



ΕΘΝΙΚΟ ΑΣΤΕΡΟΣΚΟΠΕΙΟ ΑΘΗΝΩΝ
ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟ ΕΡΕΥΝΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ
& ΒΙΩΣΙΜΗΣ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ (ΙΕΠΒΑ)
Ι. ΜΕΤΑΞΑ & Β. ΠΑΥΛΟΥ, ΠΕΝΤΕΛΗ
152 36, ΑΘΗΝΑ
Τηλ.: 210 8109122, Fax: 210 8103236



Κατάσταση του Περιβάλλοντος στην Ελλάδα

Ενότητα: Κλιματική Αλλαγή και Υγεία

Έκθεση

προς το Εθνικό Κέντρο Περιβάλλοντος και Αειφόρου Ανάπτυξης

Επιστημονικός Υπεύθυνος: Καθ. Νικόλαος Μιχαλόπουλος, Δ/ντης ΙΕΠΒΑ/ΕΑΑ

Μέλη Επιστημονικής Ομάδας: Δρ. Χρήστος Γιαννακόπουλος

Δρ. Δήμητρα Φουντά

Δρ. Γεώργιος Γρίβας

Δρ. Κωνσταντίνος Δημητρίου

Δρ. Γεώργιος Καταβούτας

Αθήνα, Οκτώβριος 2019

Περιεχόμενα

Εισαγωγή	5
 Κεφάλαιο Α	
Η επίδραση της κλιματικής αλλαγής στην ανθρώπινη υγεία	13
A1: Θερμική άνεση	13
A1.1: Ομοιόσταση και θερμορυθμιστικοί μηχανισμοί	13
A1.2: Προσαρμογή και εγκλιματισμός	16
A1.3: Θερμική άνεση, αίσθηση, επιβάρυνση και ένταση	17
A1.4: Θερμικοί δείκτες (ή βιοκλιματικοί δείκτες)	18
A1.5: Μοντέλα και εξίσωση θερμικού ισοζυγίου	21
A2: Σύνδεση ατμοσφαιρικού περιβάλλοντος με τη θνησιμότητα, τη νοσηρότητα και τη θερμική άνεση	23
A3: Θνησιμότητα, νοσηρότητα και θερμική άνεση κατά τη διάρκεια επεισοδίων καύσωνα	41
A4: Προβολή των επιπέδων δυσφορίας στο μέλλον	48
A5: Μέτρα πρόληψης	57
Βιβλιογραφία	60
 Κεφάλαιο Β	
Η επίδραση της κλιματικής αλλαγής σε ασθένειες που σχετίζονται με κουνούπια φορείς	70
B1: Κουνούπια εισβολείς στην Ελλάδα και την Ευρώπη	70
B2: Περιγραφή ασθενειών των οποίων η μετάδοση συνδέεται με κουνούπια διαβιβαστές	74
B3: Η επίδραση αβιοτικών παραγόντων στους πληθυσμούς των κουνουπιών και στη μετάδοση ασθενειών στον κόσμο και την Ελλάδα	78
B4: Η επίδραση της κλιματικής αλλαγής στην Ελλάδα και την Ευρώπη σε είδη κουνουπιών που αποτελούν δυνητικούς φορείς ασθενειών για τον άνθρωπο	84
B4.1: Πιθανές μεταβολές στη γεωγραφική συμβατότητα συγκεκριμένων ειδών κουνουπιών σε διάφορα κλιματικά σενάρια	84
B4.2: Πιθανές μεταβολές στη δυνητική ετήσια διάρκεια της δραστηριότητας του κουνουπιού <i>Aedes albopictus</i> με βάση το	

σενάριο κλιματικής αλλαγής SRES-A1B	92
B5: Εκτίμηση της διάδοσης ασθενειών από κουνούπια φορείς με βάση σενάρια κλιματικής αλλαγής	95
B5.1: Ιός του Δυτικού Νείλου	95
B5.2: Ιός Chikungunya	100
B5.3: Δάγγειος ιός	104
B5.4: Σύνοψη των επιδράσεων της κλιματικής αλλαγής στη μετάδοση ασθενειών από κουνούπια διαβιβαστές στην Ελλάδα	109
B6: Μέτρα πρόληψης/αντιμετώπισης των κουνουπιών	111
Βιβλιογραφία	114

