες τις προσομοιώσεις. Στο RCP4.5, οι αποκλίσεις μεταβαίνουν από περίπου –1 ημέρα στην αρχή της περιόδου σε +17 ημέρες στο τέλος, μια συνολική αύξηση περίπου +18 επιπλέον θερμών ημερών τον χρόνο. Η εικόνα είναι εντονότερη στο RCP8.5, όπου οι τιμές φτά- νουν τις +27 ημέρες, δηλαδή σχεδόν έναν μήνα περισσότερες ημέρες με θερμοκρασίες άνω των 25°C. Η θερμή περίοδος στην Αθήνα δεν μεγαλώνει απλώς, αλλά επεκτείνεται σταθερά, με το κλίμα να αποκτά χαρακτηριστικά παρατεταμένου θέρους.

Ακόμα πιο χαρακτηριστική είναι η αύξηση των τροπικών νυχτών (TR), ενός δείκτη που καταγράφει τη θερμική συμπεριφορά της πόλης μετά τη δύση του ήλιου. Στο RCP4.5, οι αποκλίσεις από –2 νύχτες μεταβαίνουν σε περίπου +34 νύχτες, δηλαδή σχεδόν +36 επιπλέον νύχτες τον χρόνο όπου η θερμοκρασία δεν θα πέφτει κάτω από τους 20°C. Στο RCP8.5, η αύξηση φτάνει τις +46 νύχτες, δηλαδή ενάμιση μήνα θερμών νυχτών μέσα στον χρόνο. Αυτό συνιστά ουσιαστικά μετα- βολή της νυχτερινής «λειτουργίας» της Αθήνας: η πόλη δεν προλαβαίνει να κρυώσει, διατηρώ- ντας ένα θερμικό φορτίο που μεταφέρεται από ημέρα σε ημέρα. Η μεταβολή αυτή έχει ιδιαίτερη σημασία για την ανθρώπινη υγεία.[28] Οι νύχτες με υψηλές θερμοκρασίες μειώνουν τη φυσιολο- γική ικανότητα του σώματος να αποβάλλει θερμότητα, αυξάνουν το καρδιαγγειακό φορτίο και περιορίζουν την αποκατάσταση του οργανισμού. Σε ευαίσθητες ομάδες –ηλικιωμένοι, άτομα με καρδιοαναπνευστικά προβλήματα, εργαζόμενοι σε θερμικά φορτισμένα περιβάλλοντα–, οι τροπικές νύχτες αποτελούν αναγνωρισμένο παράγοντα αυξημένης θνησιμότητας κατά τη διάρκεια θερμικών κυμάτων. Σε μια πυκνοδομημένη πόλη όπως η Αθήνα, όπου η αστική θερμική νησίδα παρατείνει τη διάρκεια της νυχτερινής ζέστης, η αύξηση των τροπικών νυχτών μεταφράζεται σε συνεχή θερμική καταπόνηση χωρίς «διάλειμμα» ανάμεσα στις ημέρες.

[28] Paravantis, J., Santamouris, M., Cartalis, C., Efthymiou, C., Kontoulis, N. Mortality Associated with High Ambient Temperatures, Heatwaves, and the Urban Heat Island in Athens, Greece. *Sustainability* 2017, 9, 606, doi:10.3390/su9040606.

Ο δείκτης CDDCOLD18, ο οποίος αποτυπώνει το ενεργειακό κόστος ψύξης, συμπυκνώνει όλες τις παραπάνω μεταβολές. Στο RCP4.5 μεταβαίνει από –16 μονάδες σε 338 μονάδες, δηλαδή μια συνολική αύξηση περίπου +354 μονάδων. Στο RCP8.5 η αύξηση είναι ακόμα πιο ισχυρή, φτάνο- ντας τις +507 μονάδες. Οι τιμές αυτές υποδεικνύουν ότι η ζήτηση ψύξης –και κατ' επέκταση η θερμική επιβάρυνση του κτιριακού και ανθρωπογενούς περιβάλλοντος– πολλαπλασιάζεται, όχι μόνο λόγω υψηλότερων θερμοκρασιών, αλλά επειδή η ζέστη αποκτά μεγαλύτερη διάρκεια και συνέχεια.

Συνολικά, οι τρεις δείκτες περιγράφουν μια πόλη όπου η θερμότητα:

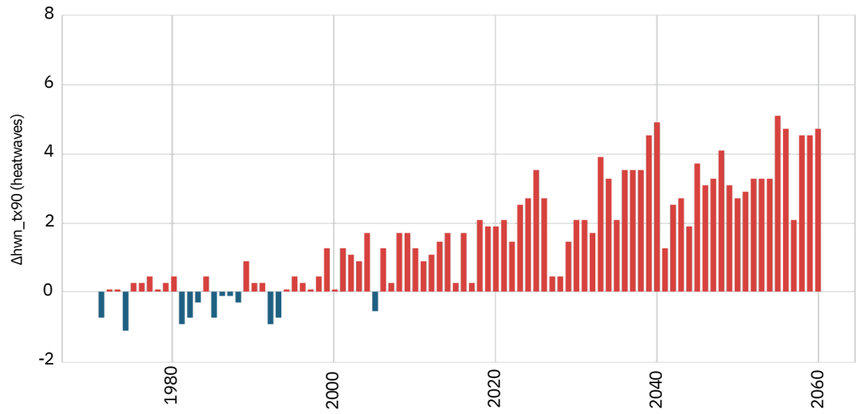
- διαρκεί περισσότερο (δηλαδή έχουμε περισσότερες ημέρες με θερμοκρασία άνω των 25°C)),
- η νύχτα δεν προσφέρει ανακούφιση (δηλαδή έχουμε περισσότερες ημέρες με ελάχιστη νυχτερινή θερμοκρασία άνω των 20°C) και
- το θερμικό φορτίο συσσωρεύεται από το πρωί ως το επόμενο πρωί (δηλαδή έχουμε μεγαλύτερες ανάγκες για ψύξη των κτιρίων).

Ακόμα και στο μετριοπαθές σενάριο RCP4.5, οι μεταβολές είναι σημαντικές. Στο δυσμενές RCP8.5, η Αθήνα διαμορφώνει ένα κλιματικό προφίλ που διαφέρει ποιοτικά από αυτό του 20ού αιώνα, με θερμική δυναμική η οποία επηρεάζει άμεσα την άνεση, την υγεία, την κατανάλωση ενέργειας και την ανθεκτικότητα των υποδομών.[29]

[29] Global Center on Adaptation, Climate-Resilient Infrastructure Handbook. Ρότερνταμ, Ολλανδία, 2021. Διαθέσιμο στο https://gca.org/reports/climate-resilient-infrastructure-officer-handbook/ (ανακτήθηκε στις 3 Φεβρουαρίου 2026).

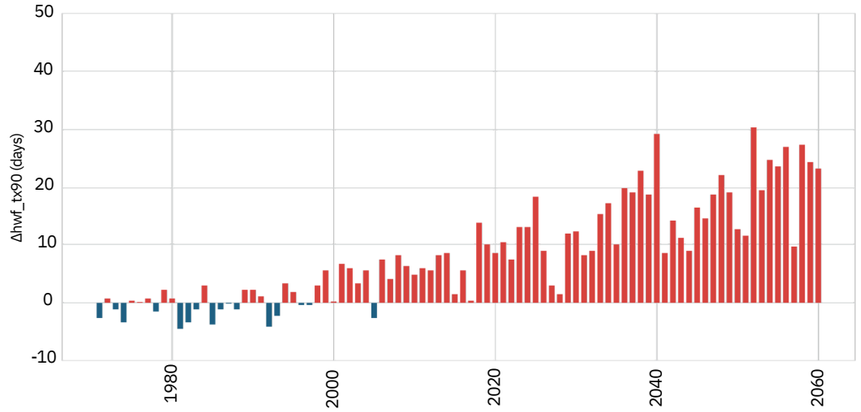
Στα Σχήματα 2.34 και 2.35 απεικονίζεται η εξέλιξη του αριθμού επεισοδίων και των ημερών καύσωνα σύμφωνα με το σενάριο RCP4.5, ενώ στα Σχήματα 2.36 και 2.37 παρουσιάζονται οι αντίστοιχοι δείκτες βάσει του σεναρίου RCP8.5. Οι προβολές για την εξέλιξη των καυσώνων στην Αθήνα δείχνουν μια από τις πιο συνεπείς και έντονες τάσεις ολόκληρης της κλιματικής ανάλυσης. Στα επόμενα χρόνια, η πόλη αναμένεται να βιώσει περισσότερα επεισόδια καύσωνα και μεγαλύτερη συνολική διάρκεια θερμικών εξάρσεων, με τη διαφορά ανάμεσα στα δύο σενάρια RCP4.5 και RCP8.5 να αφορά κυρίως την ένταση και όχι την κατεύθυνση της μεταβολής.

Μεταβολή αριθμού επεισοδίων καύσωνα (RCP4.5)



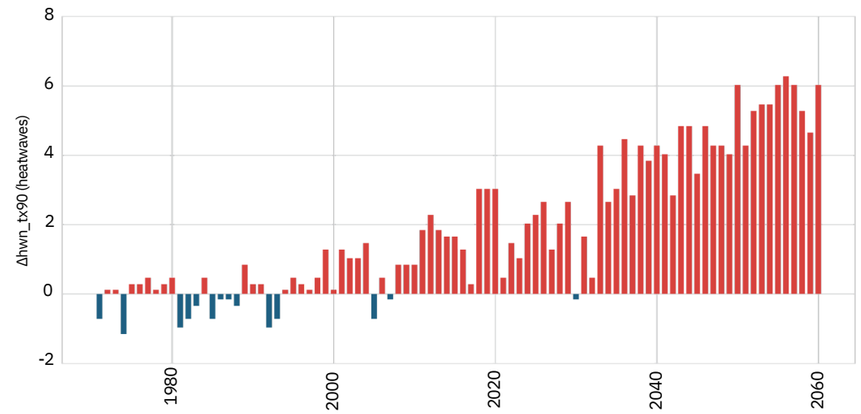
Σχήμα 2.34: Χρονική εξέλιξη των μεταβολών του αριθμού επεισοδίων καύσωνα σε σύγκριση με τη μέση τιμή της περιόδου 1971-2000, από δεδομένα κλιματικών προσομοιώσεων σύμφωνα με το σενάριο RCP4.5

Μεταβολή αριθμού ημερών με καύσωνα (RCP4.5)



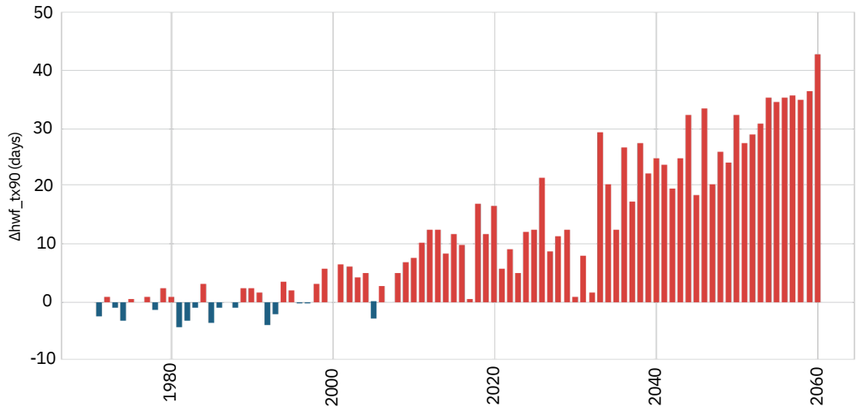
Σχήμα 2.35: Χρονική εξέλιξη των μεταβολών του αριθμού ημερών με καύσωνα σε σύγκριση με τη μέση τιμή της περιόδου 1971-2000, από δεδομένα κλιματικών προσομοιώσεων σύμφωνα με το σενάριο RCP4.5

Μεταβολή αριθμού επεισοδίων καύσωνα (RCP8.5)



Σχήμα 2.36: Χρονική εξέλιξη των μεταβολών του αριθμού επεισοδίων καύσωνα σε σύγκριση με τη μέση τιμή της περιόδου 1971-2000, από δεδομένα κλιματικών προσομοιώσεων σύμφωνα με το σενάριο RCP8.5

Μεταβολή αριθμού ημερών με καύσωνα (RCP8.5)



Σχήμα 2.37: Χρονική εξέλιξη των μεταβολών του αριθμού ημερών με καύσωνα σε σύγκριση με τη μέση τιμή της περιόδου 1971-2000, από δεδομένα κλιματικών προσομοιώσεων σύμφωνα με το σενάριο RCP8.5

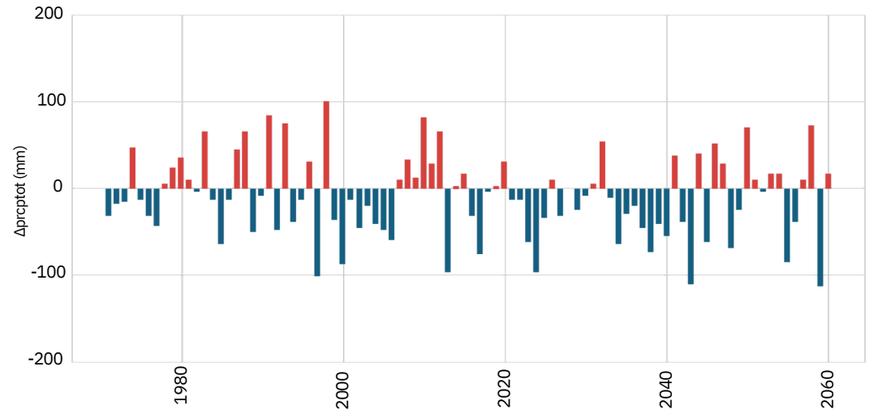
Ο αριθμός των επεισοδίων καύσωνα (HWN) εμφανίζει σταθερή ανοδική πορεία. Στο RCP4.5, οι τιμές μεταβαίνουν από μια αρχική περίοδο με σχεδόν μηδενική ή αρνητική απόκλιση (–0,13 επεισόδια) σε μια τελική περίοδο με μέση τιμή 3,63 επεισοδίων, οδηγώντας σε μια συνολική μεταβολή περίπου +3,7 επεισοδίων καύσωνα ετησίως. Στο RCP8.5 η κλιμάκωση είναι ισχυρότερη: οι τιμές φτάνουν τα 5,24 επεισόδια στο τέλος της περιόδου, με μέγιστες τιμές που αγγίζουν τα 6,28 επεισόδια, σχεδόν διπλάσιες από τις αντίστοιχες του RCP4.5. Η Αθήνα μεταβαίνει σταδιακά από μια πόλη όπου οι καύσωνες ήταν σχετικά σπάνιοι σε μια πόλη όπου πολλαπλά επεισόδια θεωρούνται πλέον τμήμα της θερινής κανονικότητας. Ενδεικτικά, τα τελευταία 20 χρόνια η Αθήνα καταγράφει κατά μέσο όρο τρία επεισόδια καύσωνα ανά έτος ενώ οι προβλέψεις για την περίοδο 2040-2060 ανεβάζουν τον μέσο όρο στα πέντε επεισόδια ανά έτος σύμφωνα με το μετριοπαθές σενάριο RCP4.5.

Ακόμα πιο εντυπωσιακή είναι η μεταβολή στη διάρκεια των καυσώνων (HWF). Στο RCP4.5, οι τιμές αυξάνονται από περίπου –0,8 ημέρες στην αρχή της προσομοίωσης σε 20,76 ημέρες στο τέλος, μια μεταβολή σχεδόν +22 ημερών καύσωνα ανά έτος. Στο RCP8.5, η αύξηση αυτή φτάνει σε δραματικά μεγέθη: οι τελικές τιμές προσεγγίζουν τις 31,94 ημέρες, ενώ οι μέγιστες φτάνουν τις 42,85 ημέρες, πάνω από έναν ολόκληρο μήνα καύσωνα τον χρόνο. Η Αθήνα οδηγείται, έτσι, σε μια περίοδο όπου η διάρκεια των θερμικών εξάρσεων πολλαπλασιάζεται και αποκτά χαρακτηριστικά συνεχούς θερμικού στρες.

Η αύξηση αυτή δεν είναι απλώς αποτέλεσμα των υψηλότερων μέσων θερμοκρασιών· συνδέεται άμεσα με τις αλλαγές στους δείκτες θερμικής διάρκειας (SU), νυχτερινής ψύξης (TR) και ωρευτικού θερμικού φορτίου (CDDCOLD18). Καθώς η θερμή περίοδος επιμηκύνεται, η νύχτα δεν προσφέρει ανακούφιση, και το θερμικό υπόβαθρο βαραίνει, τα επεισόδια καύσωνα αποκτούν μεγαλύτερη συνέχεια. Ενα θερμικό κύμα που παλαιότερα θα έσπαγε σε λίγες ημέρες, ενδέχεται πλέον να παρατείνεται χωρίς διαλείμματα, ενώ νέα επεισόδια προστίθενται μέσα στην ίδια θερινή περίοδο. Στην πράξη, αυτό σημαίνει ότι η Αθήνα εξελίσσεται σε ένα περιβάλλον όπου οι καύσωνες δεν είναι πλέον εξάρσεις, αλλά κυρίαρχο μέρος του θερινού μικροκλίματος. Ο αριθμός των επεισοδίων αυξάνεται, η διάρκειά τους πολλαπλασιάζεται, και η συχνότητα των παρατεταμένων θερμικών γεγονότων γίνεται δομικό χαρακτηριστικό του θερινού κλίματος.

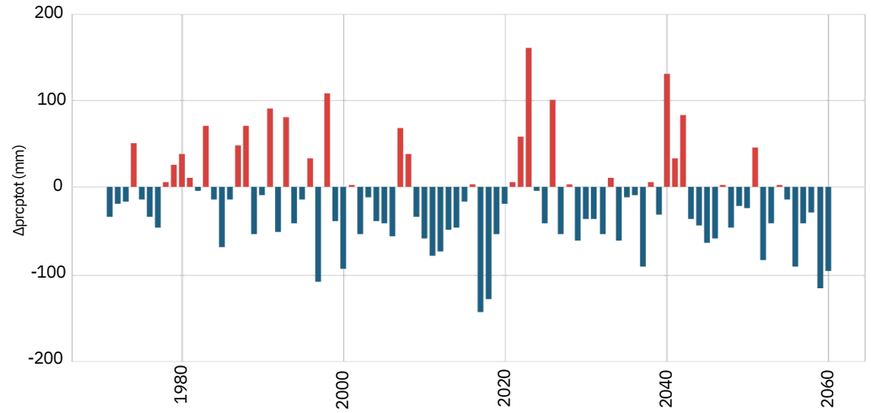
Οι προβολές για τη μελλοντική βροχόπτωση στο πολεοδομικό συγκρότημα της Αθήνας δείχνουν ότι το συνολικό ετήσιο ύψος βροχής (PRCPTOT) δεν παρουσιάζει μεγάλη συστηματική αύξηση ή μείωση, αλλά χαρακτηρίζεται από έντονη μεταβλητότητα και στα δύο σενάρια (Σχήματα 2.38, 2.39). Στο μετριοπαθές RCP4.5, η μέση απόκλιση κυμαίνεται περίπου στα –9,5 mm, με τιμές που κυμαίνονται από –120,7 mm ως +109,5 mm. Η πρώτη δεκαπενταετία της προσομοίωσης εμφανίζει σχεδόν μηδενική απόκλιση (–1,77 mm), ενώ η τελευταία δεκαπενταετία παραμένει κοντά σε αυτές τις τιμές (–1,29 mm), στοιχείο που δείχνει ότι η συνολική ποσότητα βροχής δεν εμφανίζει καθαρή τάση μεταβολής. Αντίστοιχα, στο δυσμενές RCP8.5 η μέση απόκλιση είναι –15,3 mm, με μεγαλύτερο εύρος ακραίων τιμών (από –141,8 mm ως +162,2 mm). Η τελευταία δεκαπενταετία της προσομοίωσης εμφανίζει χαμηλότερες τιμές (–39,8 mm), χωρίς όμως να συνιστά μια συνεχή καθοδική τάση.

Μεταβολή ετήσιας βροχόπτωσης (RCP4.5)



Σχήμα 2.38: Χρονική εξέλιξη των μεταβολών της ετήσιας βροχόπτωσης σε σύγκριση με τη μέση τιμή της περιόδου 1971-2000, από δεδομένα κλιματικών προσομοιώσεων σύμφωνα με το σενάριο RCP4.5

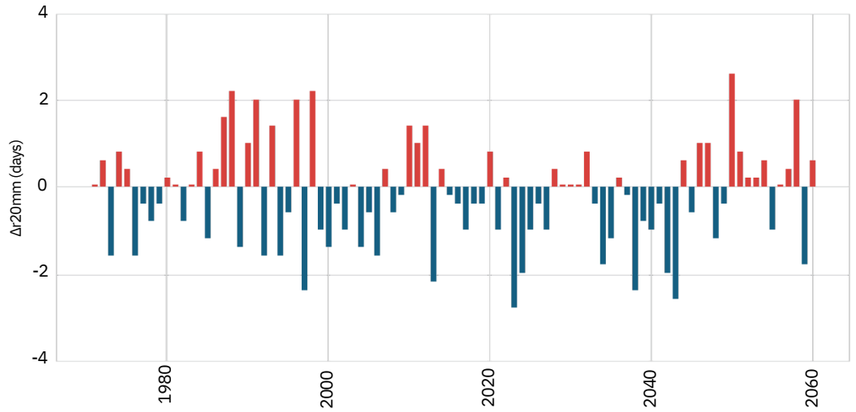
Μεταβολή ετήσιας βροχόπτωσης (RCP8.5)



Σχήμα 2.39: Χρονική εξέλιξη των μεταβολών της ετήσιας βροχόπτωσης σε σύγκριση με τη μέση τιμή της περιόδου 1971-2000, από δεδομένα κλιματικών προσομοιώσεων σύμφωνα με το σενάριο RCP8.5

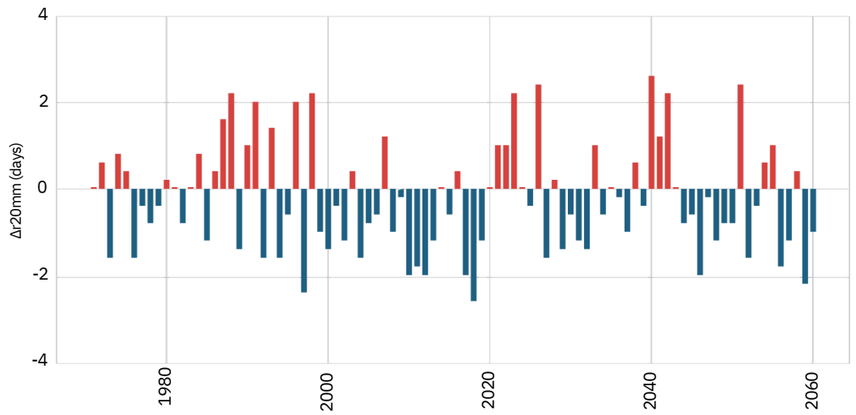
Η συνολική βροχόπτωση δεν αλλάζει δραστικά, αλλάζει όμως η ποιοτική της διάσταση, δηλαδή η συχνότητα των ημερών με έντονη βροχή (ο αριθμός ημερών με ύψος βροχής μεγαλύτερο των 20 mm ή δείκτης R20mm). Στο RCP4.5 (Σχήμα 2.40), ο δείκτης εμφανίζει μέση τιμή –0,19 ημέρες, αλλά η εικόνα μεταβάλλεται όταν εξεταστούν οι μικρότερες περίοδοι: η πρώτη δεκαπενταετία έχει –0,23 ημέρες, ενώ η τελευταία μεταβαίνει σε +0,37 ημέρες, υποδεικνύοντας μια μικρή, αλλά συστηματική αύξηση των έντονων επεισοδίων. Το εύρος κυμαίνεται από –2,76 ως +2,64 ημέρες, ένα τυπικό μοτίβο για μεσογειακό κλίμα όπου η βροχή «συμπυκνώνεται» σε λιγότερες, αλλά πιο φορτισμένες ημέρες. Στο RCP8.5 (Σχήμα 2.41), η μέση απόκλιση παραμένει ελαφρώς αρνητική (–0,22 ημέρες), αλλά η τελευταία δεκαπενταετία της προσομοίωσης επιστρέφει σε αρνητικές τι- μές (–0,55 ημέρες), χωρίς όμως να ακυρώνεται το γεγονός ότι το εύρος των εντάσεων παραμένει υψηλό (από –2,56 ως +2,64 ημέρες).

Μεταβολή αριθμού ημερών υψηλής βροχόπτωσης (RCP4.5)



Σχήμα 2.40: Χρονική εξέλιξη των μεταβολών του αριθμού των ημερών υψηλής βροχόπτωσης σε σύγκριση με τη μέση τιμή της περιόδου 1971-2000, από δεδομένα κλιματικών προσομοιώσεων σύμφωνα με το σενάριο RCP4.5

Μεταβολή αριθμού ημερών υψηλής βροχόπτωσης (RCP8.5)



Σχήμα 2.41: Χρονική εξέλιξη των μεταβολών του αριθμού των ημερών υψηλής βροχόπτωσης σε σύγκριση με τη μέση τιμή της περιόδου 1971-2000, από δεδομένα κλιματικών προσομοιώσεων σύμφωνα με το σενάριο RCP8.5

Συνολικά, η εικόνα για τη μελλοντική βροχόπτωση δεν αφορά τις ποσότητες, αλλά τη χρονική ανακατανομή τους. Η Αθήνα δεν γίνεται ούτε εντυπωσιακά πιο ξηρή ούτε εμφανώς πιο υγρή, γίνεται όμως πιο ασταθής. Το κλίμα τείνει προς ένα μοτίβο όπου οι ετήσιες τιμές μπορεί να παραμένουν κοντά στον ιστορικό μέσο όρο, αλλά τα επεισόδια βροχής γίνονται πιο «αιχμιαία». Αυτό σημαίνει λιγότερες περιόδους με σταθερή, μέτρια βροχόπτωση και περισσότερο βάρος σε έντονες, συγκεντρωμένες καταιγίδες – ένα μοτίβο που παρατηρείται ήδη στις ελληνικές και άλλες μεσογειακές πόλεις.

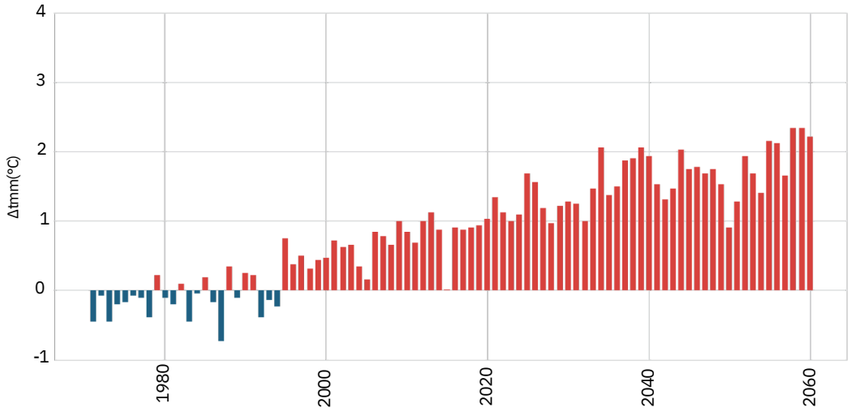
Για μια πόλη με υψηλή αδιαπερατότητα εδάφους, κορεσμένα δίκτυα ομβρίων και μικρές λεκάνες απορροής, η ενίσχυση αυτής της μεταβλητότητας αποτελεί κρίσιμο εύρημα.[30] Ακόμα και μικρές αυξήσεις στο πλήθος ή στην ένταση των επεισοδίων με υψηλή βροχόπτωση (>20 mm) αρκούν για να δημιουργήσουν συνθήκες αστικών πλημμυρών, ιδίως σε περιοχές με χαμηλό υψόμετρο ή ελλιπή αποστράγγιση. Ετσι, η κλιματική αλλαγή στην Αθήνα δεν εκδηλώνεται μέσα από μεγάλες μετατοπίσεις στο συνολικό ύψος βροχής, αλλά μέσα από μια όλο και πιο ακανόνιστη υδρολογική κατανομή, με μεγαλύτερη ενεργειακή και λειτουργική πίεση στα συστήματα υποδομής.

[30] Diakakis, M. (2014). An inventory of flood events in Athens, Greece, during the last 130 years. Seasonality and spatial distribution. *Journal of Flood Risk Management*, 7 (4), 332-343.

[2.2.2] ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ

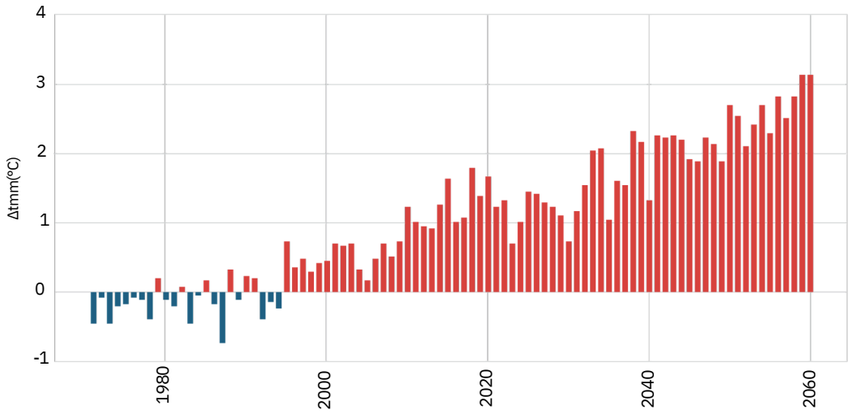
Οι κλιματικές προβολές για τη Θεσσαλονίκη, όπως παρουσιάζονται στα Σχήματα 2.42 και 2.43, καταγράφουν μια καθαρή και προοδευτική άνοδο της ετήσιας μέσης θερμοκρασίας κατά τις επόμενες δεκαετίες στη Θεσσαλονίκη, με συνέπεια την παγίωση ενός θερμότερου κλιματικού υποβάθρου. Η τάση αυτή εμφανίζεται και στα δύο σενάρια RCP –με διαφορετική ένταση, αλλά κοινή κατεύθυνση– και αποτελεί τη βάση πάνω στην οποία αναμένεται να ενισχυθούν οι θερινές ημέρες, οι τροπικές νύχτες και τα θερμικά επεισόδια.

Μεταβολή μέσης ετήσιας θερμοκρασίας (RCP4.5)



Σχήμα 2.42: Χρονική εξέλιξη των μεταβολών της μέσης ετήσιας θερμοκρασίας (°C) σε σύγκριση με τη μέση τιμή της περιόδου 1971-2000, από δεδομένα κλιματικών προσομοιώσεων σύμφωνα με το σενάριο RCP4.5

Μεταβολή μέσης ετήσιας θερμοκρασίας (RCP8.5)



Σχήμα 2.43: Χρονική εξέλιξη των μεταβολών της μέσης ετήσιας θερμοκρασίας (°C) σε σύγκριση με τη μέση τιμή της περιόδου 1971-2000, από δεδομένα κλιματικών προσομοιώσεων σύμφωνα με το σενάριο RCP8.5

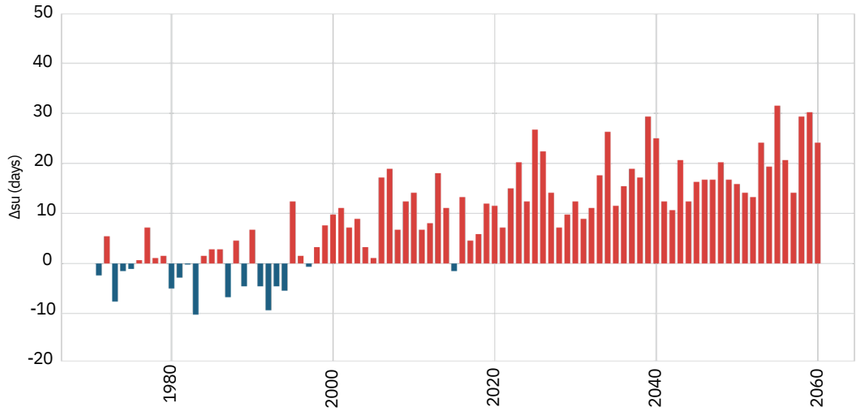
Στο μετριοπαθές σενάριο RCP4.5, η χρονοσειρά ξεκινάει από μια μέση απόκλιση –0,14°C την πρώτη δεκαπενταετία και καταλήγει σε +1,79°C την τελευταία, μια συνολική θερμική μεταβολή περίπου +1,9°C. Η μέση τιμή της περιόδου ανέρχεται στους +0,87°C, με ακραίες αποκλίσεις από –0,73°C ως +2,35°C. Αυτή η πορεία δείχνει ότι η Θεσσαλονίκη θα συνεχίσει να θερμαίνεται, αλλά με ρυθμό που βαθμιαία σταθεροποιείται.

Στο δυσμενές σενάριο RCP8.5, η εικόνα είναι πιο δυναμική. Η πρώτη δεκαπενταετία έχει την ίδια αρχική τιμή (–0,14°C), όμως η τελευταία δεκαπενταετία φτάνει στους +2,51°C, με μέση τιμή περιόδου +1,07°C και ανώτατη απόκλιση που αγγίζει τους +3,16°C. Η συνολική μεταβολή αγγίζει τα +2,65°C, δείχνοντας ότι, αν επικρατήσει το δυσμενές κλιματικό σενάριο η Θεσσαλονίκη θα εισέλθει σε ακόμα θερμότερο καθεστώς, χωρίς εμφανή σημεία σταθεροποίησης έως το τέλος της περιόδου προσομοίωσης.

Συνολικά, η μελλοντική εξέλιξη του δείκτη ΤΜΜ υποδεικνύει ότι η Θεσσαλονίκη δεν θα αντιμετωπίσει απλώς θερμότερες συνθήκες, αλλά ένα νέο κλίμα, που διαφοροποιείται ουσιαστικά από αυτό του 20ού αιώνα. Η σταθερή αύξηση της μέσης θερμοκρασίας λειτουργεί ως «θερμική βάση» πάνω στην οποία ενισχύονται όλα τα υπόλοιπα θερμικά φαινόμενα, θέτοντας τις προκλή- σεις αλλά και τις ανάγκες προσαρμογής της πόλης για τις επόμενες δεκαετίες.

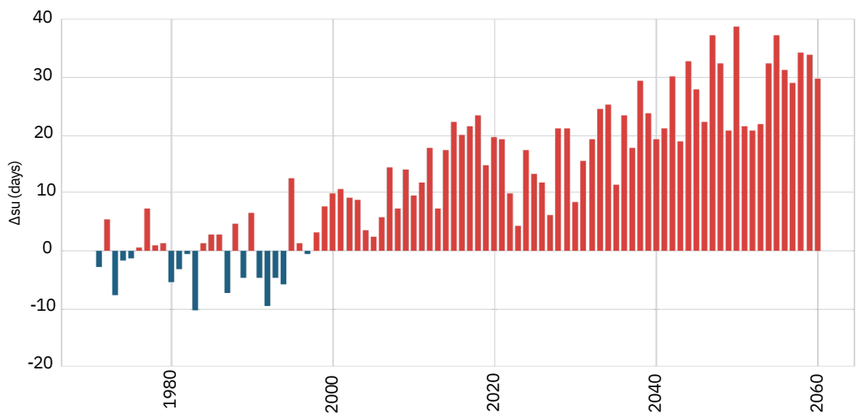
Στα Σχήματα 2.44, 2.46 και 2.48 παρουσιάζονται οι μεταβολές των θερινών ημερών (SU), τροπικών νυχτών (TR) και βαθμοημερών ψύξης (cddcold18) για το μετριοπαθές σενάριο RCP4.5, ενώ στα Σχήματα 2.45, 2.47 και 2.49 παρουσιάζονται οι αντίστοιχες μεταβολές για το δυσμενές σενάριο RCP8.5.

Μεταβολή αριθμού θερινών ημερών (RCP4.5)



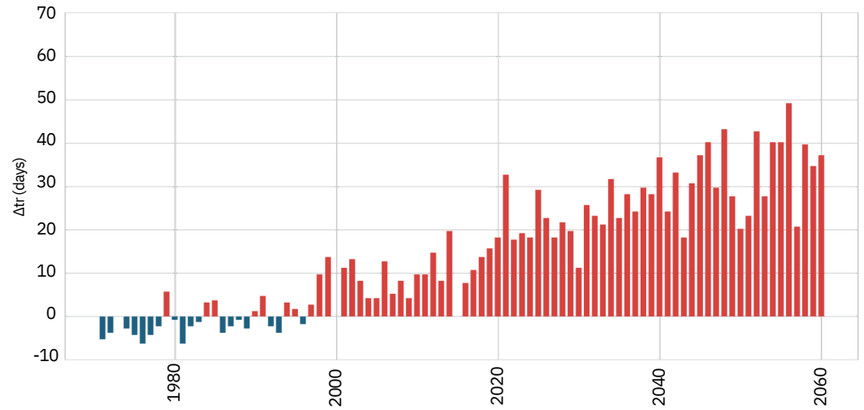
Σχήμα 2.44: Χρονική εξέλιξη των μεταβολών των θερινών ημερών σε σύγκριση με τη μέση τιμή της περιόδου 1971-2000, από δεδομένα κλιματικών προσομοιώσεων σύμφωνα με το σενάριο RCP4.5

Μεταβολή αριθμού θερινών ημερών (RCP8.5)



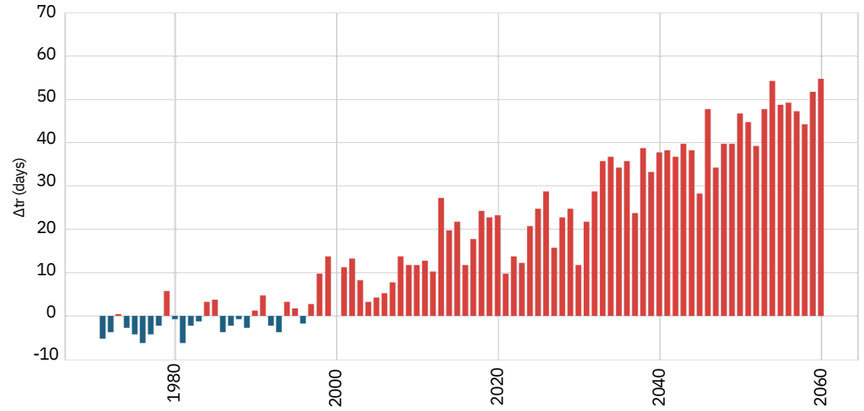
Σχήμα 2.45: Χρονική εξέλιξη των μεταβολών των θερινών ημερών σε σύγκριση με τη μέση τιμή της περιόδου 1971-2000, από δεδομένα κλιματικών προσομοιώσεων σύμφωνα με το σενάριο RCP8.5

Μεταβολή αριθμού τροπικών νυχτών (RCP4.5)



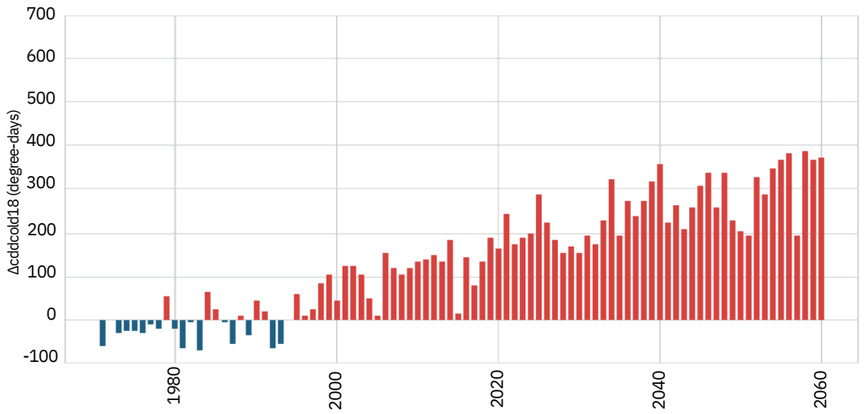
Σχήμα 2.46: Χρονική εξέλιξη των μεταβολών των τροπικών νυχτών σε σύγκριση με τη μέση τιμή της περιόδου 1971-2000, από δεδομένα κλιματικών προσομοιώσεων σύμφωνα με το σενάριο RCP4.5

Μεταβολή αριθμού τροπικών νυχτών (RCP8.5)



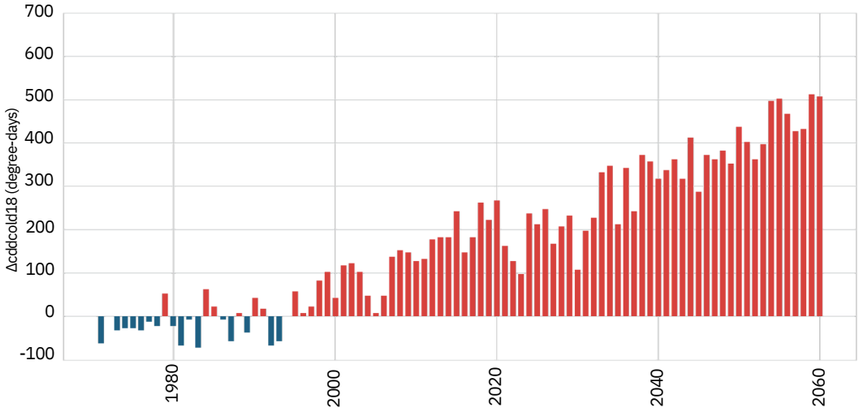
Σχήμα 2.47: Χρονική εξέλιξη των μεταβολών των τροπικών νυχτών σε σύγκριση με τη μέση τιμή της περιόδου 1971-2000, από δεδομένα κλιματικών προσομοιώσεων σύμφωνα με το σενάριο RCP8.5

Μεταβολή βαθμοημερών ψύξης (RCP4.5)



Σχήμα 2.48: Χρονική εξέλιξη των μεταβολών των βαθμοημερών ψύξης σε σύγκριση με τη μέση τιμή της περιόδου 1971-2000, από δεδομένα κλιματικών προσομοιώσεων σύμφωνα με το σενάριο RCP4.5

Μεταβολή βαθμοημερών ψύξης (RCP8.5)



Σχήμα 2.49: Χρονική εξέλιξη των μεταβολών των βαθμοημερών ψύξης σε σύγκριση με τη μέση τιμή της περιόδου 1971-2000, από δεδομένα κλιματικών προσομοιώσεων σύμφωνα με το σενάριο RCP8.5

Από τις προβολές των τριών βασικών θερμικών δεικτών για τη Θεσσαλονίκη συμπεραίνεται ότι η πόλη βαδίζει προς ένα κλίμα με περισσότερες θερμές ημέρες, πολύ περισσότερες θερμές νύχτες και ιδιαίτερα αυξημένη ενεργειακή ζήτηση για ψύξη. Αυτή η ανάγκη έχει επισημανθεί σε πρόσφατες μελέτες για τα αστικά περιβάλλοντα τόσο της Ελλάδας[31] όσο και για της Ευρώπης.[32] Η κατεύθυνση της μεταβολής είναι η ίδια σε όλα τα σενάρια, με το RCP8.5 να εμφανίζει εντονότερο ρυθμό και μεγαλύτερη συσσώρευση θερμότητας.

Ο αριθμός των ημερών με μέγιστη θερμοκρασία πάνω από 25°C αυξάνεται συστηματικά σε όλη την περίοδο μελέτης. Στο μετριοπαθές σενάριο RCP4.5, οι αποκλίσεις ξεκινούν από –1,63 ημέρες την πρώτη δεκαπενταετία και φτάνουν τις +12,95 ημέρες την τελευταία, δηλαδή μια αύξηση περίπου +14,6 θερινών ημερών τον χρόνο. Στο δυσμενές σενάριο RCP8.5, η άνοδος είναι ακόμα πιο έντονη: από –1,63 σε +24,48 ημέρες, μεταβολή που ξεπερνά τις +26 ημέρες θέρους.

Η τάση αυτή σημαίνει ότι η θερμή περίοδος της Θεσσαλονίκης επεκτείνεται σταθερά. Η άνοιξη θερμαίνεται νωρίτερα, οι θερμές συνθήκες επιμένουν περισσότερο στο φθινόπωρο, και το «καλοκαίρι» μετεωρολογικά αποκτά διάρκεια που μπορεί να φτάνει τον ενάμιση μήνα μεγαλύτερη ως τα μέσα του αιώνα υπό υψηλές εκπομπές.

Η νυχτερινή θερμική επιβάρυνση είναι ο πιο ανησυχητικός δείκτης. Στο RCP4.5, ο αριθμός των τροπικών νυχτών μεταβαίνει από –6,36 νύχτες την πρώτη δεκαπενταετία σε +24,33 νύχτες την τελευταία – μια συνολική αύξηση περίπου +30 θερμών νυχτών τον χρόνο. Στο RCP8.5, η αύξηση είναι σχεδόν διπλή: οι τιμές από –6,36 εκτινάσσονται σε +43,33 νύχτες, δηλαδή περίπου 50 επιπλέον νύχτες με ελάχιστη θερμοκρασία πάνω από 20°C.

Η μεταβολή αυτή είναι κομβική για την υγεία και την καθημερινότητα. Η απουσία νυχτερινής ψύξης οδηγεί σε θερμική συσσώρευση από ημέρα σε ημέρα, περιορίζει την ανάκαμψη ευάλωτων ομάδων (ηλικιωμένοι, άτομα με καρδιοαναπνευστικά προβλήματα, εργαζόμενοι σε θερμικώς φορτισμένα περιβάλλοντα) και ενισχύει την αστική θερμική νησίδα, ειδικά στο κέντρο και στις δυτικές συνοικίες όπου η δόμηση και η υγρασία εγκλωβίζουν περαιτέρω τη θερμότητα. Η αύ- ξηση 30-50 τροπικών νυχτών είναι ένας από τους πιο σαφείς δείκτες μετάβασης της πόλης σε εντελώς νέο θερμικό καθεστώς.

Ο δείκτης CDDCOLD18 –που εκφράζει πόσο θερμικό φορτίο απαιτεί ψύξη– παρουσιάζει τον πιο απότομο ρυθμό αύξησης. Στο RCP4.5, η χρονοσειρά περνάει από –33,19 μονάδες την πρώ- τη δεκαπενταετία σε +303,17 μονάδες την τελευταία, μια εκτίναξη περίπου +336 βαθμοημερών ψύξης. Στο RCP8.5, η αύξηση είναι ακόμα ισχυρότερη: από –33,19 μονάδες σε +461,37 μονάδες, δηλαδή +494 μονάδες.

[31] Karagiannidis, A., Lagouvardos, K., Kotroni, V., Galanaki, E. Expected Changes in Heating and Cooling Degree Days over Greece in the near Future Based on Climate Scenarios Projections. Atmosphere 2024, 15, 393. Διαθέσιμο στο https://doi.org/10.3390/atmos15040393 (ανακτήθηκε στις 3 Φεβρουαρίου 2026).

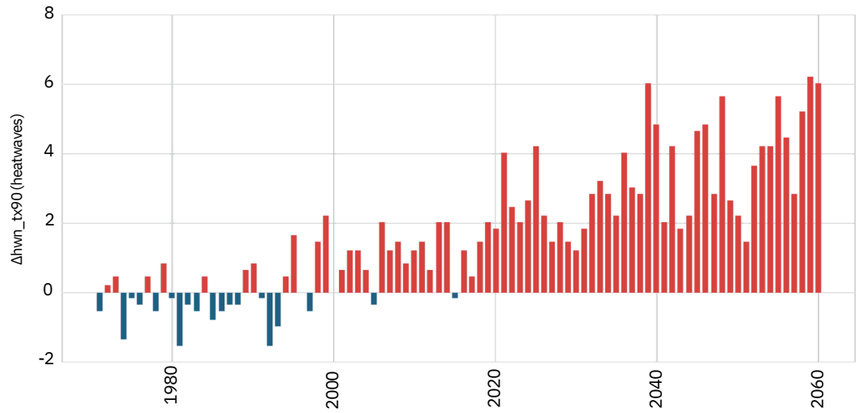
[32] Kitous A., Despres, J. 2017. "Assessment of the impact of climate change on residential energy demand for heating and cooling," JRC Research Reports JRC110191, Joint Research Centre. Διαθέσιμο στο https://ideas.repec.org/p/ipt/iptwpa/jrc110191.html (ανακτήθηκε στις 3 Φεβρουαρίου 2026)

Με απλά λόγια, η θερμότητα που πρέπει να απομακρυνθεί για να διατηρηθούν οι εσωτερικοί χώροι σε ανεκτές θερμοκρασίες πολλαπλασιάζεται. Το γεγονός αυτό συνδέεται άμεσα με το αναμενόμενο υψηλότερο κόστος ψύξης, την ενεργειακή πίεση στα νοικοκυριά και τη σημαντική αύξηση της ζήτησης σε περιόδους αιχμής. Η Θεσσαλονίκη –λόγω υγρασίας και βραδύτερης νυχτερινής αποφόρτισης σε πολλές περιοχές– έχει ιδιαίτερα αυξημένη ευαισθησία σε τέτοιου είδους θερ- μική συσσώρευση.