Κεφάλαιο Γ

Εκτίμηση των διαχρονικών μεταβολών και των προβολών στο μέλλον της θερμικής επιβάρυνσης στον πληθυσμό της Αθήνας και της Θεσσαλονίκης

Γ1: Εισαγωγή	120
Γ2: Δεδομένα – Μεθοδολογία	121
Γ2.1: Περιοχές μελέτης και μετεωρολογικά δεδομένα	121
Γ2.2: Δεδομένα για μελλοντικές εκτιμήσεις	122
Γ2.3: Δείκτες εκτίμησης της θερμικής επιβάρυνσης	123
Γ3: Αποτελέσματα στην περιοχή της Αθήνας	128
Γ3.1: Ενδο-δεκαετή και πολύ-δεκαετή κατανομή της θερμής επιβάρυνσης στην Αθήνα	128
Γ3.2: Διαχρονικές διακυμάνσεις και τάσεις του χρόνου έκθεσης υπό θερμή επιβάρυνση στην Αθήνα	133
Γ3.3: Διακυμάνσεις και τάσεις της περιόδου εμφάνισης συνθηκών θερμής επιβάρυνσης στην Αθήνα	136
Γ3.4: Εκτίμηση των επιπέδων θερμής επιβάρυνσης στο μέλλον για την Αθήνα	140
Γ3.5: Συζήτηση και συμπεράσματα για την Αθήνα	147
Γ4: Αποτελέσματα στην περιοχή της Θεσσαλονίκης	150
Γ4.1: Ενδο-δεκαετή και πολύ-δεκαετή κατανομή της θερμής επιβάρυνσης στη Θεσσαλονίκη	150
Γ4.2: Διαχρονικές διακυμάνσεις και τάσεις του χρόνου έκθεσης υπό θερμή επιβάρυνση στη Θεσσαλονίκη	154
Γ4.3: Διακυμάνσεις και τάσεις της περιόδου εμφάνισης συνθηκών θερμής	

επιβάρυνσης στη Θεσσαλονίκη	157
Γ4.4: Εκτίμηση των επιπέδων θερμής επιβάρυνσης στο μέλλον για τη Θεσσαλονίκη	161
Γ4.5: Συζήτηση και συμπεράσματα για τη Θεσσαλονίκη	167
Γ5: Συμπεράσματα	169
Βιβλιογραφία	170

Εισαγωγή

Σύμφωνα με την ειδική έκθεση σχετικά με τον αντίκτυπο της παγκόσμιας αύξησης της θερμοκρασίας κατά 1.5°C, την οποία εξέδωσε πρόσφατα η Διακυβερνητική Επιτροπή για την Αλλαγή του Κλίματος (IPCC), οι ανθρωπογενείς εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου εκτιμάται ότι έχουν οδηγήσει σε άνοδο της μέσης παγκόσμιας θερμοκρασίας κατά περίπου 1°C (IPCC, 2018), σε σύγκριση με τα επίπεδα της θερμοκρασίας πριν από τη βιομηχανική επανάσταση. Το εύρος αυτής της ανόδου προσδιορίζεται από 0.8°C έως 1.2°C. Η έκθεση αναφέρει επίσης ότι η άνοδος της θερμοκρασίας αναμένεται να προσεγγίσει τους 1.5°C ανάμεσα στο 2030 και το 2052, αν συνεχιστεί με τον σημερινό ρυθμό. Η θερμοκρασία του πλανήτη ανέρχεται μεσοσταθμικά κατά 0.2°C ανά δεκαετία, λόγω των τρεχόντων αλλά και των προγενέστερων ανθρωπογενών εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Οι παρελθούσες εκπομπές είναι δυνατό να προκαλέσουν προβλήματα όπως η περαιτέρω άνοδος της μέσης στάθμης της θάλασσας, αλλά θεωρείται απίθανο να μπορούν από μόνες τους να προκαλέσουν την προαναφερόμενη άνοδο της θερμοκρασίας κατά 1.5°C, σε σχέση με την προβιομηχανική περίοδο. Κατά συνέπεια, αν οι ανθρωπογενείς εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου εκμηδενίζονταν άμεσα, η οποία περεταίρω άνοδος της θερμοκρασίας μέσα στις επόμενες δύο με τρεις δεκαετίες δεν θα υπερέβαινε τους 0.5°C. Άρα, η αποτροπή της ανόδου της θερμοκρασίας κατά 1.5°C τα επόμενα χρόνια δεν είναι ανέφικτη και εξαρτάται από το ρυθμό της μείωσης των ανθρωπογενών εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου.

Μέχρι σήμερα η κλιματική αλλαγή έχει προκαλέσει σοβαρά προβλήματα τόσο στις ανθρώπινες κοινωνίες, ιδίως των φτωχότερων χωρών, όπως και σε διάφορα οικοσυστήματα. Τα προβλήματα αυτά μεταξύ άλλων περιλαμβάνουν αυξημένα περιστατικά ξηρασίας αλλά και πλημμυρών, ακραία κύματα ζέστης, άνοδο της στάθμης της θάλασσας, πτώση στην παραγωγή τροφίμων και απώλεια βιοποικιλότητας. Αυτές οι αλλαγές συνδέονται με πρωτοφανείς κινδύνους, ειδικά για τις πιο ευαίσθητες ομάδες του ανθρώπινου πληθυσμού (IPCC 2018, Mysiak et al, 2016).

Η πιθανή μελλοντική άνοδος της θερμοκρασίας κατά 1.5°C ή και περισσότερο, αναμένεται να επιφέρει επιπλέον ενίσχυση των δυσχερειών για τον άνθρωπο. Ωστόσο, είναι κρίσιμο να επιτευχθεί η διατήρηση της αύξησης της θερμοκρασίας μέχρι τους 1.5°C, καθώς μια ενδεχόμενη περεταίρω άνοδος θα σημάνει πολύ πιο γενικευμένες συνέπειες για τον παγκόσμιο ανθρώπινο πληθυσμό (IPCC, 2018). Πιο συγκεκριμένα, αν η άνοδος της παγκόσμιας θερμοκρασίας συγκρατηθεί στους 1.5°C, εκτιμάται ότι αυτό θα οδηγήσει σε σημαντικά χαμηλότερη νοσηρότητα αλλά και θνησιμότητα λόγω αυξημένης ζέστης, όπως

και σε μειωμένη θνησιμότητα λόγω έκθεσης στο τροποσφαιρικό όζον, συγκριτικά με ότι θα προέκυπτε από μια άνοδο της τάξεως των 2°C. Ειδικά στις πόλεις, αξίζει να σημειωθεί ότι τα παραπάνω περιστατικά νοσηρότητας και θνησιμότητας θα είναι ακόμη πιο ισχυρά, λόγω και του φαινομένου της αστικής θερμικής νησίδας. Επίσης, ο κίνδυνος προσβολής των πολιτών από ασθένειες (π.χ. Δάγγειος ιός, Ελονοσία, κτλ) που μεταδίδονται μέσω φορέων διαβιβαστών (π.χ. κουνουπιών), αναμένεται να είναι ενισχυμένος μελλοντικά σε παγκόσμια κλίμακα, ιδιαίτερα αν η θερμοκρασία ανέλθει κατά 2°C αντί για 1.5°C, λόγω και της επέκτασης των περιοχών με κλιματική συμβατότητα για τις νόσους αλλά και τους φορείς. Βεβαίως, σχετικά με τη διάδοση ασθενειών μέσω φορέων, πρέπει να τονιστεί ότι το αν οι προβλέψεις για μια συγκεκριμένη περιοχή είναι θετικές οι αρνητικές εξαρτάται από το είδος της ασθένειας, τα χαρακτηριστικά της περιοχής και το βαθμό της κλιματικής αλλαγής που θα συμβεί στη συγκεκριμένη περιοχή (IPCC, 2018).

Τα αποτελέσματα της μεγάλης πλειοψηφίας των κλιματικών μοντέλων, συμφωνούν στο ότι τα επόμενα χρόνια θα προκύψει μια αύξηση στην ένταση των ακραίων περιστατικών ζέστης σε πολλές περιοχές του κόσμου, λόγω της κλιματικής αλλαγής (IPCC, 2018). Η μεγαλύτερη ενίσχυση των επεισοδίων ζέστης αναμένεται στα μεσαία γεωγραφικά πλάτη κατά τη θερμή περίοδο (κατά 3°C για άνοδο της μέσης θερμοκρασίας του πλανήτη κατά 1.5°C), αλλά και στα μεγάλα γεωγραφικά πλάτη κατά την ψυχρή περίοδο (κατά 4.5°C για άνοδο της μέσης θερμοκρασίας του πλανήτη κατά 1.5°C). Η Νότια Ευρώπη αλλά και η περιοχή της Μεσογείου συνολικότερα αναμένεται να είναι από τις περιοχές του πλανήτη που θα πληγούν ιδιαίτερα από τα ισχυρά κύματα ζέστης και κατά συνέπεια και η Ελλάδα είναι από τις χώρες οι οποίες θα πρέπει να βρίσκονται σε επιφυλακή για την αντιμετώπιση πιθανών ακραίων περιστάσεων. Ο περιορισμός της παγκόσμιας ανόδου της θερμοκρασίας στους 1.5°C αντί για τους 2°C θα μπορούσε να μειώσει το πλήθος των ανθρώπων που θα εκτίθεται συχνά σε ακραία κύματα ζέστης κατά 420 εκατομμύρια, γεγονός που καταδεικνύει τη μεγάλη σημασία του συγκεκριμένου στόχου.