Οι μεταβολές αυτές δεν εκφράζουν μόνο ένα ζεστότερο καλοκαίρι, αλλά ένα νέο θερμοδυναμικό ισοζύγιο για την πόλη. Η θερμότητα διαρκεί περισσότερο, η νύχτα δεν προσφέρει επαρκή ανακούφιση, και η ενέργεια που απαιτείται για να διατηρηθούν βιώσιμες συνθήκες αυξάνεται δραστικά. Σε συνδυασμό με την αστική θερμική νησίδα, την αυξημένη υγρασία και το μικροκλίμα της λεκάνης του Θερμαϊκού, το μέλλον της Θεσσαλονίκης προδιαγράφεται σαφώς θερμότερο και ενεργειακά απαιτητικότερο, με σημαντικές προεκτάσεις για την υγεία, την άνεση και τον αστικό σχεδιασμό.

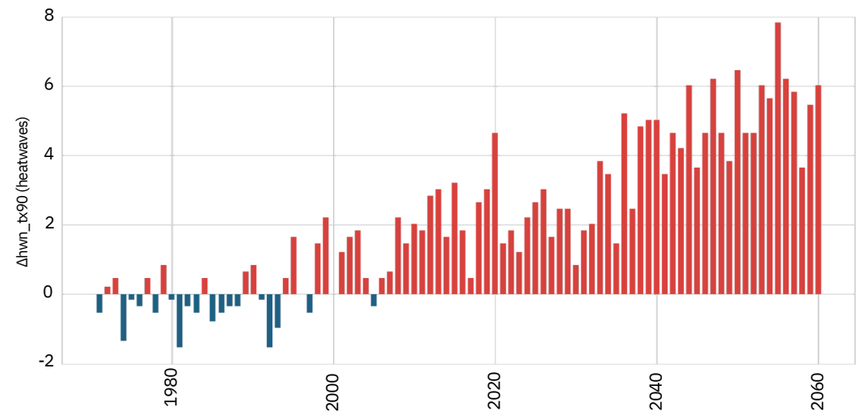
Στα Σχήματα 2.50 και 2.52 απεικονίζεται η εξέλιξη του αριθμού επεισοδίων και των ημερών καύσω- να σύμφωνα με το σενάριο RCP4.5, ενώ στα Σχήματα 2.51 και 2.53 παρουσιάζονται οι αντίστοιχοι δείκτες βάσει του σεναρίου RCP8.5. Οι μελλοντικές προβολές για τη Θεσσαλονίκη καταδεικνύουν σαφή ενίσχυση τόσο της συχνότητας όσο και της διάρκειας των καυσώνων. Η πόλη, η οποία πα- ρουσιάζει ήδη ισχυρή αστική θερμική νησίδα και περιορισμένη νυχτερινή ψύξη, εισέρχεται σε ένα κλιματικό καθεστώς όπου τα θερμικά επεισόδια γίνονται συχνότερα και μεγαλύτερα σε διάρκεια.

Μεταβολή αριθμού επεισοδίων καύσωνα (RCP4.5)



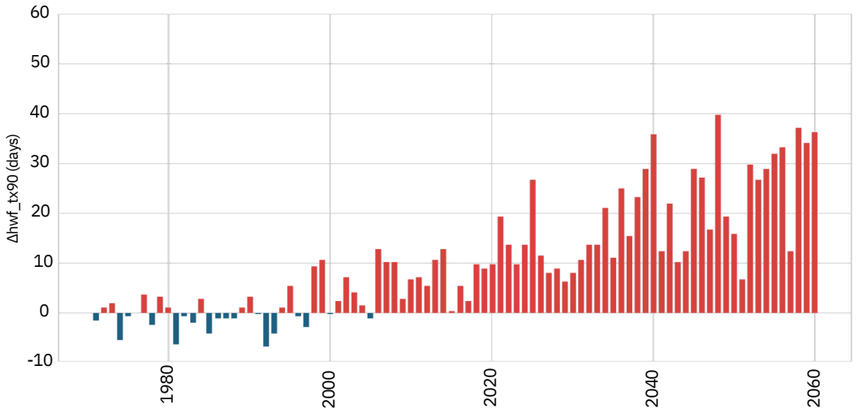
Σχήμα 2.50: Χρονική εξέλιξη των μεταβολών του αριθμού επεισοδίων καύσωνα σε σύγκριση με τη μέση τιμή της περιόδου 1971-2000, από δεδομένα κλιματικών προσομοιώσεων σύμφωνα με το σενάριο RCP4.5

Μεταβολή αριθμού επεισοδίων καύσωνα (RCP8.5)



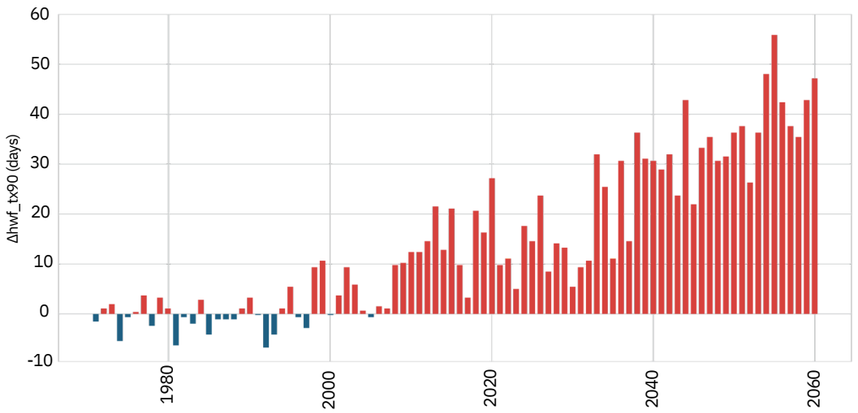
Σχήμα 2.51: Χρονική εξέλιξη των μεταβολών του αριθμού επεισοδίων καύσωνα σε σύγκριση με τη μέση τιμή της περιόδου 1971-2000, από δεδομένα κλιματικών προσομοιώσεων σύμφωνα με το σενάριο RCP8.5

Μεταβολή αριθμού ημερών με καύσωνα (RCP4.5)



Σχήμα 2.52: Χρονική εξέλιξη των μεταβολών του αριθμού ημερών με καύσωνα σε σύγκριση με τη μέση τιμή της περιόδου 1971-2000, από δεδομένα κλιματικών προσομοιώσεων σύμφωνα με το σενάριο RCP4.5

Μεταβολή αριθμού ημερών με καύσωνα (RCP8.5)



Σχήμα 2.53: Χρονική εξέλιξη των μεταβολών του αριθμού ημερών με καύσωνα σε σύγκριση με τη μέση τιμή της περιόδου 1971-2000, από δεδομένα κλιματικών προσομοιώσεων σύμφωνα με το σενάριο RCP8.5

Ο δείκτης HWN παρουσιάζει σταθερή άνοδο σε όλη τη διάρκεια του αιώνα. Σύμφωνα με το κλιματικό σενάριο RCP4.5, οι αποκλίσεις από την περίοδο αναφοράς μεταβαίνουν από –0,23 επεισόδια την πρώτη δεκαπενταετία σε +4,19 επεισόδια την τελευταία, μια συνολική αύξηση περίπου +4,4 καυσώνων ανά έτος. Στο δυσμενές κλιματικό σενάριο RCP8.5, η αύξηση είναι ακόμα ισχυρότερη, από –0,23 σε +5,49 επεισόδια, δηλαδή περίπου +5,7 καύσωνες έως το τέλος της περιόδου. Πρακτικά, αυτό σημαίνει ότι η Θεσσαλονίκη από τα 1-2 επεισόδια καύσωνα που καταγράφονταν ιστορικά μπορεί να οδηγηθεί σε 5-7 επεισόδια ανά έτος.

Η διάρκεια των θερμικών επεισοδίων παρουσιάζει πολύ πιο έντονη αύξηση σε σύγκριση με τη συχνότητά τους. Στο RCP4.5, από –0,76 ημέρες την αρχική δεκαπενταετία, η χρονοσειρά φτάνει στις +26,41 ημέρες, δηλαδή περίπου +27 ημέρες καύσωνα ετησίως. Στο RCP8.5, η κατάσταση είναι ακόμα πιο επιβαρυντική, με αύξηση από –0,76 σε +38,52 ημέρες, συνολική μεταβολή περίπου +39 ημέρες καύσωνα. Με άλλα λόγια, υπό το σενάριο των υψηλών εκπομπών θερμοκηπιακών αερίων, η πόλη μπορεί να αντιμετωπίζει πάρα πολλές ημέρες καύσωνα ορισμένες χρονιές – μια δραματική αλλαγή σε σχέση με το κλίμα του 20ού αιώνα.

Οι δύο δείκτες, όταν συνδυάζονται, δείχνουν ότι η Θεσσαλονίκη οδεύει προς ένα κλίμα όπου τα επεισόδια καύσωνα πολλαπλασιάζονται (ως +6 ετησίως στο RCP8.5), η συνολική διάρκεια εκτοξεύεται (ως +40 ημέρες), τα επεισόδια γίνονται πιο παρατεταμένα, με μικρότερα ενδιάμεσα διαλείμματα, και η θερμική συσσώρευση από ημέρα σε ημέρα ενισχύεται, λόγω της ταυτόχρονης αύξησης των τροπικών νυχτών.

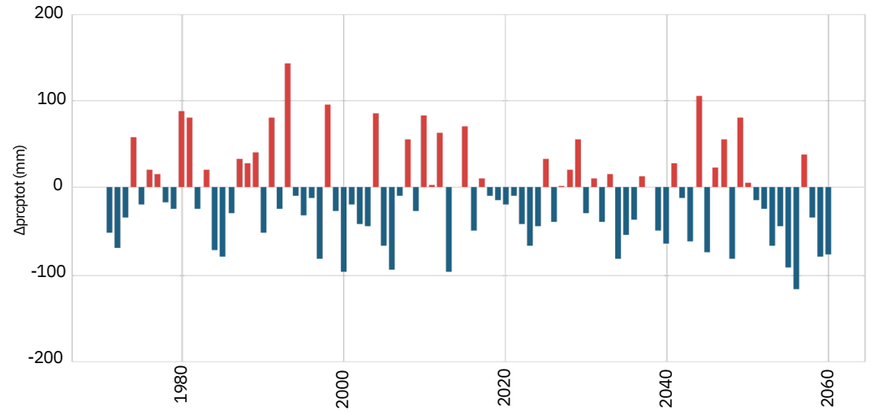
Σε αντίθεση με την ιστορική περίοδο, στη διάρκεια της οποίας η Θεσσαλονίκη εμφάνισε τάσεις αύξησης της ετήσιας βροχόπτωσης και της μεταβλητότητας, οι μελλοντικές προβολές των κλιματικών μοντέλων υποδεικνύουν γενική μείωση του υετού και οριακή υποχώρηση της συχνότητας των έντονων βροχοπτώσεων, ανεξάρτητα από το σενάριο εκπομπών.

Το αποτέλεσμα αυτό συνάδει με τις ευρύτερες προβλέψεις για τη Μεσόγειο, η οποία χαρακτηρίζεται ως “hotspot ξηρασίας” στα κλιματικά μοντέλα (IPCC AR6), αλλά η επίδραση στη Θεσσαλονίκη έχει ιδιαιτερότητες λόγω της παράκτιας θέσης της πόλης, της υγρασίας του Θερμαϊκού και της τοπικής αστικής γεωμετρίας.

Στο μετριοπαθές σενάριο RCP4.5, οι αποκλίσεις κυμαίνονται κατά μέσο όρο στα –9,62 mm, με τιμές που ξεκινούν από –5,56 mm την πρώτη δεκαπενταετία και φτάνουν έως –26,74 mm την τελευταία (Σχήμα 2.54). Η μέγιστη θετική απόκλιση αγγίζει τα +144,32 mm, ενώ η ελάχιστη φτάνει τα –114,39 mm, υπογραμμίζοντας την αυξημένη μεταβλητότητα του συστήματος.

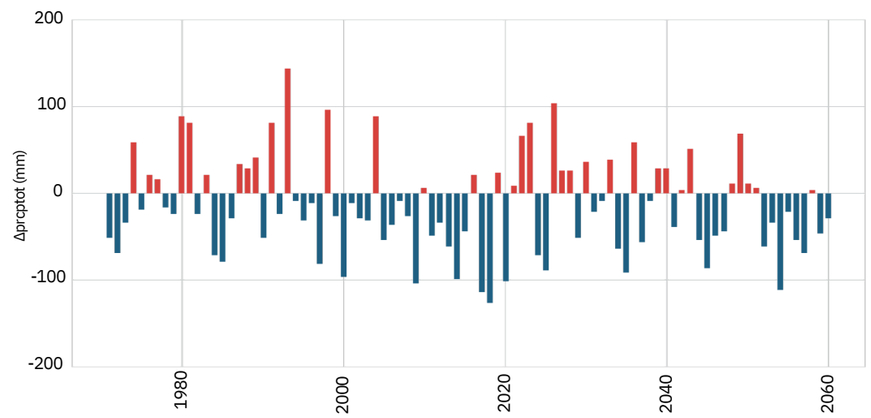
Στο δυσμενές σενάριο RCP8.5, η εικόνα είναι παρόμοια, με μέση απόκλιση –13,53 mm, τιμές πρώτης δεκαπενταετίας στα –5,56 mm και τελευταίας δεκαπενταετίας στα –26,63 mm. Το εύρος παραμένει μεγάλο, με ελάχιστη τιμή –126,17 mm (Σχήμα 2.55). Η τάση αυτή δείχνει ότι η Θεσσαλονίκη θα κινηθεί προς πιο ξηρές ετήσιες συνθήκες, με σταδιακή μείωση των συνολικών αποθεμάτων νερού και μεγαλύτερη εξάρτηση από τα ακραία επεισόδια για σημαντικό μέρος του ετήσιου υετού.

Μεταβολή ετήσιας βροχόπτωσης (RCP4.5)



Σχήμα 2.54: Χρονική εξέλιξη των μεταβολών της ετήσιας βροχόπτωσης σε σύγκριση με τη μέση τιμή της περιόδου 1971-2000, από δεδομένα κλιματικών προσομοιώσεων σύμφωνα με το σενάριο RCP4.5

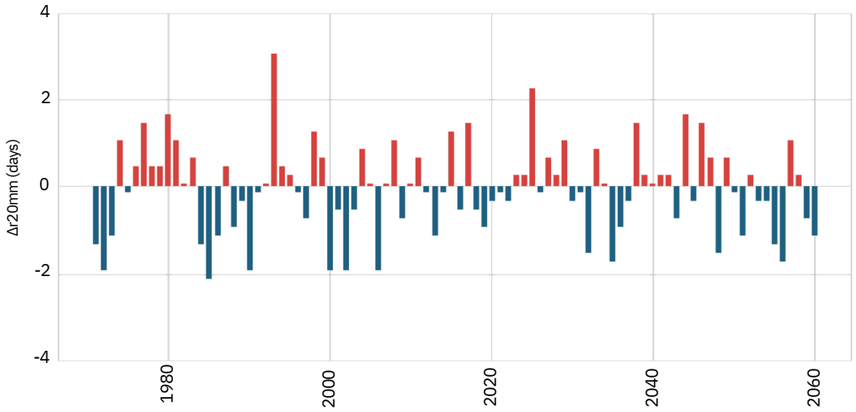
Μεταβολή ετήσιας βροχόπτωσης (RCP8.5)



Σχήμα 2.55: Χρονική εξέλιξη των μεταβολών της ετήσιας βροχόπτωσης σε σύγκριση με τη μέση τιμή της περιόδου 1971-2000, από δεδομένα κλιματικών προσομοιώσεων σύμφωνα με το σενάριο RCP8.5

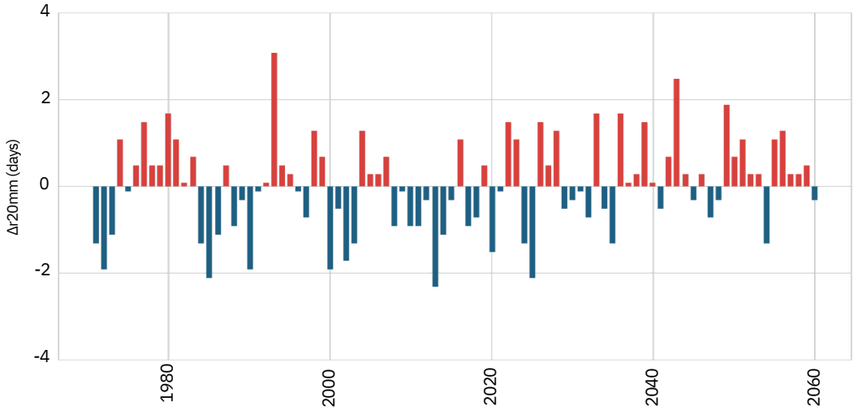
Ο δείκτης R20mm αποτυπώνει καλύτερα την «ποιότητα» των βροχοπτώσεων. Στο RCP4.5, η μέση τιμή παραμένει σχεδόν μηδενική (–0,018 ημέρες), με μια τάση μείωσης από +0,013 ημέρες την πρώτη δεκαπενταετία σε –0,21 ημέρες την τελευταία (Σχήμα 2.56). Στο RCP8.5, η εικόνα διαφορο- ποιείται οριακά προς τα πάνω: η μέση τιμή ανέρχεται σε +0,051 ημέρες, ενώ η τελευταία δεκαπεντα- ετία φτάνει τις +0,39 ημέρες, με μέγιστη τιμή ως +3,12 ημέρες έντονης βροχής (Σχήμα 2.57).

Μεταβολή αριθμού ημερών υψηλής βροχόπτωσης (RCP4.5)



Σχήμα 2.56: Χρονική εξέλιξη των μεταβολών του αριθμού των ημερών υψηλής βροχόπτωσης σε σύγκριση με τη μέση τιμή της περιόδου 1971-2000, από δεδομένα κλιματικών προσομοιώσεων σύμφωνα με το σενάριο RCP4.5

Μεταβολή αριθμού ημερών υψηλής βροχόπτωσης (RCP8.5)



Σχήμα 2.57: Χρονική εξέλιξη των μεταβολών του αριθμού των ημερών υψηλής βροχόπτωσης σε σύγκριση με τη μέση τιμή της περιόδου 1971-2000, από δεδομένα κλιματικών προσομοιώσεων σύμφωνα με το σενάριο RCP8.5

Συνολικά, οι κλιματικές προβολές δείχνουν σταθεροποίηση ή ελαφρά αύξηση των έντονων επει- σοδίων στο RCP8.5, αλλά χωρίς σαφή και ισχυρή τάση όπως στη θερμοκρασία. Τα αποτελέσμα- τα δείχνουν ότι η πόλη οδεύει προς ένα κλίμα με

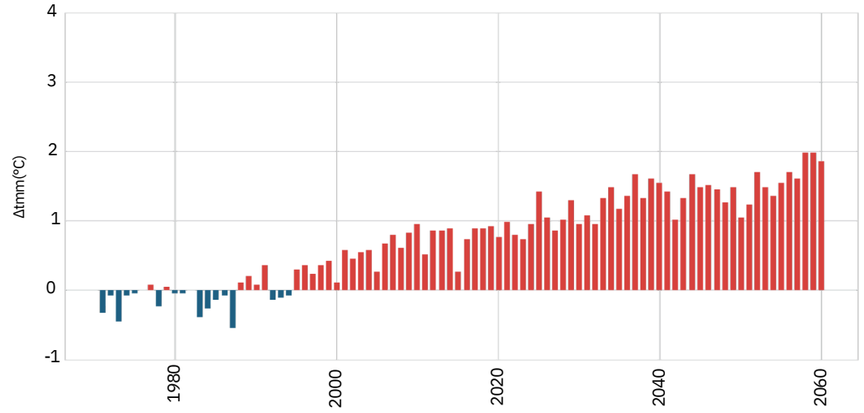
- λιγότερη ετήσια βροχή,
- μείωση των βροχερών ημερών,
- υψηλή μεταβλητότητα της ετήσιας βροχόπτωσης και
- σχεδόν σταθερή συχνότητα έντονων επεισοδίων

Η τάση για μείωση των συνολικών υετών, όταν συνδυάζεται με την προβλεπόμενη άνοδο της θερμοκρασίας, με πολλαπλασιασμό των θερμών ημερών και εκρηκτική αύξηση των τροπικών νυχτών, δημιουργεί ένα περιβάλλον αυξημένου υδατικού και αστικού στρες με περισσότερη ανά- γκη για νερό, μεγαλύτερη εξατμισοδιαπνοή (και άρα μεγαλύτερη απώλεια νερού) και αυξημένη ευαλωτότητα των πράσινων χώρων. Παράλληλα, το γεγονός ότι τα έντονα επεισόδια δεν μειώνο- νται ουσιαστικά σημαίνει ότι η πόλη θα συνεχίσει να αντιμετωπίζει κίνδυνο αστικών πλημμυρών, παρά τη συνολική «ξηρότερη» κλιματική εικόνα.

[2.2.3] ΓΟΎΡΝΕΣ

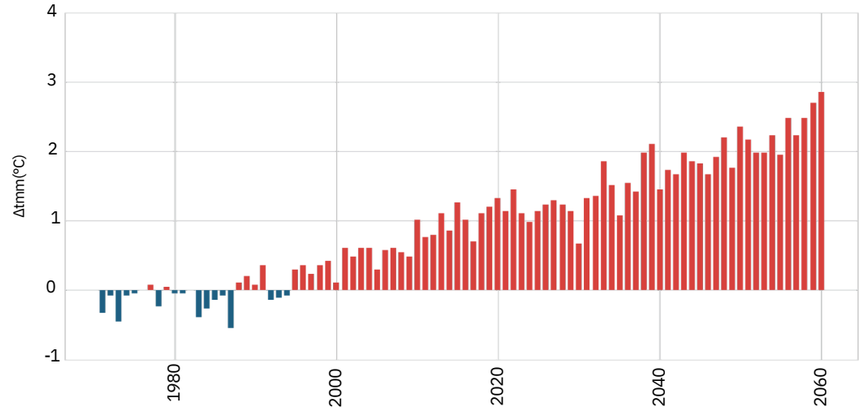
Οι κλιματικές προσομοιώσεις δείχνουν σταθερή και προοδευτική αύξηση της μέσης ετήσιας θερμοκρασίας (Σχήματα 2.58 και 2.59) στην περιοχή των Γουρνών κατά τις επόμενες δεκαετίες, ανεξάρτητα από το σενάριο εκπομπών που θα ακολουθηθεί. Στο μετριοπαθές σενάριο (RCP4.5), η θερμοκρασία αυξάνεται κατά περίπου +1,3°C την περίοδο 2026-2045 και φτάνει τους +1,6°C ως το 2060 σε σχέση με την περίοδο αναφοράς (1971-2000). Στο δυσμενές σενάριο (RCP8.5), η άνοδος είναι πιο έντονη, +1,5°C το πρώτο διάστημα και ως +2,2°C το δεύτερο, αύξηση που προ- στίθεται σε ένα ήδη θερμότερο κλιματικό υπόβαθρο σε σχέση με την προβιομηχανική περίοδο (αυξημένο κατά 0,6-0,7°C σε σχέση με την περίοδο 1850-1900, σύμφωνα με συνθετικές αξιολο- γήσεις των κύριων παγκόσμιων βάσεων δεδομένων και τις προβλέψεις της IPCC.

Μεταβολή μέσης ετήσιας θερμοκρασίας (RCP4.5)



Σχήμα 2.58: Χρονική εξέλιξη των μεταβολών της μέσης ετήσιας θερμοκρασίας (°C) σε σύγκριση με τη μέση τιμή της περιόδου 1971-2000, από δεδομένα κλιματικών προσομοιώσεων σύμφωνα με το σενάριο RCP4.5

Μεταβολή μέσης ετήσιας θερμοκρασίας (RCP8.5)



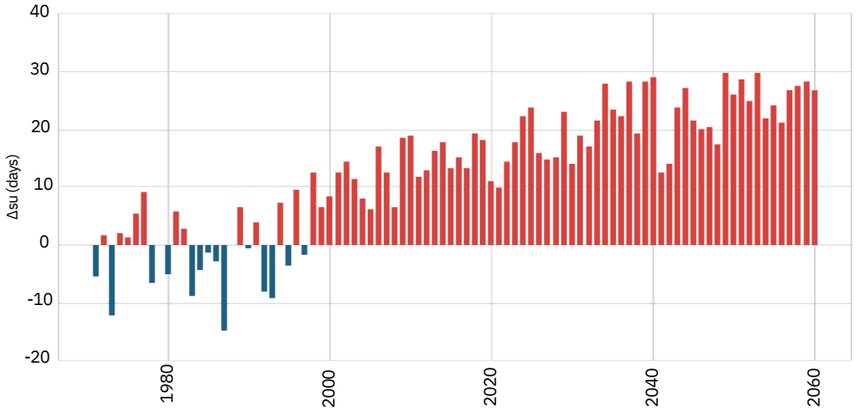
Σχήμα 2.59: Χρονική εξέλιξη των μεταβολών της μέσης ετήσιας θερμοκρασίας (°C) σε σύγκριση με τη μέση τιμή της περιόδου 1971-2000, από δεδομένα κλιματικών προσομοιώσεων σύμφωνα με το σενάριο RCP8.5

Η σύγκριση των δύο σεναρίων δείχνει ότι οι διαφορές αρχίζουν να γίνονται αισθητά σημαντι- κές μετά το 2045, υποδηλώνοντας πως η επιλογή πορείας εκπομπών επηρεάζει καθοριστικά τη θερμική ένταση των επόμενων δεκαετιών. Η σταδιακή άνοδος της θερμοκρασίας συνεπάγεται επιμήκυνση της θερινής περιόδου και αυξημένες ανάγκες ψύξης, συρρίκνωση των περιόδων φυσικής ψύξης και αλλαγές στα τοπικά οικοσυστήματα και στη διαθεσιμότητα νερού. Ακόμα και υπό το μετριοπαθές σενάριο, το κλίμα της περιοχής μεταβαίνει προς ένα θερμότερο και πιο ξηρό πρότυπο, χαρακτηριστικό της Νότιας Μεσογείου.

Οι κλιματικές προβολές συγκλίνουν σε μια σαφή εικόνα. Το θερμικό καθεστώς της περιοχής των Γουρνών μεταβάλλεται ριζικά: το κλίμα γίνεται θερμότερο, με περισσότερες ημέρες υψηλών θερμοκρασιών και ενεργειακά απαιτητικότερο. Οι δείκτες θερμικής καταπόνησης –θερινές ημέρες (SU), τροπικές νύχτες (TR) και βαθμοημέρες ψύξης (CDDCOLD18)– αυξάνονται σταθερά και στα δύο σενάρια RCP, με τις μεταβολές να είναι εντονότερες στο δυσμενές σενάριο RCP8.5.

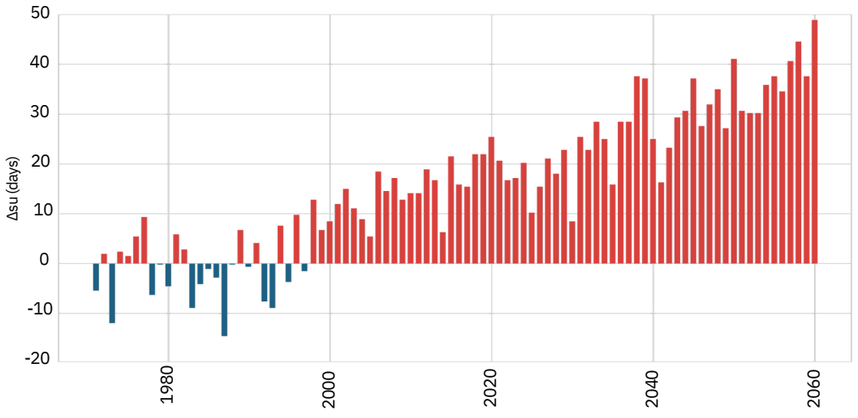
Οι ημέρες με μέγιστη θερμοκρασία άνω των 25°C (Σχήματα 2.60 και 2.61) αυξάνονται σημαντικά, υποδηλώνοντας επιμήκυνση της θερμής περιόδου και περιορισμό των ενδιάμεσων εποχών. Στο μετριοπαθές σενάριο (RCP4.5), η αύξηση υπολογίζεται σε περίπου 20-25 επιπλέον ημέρες με θερινές συνθήκες, ενώ στο δυσμενές σενάριο (RCP8.5) οι θερμές ημέρες αυξάνονται ως και κατά έναν μήνα ετησίως. Η μεταβολή αυτή αναμένεται να επηρεάσει τη θερμική συμπεριφο- ρά των οικισμών, μέσω της αυξημένης θερμικής συσσώρευσης στο δομημένο περιβάλλον και του περιορισμού της φυσικής θερμικής αποφόρτισης κατά τις νυχτερινές ώρες, οδηγώντας σε μεγαλύτερη ανάγκη για ψύξη άρα και κατανάλωση ενέργειας, και να αλλάξει τις βιοκλιματικές ανάγκες του δομημένου περιβάλλοντος.

Μεταβολή αριθμού θερινών ημερών (RCP4.5)



Σχήμα 2.60: Χρονική εξέλιξη των μεταβολών του αριθμού θερινών ημερών σε σύγκριση με τη μέση τιμή της περιόδου 1971-2000, από δεδομένα κλιματικών προσομοιώσεων σύμφωνα με το σενάριο RCP4.5

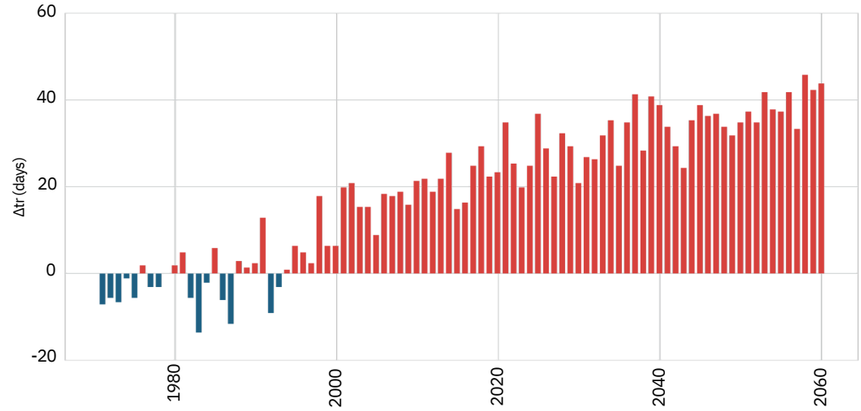
Μεταβολή αριθμού θερινών ημερών (RCP8.5)



Σχήμα 2.61: Χρονική εξέλιξη των μεταβολών του αριθμού θερινών ημερών σε σύγκριση με τη μέση τιμή της περιόδου 1971-2000, από δεδομένα κλιματικών προσομοιώσεων σύμφωνα με το σενάριο RCP8.5

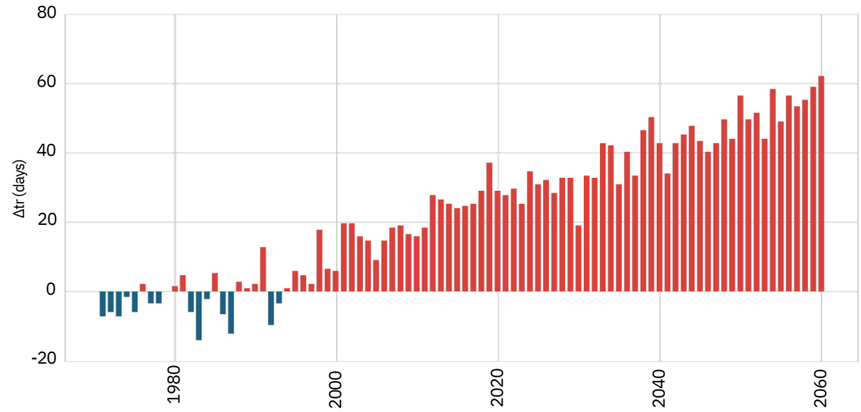
Η νυχτερινή θερμοκρασία ακολουθεί ακόμα πιο έντονη ανοδική τάση (Σχήματα 2.62 και 2.63). Οι τροπικές νύχτες, όταν η θερμοκρασία δεν πέφτει κάτω από τους 20°C, αυξάνονται από 72 την περίοδο 1971-2000 σε 109 την περίοδο 2041-2060, καθιστώντας τη θερμότητα σχεδόν συνεχές φαινόμενο. Η έλλειψη νυχτερινής ψύξης οδηγεί σε σωρευτική θερμική καταπόνηση και έντονη αίσθηση δυσφορίας, ενώ μειώνει τη δυνατότητα φυσικής ψύξης των κτιρίων και των αστικών επιφανειών. Ο ρυθμός αύξησης είναι αισθητά ταχύτερος στο RCP8.5, όπου οι τροπικές νύχτες ξεπερνούν τις 120, κατά μέσο όρο, την περίοδο 2041-2060.

Μεταβολή αριθμού τροπικών νυχτών (RCP4.5)



Σχήμα 2.62: Χρονική εξέλιξη των μεταβολών του αριθμού τροπικών νυχτών σε σύγκριση με τη μέση τιμή της περιόδου 1971-2000, από δεδομένα κλιματικών προσομοιώσεων σύμφωνα με το σενάριο RCP4.5

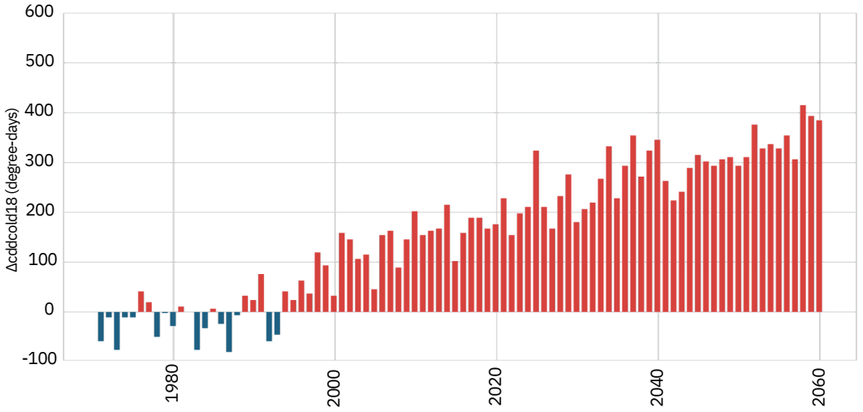
Μεταβολή αριθμού τροπικών νυχτών (RCP8.5)



Σχήμα 2.63: Χρονική εξέλιξη των μεταβολών του αριθμού τροπικών νυχτών σε σύγκριση με τη μέση τιμή της περιόδου 1971-2000, από δεδομένα κλιματικών προσομοιώσεων σύμφωνα με το σενάριο RCP8.5

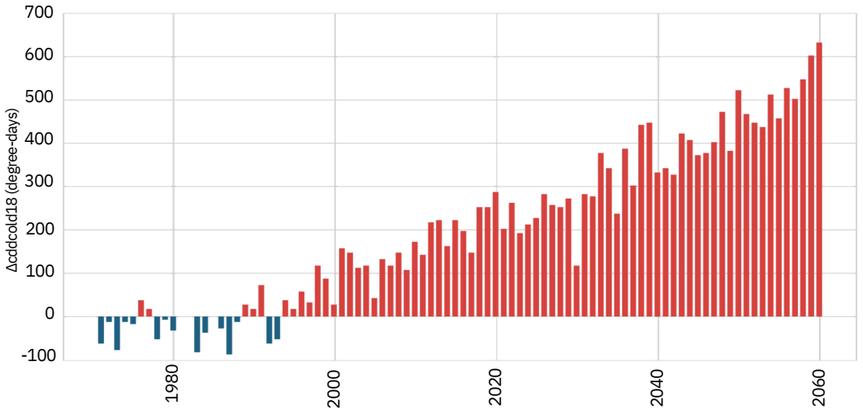
Ο δείκτης CDDCOLD18, που εκφράζει τις ενεργειακές ανάγκες ψύξης, ενισχύεται δραστικά, αποτελώντας την πιο χαρακτηριστική ένδειξη του νέου θερμικού ισοζυγίου της περιοχής (Σχήματα 2.64 και 2.65). Στο μετριοπαθές σενάριο, οι τιμές αυξάνονται σταθερά, με την αύξηση να φτάνει το 40% την περίοδο 2041-2060 σε σχέση με την περίοδο 1971-2000, ενώ στο δυσμενές σενάριο η αύξηση είναι εκθετική, με την ενεργειακή απαίτηση για ψύξη να αυξάνεται πάνω από 50% σε σχέση με το παρελθόν. Η μεταβολή αυτή δεν σημαίνει μόνο περισσότερες θερμές ημέρες, αλλά μεγαλύτερη διάρκεια συνεχόμενης θερμότητας, όπου το σύστημα (κτίρια, υποδομές, άνθρωποι) δεν προλαβαίνει να αποφορτιστεί.

Μεταβολή βαθμοημερών ψύξης (RCP4.5)



Σχήμα 2.64: Χρονική εξέλιξη των μεταβολών των βαθμοημερών ψύξης σε σύγκριση με τη μέση τιμή της περιόδου 1971-2000, από δεδομένα κλιματικών προσομοιώσεων σύμφωνα με το σενάριο RCP4.5

Μεταβολή βαθμοημερών ψύξης (RCP8.5)



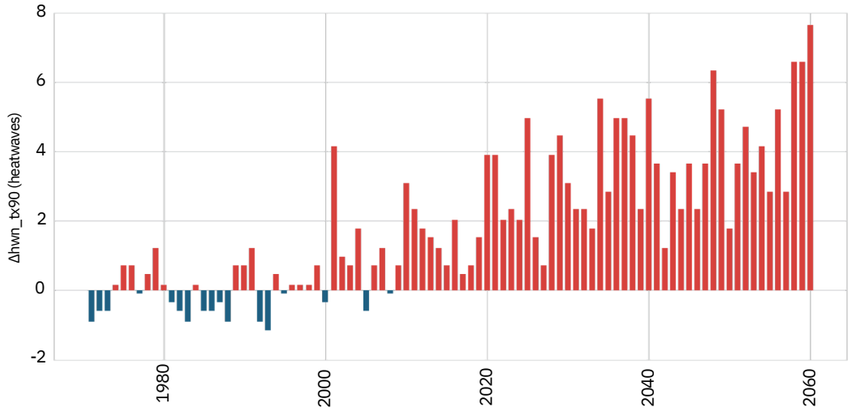
Σχήμα 2.65: Χρονική εξέλιξη των μεταβολών των βαθμοημερών ψύξης σε σύγκριση με τη μέση τιμή της περιόδου 1971-2000, από δεδομένα κλιματικών προσομοιώσεων σύμφωνα με το σενάριο RCP8.5

Η παράλληλη άνοδος των τριών δεικτών δείχνει ότι οι Γούρνες οδεύουν προς ένα θερμικά κορεσμένο περιβάλλον με παρατεταμένες περιόδους υψηλών θερμοκρασιών, ελάχιστη νυχτερινή ανακούφιση και αυξημένη ενεργειακή εξάρτηση για τη διατήρηση συνθηκών άνεσης. Ακόμα και στο μετριοπαθές σενάριο, η θερμική επιβάρυνση είναι αρκετή για να επηρεάσει τον σχεδιασμό, την κατανάλωση ενέργειας και τη βιωσιμότητα των αστικών δραστηριοτήτων. Στο δυσμενές σενά- ριο, το φαινόμενο αποκτά δομικά χαρακτηριστικά, απαιτώντας προληπτικά μέτρα προσαρμογής όπως βιοκλιματικό σχεδιασμό κτιρίων, ενίσχυση φυσικού δροσισμού και χρήση υλικών και επιφα- νειών που μειώνουν την απορρόφηση και αποθήκευση θερμότητας.

Οι κλιματικές προσομοιώσεις δείχνουν ότι οι καύσωνες αποτελούν το πλέον εντεινόμενο φαινόμενο της επόμενης περιόδου για την περιοχή των Γουρνών, τόσο σε επίπεδο συχνότητας όσο και διάρκειας. Και στα δύο σενάρια, τα επεισόδια καύσωνα γίνονται περισσότερα και πιο παρατεταμένα, ενώ στο δυσμενές σενάριο RCP8.5 οι μεταβολές αποκτούν μη γραμμικό χαρακτήρα, με ραγδαία αύξηση μετά τα μέσα του αιώνα.

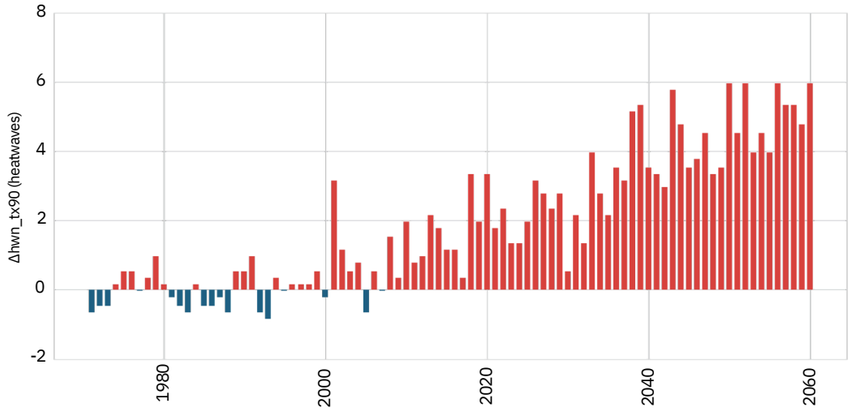
Ο δείκτης HWN (αριθμός επεισοδίων) δείχνει ότι τα γεγονότα καύσωνα αυξάνονται δραματικά από 1,2 κατά μέσο όρο την περίοδο 1971-2000 σε 4,3 και 5,8 την περίοδο 2041-2060 για το σενάριο RCP4.5 και RCP8.5 αντίστοιχα (Σχήματα 2.66 και 2.67), ενώ ο δείκτης HWF (ημέρες καύσωνα) καταγράφει πολλαπλασιασμό της διάρκειάς τους από 5 ημέρες, κατά μέσο όρο, την περίοδο 1971-2000 σε 22 και 35 την περίοδο 2041-2060, σύμφωνα με τα ίδια σενάρια (Σχήματα 2.68 και 2.69). Η σταθερή παρουσία καυσωνικών επεισοδίων κάθε χρόνο υποδεικνύει ότι οι καύσωνες παύουν να αποτελούν μεμονωμένα γεγονότα και καθίστανται κύριο χαρακτηριστικό του θερινού κλίματος.

Μεταβολή αριθμού επεισοδίων καύσωνα (RCP4.5)



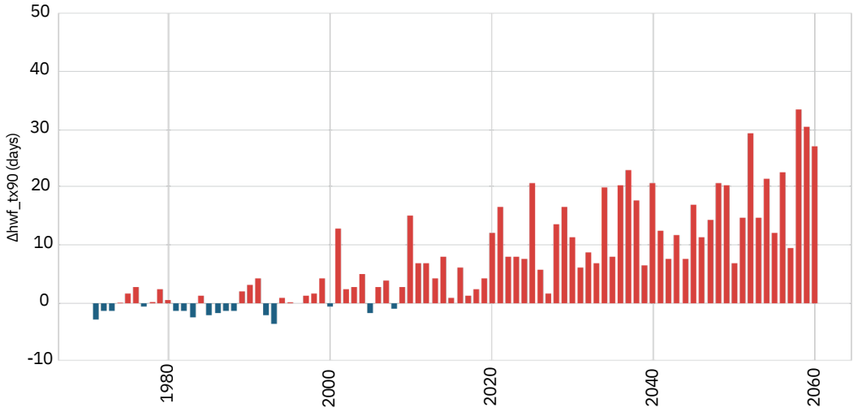
Σχήμα 2.66: Χρονική εξέλιξη των μεταβολών του αριθμού επεισοδίων καύσωνα σε σύγκριση με τη μέση τιμή της περιόδου 1971-2000, από δεδομένα κλιματικών προσομοιώσεων σύμφωνα με το σενάριο RCP4.5

Μεταβολή αριθμού επεισοδίων καύσωνα (RCP8.5)



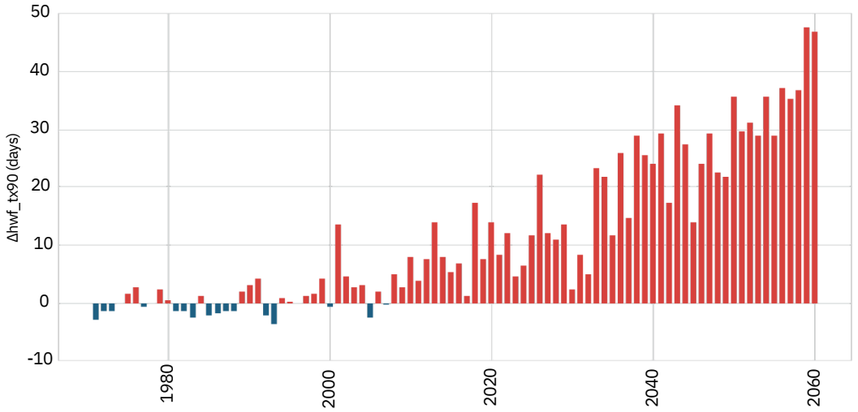
Σχήμα 2.67: Χρονική εξέλιξη των μεταβολών του αριθμού επεισοδίων καύσωνα σε σύγκριση με τη μέση τιμή της περιόδου 1971-2000, από δεδομένα κλιματικών προσομοιώσεων σύμφωνα με το σενάριο RCP8.5

Μεταβολή αριθμού ημερών με καύσωνα (RCP4.5)



Σχήμα 2.68: Χρονική εξέλιξη των μεταβολών του αριθμού των ημερών με επεισόδιο καύσωνα σε σύγκριση με τη μέση τιμή της περιόδου 1971-2000, από δεδομένα κλιματικών προσομοιώσεων σύμφωνα με το σενάριο RCP4.5

Μεταβολή αριθμού ημερών με καύσωνα (RCP8.5)

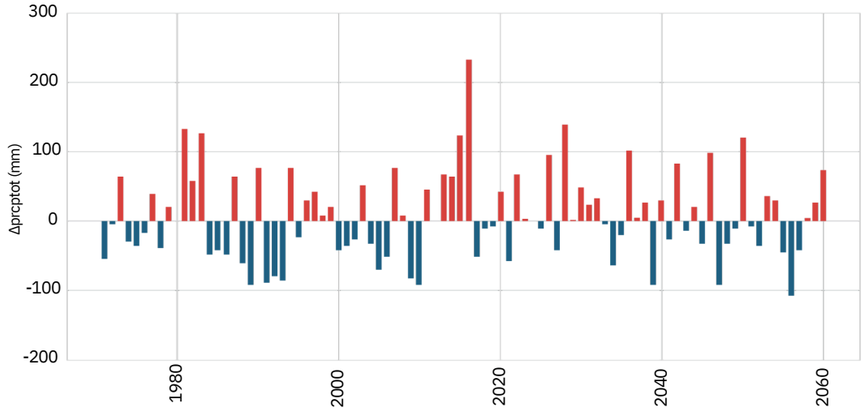


Σχήμα 2.69: Χρονική εξέλιξη των μεταβολών του αριθμού των ημερών με επεισόδιο καύσωνα σε σύγκριση με τη μέση τιμή της περιόδου 1971-2000, από δεδομένα κλιματικών προσομοιώσεων σύμφωνα με το σενάριο RCP8.5

'Οσον αφορά τις κλιματικές προβλέψεις για τη βροχόπτωση, το συνολικό ετήσιο ύψος βροχής (PRCPTOT) παραμένει συνολικά κοντά στη μακροχρόνια μέση τιμή (420 mm), με μικρές μεταβολές που εξαρτώνται από το σενάριο και τον χρονικό ορίζοντα::

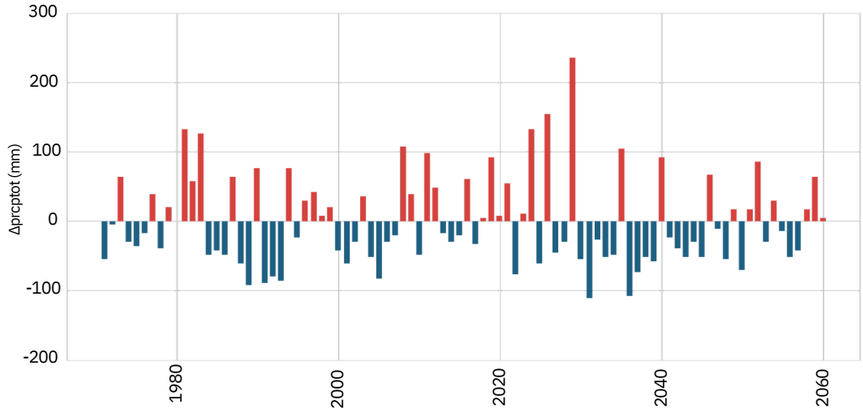
- στο RCP4.5 (Σχήμα 2.70) η εικόνα είναι ήπια θετική (ελαφρά αυξημένα ετήσια ύψη σε μέσο όρο),
- στο RCP8.5 (Σχήμα 2.71) εμφανίζεται μικρή μείωση στην κοντινή μελλοντική περίοδο και εξομάλυνση/ουδετεροποίηση μεσοπρόθεσμα.