Η άνοδος της μέσης θερμοκρασίας του πλανήτη τόσο κατά 1.5°C, όσο και κατά 2°C, εκτιμάται ότι θα προκαλέσει επίσης σοβαρές αλλαγές στο μέσο ύψος υετού ανά περιοχή, σε σύγκριση με την προβιομηχανική περίοδο. Αναφορικά με πιθανές διαφοροποιήσεις στο ύψος υετού, οι οποίες μπορεί να προκύψουν λόγω της ανόδου της θερμοκρασίας κατά 2°C αντί για 1.5°C, αυτές υπάρχει περίπτωση να συμβούν σε περιοχές όπως η λεκάνη της Μεσογείου, συμπεριλαμβανομένης και της Νότιας Ευρώπης, όπου και αναμένεται περεταίρω μείωση του υετού στην περίπτωση του δυσμενέστερου σεναρίου (Vautard et al, 2014, Jacob et al, 2018, Kjellstrom et al, 2018). Με βάση τα παραπάνω, η ειδική έκθεση του

IPCC για το κλίμα διαπιστώνει ότι υπάρχει ισχυρή τάση για άνοδο της ξηρασίας στην περιοχή της Μεσογείου, ενώ σε άλλες περιοχές του πλανήτη όπως η Βόρεια Αμερική και η Βορειοδυτική Αυστραλία η τάση δείχνει ότι οδηγούμαστε σε μείωση της ξηρασίας. Πρόσφατες δημοσιεύσεις (Gudmundsson and Seneviratne, 2016, Gudmundsson et al, 2017) οι οποίες βασίστηκαν τόσο σε μετρήσεις, όσο και σε αποτελέσματα μοντέλων, έδειξαν ότι οι ανθρωπογενείς εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου είναι η αιτία που έχει αυξήσει σημαντικά την πιθανότητα για πρόκληση ετών ξηρασίας στην περιοχή της Μεσογείου και ότι αυτή η τάση θα συνεχιστεί όσο η κλιματική αλλαγή ενισχύεται. Οι Schleussner et al, 2016, εκτιμούν ότι μια ενδεχόμενη αύξηση της θερμοκρασίας κατά 2°C αντί για 1.5°C, θα οδηγούσε σε ενίσχυση της μείωσης της ροής των ποταμών της Μεσογείου από το 9% στο 17%, ενώ οι Donnelly et al, 2017 επίσης αναφέρουν ότι η ενίσχυση της κλιματικής αλλαγής θα επιφέρει μείωση στη ροή των ποταμών κατά μήκος των ακτών της Ιβηρικής και της Βαλκανικής χερσονήσου. Σύμφωνα με τους Lehner et al, 2017, ο περιορισμός της ανόδου της θερμοκρασίας μέχρι τους 1.5°C μπορεί να έχει ευεργετικά αποτελέσματα ως προς τον περιορισμό της ξηρασίας στην περιοχή της Μεσογείου, αλλά αυτό αποτελεί ένα εύρημα εξαιρετικά αβέβαιο και αφορά μόνο συγκεκριμένες περιοχές. Λόγω των παραπάνω ευρημάτων, ειδικά στην περίπτωση της ανόδου της θερμοκρασίας κατά 2°C, είναι πιθανό μελλοντικά να προκύψει μια έλλειψη στα αποθέματα και τη διαθεσιμότητα νερού στην περιοχή της Μεσογείου (Lehner et al, 2017, Greve et al, 2018, Wartenburger et al, 2017), γεγονός που μπορεί να έχει αρνητικό αντίκτυπο στην ανθρώπινη διατροφή και κατ' επέκταση στην υγεία του τοπικού πληθυσμού.