Μεταβολή ετήσιας βροχόπτωσης (RCP4.5)



Σχήμα 2.70: Χρονική εξέλιξη των μεταβολών της αθροιστικής ετήσιας βροχόπτωσης (mm) σε σύγκριση με τη μέση τιμή της περιόδου 1971-2000, από δεδομένα κλιματικών προσομοιώσεων σύμφωνα με το σενάριο RCP4.5

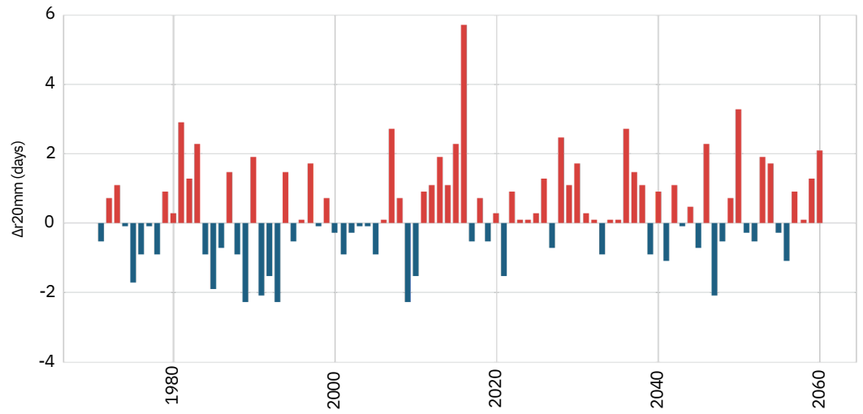
Μεταβολή ετήσιας βροχόπτωσης (RCP8.5)



Σχήμα 2.71: Χρονική εξέλιξη των μεταβολών της αθροιστικής ετήσιας βροχόπτωσης (mm) σε σύγκριση με τη μέση τιμή της περιόδου 1971-2000, από δεδομένα κλιματικών προσομοιώσεων σύμφωνα με το σενάριο RCP8.5

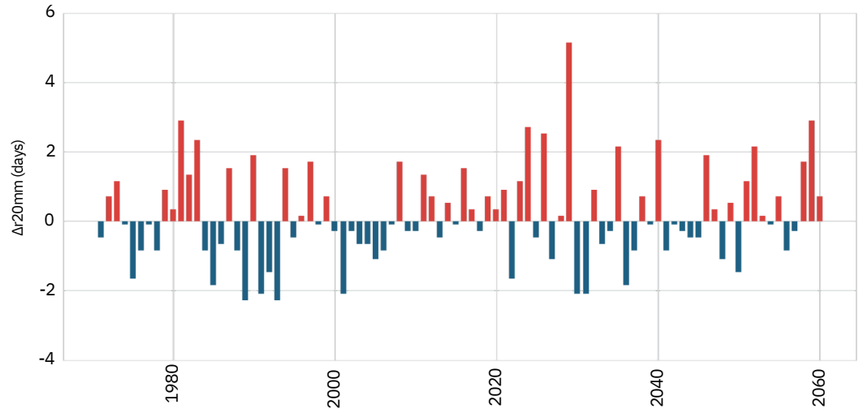
Συμπεραίνεται ότι δεν αναμένεται δραστική αλλαγή στη συνολική «ποσότητα» βροχής, όμως το μοτίβο αλλάζει. Ο δείκτης R20mm (ημέρες με βροχή >20 mm) αυξάνεται από 5,5 ημέρες κατά μέσο όρο την περίοδο 1971-2000 σε 6,2 την περίοδο 2041-2060 και στα δύο σενάρια (Σχήματα 2.72 και 2.73), με πιο έντονο τρόπο μεσοπρόθεσμα. Αυτό σημαίνει ότι, παρόλο που το άθροισμα της βροχής παραμένει σχεδόν σταθερό, μεγαλύτερο μέρος του έτους «πέφτει» σε λίγα ισχυρά επεισόδια. Η μετατόπιση προς πιο έντονες και συμπυκνωμένες καταιγίδες είναι σαφής και στα δύο σενάρια.

Μεταβολή αριθμού ημερών υψηλής βροχόπτωσης (RCP4.5)



Σχήμα 2.72: Χρονική εξέλιξη των μεταβολών του αριθμού ημερών υψηλής βροχόπτωσης σε σύγκριση με τη μέση τιμή της περιόδου 1971-2000, από δεδομένα κλιματικών προσομοιώσεων σύμφωνα με το σενάριο RCP4.5

Μεταβολή αριθμού ημερών υψηλής βροχόπτωσης (RCP8.5)



Σχήμα 2.73: Χρονική εξέλιξη των μεταβολών του αριθμού ημερών υψηλής βροχόπτωσης σε σύγκριση με τη μέση τιμή της περιόδου 1971-2000, από δεδομένα κλιματικών προσομοιώσεων σύμφωνα με το σενάριο RCP8.5

Βάσει των προβλέψεων, προκύπτει υδρολογική αβεβαιότητα με περισσότερες περιόδους χωρίς βροχή και σύντομες, αλλά μεγάλης έντασης βροχοπτώσεις. Αυξάνεται αισθητά ο πλημμυρικός κίνδυνος, όπως προκύπτει από την ήπια άνοδο των ημερών με βροχόπτωση άνω των 20 χιλιοστόμετρων (δείκτης R20mm), σε συνδυασμό με τη σταθερότητα του συνολικού ύψους βροχής (PRCPTOT), που σημαίνει μεγαλύτερες παροχές σε μικρότερα χρονικά παράθυρα, δηλαδή αυξημένη επιφανειακή απορροή, ειδικά σε αδιαπέραστες και χαμηλές παράκτιες ζώνες. Η πρόκληση της διαχείρισης των υδατικών αποθεμάτων μετατοπίζεται από την «ποσότητα» στη χρονική κατανομή – χρειάζονται λύσεις αποθήκευσης/καθυστέρησης απορροής (δεξαμενές ομβρίων, πράσινες υποδομές, διαπερατές επιφάνειες).

Συνολικά, η περιοχή δεν γίνεται «πιο υγρή» ή «πιο ξηρή» σε ετήσιο άθροισμα, αλλά καθίσταται πιο ασταθής. Αυτό το «νέο μοτίβο» –λίγες, αλλά πιο ισχυρές βροχές– είναι απολύτως συνεπές με τη μεσογειακή κλιματική μεταβολή[33] και ενισχύει την ανάγκη για σχεδιασμό αποστράγγισης με βάση αιχμιαίες εντάσεις, σε δίκτυα μικρο-απορροής, οδικά έργα, υπαίθριους χώρους και παράκτιες υποδομές.

[33] https://www.iemed.org/publication/climate-change-in-the-mediterranean-environmental-impacts-and-extreme-events/

[2.3] Αξιολόγηση ακραίων κλιματικών συνθηκών

Πέρα από τις μέσες μεταβολές των κλιματικών δεικτών, κρίσιμο στοιχείο για τον σχεδιασμό σε μια μεγάλη και ευάλωτη αστική περιοχή όπως η Αθήνα είναι η αξιολόγηση της πιθανότητας εμφάνισης ακραίων γεγονότων – ιδιαίτερα υψηλών θερμοκρασιών ή επεισοδίων ισχυρής βροχόπτωσης. Τα γεγονότα αυτά, παρότι σπάνια, έχουν δυσανάλογα μεγάλο αντίκτυπο στην υγεία, στις υποδομές, στην ενεργειακή κατανάλωση και στη λειτουργία της πόλης. Για τον σκοπό αυτό, χρησιμοποιήθηκε η Θεωρία Ακραίων Τιμών (Extreme Value Theory, EVT),[34] η οποία επιτρέπει την πρόγνωση του πόσο συχνά αναμένεται να υπερβεί ένα φαινόμενο (π.χ., θερμοκρασία ή βροχόπτωση) ένα συγκεκριμένο όριο στο μέλλον, με βάση τις ιστορικές παρατηρήσεις. Ουσιαστικά, η ανάλυση ακραίων τιμών βασίζεται στις υψηλότερες θερμοκρασίες και βροχοπτώσεις που έχουν καταγραφεί κάθε έτος και χρησιμοποιείται για να προβλεφθεί ποια ένταση ενός ακραίου φαινομένου (π.χ., καύσωνας ή έντονη βροχή) μπορεί ρεαλιστικά να αναμένεται να συμβεί σπάνια, όπως μία φορά ανά 10, 20 ή 50 χρόνια.

[34] Introduction to extreme value theory, Calendar Tech. Διαθέσιμο στο https://www.callendar.tech/en/post/introduction-to-extreme-value-theory (ανακτήθηκε στις 3 Φεβρουαρίου 2026).

Η ανάλυση βασίζεται στα διαθέσιμα ημερήσια δεδομένα της μέγιστης θερμοκρασίας και του ύψους βροχής και περιλαμβάνει τα ακόλουθα στάδια:

- Ανίχνευση των ετήσιων μέγιστων τιμών για κάθε μεταβλητή.
- Μοντελοποίηση αυτών των τιμών με τη Γενικευμένη Κατανομή Ακραίων Τιμών (Generalized Extreme Value, GEV), ώστε να περιγραφεί η στατιστική συμπεριφορά των ακραίων γεγονότων.
- Αξιολόγηση των παραμέτρων της κατανομής και έλεγχος της καλής προσαρμογής της στα δεδομένα.
- Υπολογισμός των τιμών επαναφοράς (return levels), δηλαδή των τιμών θερμοκρασίας και βροχόπτωσης που αναμένεται να ξεπεραστούν μία φορά ανά 10, 20 ή 50 έτη.

Η προσέγγιση αυτή συμπληρώνει τα αποτελέσματα των κλιματικών προσομοιώσεων, προσφέροντας μια ανεξάρτητη αξιολόγηση της επικινδυνότητας των ακραίων φαινομένων. Ενώ οι προσομοιώσεις καταγράφουν πώς μεταβάλλεται η μέση συμπεριφορά του κλίματος στον χρόνο, η EVT αποτυπώνει πώς μεταβάλλονται τα άκρα – δηλαδή τα γεγονότα που, παρότι σπάνια, είναι τα πιο καταστροφικά για την πόλη. Στους Πίνακες 2.3 ως 2.5 που ακολουθούν, παρουσιάζονται οι κατά προσέγγιση τιμές της μέγιστης ημερήσιας θερμοκρασίας και του ημερήσιου ύψους βρο- χής που είναι πιθανό να ξεπεραστούν τουλάχιστον μία φορά μέσα στις επόμενες δεκαετίες, για περιόδους επαναφοράς 10, 20 και 50 ετών.

Οι τιμές που παρουσιάζονται στους παρακάτω πίνακες δεν αποτελούν προβλέψεις για ένα συγκεκριμένο έτος, αλλά αξιολογήσεις της έντασης ακραίων φαινομένων που είναι πιθανό να εμφανιστούν σπάνια, αλλά επαναλαμβανόμενα στον χρόνο. Για παράδειγμα, μια «τιμή δεκαετίας» σημαίνει ότι ένα τέτοιο φαινόμενο μπορεί να συμβεί, κατά μέσο όρο, μία φορά κάθε 10 χρόνια, ενώ μια «τιμή πεντηκονταετίας» αντιστοιχεί σε πολύ σπάνια, αλλά εξόχως έντονα γεγονότα. Οι αξιολογήσεις αυτές χρησιμοποιούνται διεθνώς για τον σχεδιασμό υποδομών, την πολιτική προστασία και την προσαρμογή των πόλεων, καθώς αποτυπώνουν τα γεγονότα που, παρότι δεν συμβαίνουν συχνά, προκαλούν τις μεγαλύτερες επιπτώσεις.

Πίνακας 2.3: Αποτελέσματα της ανάλυσης ακραίων τιμών για τις παραμέτρους της ημερήσιας μέγιστης θερμοκρασίας και του ύψους βροχόπτωσης. ↓

ΑΘΗΝΑ	10 έτη	20 έτη	50έτη
Μέγιστη θερμοκρασία (°C)	41,4	42,2	43,1
Ύψος βροχής (mm)	63,7	73,7	86,8

Πίνακας 2.4: Αποτελέσματα της ανάλυσης ακραίων τιμών για τις παραμέτρους της ημερήσιας μέγιστης θερμοκρασίας και του ύψους βροχόπτωσης. ↓

Για την Αθήνα, οι αναμενόμενες μέγιστες θερμοκρασίες δείχνουν ότι στο μέλλον είναι πιθανό να εμφανίζονται ημέρες με θερμοκρασίες άνω των 41-43°C, ακόμη και αν αυτές δεν συμβαίνουν κάθε χρόνο. Τέτοιες θερμοκρασίες θεωρούνται κρίσιμες για τη λειτουργία της πόλης, καθώς αυξάνουν σημαντικά τη θερμική καταπόνηση των κατοίκων, τη ζήτηση για κλιματισμό και την πίεση στο ηλεκτρικό δίκτυο. Αντίστοιχα, τα πολύ υψηλά ημερήσια ύψη βροχής που προκύπτουν από την ανάλυση υποδηλώνουν ότι η Αθήνα μπορεί να αντιμετωπίσει επεισόδια έντονης βροχόπτωσης μέσα σε μία μόνο ημέρα, τα οποία είναι ικανά να προκαλέσουν πλημμυρικά φαινόμενα.

ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ	10 έτη	20 έτη	50έτη
Μέγιστη θερμοκρασία (°C)	39,5	40,5	41,6
Ύψος βροχής (mm)	56,4	62,3	69,3

Πίνακας 2.5: Αποτελέσματα της ανάλυσης ακραίων τιμών για τις παραμέτρους της ημερήσιας μέγιστης θερμοκρασίας και του ύψους βροχόπτωσης. ↓

Στη Θεσσαλονίκη, τα αποτελέσματα δείχνουν ότι ακραίες θερμές ημέρες με θερμοκρασίες γύρω στους 40-42°C προβλέπεται να εμφανίζονται περιοδικά στο μέλλον. Παρόλο που οι τιμές αυτές είναι χαμηλότερες από της Αθήνας, παραμένουν ιδιαίτερα υψηλές για την περιοχή. Παράλλη- λα, τα αναμενόμενα ύψη έντονης ημερήσιας βροχής υποδηλώνουν αυξημένο κίνδυνο τοπικών πλημμυρών, αν και χαμηλότερο αυτού της Αθήνας.

ΓΟΥΡΝΕΣ	10 έτη	20 έτη	50έτη
Μέγιστη θερμοκρασία (°C)	40,43	41,94	42,13
Ύψος βροχής (mm)	45,74	53,08	63,02

Για τις Γούρνες, τα αποτελέσματα δείχνουν ότι ακόμα και σε παράκτιες νησιωτικές περιοχές εί- ναι πιθανό να εμφανίζονται πολύ θερμές ημέρες, με θερμοκρασίες άνω των 42°C, γεγονός που επηρεάζει τη θερμική άνεση, την ενεργειακή κατανάλωση και τις ανάγκες ψύξης των κτιρίων. Παράλληλα, τα επεισόδια έντονης βροχόπτωσης που προκύπτουν από την ανάλυση δείχνουν ότι, παρόλο που αναμένεται να είναι μικρότερης έντασης σε σύγκριση με την Αθήνα και τη Θεσ- σαλονίκη, έχουν τη δυναμική για τοπικές πλημμύρες, ιδίως όταν η βροχή είναι συγκεντρωμένη σε μικρό χρονικό διάστημα.

[3.0] ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΉ ΦΎΣΙΟΓΝΩΜΙΑ ΚΑΙ ΚΛΙΜΑ – ΚΛΙΜΑΤΙΚΉ ΑΛΛΑΓΉ

Η κατανόηση των φυσικογεωγραφικών χαρακτηριστικών αποτελεί κρίσιμο βήμα για την αποτί- μηση του κλίματος και των μικροκλιματικών συνθηκών σε κάθε περιοχή μελέτης. Το ανάγλυφο, η κάλυψη γης, η παρουσία ή απουσία φυσικής βλάστησης, καθώς και η μορφή και πυκνότητα του δομημένου ιστού καθορίζουν σε μεγάλο βαθμό την έκθεση και την τρωτότητα σε κλιματικούς κινδύνους. Ωστόσο η φύση αυτών των κινδύνων δεν είναι ενιαία σε όλες τις περιοχές, καθώς εξαρτάται άμεσα από τα ποιοτικά και χωρικά χαρακτηριστικά του περιβάλλοντος.

Στις μη αστικές και περιαστικές περιοχές, το φυσικό υπόβαθρο συνδέεται συνήθως με ένα ευρύ φάσμα κλιματικών κινδύνων, όπως ξηρασία, δασικές πυρκαγιές, πλημμυρικά επεισόδια και καύ- σωνες. Η παρουσία γεωργικής γης, μεταβατικών φυσικών οικοσυστημάτων, χαμηλών υψομέ- τρων και παράκτιων ζωνών δημιουργεί πολλαπλές διαδρομές τρωτότητας, καθώς οι φυσικές διεργασίες και οι χρήσεις γης αλληλεπιδρούν άμεσα με τις μεταβολές του κλίματος. Σε τέτοια περιβάλλοντα απαιτείται ολοκληρωμένη θεώρηση πολλών ειδών κινδύνου, καθώς καθένας επη- ρεάζει με διαφορετικό τρόπο τη λειτουργία και την ανθεκτικότητα του τοπικού συστήματος.

Αντίθετα, στις αστικές περιοχές, όπως η Αθήνα και η Θεσσαλονίκη, το προφίλ τρωτότητας δια- φοροποιείται ουσιαστικά. Η υψηλή πυκνότητα δόμησης, η εκτεταμένη αδιαπερατότητα των επι- φανειών, η περιορισμένη διαθέσιμη βλάστηση και η απουσία συνεχών φυσικών οικοσυστημά- των μειώνουν την αναγκαιότητα ανάλυσης κινδύνων όπως η ξηρασία και η δασική πυρκαγιά, οι οποίοι δεν αντανακλούν τις πραγματικές συνθήκες έκθεσης στο κέντρο των πόλεων. Αντίστοιχα, ο πλημμυρικός κίνδυνος, παρότι υπαρκτός σε συγκεκριμένες αστικές ζώνες, αποτελεί σύνθετο φαινόμενο που εξαρτάται όχι μόνο από τα φυσικά χαρακτηριστικά αλλά και από πλήθος ανθρω- πογενών παραγόντων, όπως η κατάσταση του δικτύου ομβρίων, οι σημειακές αποφράξεις, οι μεταβολές στις απορροές από τοπικές παρεμβάσεις και η γενικότερη επάρκεια των υποδομών αποστράγγισης. Η αξιόπιστη αξιολόγησή του απαιτεί εξειδικευμένη υδρολογική και υδραυλική προσομοίωση υψηλής ανάλυσης – διαδικασία που δεν εμπίπτει στο αντικείμενο της παρούσας μελέτης.

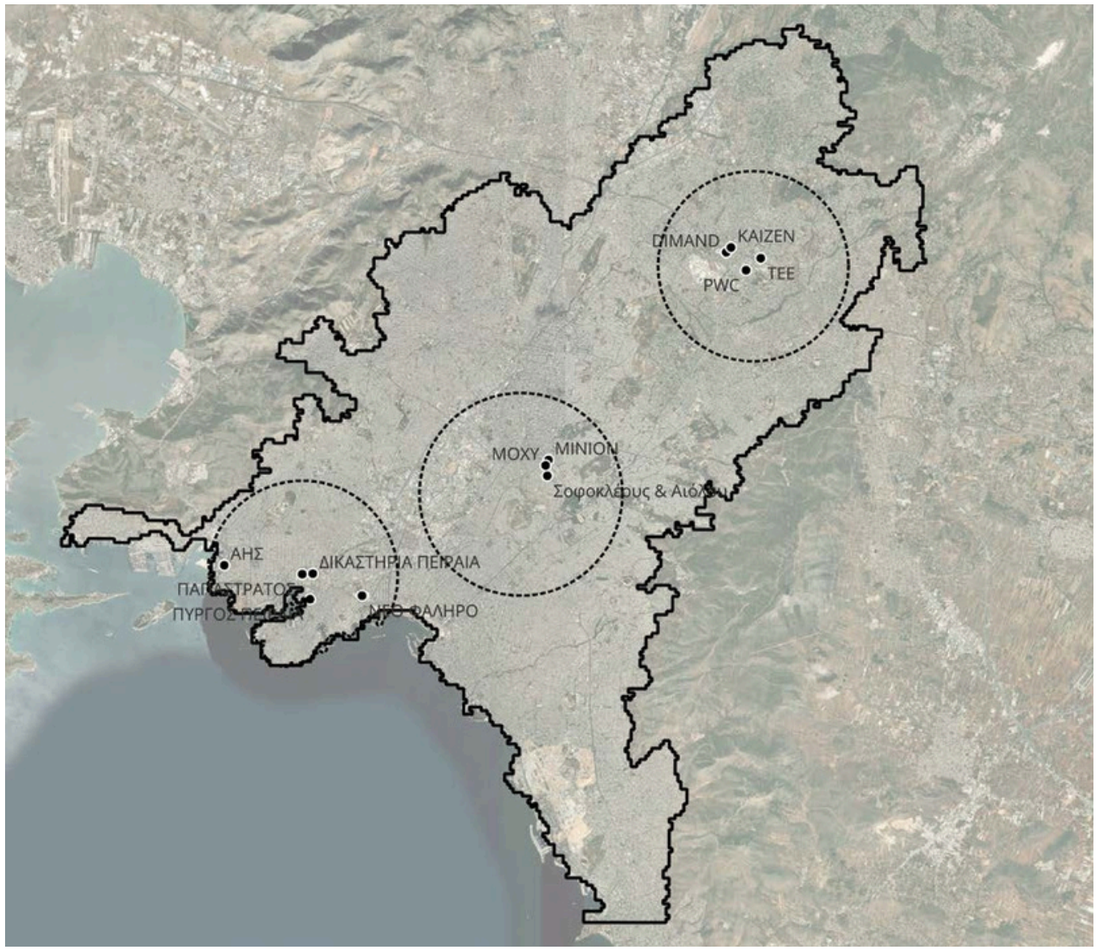
ΑΘΗΝΑ

Ύπό αυτό το πλαίσιο, ο θερμικός κίνδυνος αποτελεί τον κυρίαρχο και πλέον συναφή κλιματικό κίνδυνο για μητροπολιτικές περιοχές όπως η Αθήνα. Τα φυσικογεωγραφικά χαρακτηριστικά της περιοχής επηρεάζουν άμεσα τη χωρική κατανομή των θερμικών φορτίων, την ικανότητα αποβολής θερμότητας, την παραγωγή θερμικών νησίδων και τις συνθήκες θερμικής δυσφορίας. Το ανάγλυφο, η διάταξη του δομημένου ιστού, η θερμική αδράνεια των επιφανειών, η πυκνότητα της βλάστησης και η σχέση συμπαγών και ανοιχτών χώρων διαμορφώνουν τη βασική μικροκλιματική «υπογραφή» κάθε περιοχής.

Η παρούσα ενότητα εξετάζει αυτά ακριβώς τα στοιχεία: το γεωμορφολογικό υπόβαθρο, τη δομή των αστικών επιφανειών, τα πρότυπα κάλυψης/χρήσης γης και τις παραμέτρους που επηρεά- ζουν τη θερμική συμπεριφορά των πόλεων. Η ανάλυση αυτή αποτελεί το απαραίτητο υπόβαθρο για την επόμενη ενότητα, όπου αξιολογείται ο θερμικός κίνδυνος και χαρτογραφούνται οι θερμι- κά επιβαρυμένες περιοχές στο αστικό περιβάλλον.

Στην Εικόνα 3.1 παρουσιάζεται η περιοχή μελέτης, η οποία καλύπτει την ευρύτερη μητροπολιτική περιοχή των Αθηνών και περιλαμβάνει τις τρεις αστικές ενότητες ενδιαφέροντος: τον Πειραιά, το κεντρικό τμήμα της Αθήνας και το Μαρούσι. Η κλίμακα της περιοχής μελέτης επιλέχτηκε ώστε να αποτυπώνει τόσο τα χωρικά πρότυπα της μητροπολιτικής δομής όσο και τις διαφορο- ποιήσεις των φυσικογεωγραφικών και μικροκλιματικών χαρακτηριστικών μεταξύ των επιμέρους αστικών υποπεριοχών.

Εικόνα 3.1: Περιοχή μελέτης – μητροπολιτική Αθήνα και υποπεριοχές ανάλυσης ↓

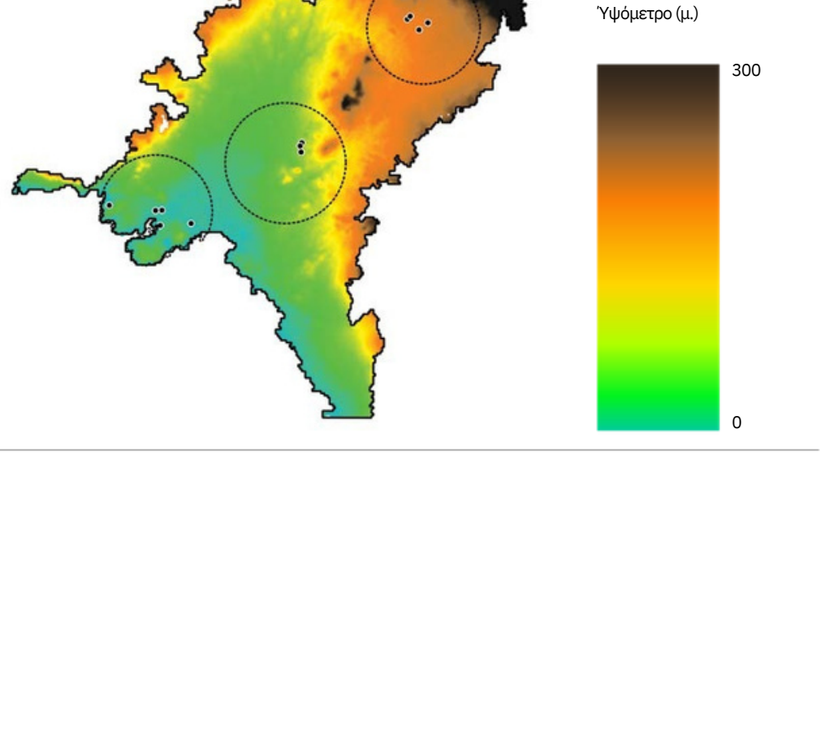


[3.1.1] Γεωμορφολογία και τοπογραφία

Στην Ενότητα 3.1 παρουσιάζονται δείκτες που αποτυπώνουν το φυσικό ανάγλυφο και τη γεωμετρία του αστικού καναλιού. Το ψηφιακό μοντέλο εδάφους (DEM) και η κλίση (slope, που εκφράζει τη μεταβολή του υψομέτρου σε σχέση με την οριζόντια απόσταση) περιγράφουν το φυσικό υπόβαθρο της πόλης και τις βασικές μορφολογικές ενότητες που επηρεάζουν τη ροή αέρα και τη συσσώρευση θερμότητας. Η γεωγραφική φυσιογνωμία της μητροπολιτικής Αθήνας καθορίζεται από έναν ιδιαίτερο συνδυασμό φυσικού ανάγλυφου και πυκνής, συχνά ανομοιόμορφης αστικής δόμησης. Παρότι το κέντρο της πόλης εμφανίζεται σχετικά ομοιογενές σε όρους υψομέτρου, το λεκανοπέδιο οριοθετείται από έντονους ορεινούς όγκους (Υμηττός, Πάρνηθα, Πεντέλη, Αιγά- λεω), που λειτουργούν ως φυσικά εμπόδια στη ροή αέρα και συμβάλλουν στη διαμόρφωση μικροκλιματικών διαφοροποιήσεων. Η συνδυαστική εξέταση του υψομέτρου, της κλίσης εδάφους και της γεωμετρίας του αστικού καναλιού αποτελεί βασική προϋπόθεση για την κατανόηση της θερμικής συμπεριφοράς του αστικού ιστού και για τη χαρτογράφηση συνθηκών αερισμού και εγκλωβισμού θερμότητας.

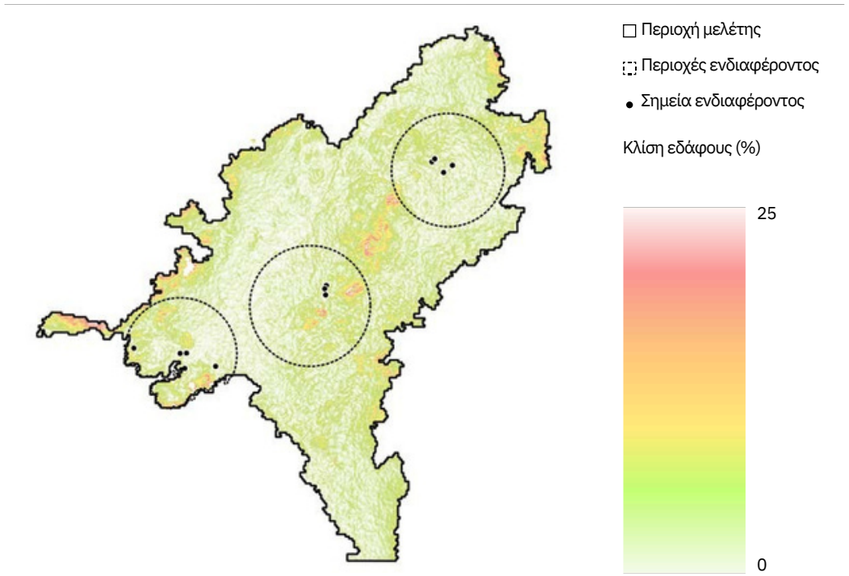
Το ψηφιακό μοντέλο εδάφους (Εικόνα 3.2) παρουσιάζει την ευρύτερη γεωμορφολογική δομή της περιοχής. Αποτελεί μια ψηφιακή αναπαράσταση του ανάγλυφου μιας περιοχής, όπου κάθε σημείο έχει μια τιμή υψομέτρου. Με βάση αυτό το αρχείο μπορούν να υπολογιστούν χαρακτη- ριστικά όπως η κλίση του εδάφους και η απορροή του νερού. Οι χαμηλές τιμές κυριαρχούν στο κεντρικό τμήμα της Αθήνας και στον Πειραιά, ενώ οι υψηλές τιμές εντοπίζονται περιμετρικά, στα ορεινά μέτωπα που περιβάλλουν το λεκανοπέδιο. Αυτή η μορφολογία, με τη χαρακτηριστική «λεκάνη» στο κέντρο, επηρεάζει σημαντικά τη μικροκλιματική κυκλοφορία και τη δυνατότητα απομάκρυνσης θερμικών φορτίων από την πόλη.

→
Εικόνα 3.2: Ψηφιακό μοντέλο εδάφους Αθήνας



Η χωρική μεταβολή της κλίσης αποκαλύπτει τις περιοχές όπου το έδαφος παρουσιάζει απότο- μες μεταβολές υψομέτρου. Παρά την επικράτηση ήπιων κλίσεων στο κεντρικό τμήμα της πόλης, εκτεταμένες ζώνες με μέτριες ή υψηλές τιμές παρατηρούνται σε περιοχές όπου η δόμηση ανα- πτύσσεται σε πρανή (Πειραιάς, Άνω Κυψέλη, Παγκράτι-Μετς, βόρεια προάστια). Η κλίση επηρε- άζει τη ροή αέρα, τη δυνατότητα αποστράγγισης θερμότητας κατά τη νύχτα και τη διαμόρφωση τοπικών μικροκλιματικών θυλάκων.

→
Εικόνα 3.3: Κλίση επιφάνειας Αθήνας



Η συνδυαστική θεώρηση υψομέτρου και κλίσης δείχνει ότι το λεκανοπέδιο λειτουργεί ως κλειστό φυσικό σύστημα, με περιορισμένες χαράξεις φυσικού αερισμού και έντονες διαφοροποιήσεις στη μικροκλιματική συμπεριφορά μεταξύ του κεντρικού πυρήνα και των περιμετρικών ορεινών όγκων. Τα στοιχεία αυτά αποτελούν το φυσικό υπόβαθρο για τις επόμενες ενότητες, οι οποίες εξετάζουν τη δομή της δόμησης (3.3), τη βλάστηση (3.4) και τη θερμική απόκριση του αστικού υποβάθρου (3.5).

[3.1.1.1]

Κάλυψη και χρήσεις γης

Η κάλυψη και οι χρήσεις γης αποτελούν βασική παράμετρο της γεωγραφικής φυσιογνωμίας μιας πόλης, καθορίζοντας τη δομή του αστικού ιστού, τον βαθμό σφράγισης του εδάφους και την παρουσία ή απουσία φυσικών επιφανειών. Η μητροπολιτική περιοχή της Αθήνας παρουσι- άζει υψηλή επικράτηση δομημένων επιφανειών, με περιορισμένα συνεχόμενα τμήματα αστικής βλάστησης και εμφανή διάκριση μεταξύ των παλαιότερων, πυκνοδομημένων ζωνών και των νε- ότερων αναπτύξεων στα βόρεια και ανατολικά προάστια.

Για την αποτύπωση της χωρικής κατανομής των χρήσεων γης χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομέ- να του Urban Atlas του προγράμματος Copernicus Land Monitoring Service της Ευρωπαϊκής Ενωσης, τα οποία προσφέρουν υψηλή θεματική ακρίβεια και λεπτομερή κατηγοριοποίηση του αστικού ιστού. Η ταξινόμηση των χρήσεων γης βασίζεται στο επίσημο σύστημα ονοματολογίας του Urban Atlas, το οποίο διακρίνει με σαφήνεια τις επιμέρους κατηγορίες αστικού δομημένου χώρου, υποδομών, αστικού πρασίνου, αγροτικών και φυσικών εκτάσεων. Στον Πίνακα 3.1 πα- ρουσιάζεται αναλυτικά η χρησιμοποιούμενη ονοματολογία.

→
Πίνακας 3.1: Κατηγορίες χρήσεων γης και κωδικοί ταξινόμησης Urban Atlas

Κατηγορία	Ονομασία
11100	Συνεχές αστικό δομημένο περιβάλλον (>80% στεγανές επιφάνειες)
11210	Ασυνεχές πυκνό αστικό δομημένο περιβάλλον (50-80%)
11220	Ασυνεχές μέσης πυκνότητας αστικό δομημένο περιβάλλον (30-50%)
11230	Ασυνεχές χαμηλής πυκνότητας αστικό δομημένο περιβάλλον (10-30%)
11240	Ασυνεχές πολύ χαμηλής πυκνότητας αστικό δομημένο περιβάλλον (<10%)
11300	Μεμονωμένες κατασκευές
12100	Βιομηχανικές, εμπορικές, δημόσιες, στρατιωτικές και ιδιωτικές εγκαταστάσεις
12210	Αυτοκινητόδρομοι και συναφείς εκτάσεις
12220	Λοιποί οδικοί άξονες και συναφείς εκτάσεις
12230	Σιδηροδρομικές υποδομές και συναφείς εκτάσεις
12300	Λιμενικές ζώνες
12400	Αεροδρόμια
13100	Χώροι εξόρυξης και αποθέσεων
13300	Εργοτάξια
13400	Εκτάσεις χωρίς τρέχουσα χρήση
14100	Αστικοί χώροι πρασίνου
14200	Αθλητικές και ψυχαγωγικές εγκαταστάσεις

21000	Αρόσιμες καλλιέργειες
22000	Μόνιμες καλλιέργειες
23000	Βοσκότοποι
24000	Σύνθετα και μεικτά αγροτικά συστήματα
25000	Δενδρώνες στα όρια αστικών περιοχών
31000	Δάση
32000	Φυσικοί χορτολιβαδικοί σχηματισμοί
33000	Ανοιχτές εκτάσεις με ελάχιστη ή μηδενική βλάστηση
40000	Ύγρότοποι
50000	Ύδάτινες επιφάνειες

Η ευρύτερη περιοχή μελέτης χαρακτηρίζεται από:

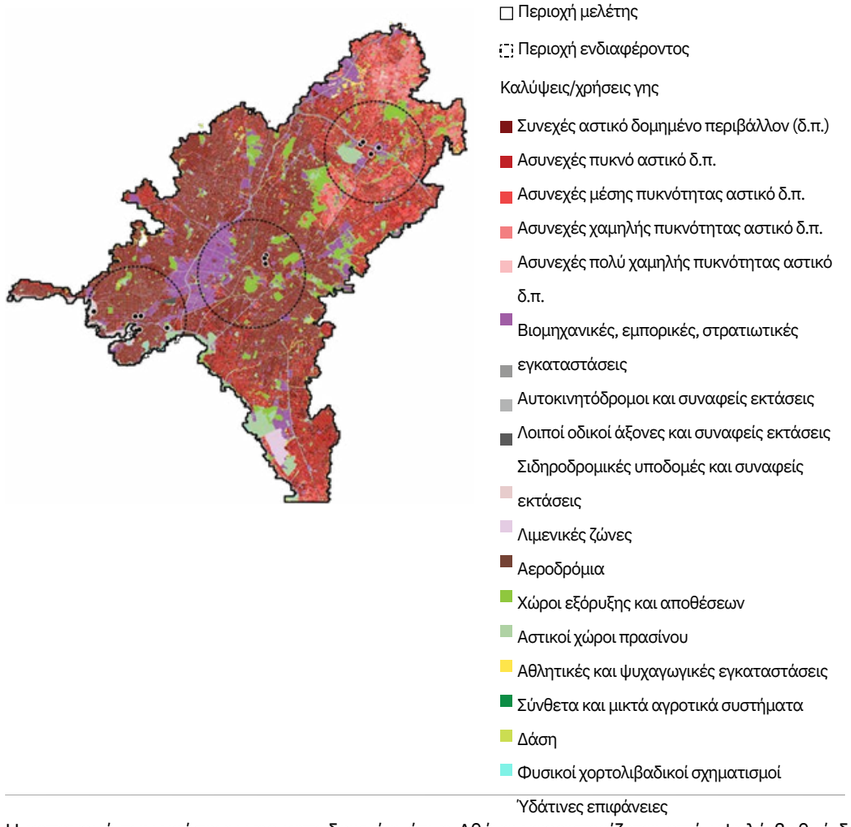
1. Ύψηλή πυκνότητα δομημένου ιστού (Continuous και Discontinuous Urban Fabric). Οι κατηγορίες 11100 (Continuous Urban Fabric) και 112xx (Discontinuous Urban Fabric) κυριαρχούν στο μεγαλύτερο μέρος του λεκανοπεδίου, αποτυπώνοντας τον έντονα αστικοποιημένο χαρακτήρα της περιοχής. Το κέντρο της Αθήνας, ο Πειραιάς και μεγάλα τμήματα του νότιου και δυτικού τομέα εμφανίζουν υψηλή συνεκτικότητα δόμησης, με ελάχιστα διαλείμματα πρασίνου ή μη δομημένων επιφανειών.
2. Περιορισμένη παρουσία αστικού πρασίνου. Οι κατηγορίες 14100 (Green Urban Areas) και οι εκτάσεις αστικού πρασίνου κατέχουν σχετικά μικρό ποσοστό της συνολικής επιφάνειας. Τα μεγαλύτερα συνεχόμενα τμήματα πρασίνου εντοπίζονται στον Λόφο Φιλοπάππου, στον Εθνικό Κήπο, στο Πεδίον του Αρεως και σε τμήματα των βόρειων προαστίων. Η ανομοιόμορφη κατανομή τους επηρεάζει αισθητά τη θερμική συμπεριφορά της περιοχής.
3. Εκτεταμένες ζώνες μεταφορών και εμπορικών/διοικητικών χρήσεων. Οι χρήσεις μεταφορών (κωδ. 122xx, 124xx) και οι εμπορικές-διοικητικές περιοχές (121xx) σχηματίζουν γραμμικά ή διάσπαρτα μοτίβα κατά μήκος των βασικών οδικών αξόνων και των κεντρικών λειτουργικών πόλων. Τα τμήματα αυτά είναι συνήθως υψηλής αδιαπερατότητας και χαμηλής θερμικής ανακούφισης.
4. Βιομηχανικές και λιμενικές ζώνες. Οι κατηγορίες 12100-12200 εντοπίζονται κυρίως:

    - στον Πειραιά (λιμενικές εγκαταστάσεις),
    - στο δυτικό τμήμα της Αθήνας (βιομηχανικές περιοχές),
    - και σε επιμέρους θύλακες στα βόρεια.

Οι περιοχές αυτές χαρακτηρίζονται από εκτεταμένες σκληρές επιφάνειες, ελάχιστη βλάστηση και υψηλή θερμική αδράνεια. Ειδικότερα στις τρεις περιοχές ενδιαφέροντος, ο Πειραιάς παρουσιά- ζει υψηλή συνεκτικότητα δόμησης, σημαντικό μερίδιο λιμενικών εγκαταστάσεων και περιορισμέ- νες πράσινες επιφάνειες. Η κατανομή των χρήσεων γης αντικατοπτρίζει ένα αστικό περιβάλλον με έντονη λειτουργική φόρτιση και ελάχιστες δυνατότητες φυσικού δροσισμού.

Το κέντρο της Αθήνας αποτελεί την περιοχή με τη μεγαλύτερη πυκνότητα δομημένου ιστού και τη μικρότερη αναλογία αστικού πρασίνου ανά κάτοικο. Οι εμπορικές, διοικητικές και τουριστικές χρήσεις συνυπάρχουν σε έναν εξαιρετικά πυκνό και πολυλειτουργικό ιστό, με υψηλά ποσοστά αδιαπερατότητας και περιορισμένο φυσικό υπόβαθρο. Η περιοχή του Αμαρουσίου προς τα βό- ρεια της Αθήνας παρουσιάζει μεικτό χαρακτήρα, με πυκνές διοικητικές-εμπορικές χρήσεις γύρω από τους μεγάλους άξονες αλλά και μεγαλύτερη παρουσία πρασίνου σε σχέση με το κέντρο της Αθήνας και τον Πειραιά. Η κατανομή των χρήσεων γης αντανακλά την ύπαρξη νεότερων αναπτύ- ξεων και λιγότερο συμπαγούς δόμησης.

→
Εικόνα 3.4: Χρήσεις και κάλυψη γης Αθήνας (Urban Atlas)



Η κατανομή των χρήσεων γης καταδεικνύει ότι η Αθήνα χαρακτηρίζεται από υψηλό βαθμό δό- μησης, σημαντική εδαφική αδιαπερατότητα και περιορισμένη παρουσία αστικού πρασίνου, ιδι- αίτερα στα ιστορικά και κεντρικά τμήματα. Οι διαφοροποιήσεις αυτές επηρεάζουν καθοριστικά τη θερμική συμπεριφορά της πόλης και λειτουργούν ως κρίσιμη είσοδος για τις ενότητες που εξετάζουν τη μορφολογία της δόμησης (3.3), τη βλάστηση (3.4) και τη μικροκλιματική έκφραση του αστικού περιβάλλοντος (3.5).

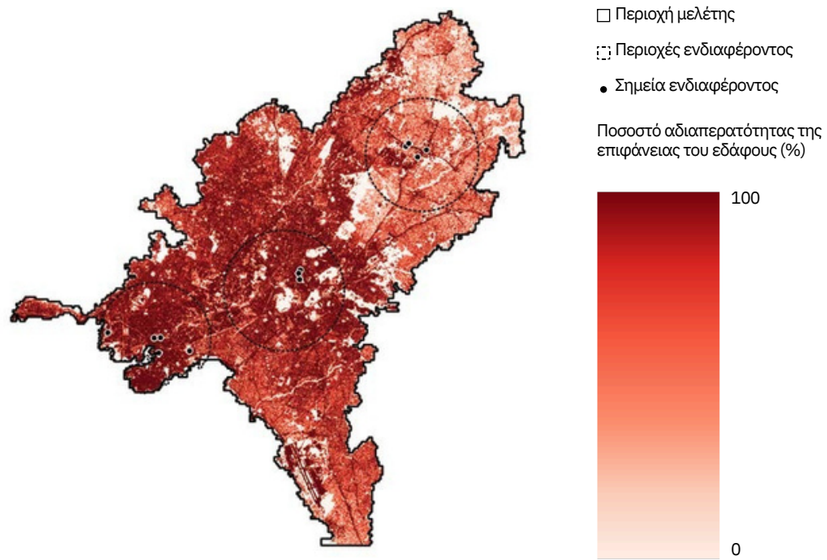
[3.1.1.2]

Χαρακτηριστικά δόμησης

Η μορφολογία του αστικού ιστού, η αδιαπερατότητα του εδάφους και η γεωμετρία των οικοδομικών τετραγώνων αποτελούν θεμελιώδεις παράγοντες για τη διαμόρφωση των μικροκλιματικών συνθηκών στις πόλεις. Οι παράμετροι αυτές επηρεάζουν τη χωρική κατανομή του θερμικού φορτίου, την ικανότητα αερισμού, τη σκίαση και τη θερμική αδράνεια του δομημένου περιβάλλοντος. Στην παρούσα υποενότητα εξετάζονται τρεις κρίσιμοι μορφολογικοί δείκτες: η αδιαπερατότητα επιφανειών (Imperviousness Density, IMD), το ύψος των κτιρίων και ο λόγος ύψους/πλάτους δρόμου (Height-to-Width ratio ή H/W), οι οποίοι αποτυπώνουν τη δομή του αστικού υποβά- θρου.

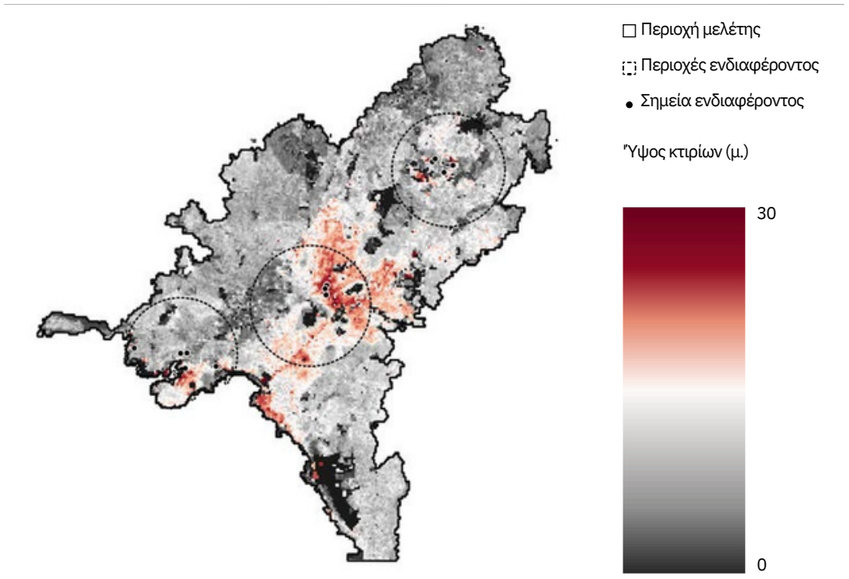
Ο δείκτης IMD αποτυπώνει το ποσοστό των επιφανειών που καλύπτονται από αδιαπέραστα υλικά, όπως άσφαλτο, σκυρόδεμα, πλακοστρώσεις και συμπαγείς κατασκευές. Τιμές κοντά στο 100% αντιστοιχούν σε πλήρως σκληρές επιφάνειες, ενώ χαμηλές τιμές αντανακλούν περιοχές με περισσότερες φυσικές ή ημιδιαπερατές επιφάνειες. Στη μητροπολιτική περιοχή της Αθήνας, πολύ υψηλές τιμές IMD παρατηρούνται στο κέντρο της πόλης, στον Πειραιά και σε κύριους εμπορικούς/διοικητικούς άξονες. Αντιθέτως, χαμηλότερες τιμές εμφανίζονται στα βόρεια και ανατολικά προάστια, όπου η παρουσία πρασίνου είναι μεγαλύτερη και η αστική μορφή λιγότερο συμπαγής. Η αδιαπερατότητα αποτελεί ισχυρό προγνωστικό δείκτη θερμικής επιβάρυνσης, καθώς περιορί- ζει την εξατμισοδιαπνοή και ενισχύει την αποθήκευση θερμότητας.

→
Εικόνα 3.5: Ποσοστό αδιαπερατότητας επιφανειών Αθήνας (IMD)



Το ύψος των κτιρίων αποτελεί βασική παράμετρο της αστικής μορφολογίας και επηρεάζει τη σκίαση, τη θερμική αποθήκευση και τη συμπεριφορά του αστικού καναλιού. Περιοχές με αυξημένα ύψη (κέντρο Αθήνας, Πειραιάς, επιλεγμένες ζώνες στο Μαρούσι) παρουσιάζουν μεγαλύτε- ρη θερμική αδράνεια και εντονότερες διαφοροποιήσεις μεταξύ ημερήσιων και νυχτερινών θερμοκρασιών. Αντίθετα, περιοχές χαμηλότερης δόμησης χαρακτηρίζονται από πιο ομοιόμορφη θερμική συμπεριφορά και αυξημένες δυνατότητες αερισμού.

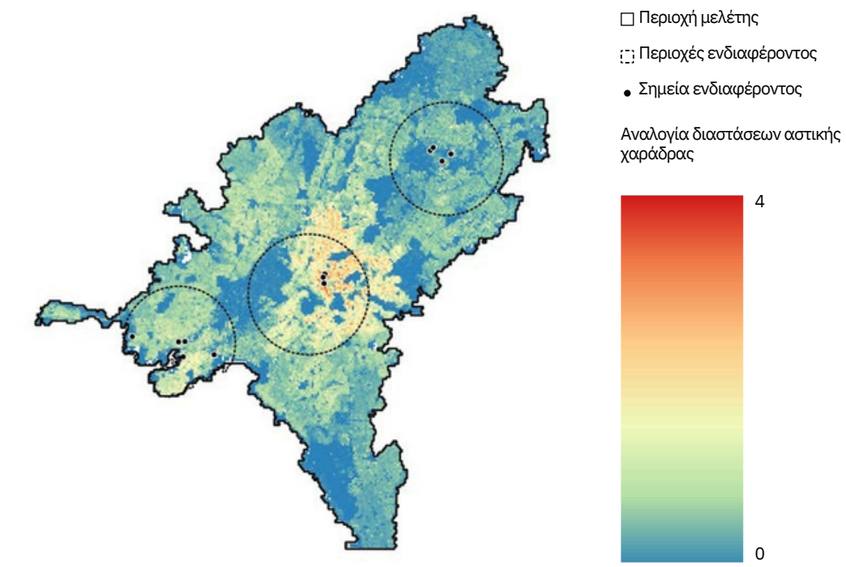
→
Εικόνα 3.6: Ύψος κτιρίων Αθήνας (μ.)



Ο δείκτης H/W περιγράφει τον βαθμό «κλεισίματος» του αστικού καναλιού από τα παρακείμενα κτίρια και αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους δείκτες μικροκλιματικής συμπεριφοράς. Ύψηλές τιμές H/W (>1,0) υποδηλώνουν στενές αστικές χαράδρες, όπου ο αερισμός είναι περιορισμένος, η αποβολή θερμότητας καθυστερεί και η νυχτερινή θερμοκρασία παραμένει αυξημένη. Πολύ υψηλές τιμές (>2,0) χαρακτηρίζουν βαθιές χαράδρες, με έντονο εγκλωβισμό θερμικού φορτίου.

Στην Αθήνα, υψηλές τιμές εντοπίζονται στο ιστορικό Κέντρο, σε τμήματα του Πειραιά και σε πυκνοδομημένες περιοχές στα δυτικά και νότια τμήματα του λεκανοπεδίου. Αντίθετα, χαμηλές τιμές H/W χαρακτηρίζουν τα βόρεια προάστια και περιοχές με μεγαλύτερο πλάτος οδών ή λιγότερο συμπαγή δόμηση.

→
Εικόνα 3.7: Λόγος ύψους/πλάτους δρόμου Αθήνας H/W



Η ανάλυση των μορφολογικών και δομικών χαρακτηριστικών του αστικού ιστού αναδεικνύει μια περιοχή με ιδιαίτερα υψηλή αδιαπερατότητα, σημαντικές διαφοροποιήσεις στο ύψος των κτι- ρίων και εκτεταμένες ζώνες υψηλού H/W, που περιορίζουν τον φυσικό αερισμό. Οι συνθήκες αυτές συνθέτουν ένα περιβάλλον με υψηλή θερμική αδράνεια και έντονη ικανότητα εγκλωβισμού θερμότητας, στοιχεία που εξηγούν σε μεγάλο βαθμό τη χωρική διακύμανση της επιφανειακής θερμοκρασίας (LST) που παρουσιάζεται στην Ενότητα 3.5. Τα ευρήματα αποτελούν κρίσιμη είσο- δο για την αξιολόγηση της τρωτότητας και του θερμικού κινδύνου στο Κεφάλαιο 4.

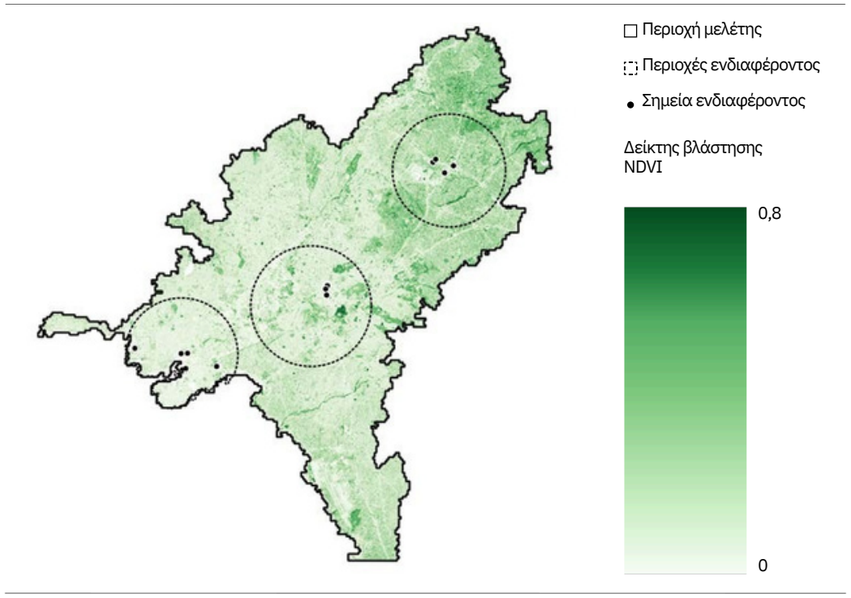
[3.1.1.3]

Βλάστηση και φυσικά στοιχεία

Η παρουσία και η κατανομή της βλάστησης αποτελούν κρίσιμους παράγοντες στη διαμόρφωση των μικροκλιματικών συνθηκών, επηρεάζοντας την εξατμισοδιαπνοή, τη σκίαση και τη θερμική άνεση στον αστικό χώρο. Η βλάστηση λειτουργεί ως βασικός μηχανισμός θερμικής ανακούφι- σης, μειώνοντας την επιφανειακή και την ατμοσφαιρική θερμοκρασία μέσω φυσικών διαδικασι- ών, γι' αυτό και η χωρική της ανάλυση αποτελεί αναγκαίο στοιχείο στην αξιολόγηση του αστικού θερμικού περιβάλλοντος.

Για την αποτύπωση της χωρικής κατανομής της βλάστησης στη μητροπολιτική περιοχή της Αθήνας χρησιμοποιήθηκε ο δείκτης βλάστησης NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), υπολογισμένος από δορυφορικές εικόνες του δορυφόρου Sentinel-2 για τη θερινή περίοδο του 2025 (Εικόνα 3.8). Ο δείκτης NDVI αποδίδει την ένταση της φωτοσυνθετικά ενεργής βλάστησης, με τιμές κοντά στο 0 να υποδηλώνουν απουσία ή πολύ περιορισμένη βλάστηση και τιμές προς το 1 να αντιπροσωπεύουν πυκνή, υγιή φυτοκάλυψη. Η κατανομή του δείκτη NDVI αναδεικνύει έντο- νες διαφοροποιήσεις μεταξύ του κεντρικού και του περιφερειακού τμήματος του λεκανοπεδίου. Οι χαμηλές τιμές NDVI στο κέντρο της Αθήνας, και ιδιαίτερα στον Πειραιά, καταδεικνύουν πε- ριοχές με ελάχιστη βλάστηση, υψηλή πυκνότητα δόμησης και αυξημένη αναλογία αδιαπέρατων επιφανειών. Η απουσία συνεχόμενων πράσινων στοιχείων συμβάλλει στην εκδήλωση εντονότε- ρης θερμικής επιβάρυνσης. Στα βόρεια και ανατολικά προάστια εμφανίζονται σαφώς υψηλότε- ρες τιμές NDVI, ιδίως γύρω από περιοχές με μεγαλύτερο ποσοστό δενδροκάλυψης ή κοντά σε ημιορεινές ζώνες. Οι περιοχές αυτές παρουσιάζουν αυξημένη ικανότητα φυσικού δροσισμού. Πάρκα, άλση και δενδροστοιχίες αποτυπώνονται καθαρά ως τοπικές υψηλές τιμές NDVI μέσα σε έναν, κατά τα άλλα, συμπαγώς δομημένο ιστό.

Η ανομοιογενής αυτή κατανομή αποτελεί καθοριστικό υπόβαθρο για την ερμηνεία της χωρικής διαφοροποίησης της επιφανειακής θερμοκρασίας (LST) που παρουσιάζεται στην Ενότητα 3.5.



→ Εικόνα 3.8: Δείκτης βλάστησης NDVI Αθήνας. Οι χαμηλές τιμές (ανοιχτές αποχρώσεις) υποδηλώνουν περιοχές περιορισμένης ή ανύπαρκτης βλάστησης, ενώ οι υψηλές τιμές (πράσινες αποχρώσεις) αποδίδουν πυκνή, ενεργή φυτοκάλυψη, που συμβάλλει στη φυσική ψύξη του αστικού περιβάλλοντος.

[3.1.1.4]

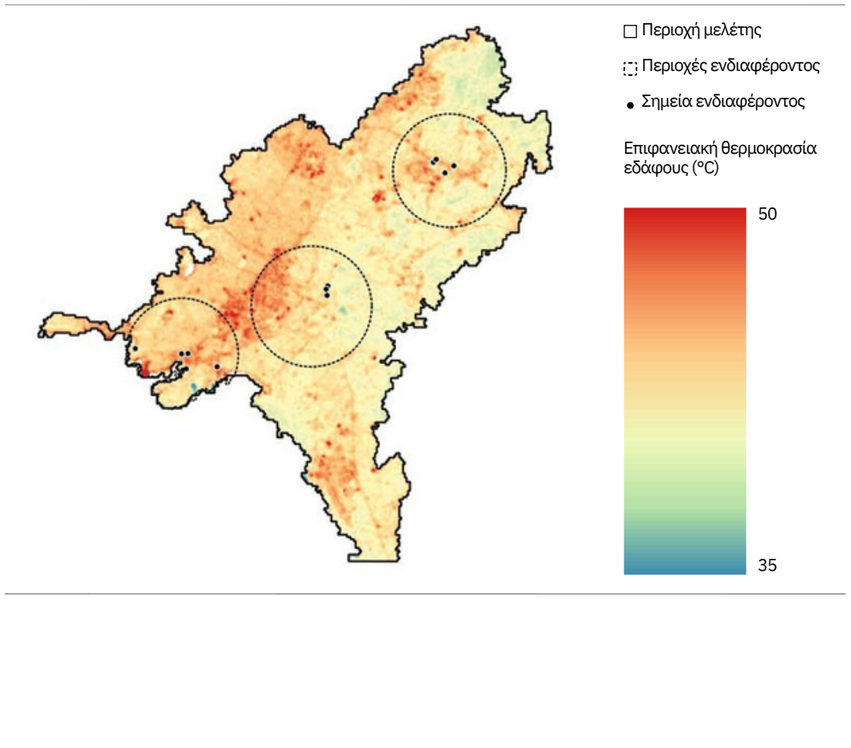
Επιφανειακή θερμοκρασία εδάφους (LST) και θερμική απόκριση του αστικού περιβάλλοντος

Η επιφανειακή θερμοκρασία εδάφους (LST) αποτελεί έναν από τους πιο ισχυρούς δείκτες θερ- μικής κατάστασης σε αστικά περιβάλλοντα, αποτυπώνοντας την ποσότητα θερμικής ενέργειας που αποθηκεύεται και επανεκπέμπεται από τις επιφάνειες. Η LST αντανακλά τη συνδυασμένη επίδραση του μικροκλίματος, της μορφής του αστικού ιστού, της βλάστησης και των υλικών επιφανείας, παρέχοντας μια ολοκληρωμένη εικόνα της χωρικής διαφοροποίησης του θερμικού φορτίου. Επισημαίνεται ότι η LST αποτελεί διαφορετική φυσική παράμετρο από τη θερμοκρασία του αέρα, την οποία αντιλαμβάνεται άμεσα ο άνθρωπος. Η LST αποτυπώνει τη θερμική κατάστα- ση των επιφανειών και όχι του ατμοσφαιρικού στρώματος στο ύψος αναφοράς (2 μέτρα). Παρότι οι δύο παράμετροι συνδέονται, η LST χρησιμοποιείται στη συγκεκριμένη ανάλυση ως δείκτης θερμικού φορτίου του αστικού υποβάθρου και όχι ως υποκατάστατο της θερμοκρασίας αέρα.

Για την παρούσα ανάλυση χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα LST από καλοκαιρινές δορυφορικές πα- ρατηρήσεις του 2025, ώστε να αποτυπωθούν οι θερμότερες συνθήκες και τα έντονα θερμικά μοτίβα του λεκανοπεδίου. Η χαρτογράφηση της LST (Εικόνα 3.9) αναδεικνύει καθαρά και επα- ναλαμβανόμενα μοτίβα θερμικών "hotspots" που σχετίζονται με συγκεκριμένα μορφολογικά και λειτουργικά χαρακτηριστικά της πόλης. Οι υψηλότερες τιμές LST καταγράφονται στο ιστορικό κέντρο της Αθήνας, στο εμπορικό τρίγωνο, στη γύρω περιοχή Ομονοίας-Σταδίου-Αθηνάς, κα- θώς και σε τμήματα του Πειραιά. Οι περιοχές αυτές χαρακτηρίζονται από:

- υψηλή αδιαπερατότητα (IMD κοντά στο 100%)
- πολύ χαμηλή βλάστηση (χαμηλός NDVI)
- στενές αστικές χαράδρες με υψηλές τιμές H/W
- μεγάλα ύψη κτιρίων, που ενισχύουν τον εγκλωβισμό θερμότητας
- συνεχές, πυκνά δομημένο περιβάλλον (Urban Atlas 11100-112xx)

Ο συνδυασμός αυτών των παραμέτρων εξηγεί την έντονη θερμική επιβάρυνση, ιδίως κατά τις απογευματινές και βραδινές ώρες.



→ Εικόνα 3.9: Επιφανειακή θερμοκρασία εδάφους (ΕΘΕ) Αθήνας. Οι υψηλές τιμές (κόκκινες αποχρώσεις) αποτυπώνουν θερμικά "hotspots" με αυξημένη αδιαπερατότητα και περιορισμένη βλάστηση, ενώ οι χαμηλότερες τιμές (μπλε-πράσινες αποχρώσεις) αντιστοιχούν σε πιο φυσικές περιοχές.

Ύψηλές τιμές ΕΘΕ, όπως είναι αναμενόμενο, εντοπίζονται, επίσης, στις λιμενικές εγκαταστάσεις του Πειραιά, σε βιομηχανικές περιοχές των δυτικών δήμων και κατά μήκος μεγάλων οδικών αξόνων και κόμβων. Οι επιφάνειες αυτές διαθέτουν σκληρά υλικά υψηλής θερμικής αδράνειας και ελάχιστη βλάστηση, γεγονός που οδηγεί σε σημαντική θέρμανση ακόμα και κατά τη διάρκεια της νύχτας.

Αντίθετα, χαμηλότερες τιμές LST καταγράφονται στα βόρεια προάστια, στις ημιορεινές ζώνες της Πεντέλης και του Ύμηττού και σε περιοχές με μεγαλύτερη φυτοκάλυψη (υψηλός NDVI). Σε αυτές τις περιοχές, η συνύπαρξη φυσικής βλάστησης, χαμηλότερης αδιαπερατότητας και πιο ανοιχτής αστικής γεωμετρίας οδηγεί σε αποτελεσματικότερη θερμική αποφόρτιση.

Η χωρική διαφοροποίηση της LST στην περιοχή της Αθήνας προκύπτει από τη συνεπίδραση των παραγόντων που εξετάζονται στις Ενότητες 3.1-3.4:

- Η μορφολογία του εδάφους (DEM, slope) επηρεάζει τις ροές αέρα και τη δυνατότητα θερμικής αποφόρτισης.
- Η κάλυψη και οι χρήσεις γης (Urban Atlas) καθορίζουν τη λειτουργική και υλική ταυτότητα του αστικού ιστού (π.χ., εμπορικές-βιομηχανικές ζώνες με υψηλό θερμικό αποτύπωμα).
- Η μορφή και η πυκνότητα της δόμησης και η αδιαπερατότητα (IMD, Building Height, H/W) ελέγχουν την αποθήκευση θερμικής ενέργειας, την αεροδυναμική συμπεριφορά των δρόμων και τον βαθμό εγκλωβισμού θερμότητας.
- Η βλάστηση (NDVI) αποτελεί τον ισχυρότερο φυσικό μηχανισμό ψύξης – και η χαμηλή της παρουσία εξηγεί τα τοπικά θερμικά “hotspots”.

Η ΕΘΕ λειτουργεί, επομένως, ως καθολικός δείκτης που συνδυάζει τις επιμέρους παραμέτρους και αποτυπώνει την τελική θερμική κατάσταση του αστικού περιβάλλοντος.

ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ

Ο αστικός ιστός της Θεσσαλονίκης απλώνεται στο βορειοδυτικό άκρο του Θερμαϊκού Κόλπου και αναπτύσσεται ακτινικά προς τις παρυφές του Χορτιάτη, σχηματίζοντας ένα σύστημα με έντονες υψομετρικές διαφορές, περιορισμένες ανοιχτές επιφάνειες και υψηλό βαθμό αδιαπερατότητας. Αυτό το μείγμα παράκτιου/πεδινού περιβάλλοντος στα δυτικά και ημιορεινού ανάγλυφου στα ανατολικά διαμορφώνει ένα πολύπλοκο μικροκλίμα, στο οποίο οι θερμικές αντιθέσεις είναι εντονότερες σε σχέση με άλλες πόλεις της χώρας.

Η πόλη χαρακτηρίζεται από υψηλή συγκέντρωση ανθρωπογενών δραστηριοτήτων, έντονη κυκλοφορία, περιορισμένο ποσοστό αστικού πρασίνου και σημαντικές μεταβολές στη χρήση γης κατά τις τελευταίες δεκαετίες. Αυτά τα στοιχεία συνδυάζονται με τις κλιματικές πιέσεις της Ανατολικής Μεσογείου –αυξανόμενες θερμοκρασίες, συχνότερα θερμικά επεισόδια, μεταβαλλόμενο υδρολογικό καθεστώς– και ενισχύουν την ευπάθεια του πολεοδομικού συγκροτήματος σε κινδύνους σχετιζόμενους με τη θερμότητα.

Η κατανόηση της γεωγραφικής και κλιματικής φυσιογνωμίας της Θεσσαλονίκης αποτελεί κρίσι- μη προϋπόθεση για την αξιολόγηση της θερμικής διακινδύνευσης, καθώς το τοπικό μικροκλίμα επηρεάζεται αποφασιστικά από το αστικό ανάγλυφο και την κλιμάκωση των κλίσεων, τη σχέση πόλης-θάλασσας και τις θαλάσσιες/χερσαίες αύρες, τον βαθμό αστικοποίησης και την κατανο- μή αδιαπέραστων επιφανειών, την παρουσία φυσικών περιοχών όπως το περιαστικό δάσος Σέιχ Σου, τις χωρικές διακυμάνσεις της βλάστησης και της υγρασίας και την έντονη διαφοροποίηση της επιφανειακής θερμοκρασίας (LST) ανά γειτονιά.

Στην παρούσα ενότητα εξετάζονται:

- Τα βασικά μορφολογικά χαρακτηριστικά της πόλης, συμπεριλαμβανομένου του ανάγλυφου, των υψομετρικών διαφορών, των κλίσεων και των φυσικών γεωγραφικών ορίων.
- Τα φυσικογεωγραφικά δεδομένα, όπως κάλυψη/χρήση γης, τύποι βλάστησης, πυκνότητα αδιαπέραστων επιφανειών και κατανομή πρασίνου.
- Δορυφορικά δεδομένα βλάστησης (NDVI) και άλλων παραμέτρων που σχετίζονται με την ποιότητα του μικροκλίματος.
- Επιφανειακή θερμοκρασία εδάφους (LST) ως βασική μεταβλητή για την κατανόηση της χωρικής έντασης της θερμικής καταπόνησης.
- Σύνθεση των παραπάνω σε ένα ενιαίο μικροκλιματικό προφίλ, το οποίο εξηγεί πώς η γεωγραφία της πόλης συμβάλλει στη διαμόρφωση συνθηκών αυξημένης θερμικής έκθεσης και ευπάθειας.

Η ανάλυση αυτή δημιουργεί το απαραίτητο υπόβαθρο για την Ενότητα 4, όπου αξιολογείται ο θερμικός κίνδυνος με όρους “hazard-exposure-vulnerability”, προσαρμοσμένος στις ιδιαιτερότητες του μητροπολιτικού συγκροτήματος Θεσσαλονίκης.

Στην Εικόνα 3.10 παρουσιάζεται η περιοχή μελέτης, η οποία περιορίζεται στη ζώνη γύρω από το συγκρότημα ΦΙΞ και το HUB26. Η κλίμακα αποτύπωσης έχει επιλεγεί ώστε να αναδεικνύει τα βασικά χωρικά μοτίβα, τις τοπικές διαφοροποιήσεις της δόμησης και τα μικροκλιματικά χαρακτηριστικά που επικρατούν στο άμεσο περιβάλλον της δυτικής Θεσσαλονίκης.

Εικόνα 3.10: Περιοχή μελέτης – δυτική Θεσσαλονίκη ↓



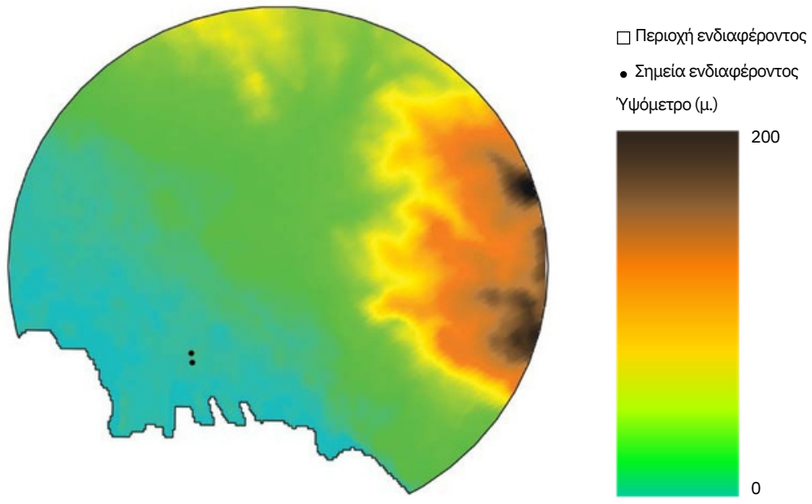
[3.1.2]

Γεωμορφολογία και τοπογραφία

Στην Ενότητα 3.1 παρουσιάζονται δείκτες που αποτυπώνουν το φυσικό ανάγλυφο. Το ψηφιακό μοντέλο εδάφους (Digital Elevation Model, DEM) και η κλίση (slope) περιγράφουν το φυσικό υπόβαθρο της πόλης και τις βασικές μορφολογικές ενότητες που επηρεάζουν τη ροή αέρα και τη συσσώρευση θερμότητας. Η περιοχή μελέτης στη δυτική Θεσσαλονίκη χαρακτηρίζεται από ήπια γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά, με σχετικά χαμηλές υψομετρικές διαφοροποιήσεις και ομαλή τοπογραφική διαβάθμιση από τα παράκτια προς τα ανατολικά. Το ανάγλυφο αποτελεί τον φυσικό καμβά πάνω στον οποίο αναπτύχθηκε ο σύγχρονος αστικός ιστός, επηρεάζοντας τη χωρική οργάνωση, τον αερισμό και, σε μικρότερο βαθμό, τις μικροκλιματικές συνθήκες.

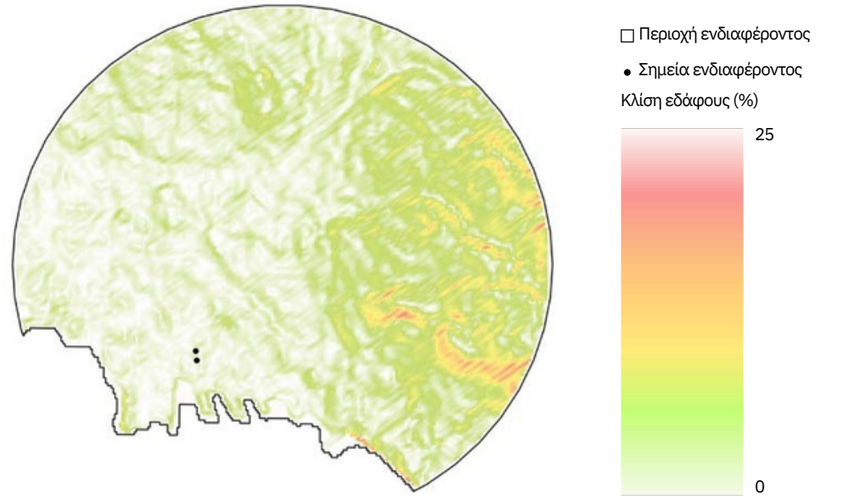
Το ψηφιακό μοντέλο εδάφους (Εικόνα 3.11) δείχνει ότι το μεγαλύτερο μέρος της περιοχής μελέτης βρίσκεται σε χαμηλές υψομετρικές στάθμες, χαρακτηριστικές του παράκτιου δυτικού τμήματος της Θεσσαλονίκης. Η αύξηση του υψομέτρου προς τα ανατολικά είναι σταδιακή, υποδηλώνο- ντας τη μετάβαση προς πιο ανυψωμένες ζώνες, που ενδέχεται να επηρεάζουν τοπικά τις ροές αέρα. Το ομαλό υψομετρικό προφίλ υποστηρίζει ένα σχετικά συνεχές και πυκνό αστικό περιβάλ- λον, χωρίς απότομες μορφολογικές ασυνέχειες.

→
Εικόνα 3.11: Ψηφιακό μοντέλο εδάφους Θεσσαλονίκης. Οι χαμηλές τιμές (πράσινες αποχρώσεις) κυριαρχούν στο δυτικό τμήμα της περιοχής μελέτης, ενώ οι υψηλότερες τιμές (καφέ αποχρώσεις) εντοπίζονται προς τα ανατολικά.



Η ανάλυση της κλίσης επιβεβαιώνει ότι η περιοχή διαθέτει κατά βάση επίπεδο ή ήπια επικλινές έδαφος (Εικόνα 3.12). Οι υψηλότερες τιμές κλίσης (slope) εμφανίζονται στο ανατολικότερο τμήμα της περιοχής μελέτης, εκεί όπου το έδαφος αρχίζει να ανηφορίζει προς τις υπώρειες του Χορ- τιάτη. Παρότι οι τοπικές κλίσεις είναι μικρές, ενδέχεται να επηρεάζουν σε περιορισμένο βαθμό τη διάχυση θερμικού φορτίου και τη δυνατότητα φυσικού αερισμού, ιδίως κατά τη διάρκεια θερ- μών περιόδων.

→
Εικόνα 3.12: Κλίση επιφάνειας Θεσσαλονίκης. Ψηλότερες κλίσεις (μπλε αποχρώσεις) εμφανίζονται προς τα ανατολικά, ενώ το κύριο σώμα της περιοχής μελέτης χαρακτηρίζεται από πολύ χαμηλές κλίσεις.



Η συνδυαστική θεώρηση υψομέτρου και κλίσης δείχνει ότι το ανάγλυφο της περιοχής μελέτης είναι γενικά ήπιο, με περιορισμένες υψομετρικές και τοπογραφικές διαφοροποιήσεις μέσα στην περιοχή μελέτης. Η τοπογραφία δεν αποτελεί τον κυρίαρχο παράγοντα μικροκλιματικών διαφο- ροποιήσεων, αλλά το σταθερό φυσικό υπόβαθρο πάνω στο οποίο εξετάζονται στη συνέχεια οι χρήσεις γης, η αδιαπερατότητα, η δομή της δόμησης και η επιφανειακή θερμοκρασία εδάφους.



[3.1.2.1]

Κάλυψη και χρήσεις γης

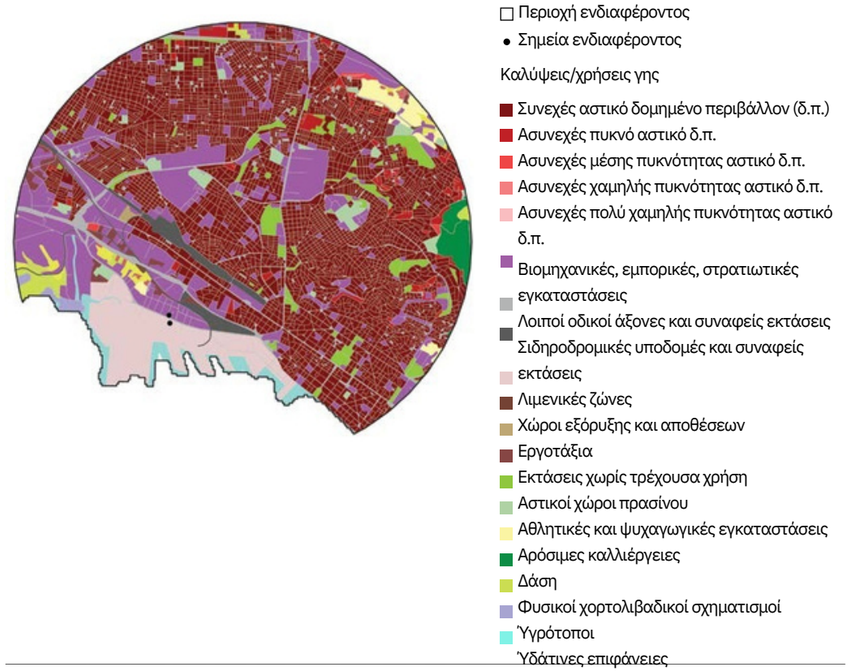
Η περιοχή μελέτης στη δυτική Θεσσαλονίκη παρουσιάζει ένα ιδιαίτερα σύνθετο μωσαϊκό χρήσεων γης, το οποίο αντανακλά την ιστορική εξέλιξη της πόλης, την εκτεταμένη βιομηχανική/εμπορική δραστηριότητα και την υψηλή οικιστική πυκνότητα. Η αποτύπωση των κατηγοριών του Urban Atlas του προγράμματος της Ευρωπαϊκής Ύπηρεσίας Διαστήματος Copernicus Land Monitoring Service (CLMS) επιτρέπει τη συστηματική κατανόηση της λειτουργικής οργάνωσης της περιοχής, αναδεικνύοντας τις χωρικές διαφοροποιήσεις που επηρεάζουν άμεσα τις μικροκλιματικές και θερμικές συνθήκες (Εικόνα 3.13).

Στο μεγαλύτερο τμήμα της περιοχής κυριαρχούν οι συνεκτικά δομημένες οικιστικές ζώνες (κατηγορίες 11100-112xx), με υψηλή πυκνότητα κτιρίων και περιορισμένες ελεύθερες επιφάνειες. Οι περιοχές αυτές εμφανίζουν συνεχή δόμηση, ελάχιστες νησίδες αστικού πρασίνου και υψηλό βαθμό αδιαπερατότητας, στοιχεία που ευνοούν την ενίσχυση του θερμικού φορτίου και τη διατήρηση αυξημένων θερμοκρασιών κατά τη διάρκεια της ημέρας.

Σε αρκετά τμήματα, η οικιστική δόμηση είναι συμπαγής, με στενούς δρόμους και περιορισμένο πλάτος οικοδομικών τετραγώνων, χαρακτηριστικά που επιδρούν περαιτέρω στη θερμική συμπεριφορά, στον αερισμό και στη δημιουργία θερμικών “hotspots”. Εμφανής είναι, επίσης, η παρουσία εκτεταμένων βιομηχανικών, εμπορικών και μεταφορικών χρήσεων (UA 12100-12300) που αποτελούν σημαντική συνιστώσα του αστικού χαρακτήρα. Αυτές οι ζώνες περιλαμβάνουν εγκαταστάσεις logistics, εκτεταμένες ασφάλτινες επιφάνειες και χώρους στάθμευσης, υποδομές μεταφοράς και οδικό δίκτυο υψηλής δραστηριότητας. Οι χρήσεις αυτές χαρακτηρίζονται από πολύ υψηλή αδιαπερατότητα, έντονη θερμική αδράνεια και περιορισμένη παρουσία βλάστησης, συμβάλλοντας σημαντικά στην τοπική αύξηση της επιφανειακής θερμοκρασίας.

Στην περιοχή εντοπίζονται διάσπαρτες νησίδες πρασίνου (UA 14100), οι οποίες λειτουργούν ως τοπικές εστίες βελτιωμένου μικροκλίματος. Πρόκειται κυρίως για μικρά πάρκα, χώρους αναψυχής και δενδροφυτεύσεις που διακόπτουν τον συνεχόμενο δομημένο ιστό, αλλά η συνολική τους έκταση είναι περιορισμένη. Οι μεγαλύτερες και πιο συνεκτικές εκτάσεις πρασίνου βρίσκονται στα ανατολικά όρια της περιοχής μελέτης, όπου οι οικιστικές πυκνότητες μειώνονται σταδιακά και η παρουσία φυσικών επιφανειών είναι εντονότερη.

→
Εικόνα 3.13: Χρήσεις και κάλυψη γης Θεσσαλονίκης (Urban Atlas)



Το μωσαϊκό χρήσεων γης στη δυτική Θεσσαλονίκη χαρακτηρίζεται από:

- κυριαρχία συμπαγούς οικιστικού ιστού,
- σημαντική παρουσία βιομηχανικών/εμπορικών εγκαταστάσεων,
- περιορισμένη έκταση αστικού πρασίνου,
- υψηλό βαθμό αδιαπερατότητας,
- ισχυρή αποτύπωση των βασικών οδικών αξόνων

Τα στοιχεία αυτά αποτελούν κρίσιμη είσοδο για τις επόμενες ενότητες, όπου εξετάζονται η αδιαπερατότητα των επιφανειών, η βλάστηση και η επιφανειακή θερμοκρασία, προκειμένου να αναδειχθούν οι παράγοντες που διαμορφώνουν τις μικροκλιματικές συνθήκες της περιοχής.

[3.1.2.2]

Χαρακτηριστικά δόμησης

'Οπως περιγράφηκε στην Ενότητα 3.2.2, η περιοχή μελέτης στη δυτική Θεσσαλονίκη χαρακτηρίζεται από ιδιαίτερα υψηλή συγκέντρωση δομημένων επιφανειών, με κυρίαρχη παρουσία σκληρών υλικών, περιορισμένη έκταση πρασίνου και έντονη λειτουργική ποικιλία. Η μορφή της δόμησης και ο βαθμός αδιαπερατότητας αποτελούν κρίσιμες παραμέτρους για την κατανόηση της μικροκλιματικής συμπεριφοράς της περιοχής, επηρεάζοντας την αποθήκευση και αποβολή θερμικής ενέργειας, τη ροή αέρα και την ένταση των τοπικών θερμικών φορτίων.

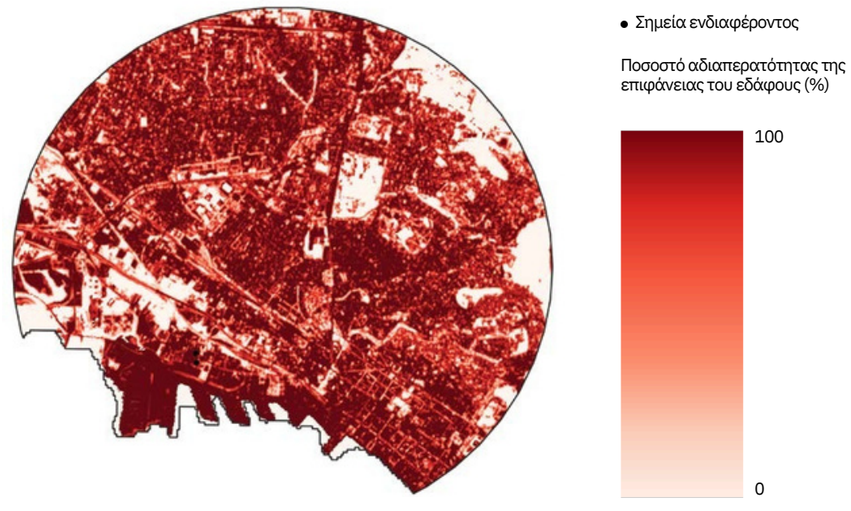
Η δυτική Θεσσαλονίκη εμφανίζει πολύ υψηλά ποσοστά αδιαπερατότητας εδάφους, με εκτεταμένα τμήματα να προσεγγίζουν το 100% αδιαπερατότητας (Εικόνα 3.14). Οι συνεχείς δομημένες επιφάνειες –οικιστική δόμηση, οδικό δίκτυο, εγκαταστάσεις μεταφορών, βιομηχανικές/εμπορικές χρήσεις– κυριαρχούν πλήρως στο τοπίο.

Τα υψηλότερα ποσοστά αδιαπερατότητας εντοπίζονται:

- κατά μήκος των μεγάλων αξόνων μεταφοράς,
- σε ζώνες logistics και εμπορίου,
- σε περιοχές συνεχούς και πυκνής κατοικίας,
- στα νότια τμήματα κοντά στο θαλάσσιο μέτωπο

Οι πολύ υψηλές τιμές αδιαπερατότητας υποδηλώνουν περιβάλλον με περιορισμένη εξατμισοδιαπνοή, υψηλό θερμικό δυναμικό και αυξημένη ικανότητα αποθήκευσης θερμότητας, γεγονός που ενισχύει τις μέγιστες και κυρίως τις νυχτερινές τιμές επιφανειακής θερμοκρασίας.

→
Εικόνα 3.14. Ποσοστό αδιαπερατότητας επιφανειών (IMD) Θεσσαλονίκης. Οι σκούρες κόκκινες αποχρώσεις υποδηλώνουν πλήρως δομημένες και σκληρές επιφάνειες, ενώ οι ανοιχτότερες αποχρώσεις αντιστοιχούν σε περιοχές με μεγαλύτερη παρουσία ελαφρώς διαπερατών επιφανειών ή αστικού πρασίνου..



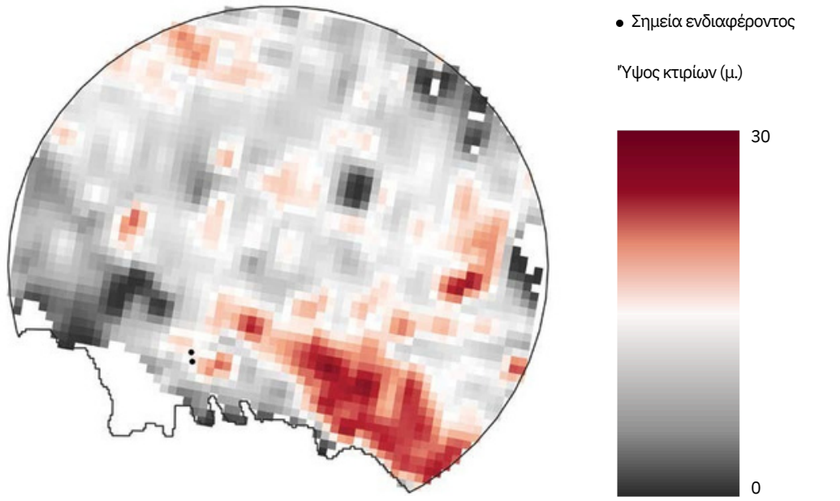
Το ύψος των κτιρίων στην περιοχή μελέτης παρουσιάζει σημαντική χωρική διαφοροποίηση (Εικόνα 3.15). Ενώ μεγάλο τμήμα της δυτικής Θεσσαλονίκης χαρακτηρίζεται από χαμηλής και μεσαίας κλίμακας δόμηση, εμφανίζονται επίσης περιοχές με αυξημένο ύψος κτιρίων, ιδιαίτερα στα νότια τμήματα.

Τα ψηλότερα κτίρια:

- ενισχύουν την τοπική θερμική αδράνεια,
- αυξάνουν τον εγκλωβισμό θερμότητας μέσα στους αστικούς δρόμους,
- περιορίζουν τη φυσική κυκλοφορία αέρα
- και οδηγούν σε αυξημένες θερμικές αντιθέσεις κατά τη διάρκεια της ημέρας.

Αντίθετα, περιοχές χαμηλότερου ύψους κτιρίων παρουσιάζουν μεγαλύτερη ορατότητα προς τον ουρανό (ψ_{sky}, που περιγράφει το ποσοστό του ουρανού το οποίο είναι ορατό από την επιφάνεια του δρόμου) και σχετικά πιο ευνοϊκές συνθήκες αερισμού.

→
Εικόνα 3.15: Ύψος κτιρίων (μ.) Θεσσαλονίκης. Οι υψηλές τιμές (κόκκινες αποχρώσεις) αποτυπώνουν ζώνες μεγαλύτερης δόμησης, ενώ οι γκρι αποχρώσεις υποδηλώνουν χαμηλότερα κτίρια.



Η δυτική Θεσσαλονίκη χαρακτηρίζεται από έναν πολύ πυκνό αστικό ιστό, με υψηλή αδιαπερατότητα, περιορισμένες ελεύθερες επιφάνειες και σημαντική μεταβλητότητα στο ύψος των κτιρίων. Η συνδυασμένη επίδραση των παραπάνω παραμέτρων διαμορφώνει ένα περιβάλλον με υψηλό θερμικό δυναμικό και αυξημένο βαθμό εγκλωβισμού θερμότητας, το οποίο εξηγεί σε μεγάλο βαθμό τη χωρική διαφοροποίηση του δείκτη βλάστησης (Normalized Difference Vegetation Index, NDVI) και της επιφανειακής θερμοκρασίας (LST), που παρουσιάζονται στις επόμενες ενότητες.

[3.1.2.3]

Βλάστηση και φυσικά στοιχεία

Η βλάστηση αποτελεί κρίσιμο ρυθμιστή του μικροκλίματος στις αστικές περιοχές, επηρεάζοντας διαδικασίες όπως η σκίαση, η εξατμισοδιαπνοή και η θερμική αποφόρτιση των επιφανειών. Στη δυτική Θεσσαλονίκη, η παρουσία πράσινων επιφανειών είναι περιορισμένη και χωρικά ασυνεχής, γεγονός που εντοπίζεται με σαφήνεια μέσω του δείκτη βλάστησης NDVI.

Ο NDVI, ο οποίος υπολογίστηκε μέσω δορυφορικών παρατηρήσεων της θερινής περιόδου του 2025, επιτρέπει την αποτύπωση της έντασης και της κατανομής της φωτοσυνθετικά ενεργής βλάστησης (Εικόνα 3.16). Τιμές κοντά στο 0 υποδηλώνουν απουσία ή υποβαθμισμένη βλάστηση, ενώ τιμές προς το 1 αντιστοιχούν σε υγιή, πυκνή φυτοκάλυψη.[35]

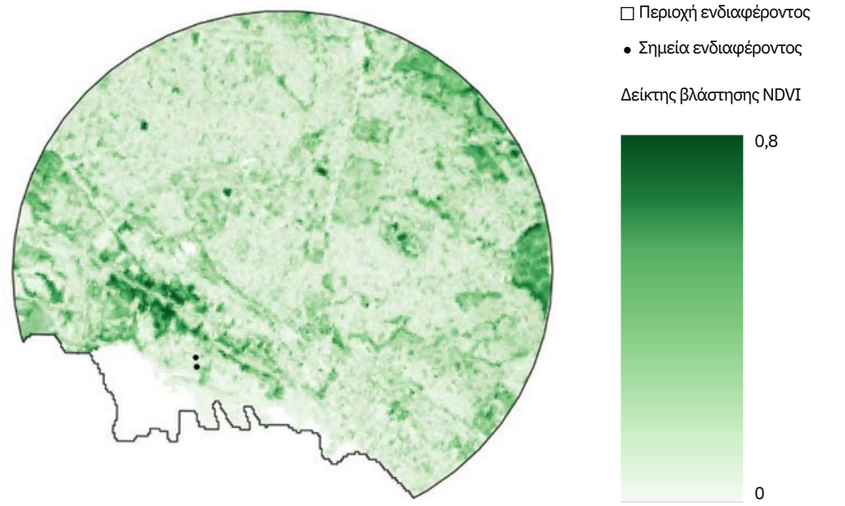
Η δυτική Θεσσαλονίκη εμφανίζει χαμηλές τιμές NDVI στο μεγαλύτερο τμήμα της περιοχής μελέτης, στοιχείο που αντικατοπτρίζει την έντονη αστικοποίηση, την υψηλή αδιαπερατότητα επιφανειών (βλ. υποενότητα 3.3.2), την περιορισμένη παρουσία πάρκων ή συνεκτικών πράσινων εκτάσεων και την κυριαρχία οικιστικών, βιομηχανικών και εμπορικών χρήσεων (βλ. επίσης υποενότητα 3.2.2)

Οι τοπικές διαφοροποιήσεις που καταγράφονται στον χάρτη αναδεικνύουν τις περιοχές στα ανατολικά της ζώνης μελέτης που εμφανίζουν αυξημένες τιμές NDVI (>0,6), υποδηλώνοντας μεγαλύτερη παρουσία δέντρων, γραμμικών φυτεύσεων και πράσινων νησίδων. Στο εσωτερικό του συνεχούς αστικού ιστού εντοπίζονται λίγες μικρές περιοχές με μέτριες τιμές NDVI (π.χ., μικρά πάρκα, σχολικοί χώροι, υπαίθριες εγκαταστάσεις), οι οποίες, αν και περιορισμένες σε έκταση, λειτουργούν ως τοπικοί δροσιστικοί πόλοι. Ενδεικτικά, η πλατεία Αριστοτέλους στο κέντρο της Θεσσαλονίκης παρουσιάζει τιμές NDVI της τάξης του 0,25, αντανακλώντας την παρουσία δέντρων και γρασιδιού στον περιβάλλοντα χώρο.

Η περιοχή στο συγκρότημα του ΦΙΞ και του HUB26 στη δυτική Θεσσαλονίκη χαρακτηρίζεται από χαμηλή ως πολύ χαμηλή βλάστηση στο μεγαλύτερο μέρος της επιφάνειάς της. Η αυξημένη αδιαπερατότητα, η συμπαγής δόμηση και η περιορισμένη παρουσία πάρκων οδηγούν σε χαμηλές τιμές NDVI (~0,1), επηρεάζοντας αρνητικά την ικανότητα φυσικής ψύξης του αστικού περιβάλλοντος. Τα ευρήματα αυτά αποτελούν θεμελιώδη είσοδο για την υποενότητα 3.1.2.4, στην οποία εξετάζεται η επιφανειακή θερμοκρασία εδάφους (ΕΘΕ) και η θερμική απόκριση της περιοχής.