Η επερχόμενη ξηρασία, μπορεί να έχει επιπτώσεις στην ποιότητα ζωής του πληθυσμού της Νότιας Ευρώπης και λόγω της μείωσης των ενεργειακών αποθεμάτων. Οι Tobin et al, 2018, αναφέρουν ότι μια άνοδος της θερμοκρασίας κατά 2°C αντί για 1.5°C, θα μπορούσε να οδηγήσει σε μείωση του υδροηλεκτρικού δυναμικού κατά 10% αντί για 5% στην Ελλάδα, την Ισπανία και την Πορτογαλία, αν και τα μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν τονίζεται ότι παρουσιάζουν σημαντική διασπορά ως προς το παραπάνω εύρημα. Επιπροσθέτως, λόγω του συνδυασμού των μειωμένων ροών των ποταμών το καλοκαίρι και των υψηλότερων θερμοκρασιών του νερού τους, η διαθέσιμη ισχύς των θερμοηλεκτρικών εργοστασίων τα οποία χρησιμοποιούν το νερό των ποταμών για να ψύχονται αναμένεται να μειωθεί (Jacob et al, 2018, Tobin et al, 2018). Η Ελλάδα, η Βουλγαρία και η Ισπανία φαίνεται να έχουν τις μεγαλύτερες μειώσεις μεταξύ των Ευρωπαϊκών χωρών, στην παραγωγή των θερμοηλεκτρικών εργοστασίων τους, ειδικά στην περίπτωση που η άνοδος της παγκόσμιας θερμοκρασίας φτάσει τους 2°C.

Η γεωργία αποτελεί επίσης έναν κρίσιμο τομέα ο οποίος συνδέεται με την επάρκεια της παραγωγής τροφίμων και αναμένεται να πληγεί σοβαρά από την κλιματική αλλαγή. Πρόσφατες μελέτες έχουν δείξει ότι οι μέχρι τώρα παρατηρούμενες αλλαγές στο κλίμα έχουν ήδη προκαλέσει σημαντικές επιπτώσεις στις σοδιές συγκεκριμένων καλλιεργειών σε διάφορες περιοχές του πλανήτη. Ιδιαίτερη επιβάρυνση εντοπίζεται σε είδη φυτών με τοπικά χαρακτηριστικά, τα οποία απαιτούν πολύ εξειδικευμένες συνθήκες για την ομαλή ανάπτυξη τους. Για την περιοχή της Μεσογείου αναφέρονται ως πιο χαρακτηριστικά παραδείγματα η ελιά και η άμπελος (Moriondo et al, 2013a,b). Οι αλλαγές στην θερμοκρασία και το ύψος υετού, λόγω της κλιματικής αλλαγής, έχουν διασυνδεθεί με μειώσεις στην παγκόσμια παραγωγή σίτου και αραβόσιτου (Lobell et al, 2011), ενώ οι επιδράσεις στην παραγωγή ρυζιού και σόγιας είναι λιγότερο ξεκάθαρες και μπορεί να είναι θετικές ή και αρνητικές (Kim et al, 2013). Σε κάποιες περιοχές που βρίσκονται σε μεγάλα γεωγραφικά πλάτη, η κλιματική αλλαγή έχει οδηγήσει σε άνοδο της παραγωγής, ενώ σε κάποιες περιπτώσεις έχει κάνει εφικτό το να υπάρχουν δύο περίοδοι συγκομιδής το χρόνο (Jaggard et al, 2007, Sun et al, 2015). Παρ' όλα αυτά, σημαντική μείωση στην παγκόσμια παραγωγή σίτου (κατά $6\% \pm 2.9\%$), ρυζιού (κατά $3.2\% \pm 3.7\%$), αραβόσιτου (κατά $7.4\% \pm 4.5\%$) και σόγιας (κατά 3.1%), προβλέπεται για κάθε περεταίρω άνοδο της μέσης παγκόσμιας θερμοκρασίας κατά 1°C (Asseng et al, 2015, Zhao et al, 2017), ενώ μια συνολική αποτίμηση της επίδρασης παραμέτρων σχετικών με την κλιματική αλλαγή όπως η θερμοκρασία, το ύψος υετού, η συγκέντρωση του CO_2 στην ατμόσφαιρα και τα περιστατικά ακραίων καιρικών φαινομένων, δείχνει ότι η άνοδος της θερμοκρασίας κατά 2°C αντί για 1.5°C θα προκαλέσει ισχυρότερες αρνητικές συνέπειες στην παγκόσμια απόδοση των καλλιεργειών και κατ' επέκταση στην παγκόσμια διατροφική ισορροπία. Τέλος, εκτός από τις άμεσες επιπτώσεις που μπορεί να επιφέρει η κλιματική αλλαγή στον γεωργικό τομέα λόγω π.χ. ακραίων υψών βροχής, ξηρασίας, πολύ υψηλών ή και χαμηλών θερμοκρασιών κτλ, υπάρχουν και έμμεσες επιπτώσεις οι οποίες συνδέονται κατά κύριο λόγο με τη διασπορά εντόμων και ασθενειών, που μπορεί να μειώσουν την ποιότητα και την ποσότητα των παραγόμενων προϊόντων (Jiao et al, 2014, van Brugen et al, 2015).

Στην ακόλουθη έκθεση για την Κλιματική αλλαγή και την υγεία στην Ελλάδα, περιγράφονται αναλυτικά οι πιθανοί κίνδυνοι για την υγεία του πληθυσμού της Ελλάδας τους οποίους μπορεί να επιφέρει η αναμενόμενη κλιματική αλλαγή Α) λόγω θερμικής καταπόνησης και Β) λόγω της πιθανής μετάδοσης ασθενειών μέσω κουνουπιών φορέων. Αυτή η επιλογή έγινε καθώς οι πιθανές άμεσες επιπτώσεις στην υγεία που μπορεί να προκύψουν λόγω των

επιδράσεων της κλιματικής αλλαγής στους δύο αυτούς τομείς, μπορεί να είναι εξαιρετικά σοβαρές και γενικευμένες σε μεγάλα τμήματα του Ελληνικού πληθυσμού.

Βιβλιογραφία

Asseng, S., Ewert, F., Martre, P., Rötter, R.P., Lobell, D.B., Cammarano, D., Kimball, B.A., Ottman, M.J., Wall, G.W., White, J.W., Reynolds, M.P., Alderman, P.D., Prasad, P.V.V., Aggarwal, P.K., Anothai, J., Basso, B., Biernath, C., Challinor, A.J., De Sanctis, G., Doltra, J., Fereres, E., Garcia-Vila, M., Gayler, S., Hoogenboom, G., Hunt, L.A., Izaurralde, R.C., Jabloun, M., Jones, C.D., Kersebaum, K.C., Koehler, A.-., Müller, C., Naresh Kumar, S., Nendel, C., O'leary, G., Olesen, J.E., Palosuo, T., Priesack, E., Eyshi Rezaei, E., Ruane, A.C., Semenov, M.A., Shcherbak, I., Stöckle, C., Stratonovitch, P., Streck, T., Supit, I., Tao, F., Thorburn, P.J., Waha, K., Wang, E., Wallach, D., Wolf, J., Zhao, Z. & Zhu, Y. 2015, "Rising temperatures reduce global wheat production", *Nature Climate Change*, vol. 5, no. 2, pp. 143-147.

Donnelly, C., Greuell, W., Andersson, J., Gerten, D., Pisacane, G., Roudier, P. & Ludwig, F. 2017, "Impacts of climate change on European hydrology at 1.5, 2 and 3 degrees mean global warming above preindustrial level", *Climatic Change*, vol. 143, no. 1-2, pp. 13-26.

Greve, P., Gudmundsson, L. & Seneviratne, S.I. 2018, "Regional scaling of annual mean precipitation and water availability with global temperature change", *Earth System Dynamics*, vol. 9, no. 1, pp. 227-240.

Gudmundsson, L. & Seneviratne, S.I. 2016, "Anthropogenic climate change affects meteorological drought risk in Europe", *Environmental Research Letters*, vol. 11, no. 4.

Gudmundsson, L., Seneviratne, S.I. & Zhang, X. 2017, "Anthropogenic climate change detected in European renewable freshwater resources", *Nature Climate Change*, vol. 7, no. 11, pp. 813-816.

IPCC, 2018: Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty [Masson-Delmotte, V., P.

Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, and T. Waterfield (eds.)). In Press.