[35] Περισσότερες λεπτομέρειες για τον δείκτη NDVI και τις εφαρμογές του είναι διαθέσιμες στην ιστοσελίδα της υπηρεσίας Earth Data της NASA. Διαθέσιμη στο https://www.earthdata.nasa.gov/topics/land-surface/normalized-difference-vegetation-index-ndvi

→
Εικόνα 3.16: Δείκτης βλάστησης NDVI Θεσσαλονίκης. Οι υψηλές τιμές (σκούρες πράσινες αποχρώσεις) αποτυπώνουν πυκνή φυτοκάλυψη στα ανατολικά, ενώ οι χαμηλές τιμές (ανοιχτές αποχρώσεις) κυριαρχούν στον υπόλοιπο αστικό χώρο, υποδεικνύοντας περιορισμένη παρουσία βλάστησης.



[3.1.2.4]

Επιφανειακή θερμοκρασία εδάφους (LST) και θερμική απόκριση του αστικού περιβάλλοντος

Για την παρούσα ανάλυση χρησιμοποιήθηκαν δορυφορικά δεδομένα LST θερινής περιόδου 2025, με στόχο την αποτύπωση της μέγιστης θερμικής επιβάρυνσης. Επισημαίνεται ότι η LST αποτελεί διαφορετική φυσική παράμετρο από τη θερμοκρασία του αέρα, την οποία αντιλαμβά- νεται άμεσα ο άνθρωπος. Η LST αποτυπώνει τη θερμική κατάσταση των επιφανειών και όχι του ατμοσφαιρικού στρώματος στο ύψος αναφοράς (2 μέτρων). Παρότι οι δύο παράμετροι συν- δέονται, η LST χρησιμοποιείται στη συγκεκριμένη ανάλυση ως δείκτης θερμικού φορτίου του αστικού υποβάθρου και όχι ως υποκατάστατο της θερμοκρασίας αέρα.

Ο χάρτης LST (Εικόνα 3.17) δείχνει ότι η περιοχή μελέτης χαρακτηρίζεται από εκτεταμένη παρουσία υψηλών θερμοκρασιών, με τις θερμές αποχρώσεις να κυριαρχούν στο μεγαλύτερο τμήμα της. Τα βασικά χωρικά μοτίβα που προκύπτουν είναι τα εξής:

1. Εκτεταμένες θερμές ζώνες στο εσωτερικό της περιοχής μελέτης

Στο κεντρικό και βόρειο τμήμα της περιοχής μελέτης παρατηρούνται υψηλές τιμές ΕΘΕ, οι οποί- ες συνδέονται με πολύ υψηλό ποσοστό αδιαπερατότητας (βλ. ενότητα 3.3.2), περιορισμένη παρουσία βλάστησης (χαμηλές τιμές NDVI), κυριαρχία συμπαγούς οικιστικής και βιομηχανικής δόμησης, μεγάλες συνεχόμενες ασφάλτινες και τσιμεντένιες επιφάνειες. Αυτά τα χαρακτηριστικά οδηγούν σε αυξημένη θερμική αδράνεια και σε ενίσχυση του θερμικού φορτίου κατά τις μεσημβρινές και απογευματινές ώρες.

2. Τοπικά “hotspots” υψηλής θερμότητας

Στις περιοχές πιο βόρεια και βορειοανατολικά της περιοχής μελέτης εμφανίζονται πυρήνες υψηλών θερμοκρασιών, με κόκκινες αποχρώσεις που υποδηλώνουν έντονη θέρμανση επιφανειών. Αυτά τα τοπικά μέγιστα συσχετίζονται με συγκεντρώσεις μεγάλων δομημένων τετραγώνων, ελλιπή δενδροφύτευση και εκτεταμένες επιφάνειες με υλικά υψηλής θερμικής αδράνειας.

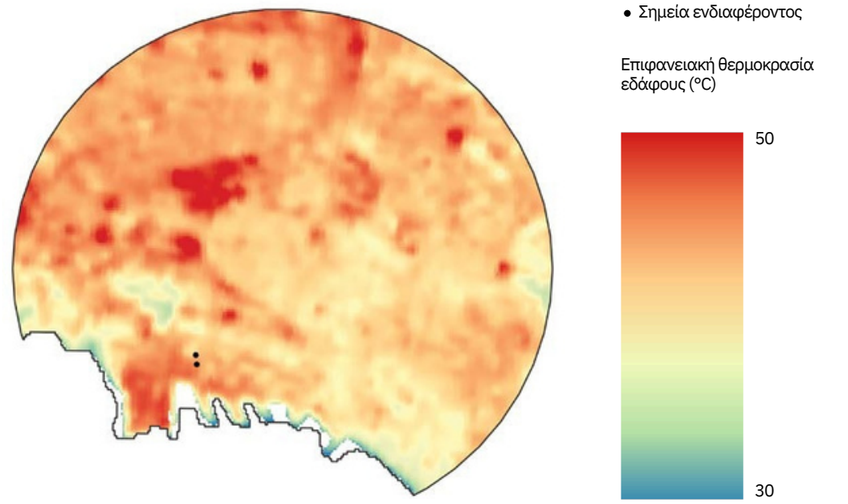
3. Χαμηλότερες θερμοκρασίες κοντά στη θαλάσσια ζώνη

Οι ψυχρότερες αποχρώσεις (γαλάζιο-πράσινο) εντοπίζονται στο νότιο άκρο, σε σημεία που γειτνιάζουν με το θαλάσσιο μέτωπο. Το μοτίβο αυτό οφείλεται στην επίδραση της θαλάσσιας αύρας, στη χαμηλότερη θερμική αδράνεια των υγρών επιφανειών και σε πιθανή αυξημένη υγρασία και μικρότερη απορρόφηση ηλιακής ακτινοβολίας.

Η χωρική διαφοροποίηση της LST επιβεβαιώνει την ισχυρή συσχέτιση με τα ανθρωπογενή και φυσικογεωγραφικά χαρακτηριστικά της περιοχής. Η αδιαπερατότητα (IMD) βρίσκεται σε άμεση αναλογία με τις υψηλότερες επιφανειακές θερμοκρασίες, καθώς οι σκληρές επιφάνειες απο- θηκεύουν μεγάλη ποσότητα θερμότητας. Παράλληλα, το ύψος κτιρίων ενισχύει τον εγκλωβισμό θερμότητας στους αστικούς δρόμους, μειώνοντας τον αερισμό και αυξάνοντας τις νυχτερινές θερμοκρασίες.[36] Ο δείκτης NDVI αποτυπώνει την απουσία βλάστησης στις θερμές ζώνες. Τέλος, η τοπογραφία –λόγω των ήπιων κλίσεων και των χαμηλών υψόμετρων– δεν παίζει σημαντικό ρόλο στη διαμόρφωση του θερμικού περιβάλλοντος της περιοχής.

[36] Αξίζει να σημειωθεί ότι το LST εξαρτάται κυρίως από το υλικό της επιφάνειας. Το ύψος των κτιρίων εγκλωβίζει κάποια θερμότητα, η οποία δεν επηρεάζει το LST. Το βράδυ όμως, η θερμότητα που αποβάλουν τα δομικά υλικά εγκλωβίζεται στους τοίχους των ψηλών κτιρίων, γι' αυτό και οι νυχτερινές θερμοκρασίες είναι υψηλότερες σε αυτές τις περιοχές.

→
Εικόνα 3.17: Επιφανειακή θερμοκρασία εδάφους (ΕΘΕ) Θεσσαλονίκης. Οι υψηλές τιμές (κόκκινες αποχρώσεις) αποτυπώνουν θερμικά “hotspots” με αυξημένη αδιαπερατότητα και περιορισμένη βλάστηση, ενώ οι χαμηλότερες τιμές (μπλε-πράσινες αποχρώσεις) αντιστοιχούν σε πιο φυσικές περιοχές.

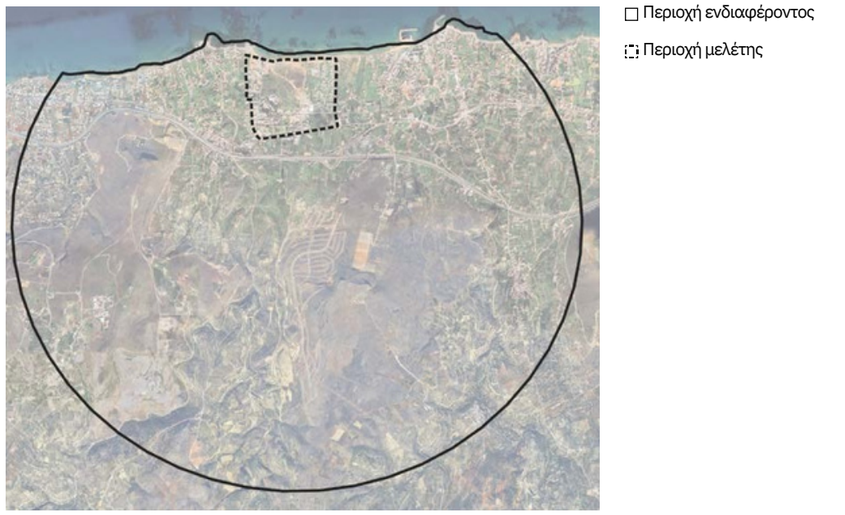


Συνολικά, η ανάλυση των γεωμορφολογικών, πολεοδομικών και μικροκλιματικών χαρακτηριστι- κών της δυτικής Θεσσαλονίκης καταδεικνύει ότι η περιοχή συγκροτεί έναν εκτεταμένο και συνε- κτικό αστικό χώρο αυξημένης θερμικής επιβάρυνσης. Η κυριαρχία της συμπαγούς δόμησης, η πολύ υψηλή αδιαπερατότητα και η περιορισμένη παρουσία βλάστησης διαμορφώνουν ένα περιβάλλον με υψηλή θερμική αδράνεια και μειωμένη ικανότητα αποφόρτισης της θερμότητας. Η χωρική κατανομή της βλάστησης (NDVI) και της επιφανειακής θερμοκρασίας εδάφους (LST) υποδηλώνει ότι οι υψηλότερες θερμικές τιμές εντοπίζονται στις ζώνες έντονης βιομηχανικής, εμπορικής και μεταφορικής δραστηριότητας, ενώ οι χαμηλότερες τιμές περιορίζονται σε απο- σπασματικές νησίδες πρασίνου.

Σε αυτό το πλαίσιο, υψηλές επιφανειακές θερμοκρασίες παρατηρούνται σε συγκεκριμένες πε- ριοχές της δυτικής Θεσσαλονίκης –όπως στις εκτάσεις των πρώην στρατοπέδων του Δήμου Αμπελοκήπων-Μενεμένης και στην περιοχή του υπό κατασκευή Μητροπολιτικού Πάρκου Παύ- λου Μελά, όπου εκτεταμένες γυμνές ή ημιδιαμορφωμένες επιφάνειες και περιορισμένη βλάστηση ευνοούν την έντονη θερμική φόρτιση ως την ολοκλήρωση του έργου. Ιδιαίτερα υψηλές θερμο- κρασίες εμφανίζονται, επίσης, στην περιοχή της Ανω Πόλης, η οποία χαρακτηρίζεται από πολύ παλαιό και πυκνά δομημένο ιστό, στενούς δρόμους και κτίρια σε μικρή απόσταση μεταξύ τους, συνθήκες που περιορίζουν τον αερισμό και ενισχύουν τον εγκλωβισμό θερμότητας. Παράλληλα, θερμικά “hotspots” εντοπίζονται στις λιμενικές εγκαταστάσεις και στον ευρύτερο χώρο γύρω από τον υπεραστικό σταθμό των ΚΤΕΛ, περιοχές με υψηλό ποσοστό αδιαπερατότητας, εκτε- ταμένες ασφαλτικές επιφάνειες και έντονη λειτουργική δραστηριότητα. Η περιοχή ΦΙΞ-HUB26, ως τμήμα του δυτικού πολεοδομικού συγκροτήματος, εντάσσεται σε αυτό το ευρύτερο πλαίσιο αυξημένης θερμικής φόρτισης, με τα σημεία ενδιαφέροντος να βρίσκονται σε άμεση γειτνίαση με ζώνες αυξημένης LST, όπως το λιμάνι και ο παλιός σιδηροδρομικός σταθμός.

ΓΟΎΡΝΕΣ

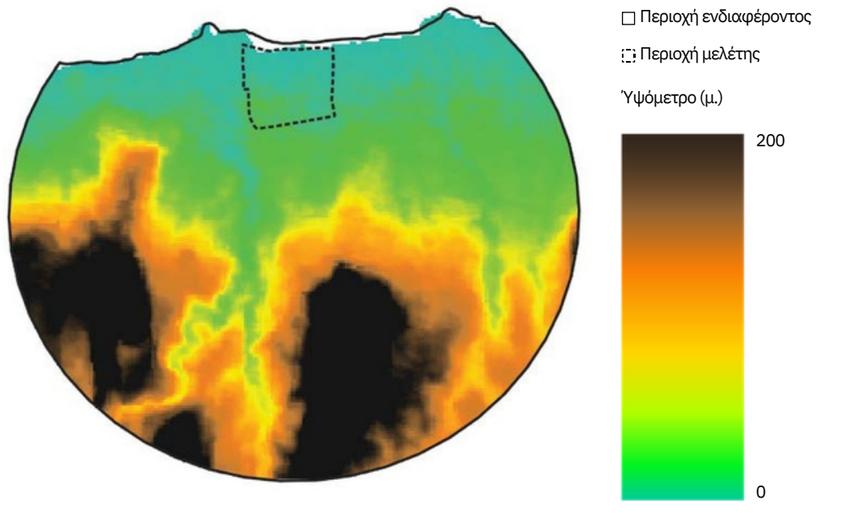
→
Εικόνα 3.18: Περιοχή μελέτης – Γούρνες



[3.1.3] Μορφολογικά δεδομένα

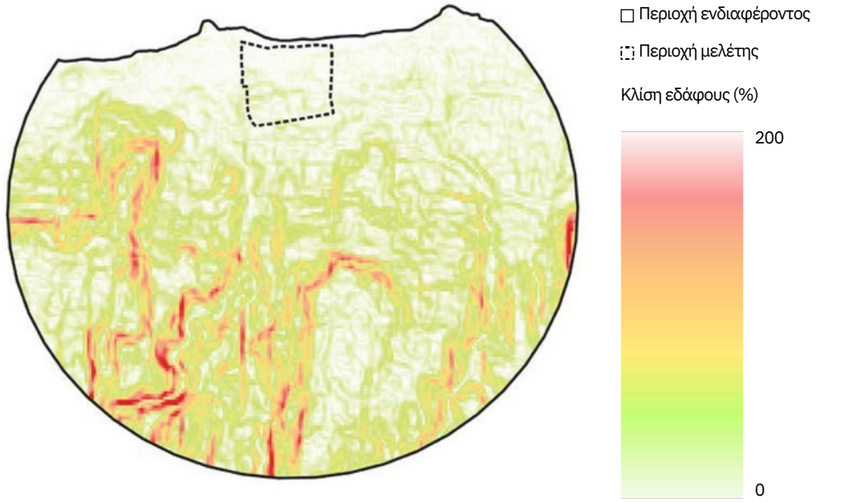
Η μορφολογική ανάλυση των Γουρνών βασίστηκε στο Copernicus GLO-30 DEM (Digital Elevation Model), ένα ψηφιακό μοντέλο εδάφους υψηλής χωρικής ανάλυσης 30 μέτρων, το οποίο αποτελεί προϊόν του Copernicus Land Monitoring Service και έχει παραχθεί από δεδομένα ραντάρ της αποστολής TanDEM-X του DLR (German Aerospace Center). Το GLO-30 DEM αναπαριστά την τοπογραφία της γήινης επιφάνειας χωρίς την επίδραση της βλάστησης ή των τεχνητών κατασκευών, αποδίδοντας με ακρίβεια τη γεωμορφολογία του εδάφους (Εικόνα 3.19). Τα δεδομένα αυτά είναι κατάλληλα για αναλύσεις εδαφικής κλίσης, αποστράγγισης, αξιολόγησης πλημμυρικής επικινδυνότητας και γενικότερα για εφαρμογές πολεοδομικού και περιβαλλοντικού σχεδιασμού.

→
Εικόνα 3.19: Ψηφιακό Μοντέλο Ύψομέτρου για την περιοχή μελέτης Γουρνών



Από την επεξεργασία των δεδομένων προέκυψαν τιμές της κλίσης του εδάφους που εκφράζονται σε ποσοστό (%), υπολογιζόμενες ως η εφαπτομένη της γωνίας ανύψωσης επί 100 (Εικόνα 3.20). Τα δεδομένα (DEM και κλίσης) έχουν αποκοπεί ήδη στα όρια της ευρύτερης περιοχής μελέτης και περιλαμβάνουν την περιοχή άμεσου ενδιαφέροντος, ώστε η ανάλυση να αποτυπώνει συνολικά το τοπογραφικό προφίλ του ευρύτερου περιβάλλοντος.

→
Εικόνα 3.20: Δεδομένα κλίσης στην περιοχή μελέτης Γουρνών



Η ανάλυση των υψομετρικών δεδομένων δείχνει ότι το ανάγλυφο της περιοχής χαρακτηρίζεται από μετρίως ορεινή ως ημιορεινή τοπογραφία, με υψόμετρα που κυμαίνονται από το επίπεδο της θάλασσας (0 μ.) ως περίπου 280 μ. και μέση τιμή 97,8 μ. Οι χαμηλές υψομετρικές τιμές αντιστοιχούν στις πεδινές εκτάσεις, ενώ οι υψηλότερες καταγράφονται στις περιμετρικές ορεινές εξάρσεις που περιβάλλουν την ενότητα μελέτης. Η μέση κλίση του εδάφους είναι 8,2%, υποδηλώνοντας ήπιες έως μέτριες κλίσεις στο μεγαλύτερο τμήμα της περιοχής. Η τυπική απόκλιση 7,2% αντανακλά τη μορφολογική ποικιλία, με έντονες κλίσεις να εντοπίζονται στα ορεινά περιθώ- ρια και επίπεδες επιφάνειες γύρω από την περιοχή άμεσου ενδιαφέροντος.

Πίνακας 3.2: Ταξινόμηση κλίσεων εδάφους ↓

Η κατανομή των κλίσεων παρουσιάζει την ακόλουθη ταξινόμηση:

Κατηγορία κλίσης	Εύρος (%)	Ποσοστό κάλυψης	Μορφολογική περιγραφή
Πολύ ήπιες	0-5	42,8 %	Πεδινές και γεωργικά αξιοποιήσιμες περιοχές
Ήπιες	5-15	41,6 %	Ήπιες πλαγιές και χαμηλοί λόφοι
Απότομες	15-30	13,9 %	Ορεινές πλαγιές, με εντονότερη απορροή
Πολύ απότομες	>30	1,7 %	Περιορισμένες ορεινές εξάρσεις, πιθανή αστάθεια εδάφους

Η τοπογραφική δομή επηρεάζει καθοριστικά τη χωρική διάρθρωση των χρήσεων γης, τη δυνα- μική της απορροής και τις συνθήκες τρωτότητας σε φυσικούς κινδύνους. Οι εκτεταμένες ήπιες ζώνες (0-15%) συγκεντρώνουν τη γεωργική δραστηριότητα, τις υποδομές και τους οικιστικούς πυρήνες, αλλά παρουσιάζουν υψηλότερη επιρρέπεια σε πλημμυρικά φαινόμενα, λόγω χαμηλής κλίσης και περιορισμένης φυσικής αποστράγγισης.

Αντίθετα, οι ορεινές πλαγιές με κλίση άνω του 15% χαρακτηρίζονται από αυξημένο κίνδυνο διάβρωσης και κατολισθήσεων, ειδικά σε περιόδους έντονων βροχοπτώσεων, ενώ αποτελούν περιοχές χαμηλότερης καταλληλότητας για δόμηση. Η περιοχή άμεσου ενδιαφέροντος εντάσσεται στις πολύ ήπιες κλίσεις (0-5%) και σε υψόμετρα περί τα 30 μ., γεγονός που την καθιστά γεωτεχνικά κατάλληλη για αστική ανάπτυξη, με μικρές ανάγκες εκσκαφών και ελάχιστους κινδύνους απορροής ή αστάθειας εδάφους.

Φυσικογεωγραφικά δεδομένα

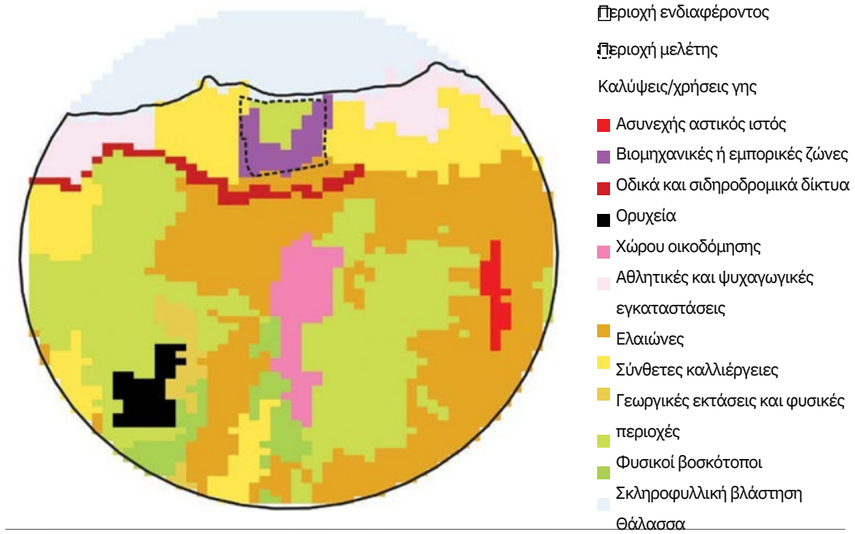
[3.1.3.1]

Η ανάλυση των φυσικογεωγραφικών χαρακτηριστικών της περιοχής μελέτης βασίστηκε σε δεδομένα υψηλής χωρικής ανάλυσης του προγράμματος Copernicus Land Monitoring Service (CLMS) της Ευρωπαϊκής Υπηρεσίας Διαστήματος, με κύριες θεματικές πηγές το CORINE Land Cover (CLC 2018, έκδοση 2020), τα προϊόντα High Resolution Layers (HRL) για τους δασικούς τύπους και την αδιαπερατότητα εδάφους, καθώς και δορυφορικά δεδομένα Landsat 8 για τον υπολογισμό της επιφανειακής θερμοκρασίας και του δείκτη βλάστησης (NDVI). Τα δεδομένα καλύπτουν το σύνολο της περιοχής μελέτης και περιλαμβάνουν την περιοχή άμεσου ενδιαφέροντος.

Το προϊόν CORINE Land Cover 2018 αποτελεί τη βάση για την κατηγοριοποίηση της κάλυψης και χρήσης γης σε 44 επιμέρους κατηγορίες, με ελάχιστη χαρτογραφήσιμη επιφάνεια 25 εκταρίων και ελάχιστο πλάτος 100 μέτρων. Η ανάλυση του αποσπάσματος της περιοχής (Εικόνα 3.21) δείχνει ότι η έκταση χαρακτηρίζεται κυρίως από γεωργικές χρήσεις, οι οποίες καταλαμβάνουν σχεδόν το ήμισυ της συνολικής επιφάνειας. Πρόκειται κυρίως για αρόσιμες και σύνθετες καλλιέργειες, που υποδεικνύουν έντονη αγροτική δραστηριότητα. Ακολουθούν οι τεχνητές επιφάνειες, οι οποίες καλύπτουν πάνω από το ένα τρίτο της περιοχής, αντανακλώντας την παρουσία οικιστικών και εμπορικών χρήσεων, τεχνικών υποδομών και περιοχών υπό ανάπτυξη. Παράλληλα, σημαντικό ποσοστό της έκτασης καταλαμβάνουν υγροτοπικές ζώνες, οι οποίες λειτουργούν ως φυσικά οικοσυστήματα ρύθμισης της απορροής και αποτελούν κρίσιμο στοιχείο του περιβαλλοντικού ισοζυγίου. Οι δασικές και ημιφυσικές εκτάσεις είναι περιορισμένες, συγκεντρώνονται κυρίως στα βόρεια και ανατολι- κά όρια και περιλαμβάνουν σποραδικά τμήματα θαμνώδους και μεικτής βλάστησης.

Η παρουσία εκτεταμένων τεχνητών επιφανειών συνεπάγεται υψηλό βαθμό αδιαπερατότητας του εδάφους, περιορίζοντας τη φυσική διήθηση των υδάτων και ενισχύοντας την απορροή κατά τη διάρκεια έντονων βροχοπτώσεων. Το γεγονός αυτό καθιστά ορισμένες ζώνες πιο ευάλωτες σε πλημμυρικά φαινόμενα, ειδικά εκεί όπου η τοπογραφία είναι ήπια και η αποστράγγιση ανεπαρκής. Παράλληλα, η αυξημένη συγκέντρωση σκληρών επιφανειών και υποδομών συμβάλλει στη δημιουργία τοπικών θερμικών νησίδων, οι οποίες εντείνουν τα φαινόμενα θερμικής δυσφορίας κατά τη διάρκεια επεισοδίων καύσωνα. Αντίθετα, οι υγροτοπικές και γεωργικές περιοχές λειτουργούν ως φυσικοί μετριαστικοί παράγοντες, διατηρώντας χαμηλότερες θερμοκρασίες επιφανείας και ευνοώντας την εξατμισοδιαπνοή.

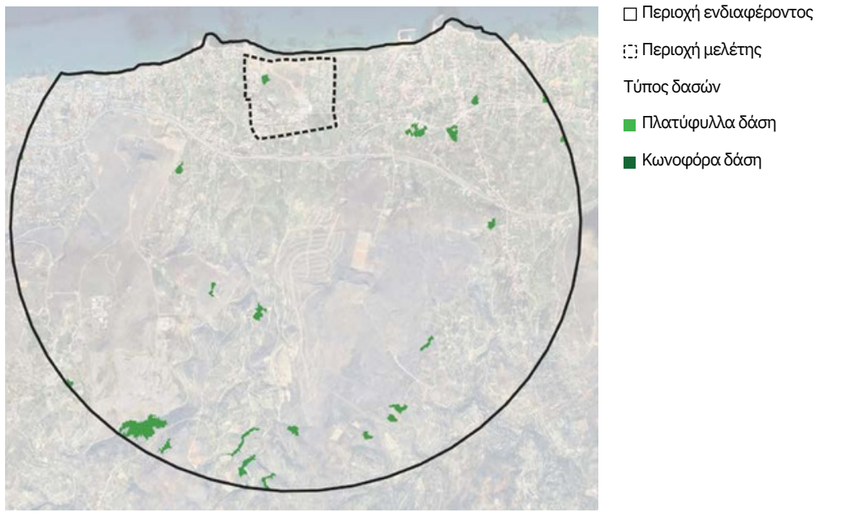
→
Εικόνα 3.21: Δεδομένα κάλυψης/χρήσης γης για την περιοχή μελέτης Γουρνών



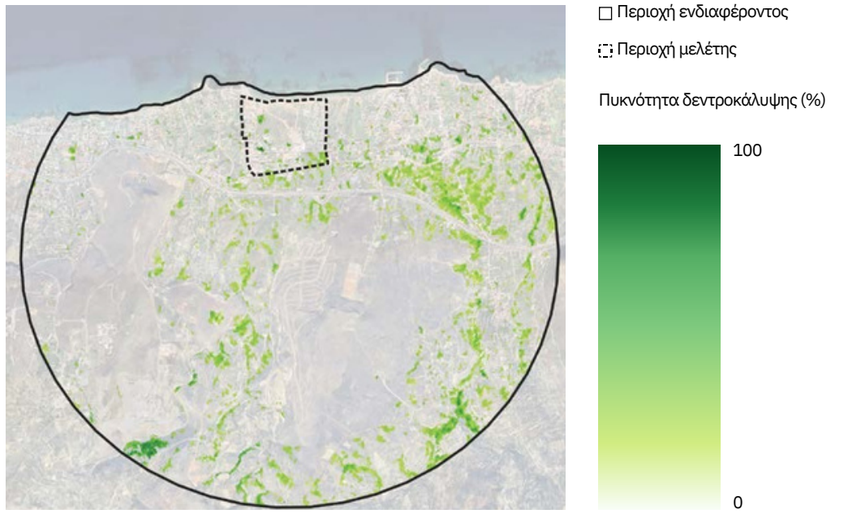
Η αξιολόγηση των δασικών χαρακτηριστικών και της βλάστησης στην περιοχή μελέτης βασίστη- κε στα προϊόντα High Resolution Layers (HRL) του προγράμματος Copernicus Land Monitoring Service, συγκεκριμένα στα δεδομένα Forest Type (FTY, 2018) και Tree Cover Density (TCD, 2018), με χωρική ανάλυση 10 μέτρων. Τα δεδομένα αυτά παρέχουν λεπτομερή ταξινόμηση των δασικών εκτάσεων και ποσοτικοποιούν την κάλυψη των δενδροκορμών ανά εικονοστοιχείο, επιτρέποντας την αποτύπωση της δομής και της πυκνότητας της βλάστησης με μεγάλη ακρίβεια.

Το προϊόν Forest Type (FTY) διακρίνει τις δασικές περιοχές σε πλατύφυλλα, κωνοφόρα και μεικτά δάση, ενώ οι μη δασικές εκτάσεις αποδίδονται ως «χωρίς δάσος». Στην περιοχή των Γουρνών (Εικόνα 3.21), η ανάλυση καταδεικνύει περιορισμένη δασική κάλυψη, η οποία εμφανίζεται αποσπασματικά στα περιφερειακά τμήματα της ενότητας μελέτης και τελείως εκτός της περιοχής άμεσου ενδιαφέροντος. Οι δασικές εκτάσεις εντοπίζονται κυρίως στις νότιες και νοτιοδυτικές παρυφές, σε μικρές συστάδες πλατύφυλλων ειδών, με ελάχιστη παρουσία κωνοφόρων. Η απουσία εκτεταμένων και συνεκτικών δασών συνάδει με τον κυρίως αγροτικό και πεδινό χαρακτήρα της περιοχής, καθώς και με τη μακροχρόνια ανθρώπινη δραστηριότητα, που έχει περιορίσει τις φυσικές δασικές κοινότητες.

→
Εικόνα 3.22: Δεδομένα δασικών τύπων για την περιοχή μελέτης Γουρνών



Το συμπληρωματικό προϊόν Tree Cover Density (TCD) ποσοτικοποιεί το εύρος κάλυψης των δέντρων, σε συνεχή κλίμακα από 0 έως 100%. Η ανάλυση του δείκτη TCD για την περιοχή μελέτης (Εικόνα 3.22) δείχνει ότι η δενδροκάλυψη είναι χαμηλή ως μέτρια, με τις τιμές να κυμαίνονται κυρίως μεταξύ 10% και 40%. Οι μεγαλύτερες πυκνότητες παρατηρούνται στα όρια των μικρών δασικών συστάδων και στις φυτοτεχνημένες εκτάσεις γύρω από τις αγροτικές περιοχές, ενώ η περιοχή άμεσου ενδιαφέροντος παρουσιάζει ελάχιστη ή μηδενική δενδροκάλυψη. Το πρότυπο αυτό αντανακλά την κυριαρχία αγροτικών και ημιφυσικών χρήσεων γης, καθώς και τη χαμηλή ικανότητα της περιοχής να παρέχει φυσική σκίαση και ρύθμιση του μικροκλίματος.



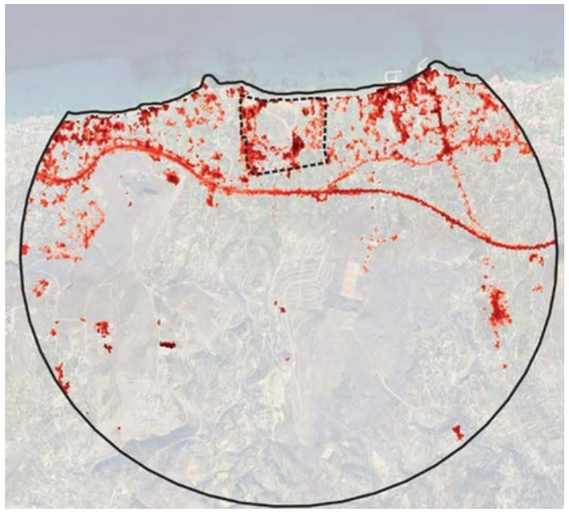
Εικόνα 3.23: Δεδομένα πυκνότητας δενδροκάλυψης για την περιοχή μελέτης

Η συνδυαστική ερμηνεία των δύο θεματικών στρωμάτων υπογραμμίζει τον περιορισμένο ρόλο της δασικής βλάστησης στη ρύθμιση των μικροκλιματικών συνθηκών και στη μετρίαση των κινδύνων που σχετίζονται με την κλιματική αλλαγή. Η μικρή έκταση των δασών και η χαμηλή πυκνότητα δενδροκάλυψης περιορίζουν τη δυνατότητα απορρόφησης θερμότητας, συγκράτη- σης εδαφικής υγρασίας και μείωσης της απορροής, εντείνοντας τη διακινδύνευση από καύσωνες, ξηρασία και διάβρωση. Παράλληλα, η απουσία πυκνής βλάστησης μειώνει τη φυσική ανθεκτι- κότητα του τοπίου σε ακραία καιρικά φαινόμενα και καθιστά αναγκαία τη λήψη στοχευμένων μέτρων, όπως αναδασώσεις με είδη ανθεκτικά στην ξηρασία, δημιουργία φυτοφρακτών και δι- ατήρηση φυσικών αναχωμάτων, που μπορούν να λειτουργήσουν ως φράγματα διάβρωσης και βελτιωτές του μικροκλίματος.

Συνολικά, η περιοχή χαρακτηρίζεται από αραιή και αποσπασματική δασική κάλυψη, επιβεβαι- ώνοντας την ανάγκη ενίσχυσης της βιοποικιλότητας και αποκατάστασης της φυτοκάλυψης, ως ουσιώδους παραμέτρου για τη βελτίωση της οικολογικής ισορροπίας και την αύξηση της ανθεκτικότητας απέναντι στις επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής.

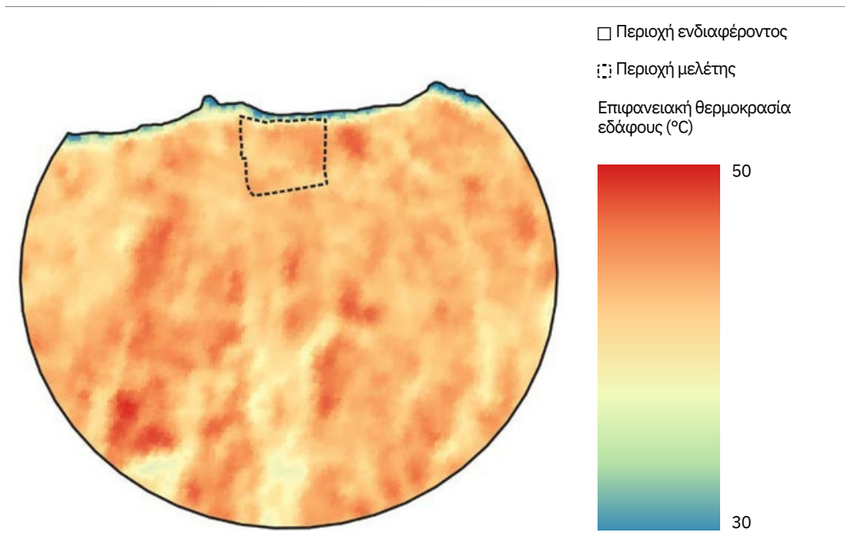
Η αξιολόγηση της αδιαπερατότητας, της θερμικής συμπεριφοράς της επιφάνειας και της κα- τάστασης της βλάστησης στην περιοχή μελέτης βασίστηκε σε συνδυασμό δορυφορικών προ- ϊόντων του Copernicus Land Monitoring Service (CLMS) και δεδομένων Landsat 8. Τα εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν περιλαμβάνουν τον δείκτη αδιαπερατότητας (IMD, έκδοση 2018), την επι- φανειακή θερμοκρασία εδάφους (LST) και τον δείκτη κανονικοποιημένης διαφοράς βλάστησης (NDVI). Τα τρία αυτά θεματικά επίπεδα παρέχουν μια συμπληρωματική προσέγγιση της σχέσης μεταξύ ανθρωπογενούς δραστηριότητας, θερμικού καθεστώτος και οικολογικής κατάστασης, καθορίζοντας κρίσιμες παραμέτρους για την αξιολόγηση της τρωτότητας στην κλιματική αλλαγή.

Το προϊόν υπολογισμού αδιαπερατότητας (IMD) εκφράζει το ποσοστό σφράγισης του εδάφους από τεχνητά υλικά –π.χ., άσφαλτο, σκυρόδεμα και στέγες– και αποτυπώνει τον βαθμό αδιαπε- ρατότητας σε ποσοστά από 0% (απόλυτα διαπερατό έδαφος) έως 100% (απόλυτα σφραγισμένο έδαφος). Η χωρική ανάλυση του IMD για την περιοχή των Γουρνών (Εικόνα 3.24) δείχνει υψηλές τιμές στις παράκτιες και περιαστικές ζώνες, με τη μεγαλύτερη συγκέντρωση γύρω από την εθνική οδό, τα τουριστικά καταλύματα και τις περιοχές εμπορικών εγκαταστάσεων. Η περιοχή άμεσου ενδιαφέροντος εμφανίζει επίσης σημαντικό βαθμό αδιαπερατότητας, λόγω των υφιστάμενων τεχνικών υποδομών και της έντονης αστικής ανάπτυξης. Η υψηλή αναλογία αδιαπέραστων επι- φανειών περιορίζει την απορρόφηση των κατακρημνισμάτων και αυξάνει την επιφανειακή απορ- ροή, καθιστώντας την περιοχή πιο ευάλωτη σε πλημμυρικά φαινόμενα και ενισχύοντας τη δημι- ουργία μικροκλιματικών συνθηκών υπερθέρμανσης.



Εικόνα 3.24: Ποσοστό αδιαπερατότητας της επιφάνειας για την περιοχή μελέτης Γουρνών

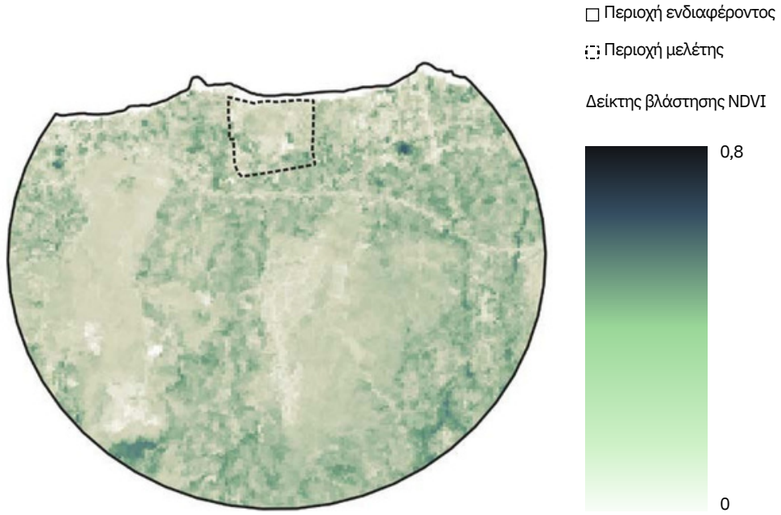
Η επιφανειακή θερμοκρασία εδάφους (LST), όπως υπολογίστηκε από τα δεδομένα Landsat 8 για την ξηρή περίοδο, παρουσιάζει μέσες τιμές μεταξύ 26°C και 50°C, με τις υψηλότερες θερμοκρα- σίες να καταγράφονται στις αδιαπέραστες και αστικοποιημένες περιοχές (Εικόνα 3.25). Οι ζώνες με έντονη αστική πυκνότητα και μικρή παρουσία βλάστησης λειτουργούν ως θερμικές νησίδες, αποθηκεύοντας θερμότητα κατά τη διάρκεια της ημέρας και απελευθερώνοντάς την τη νύχτα. Αντίθετα, χαμηλότερες θερμοκρασίες παρατηρούνται στις γεωργικές και υγροτοπικές περιοχές, όπου η βλάστηση και η υγρασία του εδάφους λειτουργούν ρυθμιστικά μέσω της εξατμισοδια- πνοής. Η διαφοροποίηση αυτή αναδεικνύει τη στενή συσχέτιση μεταξύ της θερμικής συμπερι- φοράς του εδάφους και των χωρικών προτύπων χρήσης γης, επιβεβαιώνοντας τη συμβολή της φυσικής κάλυψης στην ψύξη του μικροκλίματος.



Εικόνα 3.25: Επιφανειακή θερμοκρασία του εδάφους για την περιοχή μελέτης Γουρνών

Στην περιοχή των Γουρνών (Εικόνα 3.26), οι τιμές του NDVI (ο οποίος, προς υπενθύμιση, αποτυπώνει την υγεία και πυκνότητα της βλάστησης και οι τιμές του κυμαίνονται μεταξύ 0 και 1) εμφανίζουν μεγάλη χωρική διακύμανση: υψηλές τιμές (>0,5) καταγράφονται στους γεωργικούς και υγροτοπικούς σχηματισμούς, ενώ χαμηλές (<0,3) εντοπίζονται στις αστικές και τεχνητές επιφάνειες. Η περιοχή άμεσου ενδιαφέροντος εμφανίζει χαμηλές έως μέτριες τιμές NDVI, γεγονός που επιβεβαιώνει τη μειωμένη παρουσία φυσικής βλάστησης. Η συσχέτιση μεταξύ χαμηλού NDVI, υψηλής αδιαπερατότητας και αυξημένων θερμοκρασιών επιφανείας υποδηλώνει τη συσσωρευτική επίδραση του αστικού μικροκλίματος, με αυξημένο θερμικό φορτίο και μειωμένη βιοκλιματική ανθεκτικότητα.

→
Εικόνα 3.26: Δείκτης κανονικοποιημένης διαφοράς βλάστησης για την περιοχή μελέτης Γουρνών



Η συνδυασμένη ανάλυση των τριών δεικτών (IMD, LST και NDVI) αποκαλύπτει ένα συνεκτικό πρότυπο αλληλεξάρτησης μεταξύ ανθρώπινης δραστηριότητας, θερμικής συμπεριφοράς και οικολογικής λειτουργικότητας. Οι περιοχές με υψηλό βαθμό αστικοποίησης παρουσιάζουν αυξημένη θερμική καταπόνηση και χαμηλή φυτοκάλυψη, ενώ οι αγροτικές και φυσικές εκτάσεις λειτουργούν ως ψυχρές νησίδες, ρυθμίζοντας το μικροκλίμα και μετριάζοντας τις επιπτώ- σεις των καυσώνων. Αυτή η ετερογένεια καθιστά σαφές ότι ο σχεδιασμός προσαρμογής στην κλιματική αλλαγή πρέπει να εστιάζει στην ενίσχυση της πράσινης υποδομής, στη μείωση της αδιαπερατότητας και στη διατήρηση των φυσικών επιφανειών, που συμβάλλουν στην απορρόφηση νερού και στη θερμική εξισορρόπηση του τοπίου.

[4.0]

[4.1] Αξιολόγηση τρωτότητας αστικών περιοχών σε θερμική καταπόνηση

Οι υψηλές θερμοκρασίες και τα θερμικά επεισόδια που παρουσιάστηκαν στις Ενότητες 1 και 2 αποτελούν το κλιματικό υπόβαθρο στο οποίο λειτουργούν οι αστικές περιοχές. Ωστόσο η πραγματική ένταση της θερμικής καταπόνησης μέσα στον αστικό χώρο δεν καθορίζεται μόνο από τις κλιματικές τάσεις, αλλά και από τον τρόπο με τον οποίο ο ίδιος ο αστικός ιστός απορροφά, αποθηκεύει και απελευθερώνει θερμότητα. Η αστική γεωμετρία, η παρουσία βλάστησης, η αδιαπερατότητα των επιφανειών και η θερμική αδράνεια των υλικών είναι παράγοντες που ενισχύουν ή μετριάζουν τις επιπτώσεις των θερμικών πιέσεων και δημιουργούν έντονες χωρικές διαφοροποιήσεις.

Στο πλαίσιο της IPCC και του EUCRA, η τρωτότητα (vulnerability) αποτελεί βασικό στοιχείο της συνολικής διακινδύνευσης, καθώς περιγράφει τον βαθμό ευαισθησίας ενός τόπου στις επικρατούσες θερμικές συνθήκες. Η τρωτότητα των αστικών περιοχών σχετίζεται άμεσα με τα χαρακτηριστικά του δομημένου περιβάλλοντος και τη μικροκλιματική λειτουργία του: τον βαθμό σκίασης, την ικανότητα φυσικού δροσισμού, τον εγκλωβισμό θερμότητας στους δρόμους και την παρουσία επιφανειών υψηλής θερμικής φόρτισης.

[4.1.1] Μεθοδολογικό πλαίσιο και ρόλος των δεικτών

Ο υπολογισμός της τρωτότητας σε αστικές περιοχές δεν αποτελεί μια αυστηρά ποσοτική διαδικασία. Η τρωτότητα περιγράφει την ευαισθησία ενός τόπου στις θερμικές πιέσεις και αποτελεί πολυδιάστατη έννοια, η οποία δεν αποτυπώνεται αυτούσια σε ένα μοναδικό μετρήσιμο μέγεθος. Για τον λόγο αυτό, η διεθνής πρακτική βασίζεται στη χρήση δεικτών –επιμέρους και σύνθετων,– που επιτρέπουν τη συστηματική προσέγγιση, τον χωρικό εντοπισμό και τη συγκριτική αξιολόγηση των επιδράσεων.

Οι δείκτες λειτουργούν ως εργαλεία που μεταφράζουν φυσικές και χωρικές διεργασίες σε μορφή κατάλληλη για ανάλυση και χαρτογράφηση. Η διαδικασία αυτή είναι αναπόφευκτα προσεγγιστική, καθώς συμπυκνώνει σύνθετες αλληλεπιδράσεις σε τυποποιημένες μεταβλητές, χωρίς αυτό να μειώνει τη μεθοδολογική της εγκυρότητα. Η προσέγγιση αυτή ευθυγραμμίζεται πλήρως με:

- τη μεθοδολογία της IPCC, όπου η τρωτότητα και οι κλιματικοί κίνδυνοι αναλύονται μέσω συνθετικών δεικτών,
- το ευρωπαϊκό πλαίσιο EUCRA, το οποίο αξιοποιεί χωρικές, λειτουργικές και περιβαλλοντικές μεταβλητές για την αξιολόγηση της διακινδύνευσης,
- τη διεθνή βιβλιογραφία αστικού κλίματος και ανθεκτικότητας, όπου η αξιοποίηση δεικτών μικροκλίματος αποτελεί βασική μεθοδολογική επιλογή.[37]

[37] Oke, T.R., Mills, G., Christen, A. και Voogt, J.A. (2017). *Urban climates*. Cambridge University Press.

Οι δείκτες δεν αποτελούν «απόλυτες» μετρήσεις, αλλά συνεπείς αναπαραστάσεις που αποδίδουν τις χωρικές διαφοροποιήσεις της ευαισθησίας. Η σύνθεσή τους επιτρέπει μια λειτουργική εικόνα της τρωτότητας, χρήσιμη για την υποστήριξη σχεδιασμού, την προτεραιοποίηση παρεμβάσεων και την αξιολόγηση υφιστάμενων υποδομών.

[4.1.2] Παράμετροι που επηρεάζουν την αστική τρωτότητα

Με βάση τα γεωμορφολογικά και φυσικογεωγραφικά δεδομένα που εξετάστηκαν στην Ενότητα 3, ο υπολογισμός της τρωτότητας στηρίζεται σε τέσσερις παράγοντες με τεκμηριωμένη μικροκλιματική σημασία. Οι τέσσερις παράμετροι λειτουργούν συμπληρωματικά και αποτυπώνουν κρίσιμες διαστάσεις της ευαισθησίας του χώρου απέναντι στη θερμική καταπόνηση

1. Επιφανειακή θερμοκρασία (LST)

Αποτυπώνει το χωρικό μοτίβο της θερμικής φόρτισης και αποτελεί βασικό υπόβαθρο για τον εντοπισμό περιοχών αυξημένης θερμικής έντασης.

2. Δείκτης βλάστησης (NDVI)

Συνδέεται με τη δυνατότητα φυσικού δροσισμού μέσω σκίασης και εξατμισοδιαπνοής. Χαμηλές τιμές υποδηλώνουν αυξημένη θερμική ευπάθεια.

3. Ύψος κτιρίων (Buildings Height, BH)

Επηρεάζει τη σκίαση, την ανταλλαγή ακτινοβολίας και τη ροή αέρα. Ύψηλή και συμπαγής δόμηση αυξάνει την πιθανότητα θερμικής παγίδευσης.

4. Αδιαπερατότητα επιφανειών (Imperviousness Density, IMD)

Οι δομημένες επιφάνειες έχουν υψηλή θερμική αδράνεια και μειωμένο δυναμικό δροσισμού, ενισχύοντας τη συσσώρευση θερμότητας σε αστικό περιβάλλον.

[4.1.3] Κανονικοποίηση μεταβλητών και δημιουργία σύνθετου δείκτη

Για να καταστούν συγκρίσιμες οι μεταβλητές, κανονικοποιούνται στο διάστημα 0-1, όπου:

- 1 = υψηλή τρωτότητα
- 0 = χαμηλή τρωτότητα
- Για τον NDVI εφαρμόζεται αντιστροφή (1 – NDVI), ώστε όλες οι παράμετροι να έχουν κοινή κατεύθυνση: υψηλότερες τιμές → μεγαλύτερη ευαισθησία.

Οι τιμές των παραμέτρων κανονικοποιήθηκαν με βάση το εύρος τιμών που καταγράφεται εντός της περιοχής μελέτης, ώστε ο σύνθετος δείκτης να αποδίδει τις σχετικές διαφοροποιήσεις τρωτότητας μεταξύ των επιμέρους τμημάτων του αστικού ιστού. Η προσέγγιση αυτή επιτρέπει τον εντοπισμό των περιοχών υψηλότερης τρωτότητας, εστιάζοντας στη σύγκριση των περιοχών και όχι σε απόλυτες τιμές. Η τελική ταξινόμηση σε πέντε κατηγορίες (από πολύ χαμηλή ως πολύ υψηλή) προκύπτει από την ανακατανομή των κανονικοποιημένων τιμών, ακολουθώντας συνε- πή κλίμακα που επιτρέπει καθαρή και συγκρίσιμη οπτική αποτύπωση των περιοχών αυξημένης τρωτότητας.

Ο σύνθετος δείκτης τρωτότητας υπολογίζεται ως:

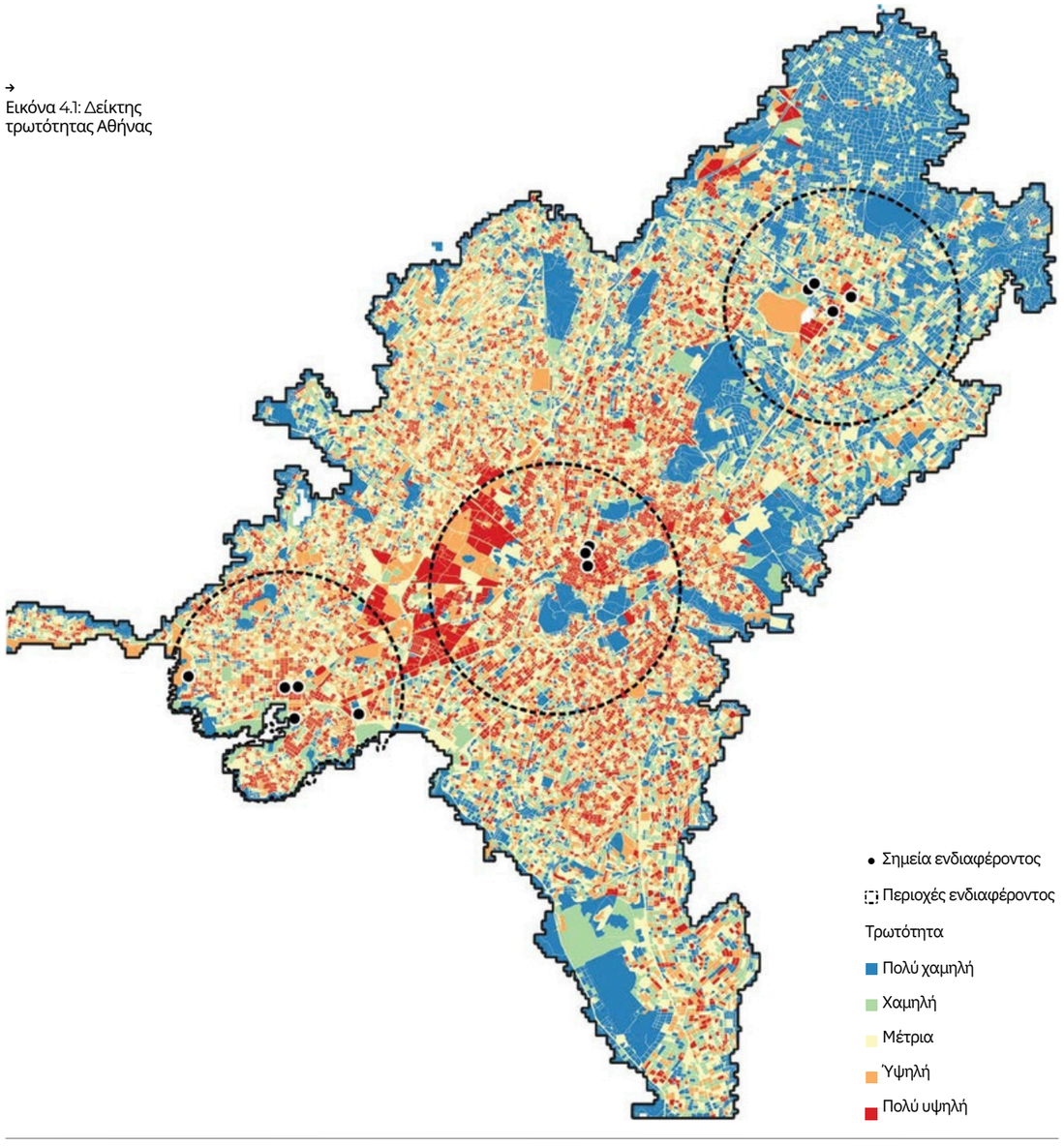
$$\text{Τρωτότητα} = \frac{\text{LST} + (1-\text{NDVI}) + \text{BH} + \text{IMD}}{4}$$

[4.1.4] Τρωτότητα στις περιοχές ενδιαφέροντος

ΑΘΗΝΑ

Για τη στοχευμένη χωρική αξιολόγηση εξετάστηκαν οι τρεις περιοχές ενδιαφέροντος –Αθήνα, Μαρούσι και Πειραιάς–, καθώς και τα επιμέρους σημεία ενδιαφέροντος. Η απεικόνιση των ταξινομημένων κατηγοριών τρωτότητας επιτρέπει τη σύγκριση του επιπέδου επιβάρυνσης μεταξύ των τριών περιοχών και τον εντοπισμό των τμημάτων όπου ο αστικός ιστός εμφανίζει υψηλότερη ή χαμηλότερη τρωτότητα στη θερμική καταπόνηση (Εικόνα 4.1).

→
Εικόνα 4.1: Δείκτης τρωτότητας Αθήνας



Αθήνα

Η περιοχή του κέντρου της Αθήνας παρουσιάζει τις υψηλότερες και πιο συνεκτικές τιμές τρωτότητας μεταξύ των τριών περιοχών ενδιαφέροντος. Ιδιαίτερα η περιοχή του ιστορικού κέντρου των Αθηνών, που περιλαμβάνει τα τρία σημεία ενδιαφέροντος, εμφανίζει πολύ υψηλή τρωτότητα, όπως και η ευρύτερη περιοχή του Ελαιώνα/Ρέντη. Το ιστορικό κέντρο, όπως έχει αναλυθεί στην προηγούμενη ενότητα, καλύπτει τμήματα του πυκνά δομημένου πολεοδομικού ιστού, όπου οι τέσσερις παράμετροι του δείκτη συγκλίνουν σε δυσμενείς τιμές:

- LST: αυξημένη επιφανειακή θερμοκρασία σε μεγάλη έκταση, ενδεικτική έντονου θερμικού υποβάθρου.
- NDVI: πολύ χαμηλές τιμές, με ουσιαστική απουσία πρασίνου στον πυρήνα.
- IMD: υψηλό ποσοστό αδιαπερατότητας με συνεχές δίκτυο σκληρών επιφανειών.
- BH: πυκνή και σχετικά υψηλή δόμηση, που περιορίζει τη χωρική «αναπνοή» και τον αερισμό.

Ο συνδυασμός αυτός δημιουργεί τις προϋποθέσεις για έναν συνεκτικό θερμικό θύλακα – ένα “hotspot” υψηλής και πολύ υψηλής τρωτότητας. Τα σημεία ενδιαφέροντος εντός της περιοχής μελέτης εντοπίζονται σχεδόν αποκλειστικά σε κατηγορίες υψηλής και πολύ υψηλής τρωτότητας, γεγονός που τα καθιστά περιοχές άμεσης προτεραιότητας για παρεμβάσεις μικροκλίματος (σκίαση, πράσινες επιφάνειες κτλ.).

Η περιοχή του Ελαιώνα/Ρέντη, η οποία φιλοξενεί ακόμη εκτεταμένες βιομηχανικές και μεταφορικές χρήσεις, εμφανίζει αντίστοιχα υψηλές τιμές τρωτότητας, αν και με διαφορετικά μορφολογικά χαρακτηριστικά. Η υψηλή αδιαπερατότητα (IMD), η εκτεταμένη παρουσία μεγάλων στεγανών επιφανειών και η περιορισμένη βλάστηση οδηγούν σε αυξημένες τιμές LST. Σε αντίθεση με το ιστορικό κέντρο, η δόμηση στην περιοχή είναι συχνά χαμηλότερη αλλά πιο εκτεταμένη και λειτουργικά ενιαία, γεγονός που ενισχύει τη συσσώρευση θερμότητας.

Μαρούσι

Η περιοχή του Αμαρουσίου παρουσιάζει τη μεγαλύτερη ανομοιογένεια. Η χαρτογράφηση του δείκτη τρωτότητας φανερώνει την παρουσία εκτεταμένων τμημάτων πολύ χαμηλής τρωτότητας (σκούρο μπλε), σημαντικές ζώνες χαμηλής και μέτριας τρωτότητας, αλλά και μεμονωμένες συστάδες υψηλής–πολύ υψηλής τρωτότητας. Η συμπεριφορά αυτή αντανακλά τις τιμές των παραμέτρων:

- LST: κυρίως μέτριο θερμικό φορτίο, με τοπικά θερμά σημεία
- NDVI: αναλογικά υψηλότερες τιμές σε σχέση με την Αθήνα, με εμφανείς διαδρομές και συστάδες πρασίνου
- IMD: εναλλαγή διαπερατών και αδιαπέραστων επιφανειών, που διαμορφώνουν θερμικά μωσαϊκά
- BH: ποικίλη δόμηση, με τμήματα υψηλότερης πυκνότητας να αντιστοιχούν στα θερμά σημεία.

Η περιοχή ενδιαφέροντος δεν αναπτύσσει ενιαίο θερμικό πυρήνα, αλλά ένα πολυζωνικό μικροκλιματικό πεδίο, με χαμηλές τρωτότητες σε μεγάλη έκταση και τοπικές υψηλές εξάρσεις που συνδέονται με τοπικές συστάδες δόμησης ή μεγάλες αδιαπέραστες επιφάνειες. Τα σημεία ενδιαφέροντος βρίσκονται σε ζώνες χαμηλής τρωτότητας, όμως γειτνιάζουν άμεσα με περιοχές υψηλότερης τρωτότητας.

Πειραιάς

Η περιοχή του Πειραιά εμφανίζει εκτεταμένες περιοχές υψηλής και πολύ υψηλής τρωτότητας. Τα μορφολογικά και κλιματικά χαρακτηριστικά της περιοχής συνδέονται άμεσα με το χωρικό μοτίβο του δείκτη:

- LST: Η περιοχή παρουσιάζει μέτρια θερμική φόρτιση, αλλά τα θερμά σημεία είναι ευκρινώς οριοθετημένα και συνδέονται με τμήματα αυξημένης θερμικής αδράνειας.
- NDVI: Η παρουσία βλάστησης είναι περιορισμένη στον κεντρικό ιστό, γεγονός που διατηρεί τον δείκτη σε μέτριες κατηγορίες και επιτρέπει την εμφάνιση υψηλών τιμών όπου η φυτοκάλυψη απουσιάζει πλήρως.
- IMD: Τμήματα με υψηλή αδιαπερατότητα αντιστοιχούν απευθείας στις υψηλές κατηγορίες τρωτότητας.
- BH: Η ανομοιομορφία στην κτιριακή δόμηση –με πυκνότερα και υψηλότερα τμήματα ενδιάμεσα σε χαμηλότερες δομές– οδηγεί σε μικροκλιματική μεταβλητότητα.

Συνολικά, η ανάλυση της αστικής τρωτότητας αναδεικνύει σαφείς διαφοροποιήσεις μεταξύ των περιοχών ενδιαφέροντος. Το ιστορικό κέντρο της Αθήνας παρουσιάζει υψηλές τιμές τρωτότη- τας, με τη θερμική καταπόνηση να είναι συστηματική και έντονη. Αντίθετα, το Μαρούσι παρουσι- άζει πολυζωνικό χαρακτήρα με σημαντικές εκτάσεις χαμηλής τρωτότητας και τοπικές εξάρσεις, ενώ ο Πειραιάς εμφανίζει συνολικά αυξημένη τρωτότητα, άμεσα συνδεδεμένη με την αδιαπερα- τότητα και τη μορφολογία του δομημένου ιστού.

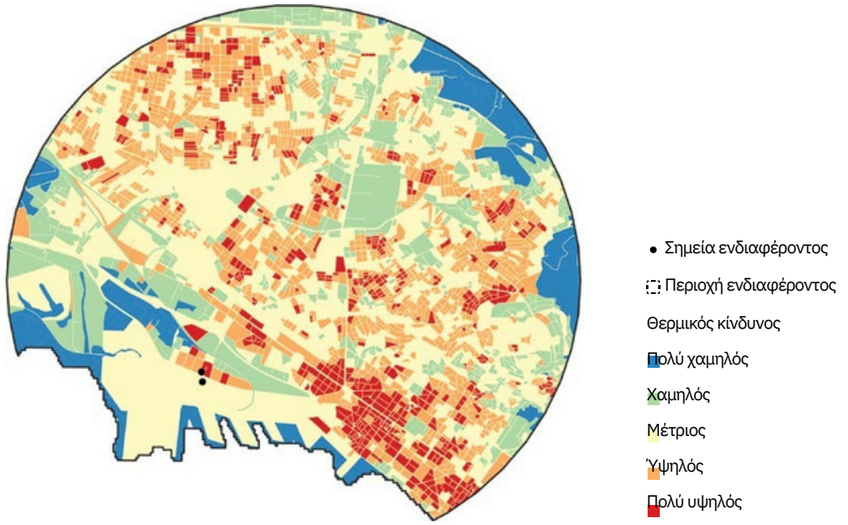
Ο σύνθετος δείκτης τρωτότητας δεν αποσκοπεί στην αποτύπωση απόλυτων θερμικών τιμών, αλλά στη χωρική ιεράρχηση της ευαισθησίας του αστικού χώρου απέναντι στη θερμική καταπόνηση. Έτσι, η χαρτογραφική απεικόνιση της τρωτότητας προσδιορίζει τις περιοχές όπου οι παρεμβάσεις προσαρμογής, όπως η ενίσχυση του αστικού πρασίνου, η σκίαση κ.ά., είναι περισσότερο αναγκαίες και αναμένεται να έχουν τη μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα.

Οι περιοχές και τα σημεία ενδιαφέροντος που εντοπίζονται στις κατηγορίες υψηλής και πολύ υψηλής τρωτότητας αποτελούν, συνεπώς, ζώνες άμεσης προτεραιότητας για την εφαρμογή μέτρων προσαρμογής στο αστικό περιβάλλον. Η εξειδίκευση των κατάλληλων παρεμβάσεων, λαμβάνοντας υπόψη τα ιδιαίτερα μορφολογικά και λειτουργικά χαρακτηριστικά κάθε περιοχής, παρουσιάζεται αναλυτικά στο κείμενο «Κανόνες και πρακτικές για “ανθεκτικές” αστικές περιοχές», το οποίο αξιοποιεί τα αποτελέσματα της παρούσας ανάλυσης ως χωρικό υπόβαθρο για τον σχεδιασμό στοχευμένων δράσεων.

ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ

Η χαρτογράφηση του σύνθετου δείκτη τρωτότητας (Εικόνα 4.2) αναδεικνύει έντονες χωρικές διαφοροποιήσεις μέσα στον πυκνοδομημένο και λειτουργικά σύνθετο αστικό ιστό της δυτικής Θεσσαλονίκης. Τα πρότυπα τρωτότητας αντανακλούν τα ευρήματα της Ενότητας 3, όπου καταγράφηκαν υψηλή αδιαπερατότητα, περιορισμένη βλάστηση, έντονη παρουσία βιομηχανικών/εμπορικών χρήσεων και συμπαγή οικιστική δόμηση. Οι τέσσερις παράμετροι του δείκτη τρωτότητας συγκλίνουν σε ένα συνεκτικό μικροκλιματικό προφίλ που εξηγεί την κατανομή των κατηγοριών τρωτότητας.

→
Εικόνα 4.2: Δείκτης τρωτότητας Θεσσαλονίκης



Περιοχές υψηλής και πολύ υψηλής τρωτότητας

Οι υψηλότερες τιμές τρωτότητας εντοπίζονται σε εκτεταμένα και συνεχή τμήματα στο μεγαλύτερο μέρος της περιοχής μελέτης. Πρόκειται για ζώνες όπου:

- η αδιαπερατότητα είναι εξαιρετικά υψηλή, με μεγάλες ενιαίες επιφάνειες ασφάλτου, τσιμέντου και δικτύων μεταφορών,
- η βλάστηση είναι αποσπασματική ή ανύπαρκτη,
- η επιφανειακή θερμοκρασία (LST) καταγράφει έντονα θερμικά “hotspots”,
- το ύψος και η πυκνότητα των κτιρίων δημιουργούν συνθήκες θερμικού εγκλωβισμού.

Περιοχές μέτριας τρωτότητας

Σε αρκετά τμήματα εμφανίζονται μεταβατικές ζώνες με μέτρια τρωτότητα. Αυτές αντιστοιχούν σε περιοχές όπου η δόμηση είναι λιγότερο συμπαγής, υπάρχουν μικρές νησίδες πρασίνου ή χαμηλότερες θερμικές τιμές σε σύγκριση με τον κεντρικό πυρήνα. Παρότι συχνά παραμένουν θερμικά φορτισμένες, η καταπόνηση είναι ηπιότερη.

Περιοχές χαμηλότερης τρωτότητας

Οι χαμηλότερες κατηγορίες εμφανίζονται κυρίως προς τη νότια ζώνη, κοντά στο θαλάσσιο μέτωπο, όπου η επίδραση της αύρας και η μικρότερη θερμική αδράνεια οδηγούν σε μειωμένες θερμοκρασίες επιφανείας. Μικρές νησίδες χαμηλής τρωτότητας υπάρχουν και στα ανατολικά, όπου η παρουσία πρασίνου και οι λιγότερο δομημένες επιφάνειες λειτουργούν δροσιστικά.

Συνολικά, η χαρτογράφηση του σύνθετου δείκτη τρωτότητας καταδεικνύει ότι η δυτική Θεσσαλονίκη συγκροτεί έναν εκτεταμένο και λειτουργικά συνεκτικό χώρο αυξημένης θερμικής τρωτότητας. Οι ζώνες υψηλής και πολύ υψηλής τρωτότητας εντοπίζονται σε μεγάλο μέρος της περιοχής, ενώ οι χαμηλότερες κατηγορίες περιορίζονται κυρίως περιμετρικά ή εμφανίζονται αποσπασματικά, χωρίς να διαμορφώνουν ενιαία δροσιστικά μέτωπα. Το χωρικό αυτό πρότυπο αντανακλά έναν αστικό ιστό με υψηλή θερμική αδράνεια, περιορισμένη φυτοκάλυψη και έντονη συγκέντρωση αδιαπέραστων επιφανειών.

Ο δείκτης τρωτότητας λειτουργεί ως εργαλείο χωρικής ιεράρχησης, αναδεικνύοντας με σαφήνεια τις περιοχές όπου η θερμική καταπόνηση είναι συστηματική και όχι περιστασιακή. Οι ζώνες που εντάσσονται στις κατηγορίες υψηλής και πολύ υψηλής τρωτότητας αποτελούν περιοχές άμεσης προτεραιότητας για την εφαρμογή παρεμβάσεων προσαρμογής, ιδίως σε επίπεδο μικροκλίματος και δομημένου περιβάλλοντος.

Η επιλογή, ο σχεδιασμός και η εξειδίκευση των κατάλληλων μέτρων, όπως η ενίσχυση του αστι- κού πρασίνου, η σκίαση και η αναβάθμιση των υλικών, παρουσιάζονται αναλυτικά στο κείμενο «Κανόνες και πρακτικές για “ανθεκτικές” αστικές περιοχές», το οποίο αξιοποιεί τα αποτελέσματα της παρούσας χωρικής ανάλυσης για τον στοχευμένο σχεδιασμό παρεμβάσεων στις περιοχές με τη μεγαλύτερη ανάγκη.

[4.2]

Αξιολόγηση τρωτότητας της περιοχής των Γουρνών λόγω κλιματικών κινδύνων

Η περιοχή των Γουρνών, στην παράκτια ζώνη του Δήμου Χερσονήσου, αποτελεί χαρακτηριστικό παράδειγμα πεδινής και έντονα ανθρωπογενούς ενότητας, όπου η αλληλεπίδραση μεταξύ φυσικού περιβάλλοντος και αστικής ανάπτυξης καθορίζει σε μεγάλο βαθμό τη διακινδύνευση απέναντι στην κλιματική αλλαγή. Η περιοχή συνδυάζει εκτεταμένες τεχνητές επιφάνειες και αγροτικές εκτάσεις, περιορισμένη δασική κάλυψη, καθώς και υγροτοπικές ψηφίδες κοντά στην παράκτια ζώνη, στοιχεία που την καθιστούν ιδιαίτερα ευαίσθητη στις μεταβολές των κλιματικών παραμέ- τρων. Οι χωρικές αναλύσεις των μορφολογικών και φυσικογεωγραφικών δεδομένων κατέδειξαν ότι η περιοχή χαρακτηρίζεται από ήπιες κλίσεις, μέτρια υψομετρική διαφοροποίηση και υψηλό βαθμό αδιαπερατότητας, γεγονός που επηρεάζει άμεσα τη δυναμική της απορροής, τη θερμική καταπόνηση και την ευπάθεια σε πλημμύρες και καύσωνες.

Η αξιολόγηση των κλιματικών κινδύνων βασίζεται στη μεθοδολογική προσέγγιση του IPCC AR6 και του ευρωπαϊκού πλαισίου EUCRA (European Climate Risk Assessment), η οποία αναγνω- ρίζει τη διακινδύνευση (Risk) ως συνάρτηση τριών βασικών παραμέτρων: κλιματικού κινδύνου (hazard), έκθεσης (exposure) και τρωτότητας (vulnerability). Οι κλιματικοί κίνδυνοι απορρέουν από τις φυσικές μεταβολές του κλιματικού συστήματος, όπως η αύξηση της θερμοκρασίας, η μειωμένη βροχόπτωση ή η αύξηση των ακραίων καιρικών φαινομένων. Η έκθεση αναφέρεται στην παρουσία ανθρώπινων, οικολογικών και οικονομικών συστημάτων σε περιοχές που επηρε- άζονται από αυτούς τους κινδύνους, ενώ η τρωτότητα εκφράζει την εγγενή ευαισθησία και την ικανότητα προσαρμογής των συστημάτων αυτών στις μεταβαλλόμενες συνθήκες.

Η ανάλυση για τις Γούρνες επικεντρώνεται στους τέσσερις σημαντικότερους κλιματικούς κινδύνους για την περιοχή:

- Δασικές πυρκαγιές, που συνδέονται με την υψηλή θερμοκρασία, την ξηρότητα του καλοκαιριού και τη χαμηλή δενδροκάλυψη.
- Πλημμύρες, που ευνοούνται από τη μορφολογία του εδάφους και την εκτεταμένη αδιαπερατότητα των επιφανειών.
- Ξηρασία, αποτέλεσμα της μείωσης των βροχοπτώσεων και της αυξημένης εξάτμισης λόγω θερμότερων περιόδων.
- Καύσωνες, που συνδέονται με τις αυξανόμενες μέσες και ακραίες θερμοκρασίες και την αστική θερμική νησίδα.

Για την ποσοτικοποίηση των κινδύνων αξιοποιήθηκαν κλιματικά δεδομένα από προσομοιώσεις υψηλής χωρικής ανάλυσης (EURO-CORDEX),[38] οι οποίες δείχνουν πώς μπορεί να μεταβληθούν οι κλιματικές συνθήκες στο μέλλον, με βάση ένα μετριοπαθές (RCP4.5) και ένα δυσμενές σενάριο (RCP8.5) κλιματικής αλλαγής. Από τα κλιματικά δεδομένα προκύπτουν επιμέρους και σύνθετοι δείκτες, όπως δείκτες επικινδυνότητας πυρκαγιάς, δείκτες έντονων βροχοπτώσεων, ξηρασίας και υψηλών θερμοκρασιών. Οι δείκτες αυτοί χρησιμοποιούνται για να συνδεθούν οι βασικές κλιματικές μεταβλητές με τα φαινόμενα διακινδύνευσης και συνδυάστηκαν με μη κλιματικούς παράγοντες, όπως η μορφολογία του εδάφους, η κάλυψη και χρήση γης, η δασική δομή και η αδιαπερατότητα, ώστε να δημιουργηθούν σύνθετοι χάρτες διακινδύνευσης για κάθε είδος κινδύνου.

[38] Εκτενέστερη επεξήγηση του προγράμματος Euro-Cordex διεθέσιμη στο https://climate-adapt.eea.europa.eu/el/metadata/portals/euro-cordex (ανακτήθηκε στις 3 Φεβρουαρίου 2026).

Η πολυεπίπεδη αυτή ανάλυση αποτυπώνει τη χωρική διαφοροποίηση της επικινδυνότητας σε κλίμακα τοπίου, προσδιορίζοντας τις ζώνες αυξημένης ευπάθειας και τις περιοχές όπου οι φυσικοί και ανθρωπογενείς παράγοντες συνδυάζονται αρνητικά. Στις Γούρνες, οι περιοχές υψηλής συγκέντρωσης τεχνητών επιφανειών και περιορισμένης βλάστησης εμφανίζουν αυξημένη διακινδύνευση σε καύσωνες και πλημμύρες, ενώ οι αγροτικές και ημιφυσικές ενότητες επηρεάζονται περισσότερο από την ξηρασία και τη διάβρωση του εδάφους. Η μικρή παρουσία δασικών εκτά- σεων μειώνει τη φυσική ικανότητα της περιοχής να ρυθμίζει τη θερμοκρασία και την απορροή, αυξάνοντας την εξάρτηση από τεχνικά μέτρα και υποδομές.

Η επόμενη ανάλυση εξειδικεύει τα αποτελέσματα ανά κλιματικό κίνδυνο, συνδυάζοντας κλιματικούς δείκτες, γεωφυσικά δεδομένα και δείκτες τρωτότητας προκειμένου να αποτυπωθούν οι χωρικές διαφοροποιήσεις και να προσδιοριστούν οι πιθανές επιπτώσεις στους φυσικούς και ανθρωπογενείς πόρους. Μέσα από αυτή τη διαδικασία επιδιώκεται να καθοριστούν όχι μόνο οι πιο ευάλωτες περιοχές, αλλά και οι παράγοντες που καθοδηγούν τη διακινδύνευση, ώστε να τεθούν οι βάσεις για την ανάπτυξη στρατηγικών προσαρμογής και ανθεκτικότητας της περιοχής στις μελλοντικές κλιματικές προκλήσεις.

[4.2.1] Δασική πυρκαγιά

Οι δασικές πυρκαγιές αποτελούν σημαντικό κλιματικό κίνδυνο, επηρεάζοντας διάφορα συστήματα που είναι αναπόσπαστα στοιχεία τόσο για την οικολογική ισορροπία όσο και για την ανθρώπινη ευημερία. Οδηγούν σε απώλεια βιοποικιλότητας και καταστροφή οικοτόπων, επηρεάζουν τις τοπικές κοινότητες, ιδίως αυτές που γειτνιάζουν με τα δάση, και διαταράσσουν τις τοπικές οικονομίες, επηρεάζοντας τομείς που εξαρτώνται από τους φυσικούς πόρους, όπως η δασοκομία, ο τουρισμός και η γεωργία.

Η εκδήλωση και η ένταση των δασικών πυρκαγιών στην περιοχή των Γουρνών επηρεάζονται από τον συνδυασμό κλιματικών, γεωμορφολογικών και ανθρωπογενών παραγόντων, οι οποίοι καθορίζουν τόσο την πιθανότητα ανάφλεξης όσο και τη δυναμική εξάπλωσης της φωτιάς. Παρά το γεγονός ότι η περιοχή δεν διαθέτει εκτεταμένα δάση, η παρουσία θαμνώδους και χαμηλής βλάστησης, η ξηρότητα του εδάφους και η υψηλή θερμική καταπόνηση κατά τους θερινούς μήνες δημιουργούν ευνοϊκές συνθήκες για την εκδήλωση πυρκαγιών, ιδιαίτερα στις περιαστικές και αγροτικές ζώνες. Οι υψηλές τιμές επιφανειακής θερμοκρασίας (LST > 40°C) και ο χαμηλός δείκτης βλάστησης (NDVI < 0,3) τεκμηριώνουν την αυξημένη ευφλεκτότητα του τοπίου.

Στον Πίνακα 4.1 απεικονίζονται οι άμεσες και έμμεσες επιπτώσεις των δασικών πυρκαγιών που οδηγούν στην αξιολόγηση της διακινδύνευσης του συγκεκριμένου κλιματικού κινδύνου.

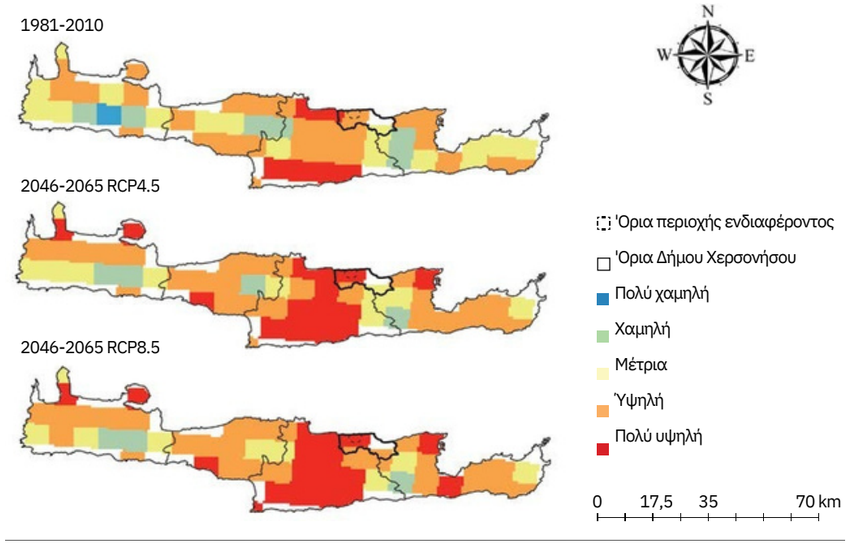
Πίνακας 4.1: Αποτύπωση επιπτώσεων δασικών πυρκαγιών ↓

Κλιματικός κίνδυνος		**Έκθεση & Τρωτότητα**	
Κλιματικός παράγοντας	*Δείκτης*	*Μη κλιματικός παράγοντας*	*Δείκτης*
Πυρομετεωρολογικές συνθήκες	Δείκτης καιρού πυρκαγιάς	Καύσιμη ύλη	Χάρτης φορτίου καύσιμης ύλης
Άμεσες και έμμεσες επιπτώσεις			
Αύξηση της συχνότητας και της σοβαρότητας των δασικών πυρκαγιών			
Διακινδύνευση			
Οικοσυστήματα: Καταστροφή των δασικών οικοσυστημάτων, απώλεια της ζωής φυτών και ζώων, υποβάθμιση του εδάφους			
Υγεία: Κίνδυνοι για την υγεία (π.χ., από την εισπνοή καπνού)			
Οικονομία: Μακροπρόθεσμες οικονομικές επιπτώσεις, συμπεριλαμβανομένου του κόστους αποκατάστασης και της απώλειας φυσικών πόρων			

Η αξιολόγηση του κλιματικού κινδύνου πραγματοποιήθηκε με τη χρήση του δείκτη Fire Weather Index (FWI), ο οποίος συνδυάζει δεδομένα θερμοκρασίας, υγρασίας, ανέμου και βροχόπτωσης για την αποτύπωση των συνθηκών επικινδυνότητας πυρκαγιάς.[39] Τα αποτελέσματα υποδεικνύ- ουν ότι η επικινδυνότητα (hazard) είναι ήδη υψηλή για την περίοδο αναφοράς (1981-2010) και αναμένεται να καταστεί πολύ υψηλή τη μελλοντική περίοδο (2046-2065), υπό την επίδραση της αύξησης της μέσης θερμοκρασίας και της μείωσης των ημερών με βροχόπτωση (Εικόνα 4.3). Για τη μελέτη υπολογίστηκε, για όλη την Ελλάδα, ο συνολικός αριθμός ημερών με υψηλό και πολύ υψηλό κίνδυνο για την περίοδο αναφοράς (1981-2010) και τη μελλοντική περίοδο (2046-2065) για τα σενάρια RCP4.5 και RCP8.5 (Εικόνα 4.3) και κανονικοποιήθηκε σε 5 κατηγορίες κινδύνου, από τον χαμηλότερο (τάξη 1) ως τον υψηλότερο (τάξη 5).

[39] Εκτενέστερη επεξήγηση του δείκτη Fire Weather Index (FWI) διαθέσιμη στο https://climate-adapt.eea.europa.eu/en/metadata/indicators/fire-weather-index (ανακτήθηκε στις 3 Φεβρουαρίου 2026).

→
Εικόνα 4.3: Δείκτης καιρού πυρκαγιάς (FWI) Κρήτης



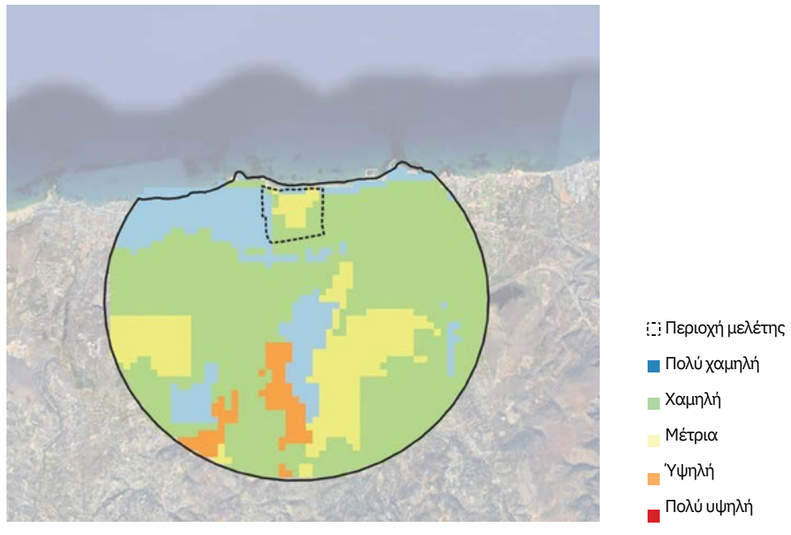
Η έκθεση και η τρωτότητα στις δασικές πυρκαγιές αξιολογούνται με βάση την κατανομή του φορτίου καύσιμης ύλης, δηλαδή της ποσότητας και του τύπου της διαθέσιμης βλάστησης που μπορεί να καεί σε κάθε περιοχή, σύμφωνα με τα δεδομένα του ερευνητικού προγράμμα- τος FirEUrisk.[40] Εφαρμόζοντας τη μεθοδολογία του FirEUrisk, ταξινομήθηκαν οι διάφοροι τύποι κάλυψης/χρήσης γης που απαντώνται στην Ελλάδα σε πέντε κατηγορίες, ανάλογα με την επί- δρασή τους στην τρωτότητα της περιοχής σε δασικές πυρκαγιές (Πίνακας 4.2). Στην περιοχή των Γουρνών, ο δείκτης έκθεσης-τρωτότητας παρουσιάζει χαμηλές έως μέτριες τιμές κατά την περί- οδο αναφοράς, γεγονός που αντανακλά τη σχετικά περιορισμένη παρουσία συνεχούς δασικής βλάστησης και τη μωσαϊκή κατανομή των χρήσεων γης (αγροτικές, αδόμητες και κατοικημένες εκτάσεις). Οι περιοχές υψηλής τιμής του δείκτη εντοπίζονται νοτιοδυτικά και νοτιοανατολικά του πεδίου μελέτης, όπου συνυπάρχουν θαμνώνες, μεταβατικές καλύψεις και εκτεταμένες αγροτικές εκτάσεις με χαμηλή υγρασία εδάφους και περιορισμένη προσβασιμότητα. Αντίθετα, το παρά- κτιο τμήμα και η περιοχή άμεσου ενδιαφέροντος εντάσσονται κυρίως στις χαμηλές έως μέτριες κατηγορίες έκθεσης-τρωτότητας, λόγω του αστικού χαρακτήρα, της μειωμένης καύσιμης ύλης και της καλύτερης πρόσβασης σε υποδομές πυροπροστασίας. Παρ' όλα αυτά, η γειτνίαση με ζώνες υψηλότερης ευφλεκτότητας στα νότια μπορεί να αυξήσει τον κίνδυνο ταχείας διάδοσης πυρκαγιάς προς το βόρειο τμήμα της περιοχής, ιδιαίτερα υπό συνθήκες ισχυρών ανέμων.

[40] Aragoneses, E., García, M., Salis, M., Ribeiro, L.M. και Chuvieco, E.: Classification and mapping of European fuels using a hierarchical, multipurpose fuel classification system, *Earth Syst. Sci. Data*, 15, 1287-1315 (https://doi.org /10.5194/essd-15-1287-2023), 2023.

Πίνακας 4.2: Κατηγορίες φορτίου καύσιμης ύλης ↓

Κατηγορία	Τύποι κάλυψης γης
Πολύ χαμηλή	Αστικός συνεχής ιστός, Αστικός ασυνεχής ιστός
Χαμηλή	Χαμηλή χορτολιβαδική έκταση, Μέτρια χορτολιβαδική έκταση, Ποώδης καλλιεργήσιμη έκταση
Μέτρια	Ξυλώδεις καλλιεργήσιμες εκτάσεις, Ανοιχτό μεικτό δάσος, Ανοιχτό δάσος φυλλοβόλων πλατύφυλλων, Ανοιχτό δάσος αειφύλλων βελονοφύλλων, Ύγρές και τυρφώδεις/ημιτεφρώδεις εκτάσεις – δέντρα, Ύγρές και τυρφώδεις/ημιτεφρώδεις εκτάσεις –θάμνοι, Ύγρές και τυρφώδεις/ημιτεφρώδεις εκτάσεις – χορτολιβαδικές εκτάσεις
Ύψηλή	Μεσαία θαμνώδης έκταση, Ύψηλή θαμνώδης έκταση, Κλειστό δάσος πλατύφυλλων φυλλοβόλων δέντρων
Πολύ Ύψηλή	Δάσος με αείφυλλα βελονόφυλλα, Κλειστό μεικτό δάσος

→ Εικόνα 4.4: Χάρτης φορτίου καύσιμης ύλης Γουρνών



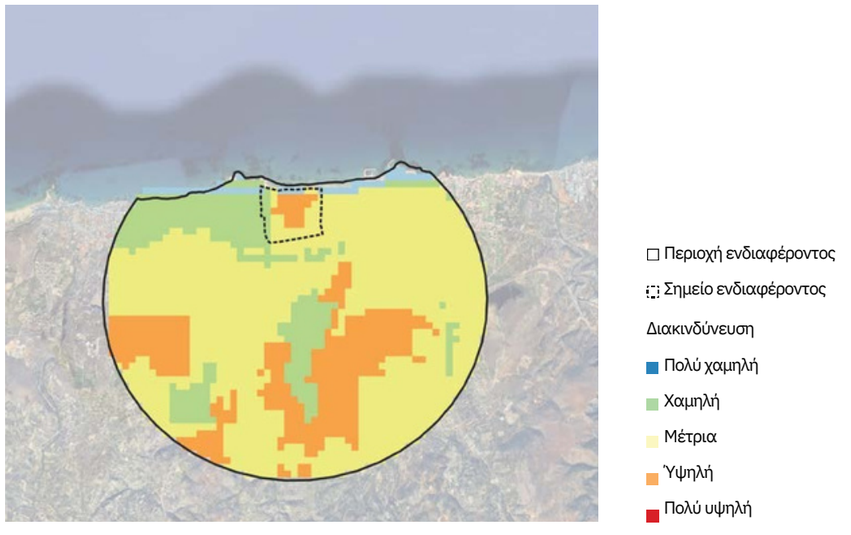
Η σύνθεση του τελικού δείκτη διακινδύνευσης γίνεται με τη χρήση του Πίνακα 4.3, ο οποίος, σύμφωνα με τη μεθοδολογία EUCRA, συνδυάζει το επίπεδο της επικινδυνότητας (κλιματικές πα- ράμετροι) με το επίπεδο έκθεσης/τρωτότητας (μη κλιματικές παράμετροι). Πρέπει να σημειωθεί ότι, σύμφωνα με τη διεθνή πρακτική, για τη σύνθεση επιπέδων διαφορετικής χωρικής ανάλυσης χρησιμοποιείται η διαδικασία resampling, επαναδειγματοληπτώντας το επίπεδο χαμηλότερης ανάλυσης στη χωρική ανάλυση του επιπέδου υψηλότερης ανάλυσης μέσω της μεθόδου του πλησιέστερου γείτονα. Η διαδικασία αυτή εφαρμόστηκε τυπικά για τη σύνθεση του δείκτη επικιν- δυνότητας με τον αντίστοιχο συνθετικό δείκτη έκθεσης/τρωτότητας.

Πίνακας 4.3: Πίνακας σύνθεσης επικινδυνότητας, έκθεσης και τρωτότητας. ↓

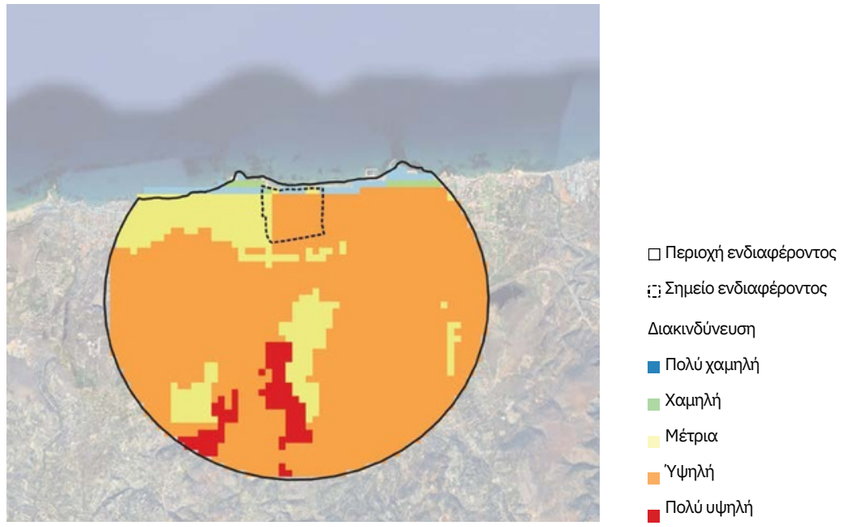
Επικινδυνότητα	Έκθεση / τρωτότητα: Πολύ χαμηλή	Χαμηλή	Μέτρια	Ύψηλή	Πολύ υψηλή
Πολύ χαμηλή	1	1	2	2	3
Χαμηλή	1	2	2	3	4
Μέτρια	2	2	3	4	4
Ύψηλή	2	3	4	4	5

Η σύνθεση των τριών παραμέτρων (hazard-exposure-vulnerability) οδηγεί σε συνολικό δείκτη διακινδύνευσης (fire risk), με πέντε επίπεδα διακινδύνευσης: πολύ χαμηλή, χαμηλή, μέτρια, υψη- λή, πολύ υψηλή. Ο δείκτης fire risk κατατάσσει την ευρύτερη περιοχή των Γουρνών ως μέτριας και υψηλής διακινδύνευσης την περίοδο 1981-2010 και υψηλής έως πολύ υψηλής τη μελλοντι- κή περίοδο (2046-2065). Η εξέλιξη αυτή υποδηλώνει ότι, χωρίς πρόσθετα μέτρα πρόληψης, η πιθανότητα εκδήλωσης και εξάπλωσης πυρκαγιών θα αυξηθεί σημαντικά (Εικόνες 4.5 ως 4.7).

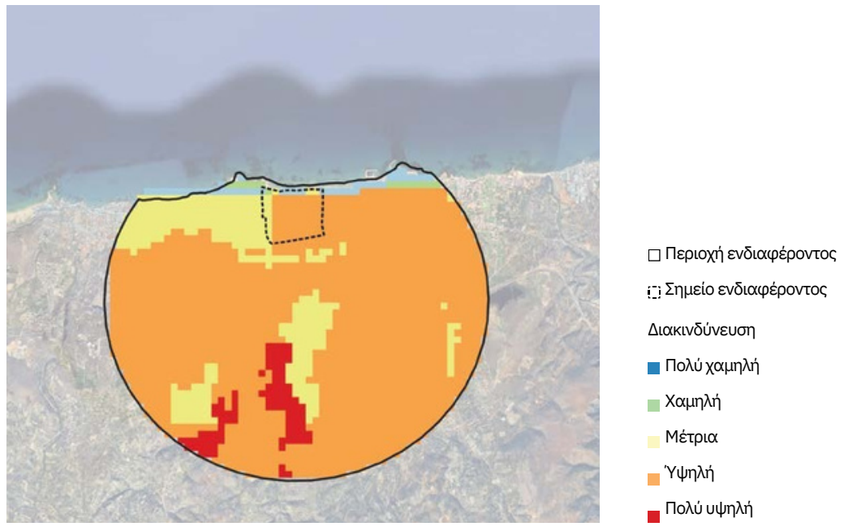
→ Εικόνα 4.5: Αξιολόγηση διακινδύνευσης λόγω δασικών πυρκαγιών στις Γούρνες για την περίοδο αναφοράς 1981-2010



→
Εικόνα 4.6: Αξιολόγηση διακινδύνευσης λόγω δασικών πυρκαγιών στις Γούρνες για τα μέσα του αιώνα βάσει του σεναρίου RCP4.5



→
Εικόνα 4.7: Αξιολόγηση διακινδύνευσης λόγω δασικών πυρκαγιών στις Γούρνες για τα μέσα του αιώνα βάσει του σεναρίου RCP8.5



Ως εκ τούτου, κρίνονται αναγκαίες στοχευμένες παρεμβάσεις μείωσης κινδύνου, όπως:

- δημιουργία αντιπυρικών διαδρόμων και φυτοτεχνικών ζωνών αποκοπής γύρω από κρίσιμες υποδομές,
- ελεγχόμενες καύσεις ή αποψιλώσεις σε περιοχές υψηλής ευφλεκτότητας,
- εγκατάσταση δεξαμενών νερού και σημείων υδροληψίας σε στρατηγικές θέσεις και
- και ενσωμάτωση πράσινων υποδομών πυροπροστασίας (ανθεκτικά στη φωτιά φυτικά είδη, buffer zones)

Η περιοχή των Γουρνών, παρά το μικρό ποσοστό δασικής κάλυψης, παρουσιάζει υψηλή μελλοντική διακινδύνευση δασικών πυρκαγιών λόγω της συνδυασμένης επίδρασης ακραίων θερμοκρασιών, ξηρασίας, ανθρωπογενούς πίεσης και χαμηλής ικανότητας φυσικής ανάσχεσης. Η έγκαιρη ενσωμάτωση των μέτρων αυτών στον τοπικό σχεδιασμό αποτελεί κρίσιμο βήμα για τη μακροπρόθεσμη ανθεκτικότητα της περιοχής.

[4.2.2] Πλημμύρα

Η πλημμυρική διακινδύνευση στην περιοχή των Γουρνών καθορίζεται από τοπικούς μορφολογικούς, υδρολογικούς και ανθρωπογενείς παράγοντες, που επηρεάζουν τόσο τη συγκέντρωση όσο και την απορροή των επιφανειακών υδάτων. Η περιοχή χαρακτηρίζεται από ήπιο ανάγλυφο, με χαμηλές κλίσεις και μέτριες υψομετρικές διαφοροποιήσεις, στοιχεία που περιορίζουν μεν τον κίνδυνο ορεινών χειμάρρων, αυξάνουν όμως την πιθανότητα συσσώρευσης νερού στις πεδινές και παράκτιες ζώνες. Η εκτεταμένη παρουσία αδιαπέραστων επιφανειών (οδικά δίκτυα, κτίρια, τουριστικές εγκαταστάσεις) σε συνδυασμό με την έλλειψη φυσικών απορροφητικών επιφανειών επιβαρύνει τη συμπεριφορά της λεκάνης απορροής κατά τη διάρκεια έντονων βροχοπτώσεων.

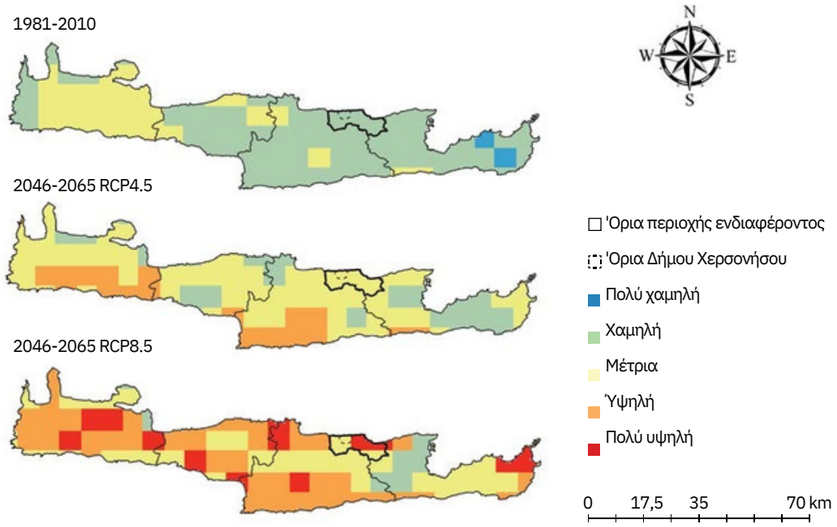
Πίνακας 4.4: Αποτύπωση επιπτώσεων πλημμυρών ↓

Στον Πίνακα 4.4 απεικονίζονται οι άμεσες και έμμεσες επιπτώσεις των πλημμυρών που οδηγούν στην πρόγνωση της διακινδύνευσης του συγκεκριμένου κλιματικού κινδύνου.

Κλιματικός κίνδυνος		**Έκθεση & Τρωτότητα**	
Κλιματικός παράγοντας	*Δείκτης*	*Μη κλιματικός παράγοντας*	*Δείκτης*
Ακραία Βροχόπτωση	Ημέρες υψηλής βροχόπτωσης (R20mm)	Γεωφυσικά χαρακτηριστικά & πιθανότητα πλημμύρας	Ζώνες δυνητικά υψηλού κινδύνου πλημμύρας
	Συνολικό ύψος βροχόπτωσης από ακραίες βροχοπτώσεις (R99ptot)		
	Μέγιστο ύψος ημερήσιας βροχόπτωσης (Rx1day)		
Άμεσες και έμμεσες επιπτώσεις			
Απώλεια ζωής και τραυματισμοί			
Ζημιές στο δομημένο περιβάλλον και στις υποδομές (π.χ. μεταφορές, ενεργειακά συστήματα)			
Γεωργικές επιπτώσεις			
Διακινδύνευση			
Οικοσυστήματα: Καταστροφή των φυσικών οικοτόπων και διάβρωση του εδάφους			
Υγεία: Θνησιμότητα και κίνδυνος από την εξάπλωση μολυσματικών ασθενειών			
Οικονομικά: Σημαντικές οικονομικές απώλειες λόγω ζημιών σε περιουσίες, υποδομές και απώλειες στη γεωργία			

Η αξιολόγηση του κλιματικού κινδύνου (hazard) βασίστηκε σε δείκτες έντασης και συχνότητας βροχοπτώσεων (R20mm, R99ptot και RX1day), οι οποίοι προσομοιώθηκαν για την περίοδο αναφοράς 1981-2010 και τις μελλοντικές περιόδους (2046-2065) υπό τα σενάρια RCP4.5 και RCP8.5. Οι τιμές των τριών δεικτών μετατράπηκαν σε κοινή κλίμακα 0-1 και συνδυάστηκαν με ίση στάθμι- ση, ώστε ο τελικός σύνθετος δείκτης κλιματικού κινδύνου να αποδίδεται επίσης σε κλίμακα 0-1. Η προσέγγιση αυτή εξασφαλίζει τη συγκρισιμότητα των μεταβλητών και επιτρέπει την ισόρροπη συναξιολόγηση των επιμέρους συνιστωσών του κινδύνου. Τα αποτελέσματα υποδεικνύουν ότι ο κίνδυνος πλημμύρας είναι χαμηλός την παρούσα περίοδο, ενώ αυξάνεται σε μέτρια επίπεδα στο μέλλον, ως συνέπεια της αύξησης της έντασης των μεμονωμένων βροχοπτώσεων και της μετα- βολής της χωρικής κατανομής των υετικών επεισοδίων (Σχήμα 4.8). Η αύξηση του αριθμού των ημερών με έντονα φαινόμενα (≥20 mm) σε συνδυασμό με την παράλληλη μείωση των συνολικών ετήσιων βροχοπτώσεων δημιουργεί περισσότερα ακραία επεισόδια μικρής διάρκειας, που προ- καλούν υψηλές παροχές απορροής σε περιορισμένο χρονικό διάστημα.

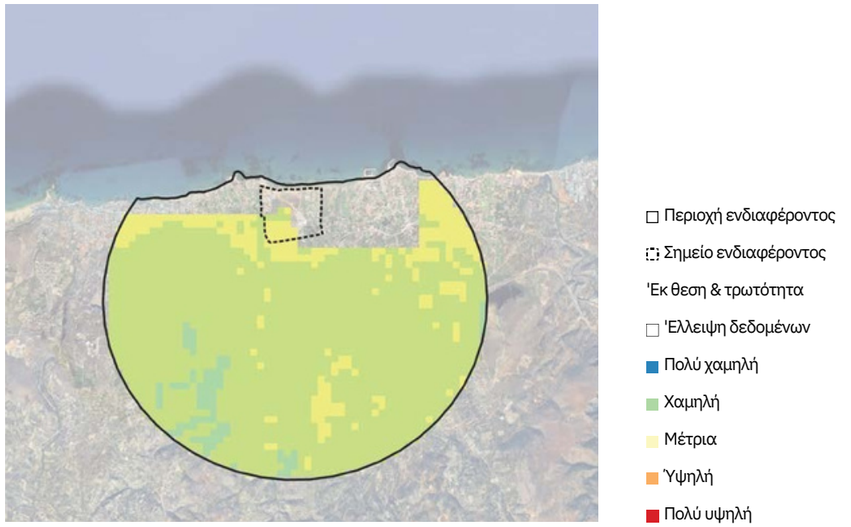
→
Εικόνα 4.8: Σύνθετος κλιματικός δείκτης πλημμύρας στις Γούρνες



Η ανάλυση της έκθεσης (exposure) και της τρωτότητας (vulnerability) διεξάγεται παράλληλα, καθώς και οι δύο βασίζονται σε μη κλιματικούς δείκτες. Η σύνθεση αυτών των δεδομένων σε έναν ενιαίο δείκτη (Εικόνα 4.9) παρέχει μια ολοκληρωμένη χωρική απεικόνιση της διακινδύνευσης, ενσωματώνοντας:

- τον βαθμό έκθεσης των περιοχών στις πλημμύρες με βάση τις ζώνες δυνητικά υψηλού κινδύνου πλημμύρας (όπως αυτές αποτυπώνονται από το Copernicus και τις εθνικές χαρτογραφήσεις επικινδυνότητας) και
- την ευαισθησία των περιοχών, η οποία εξαρτάται από χαρακτηριστικά όπως η τοπογραφία (υψόμετρο και κλίση) και τα γεωλογικά χαρακτηριστικά του εδάφους (σύσταση, ικανότητα αποστράγγισης και διαβρωσιμότητα).

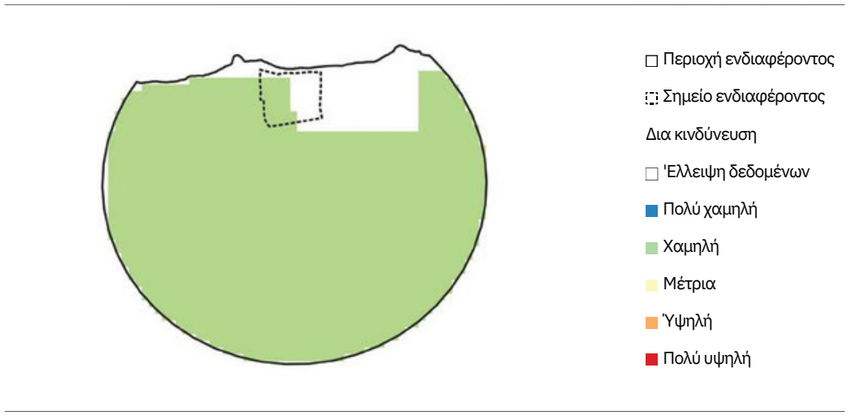
→
Εικόνα 4.9: Αξιολόγηση έκθεσης και τρωτότητας στις πλημμύρες στις Γούρνες



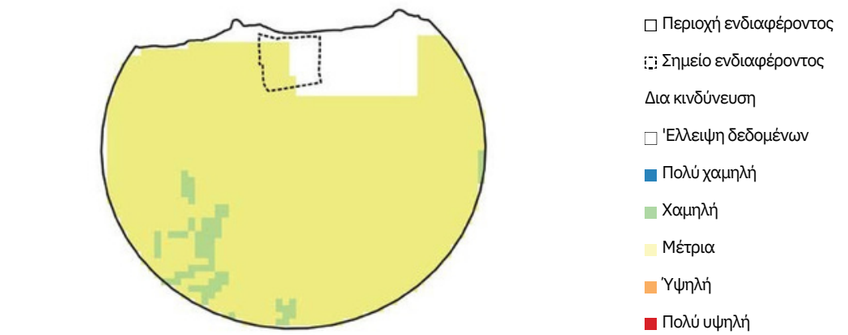
Σύμφωνα με την Εικόνα 4.9, το μεγαλύτερο μέρος της περιοχής των Γουρνών κατατάσσεται στη μέτρια κατηγορία, γεγονός που υποδηλώνει ισορροπημένο συνδυασμό φυσικών και ανθρωπογενών χαρακτηριστικών. Οι ήπιες κλίσεις, η μέση τιμή αδιαπερατότητας και η απουσία έντονων υδρογραφικών χαραδρώσεων συμβάλλουν σε έναν μέτριο βαθμό ευαισθησίας του εδάφους στις πλημμυρικές διεργασίες. Η περιοχή άμεσου ενδιαφέροντος εντάσσεται επίσης στη μέτρια κατηγορία έκθεσης-τρωτότητας. Μόνο μικρές περιοχές στα δυτικά και νοτιοδυτικά εμφανίζουν χαμηλότερες τιμές (χαμηλή κατηγορία), όπου η φυσική κάλυψη και η χαμηλή αδιαπερατότητα διευκολύνουν τη διήθηση του νερού. Συνολικά, αναδεικνύεται η μέτρια ευπάθεια της περιοχής μελέτης, με κύριους παράγοντες κινδύνου τη σταδιακή αύξηση της αστικοποίησης και τη μείωση των φυσικών επιφανειών απορρόφησης.

Ο συνδυαστικός δείκτης διακινδύνευσης πλημμύρας (flood risk) επιβεβαιώνει τα παραπάνω ευρήματα:

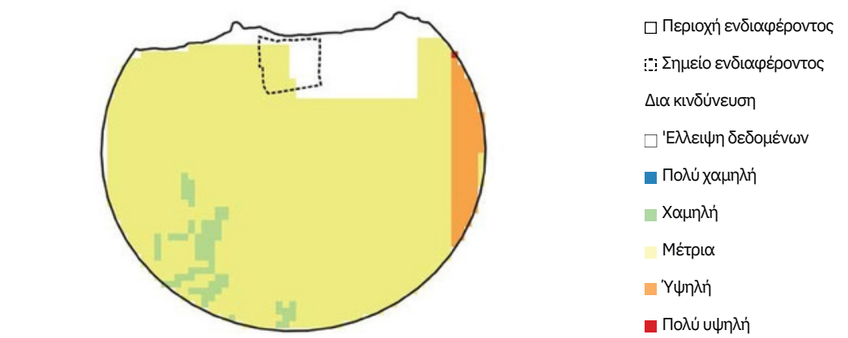
- για την περίοδο 1981-2010, η περιοχή εμφανίζει χαμηλή επικινδυνότητα (Σχήμα 4.8),
- τη μελλοντική περίοδο (2046-2065), τόσο στο σενάριο RCP4.5 όσο και στο RCP8.5 παρατηρείται γενικευμένη μετάβαση στη μέτρια κατηγορία (Σχήματα 4.9 και 4.10).



→
Εικόνα 4.10: Αξιολόγηση διακινδύνευσης λόγω πλημμύρας στις Γούρνες για την περίοδο αναφοράς 1981-2010. (Σημείωση: Το λευκό κομμάτι μέσα στην περιοχή μελέτης αποτελεί περιοχή χωρίς διαθέσιμα δεδομένα.)



→
Εικόνα 4.11: Αξιολόγηση διακινδύνευσης λόγω πλημμύρας στις Γούρνες για τα μέσα του αιώνα βάσει του σεναρίου RCP4.5. (Σημείωση: Το λευκό κομμάτι μέσα στην περιοχή μελέτης αποτελεί περιοχή χωρίς διαθέσιμα δεδομένα.)



→
Εικόνα 4.12: Αξιολόγηση διακινδύνευσης λόγω πλημμύρας στις Γούρνες για τα μέσα του αιώνα βάσει του σεναρίου RCP8.5. (Σημείωση: Το λευκό κομμάτι μέσα στην περιοχή μελέτης αποτελεί περιοχή χωρίς διαθέσιμα δεδομένα.)

Η αύξηση αυτή αποδίδεται στη συνδυασμένη επίδραση του κλιματικού παράγοντα (ακραίες βροχοπτώσεις) και του ανθρωπογενούς παράγοντα (αδιαπερατότητα, έλλειψη αποστραγγιστικού δικτύου). Αν και η τοπογραφία περιορίζει τον κίνδυνο εκτεταμένων πλημμυρών, τα τοπικά φαινόμενα αστικού πλημμυρισμού (urban flooding) αναμένεται να ενταθούν, ιδίως στις περιοχές γύρω από το οδικό δίκτυο και τους αστικούς ιστούς.

Συνολικά, η περιοχή των Γουρνών παρουσιάζει χαμηλό ως μέτριο επίπεδο διακινδύνευσης πλημμύρας, με ελαφρά αυξητική τάση στο μέλλον. Προτείνονται τα εξής μέτρα πρόληψης και προσαρμογής:

- αναβάθμιση και τακτικός καθαρισμός του δικτύου αποστράγγισης,
- ενίσχυση των διαπερατών επιφανειών (πράσινες οροφές, υδατοπερατά δάπεδα),
- δημιουργία ζωνών προσωρινής ανάσχεσης απορροής στις νοτιοδυτικές χαμηλές περιοχές και
- διατήρηση της φυσικής φυτοκάλυψης κοντά στις κοίτες και στα όρια της παράκτιας ζώνης

Η ενσωμάτωση αυτών των παρεμβάσεων στον τοπικό σχεδιασμό μπορεί να μειώσει σημαντικά τον κίνδυνο αστικών πλημμυρών και να ενισχύσει τη συνολική ανθεκτικότητα του παράκτιου συστήματος των Γουρνών απέναντι στις μελλοντικές κλιματικές προκλήσεις.

[4.2.3] Ξηρασία

Η ξηρασία αποτελεί έναν από τους πιο κρίσιμους κλιματικούς κινδύνους για την περιοχή των Γουρνών, καθώς επηρεάζει τόσο τη διαθεσιμότητα των υδατικών πόρων όσο και τη βιωσιμότητα των γεωργικών, φυσικών και αστικών οικοσυστημάτων. Η περιοχή, που χαρακτηρίζεται από ημίξηρο μεσογειακό κλίμα, παρουσιάζει παρατεταμένες περιόδους χωρίς βροχόπτωση, υψηλές θερμοκρασίες και περιορισμένη φυσική βλάστηση, στοιχεία που ενισχύουν την ευαισθησία του εδάφους και τη διακινδύνευση σε φαινόμενα λειψυδρίας.

Στον Πίνακα 4.5 απεικονίζονται οι άμεσες και έμμεσες επιπτώσεις της ξηρασίας που οδηγούν στην αξιολόγηση της διακινδύνευσης του συγκεκριμένου κλιματικού κινδύνου.

Πίνακας 4.5: Αποτύπωση επιπτώσεων ξηρασίας ↓

Κλιματικός κίνδυνος		**Έκθεση & Τρωτότητα**	
Κλιματικός παράγοντας	*Δείκτης*	*Μη κλιματικός παράγοντας*	*Δείκτης*
Παρατεταμένη περίοδος χαμηλών βροχοπτώσεων	Διαδοχικές ξηρές ημέρες (CDD) / Συνολική βροχόπτωση (PRCPTOT)	Κάλυψη γης	Συγκεκριμένες κατηγορίες κάλυψης γης (π.χ., δάση, γεωργική γη)
Άμεσες και έμμεσες επιπτώσεις			
Μειωμένη απόδοση των καλλιεργειών και υποβάθμιση του εδάφους			
Μειωμένη στάθμη νερού σε ταμιευτήρες, ποτάμια και υδροφόρους ορίζοντες			
Αυξημένος κίνδυνος πυρκαγιάς, ένταση και εξάπλωση πυρκαγιάς λόγω ξηρότερης βλάστησης			
Απώλεια της βιοποικιλότητας και υποβάθμιση των δασών			
Μειωμένη παραγωγή υδροηλεκτρικής ενέργειας			

Διακινδύνευση

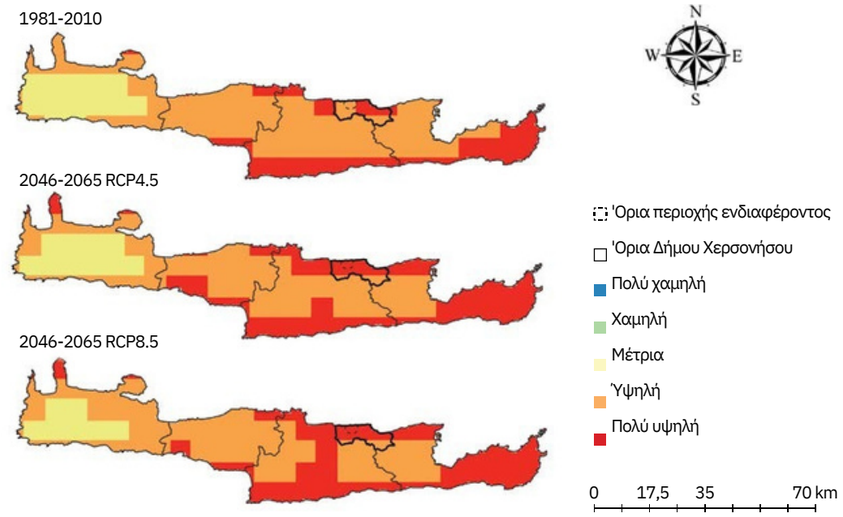
Οικοσυστήματα: Η ξηρασία μειώνει τη βιοποικιλότητα και υποβαθμίζει τους οικοτόπους.

Υγεία: Η ξηρασία μπορεί να οδηγήσει σε λειψυδρία, θέτοντας ενδεχομένως σε κίνδυνο τη δημόσια υγεία.

Οικονομία: Η ξηρασία οδηγεί σε σημαντικές οικονομικές απώλειες λόγω της μειωμένης γεωργικής παραγωγικότητας, του αυξημένου κόστους νερού και ενέργειας και της μειωμένης παραγωγής υδροηλεκτρικής ενέργειας.

Η αξιολόγηση του κλιματικού κινδύνου (hazard) πραγματοποιήθηκε με χρήση των δεικτών Consecutive Dry Days (CDD) και PRCPTOT (συνολικό ετήσιο ύψος βροχόπτωσης). Οι τιμές των δύο δεικτών μετατράπηκαν σε κοινή κλίμακα 0-1 και συνδυάστηκαν με ίση στάθμιση, ώστε ο τε- λικός σύνθετος δείκτης κλιματικού κινδύνου να αποδίδεται επίσης σε κλίμακα 0-1. Η προσέγγιση αυτή εξασφαλίζει τη συγκρισιμότητα των μεταβλητών και επιτρέπει την ισόρροπη συναξιολόγηση των επιμέρους συνιστωσών του κινδύνου. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι, για την περίοδο ανα- φοράς (1981-2010), η περιοχή των Γουρνών παρουσιάζει ήδη υψηλό κίνδυνο ξηρασίας, με παρα- τεταμένες ξηρές περιόδους άνω των 30 ημερών. Τη μελλοντική περίοδο (2046-2065), ο κίνδυνος αναμένεται να είναι πολύ υψηλός, λόγω της περαιτέρω μείωσης της ετήσιας βροχόπτωσης, της αύξησης των μέγιστων θερμοκρασιών και της μεγαλύτερης διάρκειας θερμών ημερών (Σχήμα 4.11). Οι μεταβολές αυτές προβλέπεται να οδηγήσουν σε πιο έντονες και παρατεταμένες ξηρές φάσεις, με άμεσο αντίκτυπο στα εδάφη και στην αγροτική παραγωγή.

→
Εικόνα 4.13: Σύνθετος κλιματικός δείκτης ξηρασίας Κρήτης



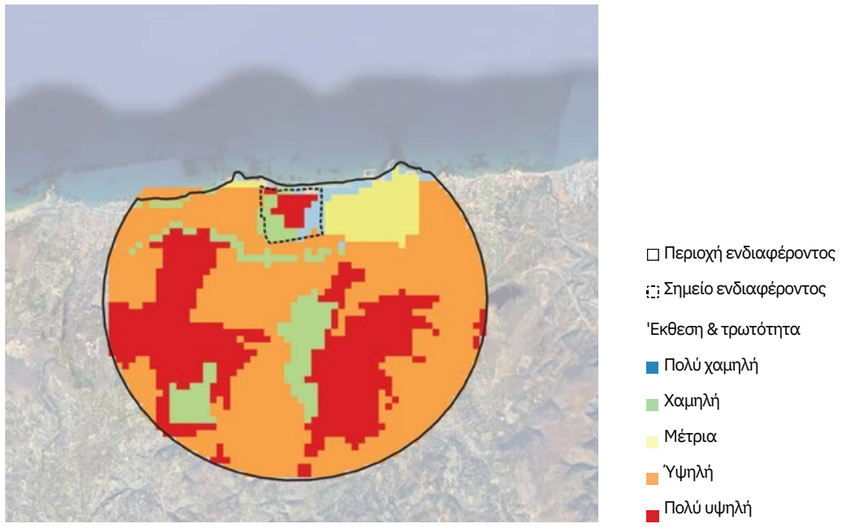
Η ανάλυση της έκθεσης και της τρωτότητας διεξάγεται παράλληλα, καθώς και οι δύο βασίζονται σε μη κλιματικούς δείκτες. Η σύνθεση αυτών των δεδομένων σε έναν ενιαίο χάρτη (Σχήμα 4.12) παρέχει μια συνολική χωρική αναπαράσταση της ευπάθειας, ενσωματώνοντας:

- τον βαθμό έκθεσης των περιοχών στην ξηρασία με βάση τη χωρική κατανομή των χρήσεων γης, αξιοποιώντας τα δεδομένα του CORINE Land Cover (CLC, 2018)[41]. Ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στις γεωργικές και τεχνητές χρήσεις γης, οι οποίες παρουσιάζουν αυξημένη ευαισθησία σε συνθήκες μειωμένης διαθεσιμότητας νερού, καθώς και στην απουσία ή στον περιορισμό δασικών και φυσικών οικοσυστημάτων, που λειτουργούν ως ρυθμιστικοί παράγοντες του υδρολογικού κύκλου. Με βάση τα χαρακτηριστικά αυτά, οι διαφορετικοί τύποι κάλυψης και χρήσης γης συσχετίστηκαν με διαφορετικά επίπεδα έκθεσης και τρωτότητας στην ξηρασία, επιτρέποντας τη χωρική αποτύπωση των περιοχών που αναμένεται να επηρεαστούν περισσότερο από παρατεταμένες ξηρές περιόδους.
- την τρωτότητα, που εξαρτάται από τα γεωλογικά και εδαφολογικά χαρακτηριστικά, όπως η σύσταση της εδαφικής ύλης, η ικανότητα αποστράγγισης και ο βαθμός διαβρωσιμότητας του εδάφους.

Ο χάρτης έκθεσης-τρωτότητας δείχνει ότι το μεγαλύτερο μέρος της περιοχής των Γουρνών κα- τατάσσεται σε υψηλή ως πολύ υψηλή κατηγορία, με τις υψηλότερες τιμές να εμφανίζονται στις αγροτικές και αδόμητες εκτάσεις του νότιου και νοτιοανατολικού τμήματος. Οι περιοχές αυτές συνδυάζουν χαμηλή εδαφική υγρασία, μικρή ικανότητα αποστράγγισης και έλλειψη δασικών σχηματισμών, ενισχύοντας τη συνολική τρωτότητα. Η περιοχή άμεσου ενδιαφέροντος εντάσσεται σε υψηλή κατηγορία έκθεσης-τρωτότητας, καθώς βρίσκεται σε τμήμα με περιορισμένη φυσική κάλυψη και αυξημένη θερμική καταπόνηση, ενώ γειτνιάζει με περιοχές πολύ υψηλής ευπάθειας στα νότια (Σχήμα 4.12).

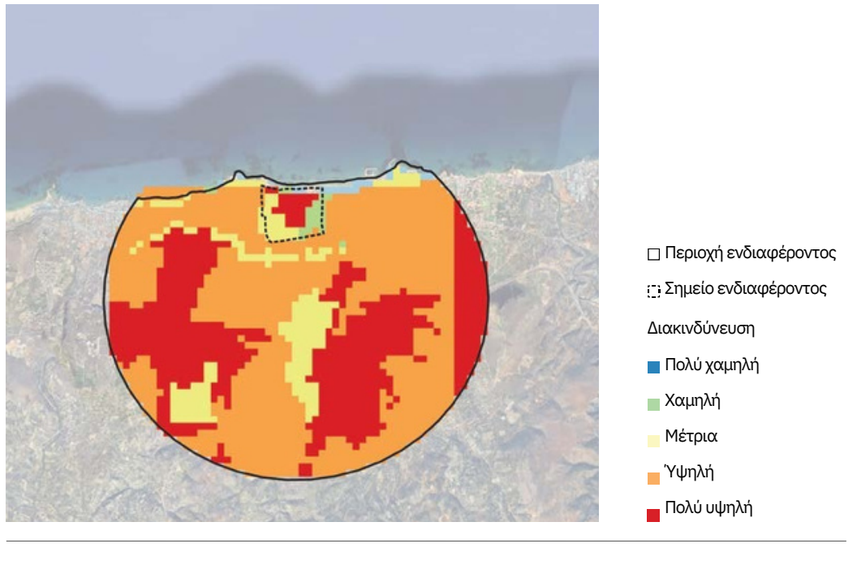
[41] Ευρωπαϊκή Υπηρεσία Διαστήματος, Copernicus Land Monitoring Service (CLMS), Corine Land Rover. Διαθέσιμο στο https://land.copernicus.eu/en/products/corine-land-cover (ανακτήθηκε στις 3 Φεβρουαρίου 2026).

→
Εικόνα 4.14: Αξιολόγηση έκθεσης και τρωτότητας στην ξηρασία στις Γούρνες

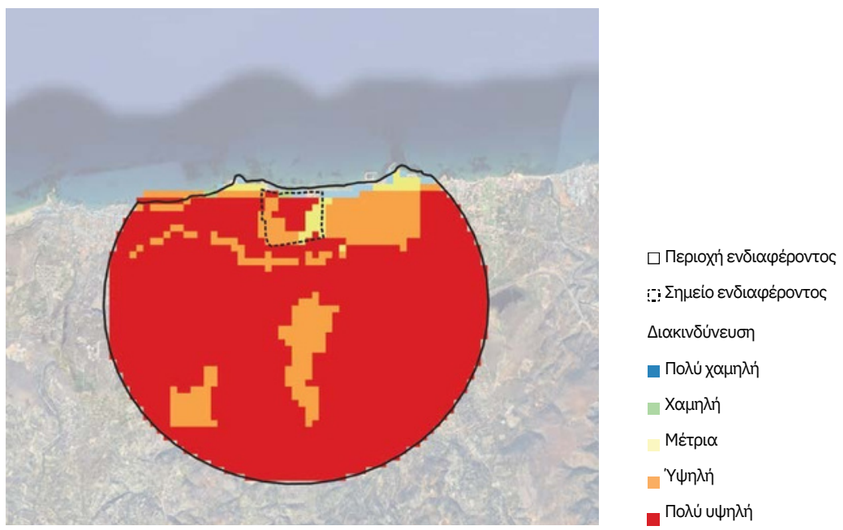


Η σύνθεση των επιμέρους παραμέτρων (hazard-exposure-vulnerability) οδηγεί σε υψηλό επίπε- δο συνολικής διακινδύνευσης (drought risk) για την περίοδο αναφοράς και σε πολύ υψηλό για τη μελλοντική περίοδο (Σχήματα 4.13 ως 4.15). Η εξέλιξη αυτή είναι ιδιαίτερα εμφανής στους χάρτες των σεναρίων RCP4.5 και RCP8.5, όπου το μεγαλύτερο τμήμα της ενότητας αποτυπώνεται στις κατηγορίες υψηλής και πολύ υψηλής διακινδύνευσης, ενώ μόνο ορισμένες παράκτιες περιοχές με τεχνητές επιφάνειες παραμένουν μέτριες. Η προβλεπόμενη παρατεταμένη ξηρασία ενδέχεται να επηρεάσει αρνητικά την παραγωγικότητα των καλλιεργειών, να προκαλέσει υποβάθμιση της εδαφικής δομής και να επιτείνει την ερημοποιητική δυναμική.

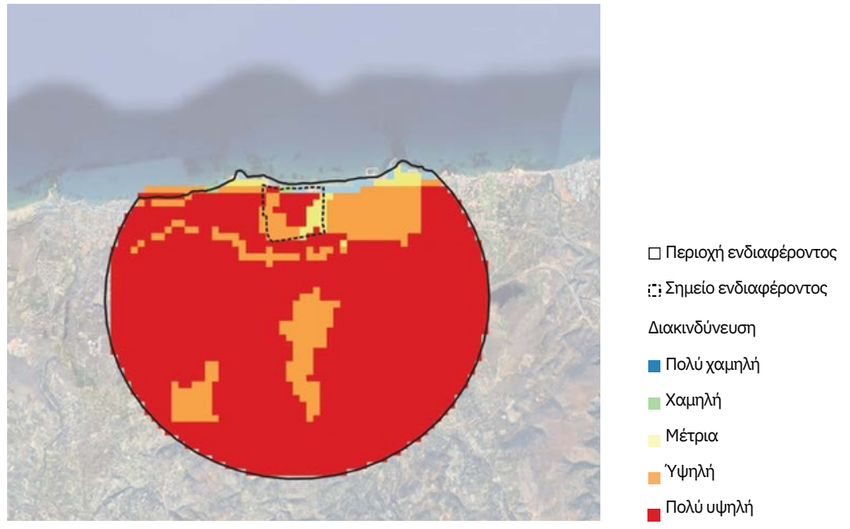
→
Εικόνα 4.15: Αξιολόγηση διακινδύνευσης λόγω ξηρασίας στις Γούρνες για την περίοδο αναφοράς 1981-2010



→
Εικόνα 4.16: Αξιολόγηση διακινδύνευσης λόγω ξηρασίας στις Γούρνες για τα μέσα του αιώνα βάσει του σεναρίου RCP4.5



→
Εικόνα 4.17: Αξιολόγηση διακινδύνευσης λόγω ξηρασίας στις Γούρνες για τα μέσα του αιώνα βάσει του σεναρίου RCP8.5



Για την ενίσχυση της ανθεκτικότητας προτείνονται στοχευμένα μέτρα προσαρμογής, όπως:

- τεχνικές εξοικονόμησης νερού και έξυπνη άρδευση σε γεωργικές εκτάσεις,
- επαναχρησιμοποίηση επεξεργασμένων υδάτων για μη πόσιμες χρήσεις,
- ενίσχυση της φυσικής βλάστησης με είδη ανθεκτικά στην ξηρασία,
- δημιουργία πράσινων υποδομών και ζωνών σκίασης για τη μείωση της επιφανειακής θερμοκρασίας και
- παρακολούθηση των εδαφικών και υδρολογικών συνθηκών μέσω δορυφορικών δεικτών

Συνολικά, η περιοχή των Γουρνών κατατάσσεται σε πολύ υψηλή κατηγορία διακινδύνευσης ξηρασίας για τη μελλοντική περίοδο, γεγονός που καθιστά επιτακτική την εφαρμογή ολοκληρωμένων
στρατηγικών διαχείρισης νερού και ενίσχυσης της οικολογικής ανθεκτικότητας, προκειμένου να διασφαλιστεί η βιωσιμότητα των φυσικών και ανθρωπογενών συστημάτων.

[4.2.4]

Καύσωνες

Οι καύσωνες αποτελούν έναν από τους πλέον κρίσιμους κλιματικούς κινδύνους για την περι- οχή των Γουρνών, καθώς επηρεάζουν άμεσα την ανθρώπινη υγεία, την ενεργειακή ζήτηση και τη θερμική άνεση, ενώ συμβάλλουν στη δευτερογενή αύξηση άλλων κινδύνων, όπως είναι οι δασικές πυρκαγιές. Η περιοχή, λόγω της χαμηλής βλάστησης, της εγγύτητας στη θάλασσα και της έντονης αστικοποίησης κατά μήκος της παράκτιας ζώνης, εμφανίζει ήδη σημάδια τοπικής θερμικής επιβάρυνσης, που ενισχύονται τις θερμές περιόδους του έτους.

Στον Πίνακα 4.6 απεικονίζονται οι άμεσες και έμμεσες επιπτώσεις των αυξημένων θερμοκρασιών και των επεισοδίων καύσωνα που οδηγούν στην αξιολόγηση της διακινδύνευσης του συγκεκρι- μένου κλιματικού κινδύνου.

Πίνακας 4.6: Αποτύπωση επιπτώσεων αυξημένων θερμοκρασιών και επεισοδίων καύσωνα ↓

Κλιματικός κίνδυνος | **Έκθεση & Τρωτότητα**

Κλιματικός παράγοντας	*Δείκτης*	*Μη κλιματικός παράγοντας*	*Indicator*
Αυξημένη θερμοκρασία	Αριθμός των καλοκαιρινών ημερών (SU) Αριθμός των τροπικών νυχτών (TR) Μέγιστη ημερήσια θερμοκρασία (TXx) Αριθμός πολύ θερμών ημερών (TXge35)	Κάλυψη γης	Συγκεκριμένες κατηγορίες κάλυψης γης (π.χ., αστικές, γεωργικές εκτάσεις, δάση)

Άμεσες και έμμεσες επιπτώσεις

Αύξηση των ασθενειών και της θνησιμότητας που σχετίζονται με τη ζέστη.

Αυξημένα επίπεδα αστικών ατμοσφαιρικών ρύπων που προκαλούν αναπνευστικά προβλήματα.

Αυξημένη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας, που συνδυάζεται με τον κίνδυνο διακοπών ρεύματος λόγω υπερφόρτωσης του δικτύου.

Γεωργικές προκλήσεις, όπως η αποτυχία των καλλιεργειών από την ακραία ζέστη και οι αυξημένες ανάγκες άρδευσης, οι οποίες μπορεί να οδηγήσουν σε λειψυδρία.

Αύξηση του κινδύνου δασικών πυρκαγιών.

Διακινδύνευση

Οικοσυστήματα: Η παρατεταμένη ζέστη καταπονεί τη βλάστηση, οδηγεί σε απώλεια της βιοποικιλότητας και διαταράσσει την οικολογική ισορροπία.

Υγεία: Οι καύσωνες αυξάνουν σημαντικά τον κίνδυνο ασθενειών που σχετίζονται με τη ζέστη.

Οικονομία: Οικονομικές απώλειες που προκύπτουν από τις αυξημένες απαιτήσεις ψύξης, τις μειωμένες γεωργικές εκροές και τη μείωση της τουριστικής δραστηριότητας λόγω δυσμενών κλιματικών συνθηκών.

Η επικινδυνότητα των καυσώνων (hazard) υπολογίστηκε με χρήση κλιματικών δεικτών που σχετίζονται με ακραία υψηλές θερμοκρασίες, προερχόμενων από προσομοιώσεις περιοχικών κλιματικών μοντέλων. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκαν οι δείκτες:

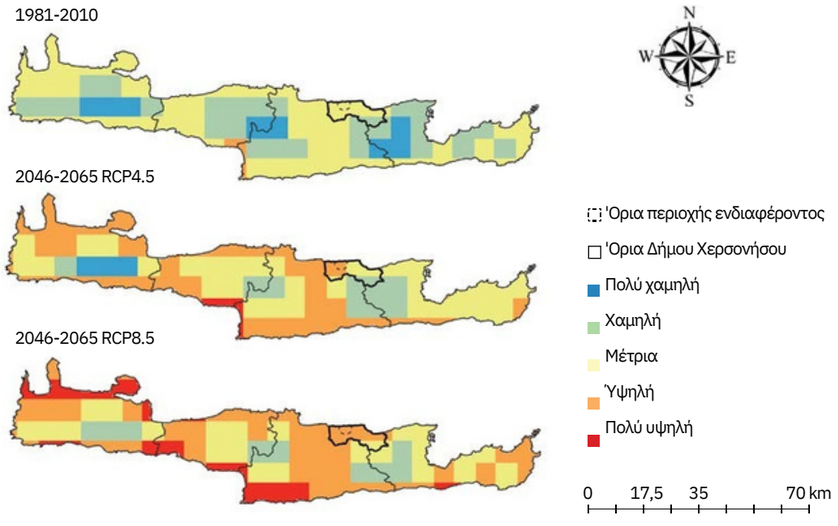
- SU (Summer Days) – αριθμός ημερών με μέγιστη θερμοκρασία >25°C
- TR (Tropical Nights) – αριθμός νυχτών με ελάχιστη θερμοκρασία >20°C
- TXx (Maximum Daily Maximum Temperature) – μέγιστη ημερήσια μέγιστη θερμοκρασία
- TXge35 (Days with TX ≥35°C) – αριθμός ημερών με θερμοκρασία ίση ή μεγαλύτερη των 35°C

Οι τιμές των δεικτών μετατράπηκαν σε κοινή κλίμακα 0-1 και συνδυάστηκαν με ίση στάθμιση, ώστε ο τελικός σύνθετος δείκτης κλιματικού κινδύνου να αποδίδεται επίσης σε κλίμακα 0-1. Η προσέγγιση αυτή εξασφαλίζει τη συγκρισιμότητα των μεταβλητών και επιτρέπει την ισόρροπη συναξιολόγηση των επιμέρους συνιστωσών του κινδύνου (Εικόνα 4.16). Η διαδικασία αυτή επιτρέπει την ολοκληρωμένη αξιολόγηση του φαινομένου, συνδυάζοντας τόσο τη συχνότητα όσο και την ένταση των θερμικών επεισοδίων.

Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι, κατά την περίοδο αναφοράς (1981-2010), η περιοχή των Γουρνών κατατάσσεται σε μέτριο επίπεδο επικινδυνότητας. Τη μελλοντική περίοδο (2046-2065), ο δείκτης αυξάνεται σε υψηλό, καθώς αναμένεται αύξηση της συχνότητας και της διάρκειας των καυσώνων, με τους δείκτες SU, TR και TXge35 να παρουσιάζουν ανοδική τάση άνω του 30-40%. Η παρατεταμένη διάρκεια θερμών ημερών και νυχτών και η αυξημένη μέση θερμοκρασία αποτελούν τους κυριότερους παράγοντες της κλιματικής επιδείνωσης.

→

Εικόνα 4.18: Σύνθετος κλιματικός δείκτης καύσωνα Κρήτης

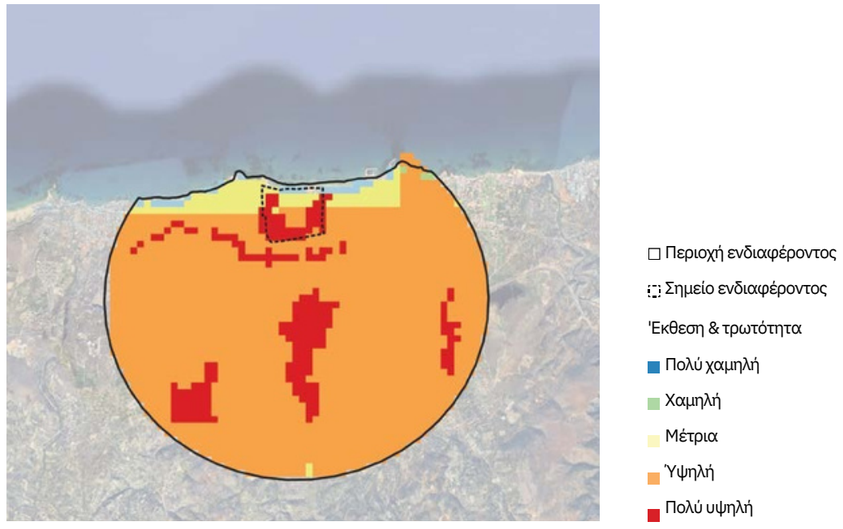


Η ανάλυση της έκθεσης και της τρωτότητας διεξήχθη συνδυαστικά, με σκοπό την αξιολόγηση της συνολικής ευπάθειας των περιοχών απέναντι στους καύσωνες. Η σύνθεση αυτών των δεδομένων (Σχήμα 4.19) παρέχει μια συνολική χωρική αναπαράσταση, ενσωματώνοντας:

- τον βαθμό έκθεσης, ο οποίος εξαρτάται από την παρουσία ή απουσία φυσικών καλύψεων με δροσιστική επίδραση, όπως δασικές εκτάσεις, γεωργικά οικοσυστήματα και υδάτινα σώματα. Η έκθεση αποτυπώθηκε σε πέντε κατηγορίες με βάση το προϊόν CORINE Land Cover (CLC, 2018) σε ανάλυση 100 μέτρων και
- την τρωτότητα, που καθορίζεται από τα φυσικογεωγραφικά χαρακτηριστικά και ειδικότερα την πυκνότητα της βλάστησης, όπως εκφράζεται μέσω του δείκτη NDVI (Normalized Difference Vegetation Index). Περιοχές με χαμηλό NDVI, δηλαδή χαμηλή φυτοκάλυψη ή εκτεταμένες τεχνητές επιφάνειες, εμφανίζουν αυξημένη θερμική ευπάθεια.

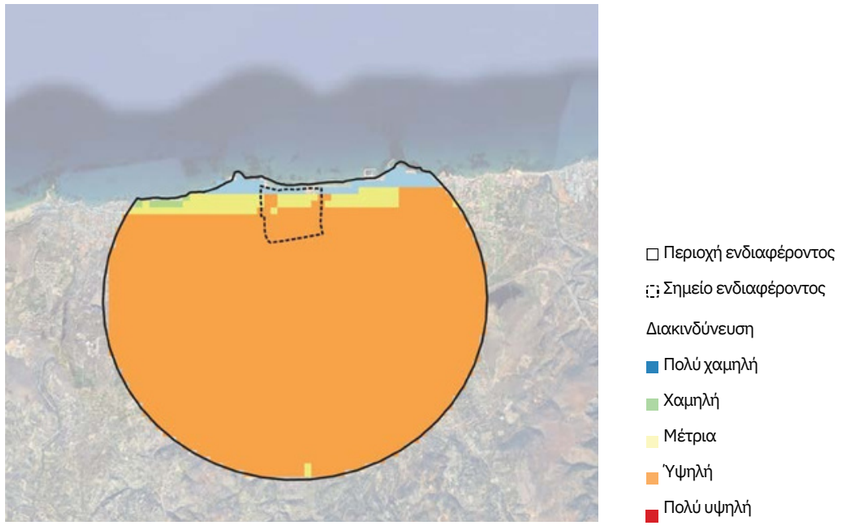
Ο χάρτης έκθεσης–τρωτότητας (heat exposure-vulnerability) καταδεικνύει ότι η ευρύτερη περιοχή των Γουρνών (Εικόνα 4.17) εντάσσεται σχεδόν εξ ολοκλήρου στις υψηλές και πολύ υψηλές κατηγορίες, γεγονός που υποδηλώνει έντονη θερμική ευπάθεια. Οι υψηλές τιμές συνδέονται με την εκτεταμένη παρουσία τεχνητών επιφανειών, τη χαμηλή φυτοκάλυψη και την απουσία φυσικών στοιχείων δροσισμού (όπως υδάτινα σώματα ή πυκνή δενδροκάλυψη). Η περιοχή άμεσου ενδιαφέροντος κατατάσσεται κατά κύριο λόγο σε υψηλή κατηγορία έκθεσης-τρωτότητας, με ορισμένα περιορισμένα τμήματα μέτριας τιμής, που πιθανώς αντιστοιχούν σε μικρές επιφάνειες μειωμένης θερμικής απορρόφησης ή μεγαλύτερης σκίασης. Παρά ταύτα, η γειτνίαση με εκτεταμένες περιοχές πολύ υψηλής θερμικής φόρτισης αυξάνει σημαντικά την πιθανότητα διατήρησης υψηλών θερμοκρασιών κατά τη διάρκεια των νυχτερινών ωρών και τη συνολική θερμική καταπόνηση του μικροπεριβάλλοντος.

→
Εικόνα 4.19: Αξιολόγηση έκθεσης και τρωτότητας στον καύσωνα στις Γούρνες

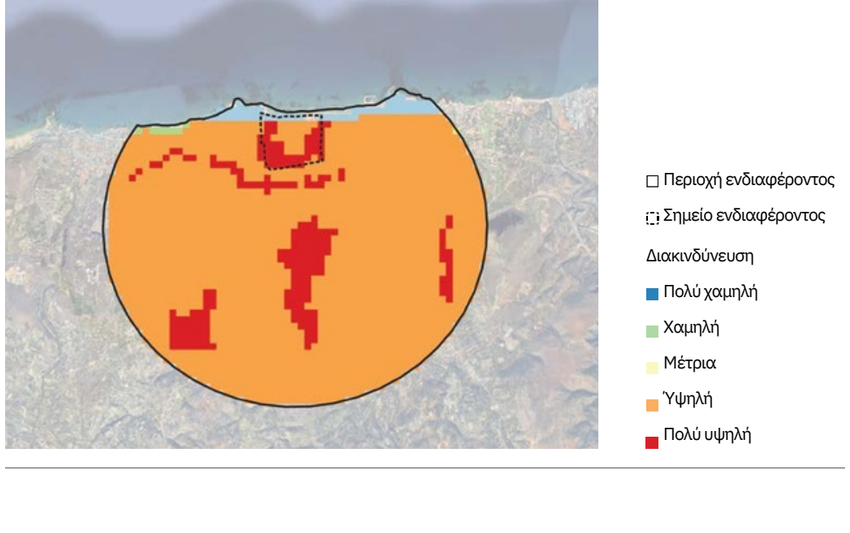


Η σύνθεση hazard-exposure-vulnerability δείχνει ότι ο συνολικός δείκτης διακινδύνευσης καυσώνων (heat risk) είναι υψηλός κατά την περίοδο αναφοράς και αυξάνεται σε κάποιες περιο- χές σε πολύ υψηλό τη μελλοντική περίοδο (2046-2065). Οι υψηλότερες τιμές εμφανίζονται στην περιοχή ενδιαφέροντος, όπου η αστική θερμική νησίδα ενισχύεται από τη μειωμένη νυχτερινή ψύξη και τη συσσώρευση θερμότητας στις τεχνητές επιφάνειες (Εικόνες 4.18 ως 4.20).

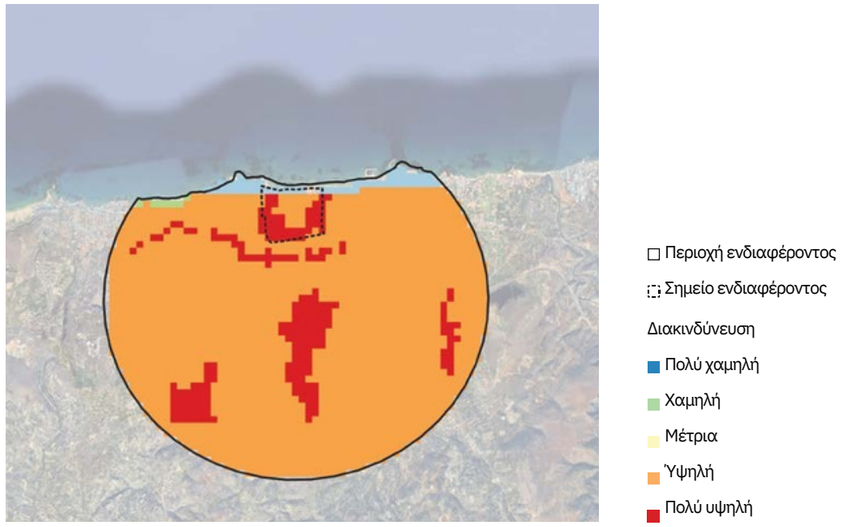
→
Εικόνα 4.20: Αξιολόγηση διακινδύνευσης λόγω καύσωνα στις Γούρνες για την περίοδο αναφοράς 1981-2010



→
Εικόνα 4.21: Αξιολόγηση διακινδύνευσης λόγω καύσωνα στις Γούρνες για τα μέσα του αιώνα βάσει του σεναρίου RCP4.5



→
Εικόνα 4.22: Αξιολόγηση διακινδύνευσης λόγω καύσωνα στις Γούρνες για τα μέσα του αιώνα βάσει του σεναρίου RCP8.5



Οι επιπτώσεις του φαινομένου αφορούν τόσο το ανθρώπινο και αστικό περιβάλλον όσο και το φυσικό οικοσύστημα, επηρεάζοντας:

- την ανθρώπινη υγεία (θερμική δυσφορία, αύξηση νοσηρότητας),
- τη λειτουργία των υποδομών (ενεργειακή κατανάλωση για ψύξη, φθορά υλικών) και
- την οικολογική ισορροπία (επιτάχυνση ξηρασίας, μείωση βλάστησης)

Για τη μείωση της διακινδύνευσης απαιτείται η ενσωμάτωση προσαρμοστικών παρεμβάσεων στον αστικό και χωρικό σχεδιασμό, όπως:

- ενίσχυση της πράσινης υποδομής (δενδροφυτεύσεις, πάρκα, σκίαση),
- εφαρμογή ψυχρών και ανακλαστικών υλικών στις επιφάνειες,
- δημιουργία σκιασμένων διαδρομών και χώρων δροσισμού και
- παρακολούθηση μικροκλιματικών συνθηκών με χρήση αισθητήρων και δορυφορικών δεδομένων (π.χ., LST, NDVI)

Συνολικά, η ανάλυση καταδεικνύει ότι η περιοχή των Γουρνών παρουσιάζει αυξημένη και εντεινόμενη διακινδύνευση απέναντι στην κλιματική αλλαγή, με σαφή διαφοροποίηση μεταξύ των επιμέρους κινδύνων. Οι καύσωνες και η ξηρασία αναδεικνύονται ως οι κυρίαρχες κλιματικές πιέσεις, εμφανίζοντας ήδη υψηλά επίπεδα διακινδύνευσης την περίοδο αναφοράς 1981-2010 και περαιτέρω επιδείνωση στα μέσα του αιώνα (2046-2065), ενώ οι δασικές πυρκαγιές, παρά τη χαμηλή δασική κάλυψη, αποκτούν αυξημένη σημασία λόγω των ακραίων θερμοκρασιών και της ξηρότητας. Η πλημμυρική διακινδύνευση είναι χαμηλότερη, ωστόσο εμφανίζει και αυτή ανοδική τάση. Η συνδυαστική επίδραση των κλιματικών πιέσεων και των ανθρωπογενών χαρακτηριστικών καθιστά την περιοχή ιδιαίτερα ευάλωτη, υπογραμμίζοντας την ανάγκη για έγκαιρη ενσωμάτωση στοχευμένων μέτρων προσαρμογής στον τοπικό χωρικό και αναπτυξιακό σχεδιασμό.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1ου μέρους

[1] Dosio, A., Mentaschi, L., Fischer, E.M., Wyser, K. Extreme Heat Waves under 1.5°C and 2°C Global Warming. *Environ. Res. Lett.* 2018, 13, 054006, doi:10.1088/1748-9326/aab827.

[2] Masson, V., Lemonsu, A., Hidalgo, J., Voogt, J. Urban Climates and Climate Change. *Annual Review of Environment and Resources* 2020, 45, 411-444.

[3] Oke, T.R., Mills, G., Christen, A., Voogt, J.A. *Urban Climates*. Cambridge University Press, 2017.

[4] Nazarian, N., Krayenhoff, E.S., Bechtel, B., Hondula, D.M., Paolini, R., Vanos, J., Cheung, T., Chow, W.T.L., de Dear, R., Jay, O. κ.ά. Integrated Assessment of Urban Overheating Impacts on Human Life. *Earth's Future* 2022, 10, e2022EF002682, doi:10.1029/2022EF002682.

[5] Martilli, A., Krayenhoff, E.S., Nazarian, N. Is the Urban Heat Island Intensity Relevant for Heat Mitigation Studies? *Urban Climate* 2020, 31, 100541, doi:10.1016/j.uclim.2019.100541.

[6] Stewart, I.D., Oke, T.R. Local Climate Zones for Urban Temperature Studies. *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 2012, 93, 1879-1900, doi:10.1175/BAMS-D-11-00019.1.

[7] Santamouris, M. On the Energy Impact of Urban Heat Island and Global Warming on Buildings. *Energy and Buildings* 2014, 82, 100-113, doi:10.1016/j.enbuild.2014.07.022.

[8] Paravantis, J., Santamouris, M., Cartalis, C., Efthymiou, C., Kontoulis, N. Mortality Associated with High Ambient Temperatures, Heatwaves, and the Urban Heat Island in Athens, Greece. *Sustainability* 2017, 9, 606, doi:10.3390/su9040606.

[9] Agathangelidis, I., Cartalis, C., Santamouris, M. Integrating Urban Form, Function, and Energy Fluxes in a Heat Exposure Indicator in View of Intra-Urban Heat Island Assessment and Climate Change Adaptation. *Climate* 2019, 7, 75, doi:https://doi.org/10.3390/cli7060075.

[10] Agathangelidis, I., Giannaros, C., Cartalis, C., Kotroni, V., Lagouvardos, K. Local Climate Zones and Urban Morphology Dataset to Support Numerical Modelling in Greece, Utilizing GIS, Multispectral, and SAR Data. *Data in Brief* 2025, 111784.

2ου μέρους

[1] Aragoneses, E., García, M., Salis, M., Ribeiro, L.M. και Chuvieco, E.: Classification and mapping of European fuels using a hierarchical, multipurpose fuel classification system, *Earth Syst. Sci. Data*, 15, 1287-1315, https://doi.org/10.5194/essd-15-1287-2023, 2023.

[2] Global Center on Adaptation, Climate-Resilient Infrastructure Handbook. Ρότερνταμ, Ολλανδία, 2021. https://gca.org/reports/climate-resilient-infrastructure-officer-handbook/

[3] Ebi, Kristie L. κ.ά. "Hot weather and heat extremes: health risks." *The lancet* 398.10301 (2021): 698-708.

[4] Paravantis, J., Santamouris, M., Cartalis, C., Efthymiou, C., Kontoulis, N. Mortality Associated with High Ambient Temperatures, Heatwaves, and the Urban Heat Island in Athens, Greece. *Sustainability* 2017, 9, 606, doi:10.3390/su9040606.

[5] Kitous A., Despres, J. 2017. "Assessment of the impact of climate change on residential energy demand for heating and cooling," JRC Research Reports JRC110191, Joint Research Centre. https://ideas.repec.org/p/ipt/iptwpa/jrc110191.html

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

1ου μέρους

[Πίνακας 2.1] Οι κυριότεροι αστικοί παράγοντες που διαμορφώνουν, εν γένει, το θερμικό περιβάλλον των πόλεων κατά τη διάρκεια της ημέρας και της νύχτας, υπό δεδομένες καιρικές συνθήκες και τοπογραφία. Η σειρά των παραγόντων ακολουθεί φθίνουσα σημαντικότητα 16

[Πίνακας 2.2] Το σύστημα των Τοπικών Κλιματικών Ζωνών (Local Climate Zones, LCZ), όπου: ψ_{sky} ο συντελεστής θέασης ουρανού, H/W ο λόγος του ύψους προς το πλάτος των κτιρίων ενός δρόμου, λ_b το ποσοστό κάλυψης από κτίρια, λ_r το ποσοστό κάλυψης από δρόμους, λ_v το ποσοστό βλάστησης, H το ύψος κτιρίων (m) και Q_F οι ανθρωπογενείς ροές θερμότητας (W/m^2). Πηγή: Stewart & Oke (2012) 22

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

1ου μέρους

[Σχήμα 2.1] Χωρική κατανομή του ύψους των κτιρίων (σε μέτρα) για: α) το πολεοδομικό συγκρότημα της Αθήνας και β) το πολεοδομικό συγκρότημα της Θεσσαλονίκης 14

[Σχήμα 2.2] Σχηματική απεικόνιση: α) της αναλογίας διαστάσεων αστικής χαράδρας (H/W) και β) του συντελεστή θέασης ουρανού (ψ_{sky}). 15

[Σχήμα 2.3] Χωρική αποτύπωση του λόγου της αναλογίας διαστάσεων αστικής χαράδρας (H/W) για τον Δήμο Αθηναίων 15

[Σχήμα 2.4] Αποτύπωση α) του συντελεστή θέασης ουρανού (ψ_{sky}) και β) της Μέση Θερμοκρασίας Ακτινοβολίας (T_{MRT}, σε °C) στις 14:00 για τυπική θερινή ημέρα, στην περιοχή του κέντρου της Αθήνας, με χωρική ανάλυση 1μ. 16

[Σχήμα 2.5] Σύνδεση α) του συντελεστή θέασης ουρανού (ψ_{sky}) και β) της αναλογίας διαστάσεων αστικής χαράδρας (H/W) με την ένταση της νυχτερινής αστικής θερμικής νησίδας (ΑΘΝ) για διάφορες πόλεις παγκοσμίως 17

[Σχήμα 2.6] Αποτύπωση α) του συντελεστή θέασης ουρανού (ψ_{sky}) και β) της Μέση Θερμοκρασίας Ακτινοβολίας (T_{MRT}, σε °C) στις 14:00 για τυπική θερινή ημέρα, στην περιοχή του Δήμου Αμαρουσίου (Κόμβος Δαχτυλίδι), με χωρική ανάλυση 1μ. 18

[Σχήμα 2.7] Τυπική χωρική κατανομή των ανθρωπογενών πηγών θερμότητας (Q, σε W/m^2_F) στο πολεοδομικό συγκρότημα της Αθήνας για τον μήνα Ιούλιο (μέση τιμή 24ώρου) 19

[Σχήμα 2.8] Χρονική κατανομή του μέσου ωριαίου Q_F για τον μήνα Ιούλιο, σε έξι επιλεγμένα σημεία της Αθήνας: α) Εμπορικό Τρίγωνο, β) σημείο αιχμής ανθρωπογενών εκπομπών (ευρύτερη περιοχή Ομόνοιας), γ) οδός Πατησίων – 'Αγιος Παντελεήμονας, δ) σημείο υψηλής κυκλοφορίας οχημάτων (Λεωφόρος Κηφισού), ε) τυπική πυκνοκατοικημένη συνοικία (Ζωγράφου) και ζ) τυπική αραιοδομημένη συνοικία (Βριλήσσια) 21

[Σχήμα 2.9] Χαρτογράφηση α) της αστικής περιοχής της Αθήνας και β) της Θεσσαλονίκης σε Τοπικές Κλιματικές Ζώνες (LCZ). Η ταξινόμηση των φυσικών περιοχών ακολουθεί το πρότυπο ταξινόμησης του International Geosphere–Biosphere Programme (IGBP) 23

[Σχήμα 2.10] Χωρική αποτύπωση της επιφανειακής θερμοκρασίας (LST) από τον δορυφόρο SDGSAT-1 για την Αθήνα, α) 25 Αυγούστου 2024, 11:15 και β) 23 Αυγούστου 2024, 22:30 24

[Σχήμα 2.11] Χωρική αποτύπωση της μέση μέγιστης και μέσης ελάχιστης θερμοκρασίας αέρα τους θερινούς μήνες του 2021για: α) και β) την Αθήνα, γ) και δ) τον Πειραιά, ε) και ζ) τον Δήμο Αμαρουσίου, η) και θ) τη Θεσσαλονίκη αντίστοιχα, με χρήση του αστικού μοντέλου προσομοίωσης SUEWS σε χωρική ανάλυση 100μ. 24

[Σχήμα 2.12] Χωρική αποτύπωση της μέσης μέγιστης και μέσης ελάχιστης θερμοκρασίας αέρα τους θερινούς μήνες του 2021 για: α) και β) την Αθήνα, γ) και δ) τον Πειραιά, ε) και ζ) τον Δήμο Αμαρουσίου, η) και θ) τη Θεσσαλονίκη, αντίστοιχα, με χρήση του αστικού μοντέλου προσομοίωσης SUEWS σε χωρική ανάλυση 100 μ. 26

[Σχήμα 3.1] Μικροκλιματική αποτύπωση και σενάρια παρεμβάσεων για την περιοχή Πλατείας Ομονοίας – Πατησίων: α) Δορυφορική απεικόνιση της περιοχής, β) Υφιστάμενη κατάσταση, γ) Σενάριο πράσινων οροφών στην οδό Πατησίων, δ) Σενάριο ψυχρών οροφών στην οδό Πατησίων, ε) Σενάριο ψυχρών υλικών στο οδόστρωμα και πεζοδρόμια, ζ) Σενάριο πράσινων τοίχων στην οδό Πατησίων. Θερμοκρασία αέρα (°C) στα 2μ., στις 15:00 κατά τυπική αίθρια θερινή ημέρα (10 Ιουλίου, 2021) 30

[Σχήμα 3.2] Μικροκλιματική αποτύπωση και σενάρια παρεμβάσεων για την περιοχή Πλατείας Κοτζιά: α) Δορυφορική απεικόνιση της περιοχής, β) Υφιστάμενη κατάσταση, γ) Σενάριο μετατροπής της πλατείας σε πάρκο με γρασίδι και δέντρα, δ) Σενάριο ψυχρών οροφών στη Σοφοκλέους, ε) Σενάριο πράσινων οροφών στη Σοφοκλέους, ζ) Σενάριο δέντρων, ψυχρών οροφών και πράσινων οροφών στην Αθηνάς, η) Σενάριο superblock στη Σοφοκλέους. Θερμοκρασία αέρα (°C) στα 2μ., στις 15:00 κατά τυπική αίθρια θερινή ημέρα (10 Ιουλίου, 2021) 31

[Σχήμα 3.3] Μικροκλιματική αποτύπωση και σενάρια παρεμβάσεων για την περιοχή Αγίου Διονυσίου Πειραιά: α) Δορυφορική απεικόνιση της περιοχής, β) Υφιστάμενη κατάσταση, γ) Σενάριο πράσινων οροφών στο 50% των κτιρίων, δ) Σενάριο πράσινων οροφών στο 50% των κτιρίων, ε) Σενάριο πάρκων τσέπης, συμπεριλαμβανομένου του αύλειου χώρου σχολείου, ζ) Σενάριο ψυχρών υλικών στο οδόστρωμα και τα πεζοδρόμια. Θερμοκρασία αέρα (°C) στα 2μ. , στις 15:00 κατά τυπική αίθρια θερινή ημέρα (11 Ιουλίου, 2021) 33

[Σχήμα 3.4] Μικροκλιματική αποτύπωση και σενάριο παρέμβασης για την περιοχή του Αμαρουσίου (νέο συγκρότημα ΤΕΕ): α) Δορυφορική απεικόνιση της περιοχής, β) Υφιστάμενη κατάσταση, γ) Σενάριο ανάπλασης με γρασίδι, δέντρα και δύο νέα κτίρια με εκτεταμένες πράσινες οροφές. Θερμοκρασία αέρα (°C) στα 2μ., στις 15:00 κατά τυπική αίθρια θερινή ημέρα (14 Ιουλίου, 2021) 34

[Σχήμα 3.5] Αρχιτεκτονικό σχέδιο του συγκροτήματος γραφείων στο ακίνητο ιδιοκτησίας του Τεχνικού Επιμελητηρίου Ελλάδας στο Μαρούσι 35

[Σχήμα 3.6] Μικροκλιματική αποτύπωση και σενάριο παρέμβασης για τη Δυτική Είσοδο Θεσσαλονίκης (πρώην εργοστάσιο ΦΙΞ): α) Δορυφορική απεικόνιση της περιοχής, β) Υφιστάμενη κατάσταση, γ) Σενάριο συνολικής ανάπλασης με δέντρα, γρασίδι και πράσινες οροφές στα νέα κτίρια. Θερμοκρασία αέρα (°C) στα 2μ., στις 15:00 κατά τυπική αίθρια θερινή ημέρα (4 Ιουλίου, 2021) 36

[Σχήμα 3.7] Μικροκλιματική αποτύπωση και σενάρια παρεμβάσεων για την περιοχή Γκύζη γύρω από το 40ό Δημοτικό Σχολείο: α) Δορυφορική απεικόνιση της περιοχής, β) Υφιστάμενη κατάσταση, γ) Σενάριο δημιουργίας superblock γύρω από το σχολείο, δ) Σενάριο ψυχρών οροφών, ε) Σενάριο πράσινων οροφών, ζ) Σενάριο συνδυασμένων παρεμβάσεων στον σχολικό αύλειο χώρο (πράσινες οροφές, πράσινος τοίχος, πάρκο τσέπης). Θερμοκρασία αέρα (°C) στα 2μ., στις 15:00 κατά τυπική αίθρια θερινή ημέρα (10 Ιουλίου, 2021) 37

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ

ΠΙΝΑΚΩΝ

[Πίνακας 2.2.1] Συγκεντρωτική λίστα του συνόλου των κλιματικών δεικτών 44

[Πίνακας 2.2.2] 2ου μέρους
Συγκριτικά κλιματικά χαρακτηριστικά για τις τρεις περιοχές μελέτης. Μέσες τιμές της περιόδου 1981-2010 και σε παρένθεση η μέση απόκλιση της περιόδου 2011-2022 62

[Πίνακας 2.2.3] Αποτελέσματα της ανάλυσης ακραίων τιμών για τις παραμέτρους της ημερήσιας μέγιστης θερμοκρασίας και του ύψους βροχόπτωσης Αθήνας 89

[Πίνακας 2.2.4] Αποτελέσματα της ανάλυσης ακραίων τιμών για τις παραμέτρους της ημερήσιας μέγιστης θερμοκρασίας και του ύψους βροχόπτωσης Θεσσαλονίκης 90

[Πίνακας 2.3.5] Αποτελέσματα της ανάλυσης ακραίων τιμών για τις παραμέτρους της ημερήσιας μέγιστης θερμοκρασίας και του ύψους βροχόπτωσης Γουρνών 90

[Πίνακας 2.3.1] Κατηγορίες χρήσεων γης και κωδικοί ταξινόμησης Urban Atlas 95 Ταξινόμηση κλίσεων εδάφους

[Πίνακας 2.3.2] 113 Αποτύπωση επιπτώσεων δασικών πυρκαγιών 127 Κατηγορίες φορτίου καύσιμης ύλης 128

[Πίνακας 2.4.1] Αποτύπωση επιπτώσεων πλημμυρών 129 Αποτύπωση επιπτώσεων ξηρασίας 131 Αποτύπωση

[Πίνακας 2.4.2] επιπτώσεων αυξημένων θερμοκρασιών και επεισοδίων καύσωνα 135 Αποτύπωση επιπτώσεων

[Πίνακας 2.4.3] αυξημένων θερμοκρασιών και επεισοδίων καύσωνα 140

[Πίνακας 2.4.4]

[Πίνακας 2.4.5]

[Πίνακας 2.4.6]

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

ΚΑΙ ΕΙΚΟΝΩΝ

2ου μέρους

[Σχήμα 2.1] Χρονική εξέλιξη των μεταβολών της μέσης ετήσιας θερμοκρασίας (°C) της Αθήνας σε σύγκριση με τη μέση τιμή της περιόδου 1981-2020, από δεδομένα ERA5-Land 45

[Σχήμα 2.2] Χρονική εξέλιξη των μεταβολών του πλήθους των θερινών ημερών της Αθήνας σε σύγκριση με τη μέση τιμή της περιόδου 1981-2020, από δεδομένα ERA5-Land 46

[Σχήμα 2.3] Χρονική εξέλιξη των μεταβολών του πλήθους των τροπικών νυχτών της Αθήνας σε σύγκριση με τη μέση τιμή της περιόδου 1981-2020, από δεδομένα ERA5-Land 46

[Σχήμα 2.4] Χρονική εξέλιξη των μεταβολών των βαθμοημερών ψύξης της Αθήνας σε σύγκριση με τη μέση τιμή της περιόδου 1981-2020, από δεδομένα ERA5-Land 47

[Σχήμα 2.5] Χρονική εξέλιξη των μεταβολών του αριθμού επεισοδίων καύσωνα της Αθήνας σε σύγκριση με τη μέση τιμή της περιόδου 1981-2020, από δεδομένα ERA5-Land 48

[Σχήμα 2.6] Χρονική εξέλιξη των μεταβολών του αριθμού ημερών με καύσωνα της Αθήνας σε σύγκριση με τη μέση τιμή της περιόδου 1981-2020, από δεδομένα ERA5-Land 48

[Σχήμα 2.7] Χρονική εξέλιξη των μεταβολών της ετήσιας βροχόπτωσης της Αθήνας σε σύγκριση με τη μέση τιμή της περιόδου 1981-2020, από δεδομένα ERA5-Land 49

[Σχήμα 2.8] Χρονική εξέλιξη των μεταβολών του αριθμού των ημερών υψηλής βροχόπτωσης της Αθήνας σε σύγκριση με τη μέση τιμή της περιόδου 1981-2020, από δεδομένα ERA5-Land 49

[Σχήμα 2.9] Χρονική εξέλιξη των μεταβολών της μέσης ετήσιας θερμοκρασίας (°C) της Θεσσαλονίκης σε σύγκριση με τη μέση τιμή της περιόδου 1981-2020, από δεδομένα ERA5-Land 51

[Σχήμα 2.10] Χρονική εξέλιξη των μεταβολών του πλήθους των θερινών ημερών της Θεσσαλονίκης σε σύγκριση με τη μέση τιμή της περιόδου 1981-2020, από δεδομένα ERA5-Land 52

[Σχήμα 2.11] Συγκριτική αποτύπωση των αποκλίσεων των μεταβολών του πλήθους των θερινών ημερών σε σχέση με τη μέση τιμή της περιόδου 1981-2020 για Αθήνα και Θεσσαλονίκη 52

[Σχήμα 2.12] Χρονική εξέλιξη των μεταβολών του πλήθους των τροπικών νυχτών της Θεσσαλονίκης σε σύγκριση με τη μέση τιμή της περιόδου 1981-2020, από δεδομένα ERA5-Land 53

[Σχήμα 2.13] Χρονική εξέλιξη των μεταβολών των βαθμοημερών ψύξης της Θεσσαλονίκης σε σύγκριση με τη μέση τιμή της περιόδου 1981-2020, από δεδομένα ERA5-Land 53

[Σχήμα 2.14] Χρονική εξέλιξη των μεταβολών του αριθμού επεισοδίων καύσωνα της Θεσσαλονίκης σε σύγκριση με τη μέση τιμή της περιόδου 1981-2020, από δεδομένα ERA5-Land 54

[Σχήμα 2.15] Χρονική εξέλιξη των μεταβολών του αριθμού ημερών με καύσωνα της Θεσσαλονίκης σε σύγκριση με τη μέση τιμή της περιόδου 1981-2020, από δεδομένα ERA5-Land 55

[Σχήμα 2.16] Χρονική εξέλιξη των μεταβολών της ετήσιας βροχόπτωσης της Θεσσαλονίκης σε σύγκριση με τη μέση τιμή της περιόδου 1981-2020, από δεδομένα ERA5-Land 56

[Σχήμα 2.17] Χρονική εξέλιξη των μεταβολών του αριθμού των ημερών υψηλής βροχόπτωσης της Θεσσαλονίκης σε σύγκριση με τη μέση τιμή της περιόδου 1981-2020, από δεδομένα ERA5-Land 56

[Σχήμα 2.18] Χρονική εξέλιξη των μεταβολών της μέσης ετήσιας θερμοκρασίας (°C) των Γουρνών σε σύγκριση με τη μέση τιμή της περιόδου 1981-2020, από δεδομένα ERA5-Land 57

[Σχήμα 2.19] Χρονική εξέλιξη των μεταβολών του αριθμού θερινών ημερών των Γουρνών σε σύγκριση με τη μέση τιμή της περιόδου 1981-2020, από δεδομένα ERA5-Land 58

[Σχήμα 2.20] Χρονική εξέλιξη των μεταβολών του αριθμού τροπικών νυχτών των Γουρνών σε σύγκριση με τη μέση τιμή της περιόδου 1981-2020, από δεδομένα ERA5-Land 58

[Σχήμα 2.21] Χρονική εξέλιξη των μεταβολών των βαθμοημερών ψύξης των Γουρνών σε σύγκριση με τη μέση τιμή της περιόδου 1981–2020, από δεδομένα ERA5-Land 59

[Σχήμα 2.22] Χρονική εξέλιξη των μεταβολών του αριθμού επεισοδίων καύσωνα των Γουρνών σε σύγκριση με τη μέση τιμή της περιόδου 1981-2020, από δεδομένα ERA5-Land 60

[Σχήμα 2.23] Χρονική εξέλιξη των μεταβολών του αριθμού των ημερών με επεισόδιο καύσωνα σε σύγκριση με τη μέση τιμή της περιόδου 1981-2020 των Γουρνών, από δεδομένα ERA5-Land 60

[Σχήμα 2.24] Χρονική εξέλιξη των μεταβολών της αθροιστικής ετήσιας βροχόπτωσης (mm) των Γουρνών σε σύγκριση με τη μέση τιμή της περιόδου 1981-2020, από δεδομένα ERA5-Land 61

[Σχήμα 2.25] Χρονική εξέλιξη των μεταβολών του αριθμού ημερών υψηλής βροχόπτωσης των Γουρνών σε σύγκριση με τη μέση τιμή της περιόδου 1981-2020, από δεδομένα ERA5-Land 61

[Σχήμα 2.26] Χρονική εξέλιξη των μεταβολών της μέσης ετήσιας θερμοκρασίας (°C) σε σύγκριση με τη μέση τιμή της περιόδου 1971-2000, από δεδομένα κλιματικών προσομοιώσεων σύμφωνα με το σενάριο RCP4.5 64

[Σχήμα 2.27] Χρονική εξέλιξη των μεταβολών της μέσης ετήσιας θερμοκρασίας (°C) σε σύγκριση με τη μέση τιμή της περιόδου 1971-2000, από δεδομένα κλιματικών προσομοιώσεων σύμφωνα με το σενάριο RCP8.5 65

[Σχήμα 2.28] Χρονική εξέλιξη των μεταβολών των θερινών ημερών σε σύγκριση με τη μέση τιμή της περιόδου 1971-2000, από δεδομένα κλιματικών προσομοιώσεων σύμφωνα με το σενάριο RCP4.5 66

[Σχήμα 2.29] Χρονική εξέλιξη των μεταβολών των θερινών ημερών σε σύγκριση με τη μέση τιμή της περιόδου 1971-2000, από δεδομένα κλιματικών προσομοιώσεων σύμφωνα με το σενάριο RCP8.5 66

[Σχήμα 2.30] Χρονική εξέλιξη των μεταβολών των τροπικών νυχτών σε σύγκριση με τη μέση τιμή της περιόδου 1971-2000, από δεδομένα κλιματικών προσομοιώσεων σύμφωνα με το σενάριο RCP4.5 66

Χρονική εξέλιξη των μεταβολών των τροπικών νυχτών σε σύγκριση με τη μέση τιμή της περιόδου 1971-2000, από δεδομένα κλιματικών προσομοιώσεων σύμφωνα με το σενάριο RCP8.5 67

[Σχήμα 2.31] Χρονική εξέλιξη των μεταβολών των βαθμοημερών ψύξης σε σύγκριση με τη μέση τιμή της περιόδου 1971-2000, από δεδομένα κλιματικών προσομοιώσεων σύμφωνα με το σενάριο RCP4.5 67

[Σχήμα 2.32] Χρονική εξέλιξη των μεταβολών των βαθμοημερών ψύξης σε σύγκριση με τη μέση τιμή της περιόδου 1971-2000, από δεδομένα κλιματικών προσομοιώσεων σύμφωνα με το σενάριο RCP8.5 67

[Σχήμα 2.33] Χρονική εξέλιξη των μεταβολών του αριθμού επεισοδίων καύσωνα σε σύγκριση με τη μέση τιμή της περιόδου 1971-2000, από δεδομένα κλιματικών προσομοιώσεων σύμφωνα με το σενάριο RCP4.5 69

[Σχήμα 2.34] Χρονική εξέλιξη των μεταβολών του αριθμού ημερών με καύσωνα σε σύγκριση με τη μέση τιμή της περιόδου 1971-2000, από δεδομένα κλιματικών προσομοιώσεων σύμφωνα με το σενάριο RCP4.5 69

[Σχήμα 2.35] Χρονική εξέλιξη των μεταβολών του αριθμού επεισοδίων καύσωνα σε σύγκριση με τη μέση τιμή της περιόδου 1971-2000, από δεδομένα κλιματικών προσομοιώσεων σύμφωνα με το σενάριο RCP8.5 69

[Σχήμα 2.36] Χρονική εξέλιξη των μεταβολών του αριθμού ημερών με καύσωνα σε σύγκριση με τη μέση τιμή της περιόδου 1971-2000, από δεδομένα κλιματικών προσομοιώσεων σύμφωνα με το σενάριο RCP8.5 70

[Σχήμα 2.37] Χρονική εξέλιξη των μεταβολών της ετήσιας βροχόπτωσης σε σύγκριση με τη μέση τιμή της περιόδου 1971-2000, από δεδομένα κλιματικών προσομοιώσεων σύμφωνα με το σενάριο RCP4.5 71

[Σχήμα 2.38] Χρονική εξέλιξη των μεταβολών της ετήσιας βροχόπτωσης σε σύγκριση με τη μέση τιμή της περιόδου 1971-2000, από δεδομένα κλιματικών προσομοιώσεων σύμφωνα με το σενάριο RCP8.5 71

[Σχήμα 2.39] Χρονική εξέλιξη των μεταβολών του αριθμού των ημερών υψηλής βροχόπτωσης σε σύγκριση με τη μέση τιμή της περιόδου 1971-2000, από δεδομένα κλιματικών προσομοιώσεων σύμφωνα με το σενάριο RCP4.5 72

[Σχήμα 2.40] Χρονική εξέλιξη των μεταβολών του αριθμού των ημερών υψηλής βροχόπτωσης σε σύγκριση με τη μέση τιμή της περιόδου 1971-2000, από δεδομένα κλιματικών προσομοιώσεων σύμφωνα με το σενάριο RCP8.5 72

[Σχήμα 2.41] Χρονική εξέλιξη των μεταβολών της μέσης ετήσιας θερμοκρασίας (°C) σε σύγκριση με τη μέση τιμή της περιόδου 1971-2000, από δεδομένα κλιματικών προσομοιώσεων σύμφωνα με το σενάριο RCP4.5 73

[Σχήμα 2.42]

[Σχήμα 2.43] Χρονική εξέλιξη των μεταβολών της μέσης ετήσιας θερμοκρασίας (°C) σε σύγκριση με τη μέση τιμή της περιόδου 1971-2000, από δεδομένα κλιματικών προσομοιώσεων σύμφωνα με το σενάριο RCP8.5 73

[Σχήμα 2.44] Χρονική εξέλιξη των μεταβολών των θερινών ημερών σε σύγκριση με τη μέση τιμή της περιόδου 1971-2000, από δεδομένα κλιματικών προσομοιώσεων σύμφωνα με το σενάριο RCP4.5 74

[Σχήμα 2.45] Χρονική εξέλιξη των μεταβολών των θερινών ημερών σε σύγκριση με τη μέση τιμή της περιόδου 1971-2000, από δεδομένα κλιματικών προσομοιώσεων σύμφωνα με το σενάριο RCP8.5 74

[Σχήμα 2.46] Χρονική εξέλιξη των μεταβολών των τροπικών νυχτών σε σύγκριση με τη μέση τιμή της περιόδου 1971-2000, από δεδομένα κλιματικών προσομοιώσεων σύμφωνα με το σενάριο RCP4.5 75

[Σχήμα 2.47] Χρονική εξέλιξη των μεταβολών των τροπικών νυχτών σε σύγκριση με τη μέση τιμή της περιόδου 1971-2000, από δεδομένα κλιματικών προσομοιώσεων σύμφωνα με το σενάριο RCP8.5 75

[Σχήμα 2.48] Χρονική εξέλιξη των μεταβολών των βαθμοημερών ψύξης σε σύγκριση με τη μέση τιμή της περιόδου 1971-2000, από δεδομένα κλιματικών προσομοιώσεων σύμφωνα με το σενάριο RCP4.5 75

[Σχήμα 2.49] Χρονική εξέλιξη των μεταβολών των βαθμοημερών ψύξης σε σύγκριση με τη μέση τιμή της περιόδου 1971-2000, από δεδομένα κλιματικών προσομοιώσεων σύμφωνα με το σενάριο RCP8.5 76

[Σχήμα 2.50] Χρονική εξέλιξη των μεταβολών του αριθμού επεισοδίων καύσωνα σε σύγκριση με τη μέση τιμή της περιόδου 1971-2000, από δεδομένα κλιματικών προσομοιώσεων σύμφωνα με το σενάριο RCP4.5 77

[Σχήμα 2.51] Χρονική εξέλιξη των μεταβολών του αριθμού επεισοδίων καύσωνα σε σύγκριση με τη μέση τιμή της περιόδου 1971-2000, από δεδομένα κλιματικών προσομοιώσεων σύμφωνα με το σενάριο RCP8.5 77

[Σχήμα 2.52] Χρονική εξέλιξη των μεταβολών του αριθμού ημερών με καύσωνα σε σύγκριση με τη μέση τιμή της περιόδου 1971-2000, από δεδομένα κλιματικών προσομοιώσεων σύμφωνα με το σενάριο RCP4.5 78

[Σχήμα 2.53] Χρονική εξέλιξη των μεταβολών του αριθμού ημερών με καύσωνα σε σύγκριση με τη μέση τιμή της περιόδου 1971-2000, από δεδομένα κλιματικών προσομοιώσεων σύμφωνα με το σενάριο RCP8.5 78

[Σχήμα 2.54] Χρονική εξέλιξη των μεταβολών της ετήσιας βροχόπτωσης σε σύγκριση με τη μέση τιμή της περιόδου 1971-2000, από δεδομένα κλιματικών προσομοιώσεων σύμφωνα με το σενάριο RCP4.5. 79

[Σχήμα 2.55] Χρονική εξέλιξη των μεταβολών της ετήσιας βροχόπτωσης σε σύγκριση με τη μέση τιμή της περιόδου 1971-2000, από δεδομένα κλιματικών προσομοιώσεων σύμφωνα με το σενάριο RCP8.5 79

[Σχήμα 2.56] Χρονική εξέλιξη των μεταβολών του αριθμού των ημερών υψηλής βροχόπτωσης σε σύγκριση με τη μέση τιμή της περιόδου 1971-2000, από δεδομένα κλιματικών προσομοιώσεων σύμφωνα με το σενάριο RCP4.5 80

[Σχήμα 2.57] Χρονική εξέλιξη των μεταβολών του αριθμού των ημερών υψηλής βροχόπτωσης σε σύγκριση με τη μέση τιμή της περιόδου 1971-2000, από δεδομένα κλιματικών προσομοιώσεων σύμφωνα με το σενάριο RCP8.5 80

[Σχήμα 2.58] Χρονική εξέλιξη των μεταβολών της μέσης ετήσιας θερμοκρασίας (°C) σε σύγκριση με τη μέση τιμή της περιόδου 1971-2000, από δεδομένα κλιματικών προσομοιώσεων σύμφωνα με το σενάριο RCP4.5 81

[Σχήμα 2.59] Χρονική εξέλιξη των μεταβολών της μέσης ετήσιας θερμοκρασίας (°C) σε σύγκριση με τη μέση τιμή της περιόδου 1971-2000, από δεδομένα κλιματικών προσομοιώσεων σύμφωνα με το σενάριο RCP8.5 81

[Σχήμα 2.60] Χρονική εξέλιξη των μεταβολών του αριθμού θερινών ημερών σε σύγκριση με τη μέση τιμή της περιόδου 1971-2000, από δεδομένα κλιματικών προσομοιώσεων σύμφωνα με το σενάριο RCP4.5 82

[Σχήμα 2.61] Χρονική εξέλιξη των μεταβολών του αριθμού θερινών ημερών σε σύγκριση με τη μέση τιμή της περιόδου 1971-2000, από δεδομένα κλιματικών προσομοιώσεων σύμφωνα με το σενάριο RCP8.5 82

[Σχήμα 2.62] Χρονική εξέλιξη των μεταβολών του αριθμού τροπικών νυχτών σε σύγκριση με τη μέση τιμή της περιόδου 1971-2000, από δεδομένα κλιματικών προσομοιώσεων σύμφωνα με το σενάριο RCP4.5 83

[Σχήμα 2.63] Χρονική εξέλιξη των μεταβολών του αριθμού τροπικών νυχτών σε σύγκριση με τη μέση τιμή της περιόδου 1971-2000, από δεδομένα κλιματικών προσομοιώσεων σύμφωνα με το σενάριο RCP8.5 83

[Σχήμα 2.64] Χρονική εξέλιξη των μεταβολών των βαθμοημερών ψύξης σε σύγκριση με τη μέση τιμή της περιόδου 1971-2000, από δεδομένα κλιματικών προσομοιώσεων σύμφωνα με το σενάριο RCP4.5 84

[Σχήμα 2.65] Χρονική εξέλιξη των μεταβολών των βαθμοημερών ψύξης σε σύγκριση με τη μέση τιμή της περιόδου 1971-2000, από δεδομένα κλιματικών προσομοιώσεων σύμφωνα με το σενάριο RCP8.5 84

[Σχήμα 2.66] Χρονική εξέλιξη των μεταβολών του αριθμού επεισοδίων καύσωνα σε σύγκριση με τη μέση τιμή της περιόδου 1971-2000, από δεδομένα κλιματικών προσομοιώσεων σύμφωνα με το σενάριο RCP4.5 85

[Σχήμα 2.67] Χρονική εξέλιξη των μεταβολών του αριθμού επεισοδίων καύσωνα σε σύγκριση με τη μέση τιμή της περιόδου 1971-2000, από δεδομένα κλιματικών προσομοιώσεων σύμφωνα με το σενάριο RCP8.5 85

[Σχήμα 2.68] Χρονική εξέλιξη των μταβολών του αριθμού των ημερών με επεισόδιο καύσωνα σε σύγκριση με τη μέση τιμή της περιόδου 1971-2000, από δεδομένα κλιματικών προσομοιώσεων σύμφωνα με το σενάριο RCP4.5 86

[Σχήμα 2.69] Χρονική εξέλιξη των μεταβολών του αριθμού των ημερών με επεισόδιο καύσωνα σε σύγκριση με τη μέση τιμή της περιόδου 1971-2000, από δεδομένα κλιματικών προσομοιώσεων σύμφωνα με το σενάριο RCP8.5 86

[Σχήμα 2.70] Χρονική εξέλιξη των μεταβολών της αθροιστικής ετήσιας βροχόπτωσης (mm) σε σύγκριση με τη μέση τιμή της περιόδου 1971-2000, από δεδομένα κλιματικών προσομοιώσεων σύμφωνα με το σενάριο RCP4.5 87

[Σχήμα 2.71] Χρονική εξέλιξη των μεταβολών της αθροιστικής ετήσιας βροχόπτωσης (mm) σε σύγκριση με τη μέση τιμή της περιόδου 1971-2000, από δεδομένα κλιματικών προσομοιώσεων σύμφωνα με το σενάριο RCP8.5 87

[Σχήμα 2.72] Χρονική εξέλιξη των μεταβολών του αριθμού ημερών υψηλής βροχόπτωσης σε σύγκριση με τη μέση τιμή της περιόδου 1971-2000, από δεδομένα κλιματικών προσομοιώσεων σύμφωνα με το σενάριο RCP4.5 88

[Σχήμα 2.73] Χρονική εξέλιξη των μεταβολών του αριθμού ημερών υψηλής βροχόπτωσης σε σύγκριση με τη μέση τιμή της περιόδου 1971-2000, από δεδομένα κλιματικών προσομοιώσεων σύμφωνα με το σενάριο RCP8.5 88

[Εικόνα 3.1] Περιοχή μελέτης – Μητροπολιτική Αθήνα και υποπεριοχές ανάλυσης 92 Ψηφιακό μοντέλο εδάφους Αθήνας 93 Κλίση επιφάνειας Αθήνας 94 Χρήσεις και κάλυψη γης Αθήνας (Urban Atlas) 97

[Εικόνα 3.2]

[Εικόνα 3.3]

[Εικόνα 3.4]

[Εικόνα 3.5] Ποσοστό αδιαπερατότητας επιφανειών Αθήνας (IMD) 98 Ύψος κτιρίων Αθήνας (μ.) 99 Λόγος
[Εικόνα 3.6] ύψους/πλάτους δρόμου Αθήνας H/W 99 Δείκτης βλάστησης NDVI Αθήνας. 100 Επιφανειακή
[Εικόνα 3.7] θερμοκρασία εδάφους (ΕΘΕ) Αθήνας 101 Περιοχή μελέτης – δυτική Θεσσαλονίκη 103 Ψηφιακό
[Εικόνα 3.8] μοντέλο εδάφους Θεσσαλονίκης 104 Κλίση επιφάνειας Θεσσαλονίκης 105 Χρήσεις και κάλυψη
[Εικόνα 3.9] γης Θεσσαλονίκης (Urban Atlas) 106 Ποσοστό αδιαπερατότητας επιφανειών (IMD) Θεσσαλονίκης
[Εικόνα 3.10] 107 Ύψος κτιρίων (μ.) Θεσσαλονίκης 108 Δείκτης βλάστησης NDVI Θεσσαλονίκης 109
[Εικόνα 3.11] Επιφανειακή θερμοκρασία εδάφους (ΕΘΕ) Θεσσαλονίκης 111 Περιοχή μελέτης – Γούρνες 112
[Εικόνα 3.12] Ψηφιακό Μοντέλο Ύψομέτρου για την περιοχή μελέτης Γουρνών 112 Δεδομένα κλίσης στην
[Εικόνα 3.13] περιοχή μελέτης Γουρνών 113 Δεδομένα κάλυψης/χρήσης γης για την περιοχή μελέτης Γουρνών
[Εικόνα 3.14] 114 Δεδομένα δασικών τύπων για την περιοχή μελέτης Γουρνών 115 Δεδομένα πυκνότητας
[Εικόνα 3.15] δενδροκάλυψης για την περιοχή μελέτης Γουρνών 116 Ποσοστό αδιαπερατότητας της επιφάνειας
[Εικόνα 3.16] για την περιοχή μελέτης Γουρνών 117 Επιφανειακή θερμοκρασία του εδάφους για την περιοχή
[Εικόνα 3.17] μελέτης Γουρνών 117 Δείκτης Κανονικοποιημένης Διαφοράς Βλάστησης για την περιοχή μελέτης
[Εικόνα 3.18] Γουρνών 118 Δείκτης τρωτότητας Αθήνας 121 Δείκτης τρωτότητας Θεσσαλονίκης 124 Δείκτης
[Εικόνα 3.19] Καιρού Πυρκαγιάς (FWI) Κρήτης 127 Χάρτης φορτίου καύσιμης ύλης Γουρνών 128 Αξιολόγηση
[Εικόνα 3.20] διακινδύνευσης λόγω δασικών πυρκαγιών στις Γούρνες για την περίοδο αναφοράς 198-2010 129
[Εικόνα 3.21] Αξιολόγηση διακινδύνευσης λόγω δασικών πυρκαγιών στις Γούρνες για τα μέσα του αιώνα βάσει
[Εικόνα 3.22] του σεναρίου RCP4.5 130 Αξιολόγηση διακινδύνευσης λόγω δασικών πυρκαγιών στις Γούρνες για
[Εικόνα 3.23] τα μέσα του αιώνα βάσει του σεναρίου RCP8.5 130 Σύνθετος κλιματικός δείκτης πλημμύρας στις
[Εικόνα 3.24] Γούρνες 132
[Εικόνα 3.25]
[Εικόνα 3.26]
[Εικόνα 4.1]
[Εικόνα 4.2]
[Εικόνα 4.3]
[Εικόνα 4.4]
[Εικόνα 4.5]
[Εικόνα 4.6]
[Εικόνα 4.7]
[Εικόνα 4.8]

[Εικόνα 4.9] Αξιολόγηση έκθεσης και τρωτότητας στις πλημμύρες στις Γούρνες 133
[Εικόνα 4.10] Αξιολόγηση διακινδύνευσης λόγω πλημμύρας στις Γούρνες για την περίοδο αναφοράς 1981-2010. 134
[Εικόνα 4.11] Αξιολόγηση διακινδύνευσης λόγω πλημμύρας στις Γούρνες για την περίοδο αναφοράς 1981-2010, βάσει του σεναρίου RCP4.5 134
[Εικόνα 4.12] Αξιολόγηση διακινδύνευσης λόγω πλημμύρας στις Γούρνες για την περίοδο αναφοράς 1981-2010, βάσει του σεναρίου RCP8.5 134
[Εικόνα 4.13] Σύνθετος κλιματικός δείκτης ξηρασίας Κρήτης 136 Αξιολόγηση έκθεσης και τρωτότητας στη ξηρασία στις Γούρνες 137 Αξιολόγηση διακινδύνευσης λόγω ξηρασίας στις Γούρνες για την περίοδο αναφοράς 1981-2010 138 Αξιολόγηση διακινδύνευσης λόγω ξηρασίας στις Γούρνες για τα μέσα του αιώνα βάσει του σεναρίου RCP4.5 138 Αξιολόγηση διακινδύνευσης λόγω ξηρασίας στις Γούρνες για τα μέσα του αιώνα βάσει του σεναρίου RCP8.5 139 Σύνθετος κλιματικός δείκτης καύσωνα Κρήτης 141 Αξιολόγηση έκθεσης και τρωτότητας στον καύσωνα στις Γούρνες 142 Αξιολόγηση διακινδύνευσης λόγω καύσωνα στις Γούρνες για την περίοδο αναφοράς 1981-2010 143 Αξιολόγηση διακινδύνευσης λόγω καύσωνα στις Γούρνες για τα μέσα του αιώνα βάσει του σεναρίου RCP4.5 143 Αξιολόγηση διακινδύνευσης λόγω καύσωνα στις Γούρνες για τα μέσα του αιώνα βάσει του σεναρίου RCP8.5 144
[Εικόνα 4.14]
[Εικόνα 4.16]
[Εικόνα 4.15]
[Εικόνα 4.17]
[Εικόνα 4.18]
[Εικόνα 4.19]
[Εικόνα 4.20]
[Εικόνα 4.21]
[Εικόνα 4.22]

DIMAND
REAL ESTATE DEVELOPMENT