Jacob, D., Kotova, L., Teichmann, C., Sobolowski, S.P., Vautard, R., Donnelly, C., Koutroulis, A.G., Grillakis, M.G., Tsanis, I.K., Damm, A., Sakalli, A. & van Vliet, M.T.H. 2018, "Climate Impacts in Europe Under +1.5°C Global Warming", *Earth's Future*, vol. 6, no. 2, pp. 264-285.

Jaggard, K.W., Qi, A. & Semenov, M.A. 2007, "The impact of climate change on sugarbeet yield in the UK: 1976-2004", *Journal of Agricultural Science*, vol. 145, no. 4, pp. 367-375.

Jiao, M., G. Zhou, and Z. Chen (eds.), 2014: Blue book of agriculture for addressing climate change: Assessment report of climatic change impacts on agriculture in China (No.1) (in Chinese). Social Sciences Academic Press, Beijing, China.

Kim, H.-., Ko, J., Kang, S. & Tenhunen, J. 2013, "Impacts of climate change on paddy rice yield in a temperate climate", *Global Change Biology*, vol. 19, no. 2, pp. 548-562.

Kjellström, E., Nikulin, G., Strandberg, G., Bøssing Christensen, O., Jacob, D., Keuler, K., Lenderink, G., Van Meijgaard, E., Schär, C., Somot, S., Lund Sørland, S., Teichmann, C. & Vautard, R. 2018, "European climate change at global mean temperature increases of 1.5 and 2 °C above pre-industrial conditions as simulated by the EURO-CORDEX regional climate models", *Earth System Dynamics*, vol. 9, no. 2, pp. 459-478.

Lehner, F., Coats, S., Stocker, T.F., Pendergrass, A.G., Sanderson, B.M., Raible, C.C. & Smerdon, J.E. 2017, "Projected drought risk in 1.5°C and 2°C warmer climates", *Geophysical Research Letters*, vol. 44, no. 14, pp. 7419-7428.

Lobell, D.B., Schlenker, W. & Costa-Roberts, J. 2011, "Climate trends and global crop production since 1980", *Science*, vol. 333, no. 6042, pp. 616-620.

Moriondo, M., Jones, G.V., Bois, B., Dibari, C., Ferrise, R., Trombi, G. & Bindi, M. 2013^a, "Projected shifts of wine regions in response to climate change", *Climatic Change*, vol. 119, no. 3-4, pp. 825-839.

Moriondo, M., Trombi, G., Ferrise, R., Brandani, G., Dibari, C., Ammann, C.M., Lippi, M.M. & Bindi, M. 2013^b, "Olive trees as bio-indicators of climate evolution in the Mediterranean Basin", *Global Ecology and Biogeography*, vol. 22, no. 7, pp. 818-833.

Mysiak, J., Surminski, S., Thieken, A., Mechler, R. & Aerts, J. 2016, "Brief communication: Sendai framework for disaster risk reduction - Success or warning sign for Paris?", *Natural Hazards and Earth System Sciences*, vol. 16, no. 10, pp. 2189-2193.

Schleussner, C.-., Lissner, T.K., Fischer, E.M., Wohland, J., Perrette, M., Golly, A., Rogelj, J., Childers, K., Schewe, J., Frieler, K., Mengel, M., Hare, W. & Schaeffer, M. 2016, "Differential climate impacts for policy-relevant limits to global warming: The case of 1.5 °c and 2 °c", *Earth System Dynamics*, vol. 7, no. 2, pp. 327-351.

Sun, S., X.-G. Yang, J. Zhao, and F. Chen, 2015: "The possible effects of global warming on cropping systems in China XI The variation of potential light-temperature suitable cultivation zone of winter wheat in China under climate change", *Scientia Agricultura Sinica*, vol. 48, no. 10, pp. 1926–1941.

Tobin, I., Greuell, W., Jerez, S., Ludwig, F., Vautard, R., Van Vliet, M.T.H. & Breón, F.-. 2018, "Vulnerabilities and resilience of European power generation to 1.5 °c, 2 °c and 3 °c warming", *Environmental Research Letters*, vol. 13, no. 4.

van Bruggen, A.H.C., J.W. Jones, J.M.C. Fernandes, K. Garrett, and K.J. Boote, 2015: Crop Diseases and Climate Change in the AgMIP Framework. In: *Handbook of Climate Change and Agroecosystems* [Rosenzweig, C. and D. Hillel (eds.)]. ICP Series on Climate Change Impacts, Adaptation, and Mitigation Volume 3, Imperial College Press, London, UK, pp. 297–330,

Vautard, R., Gobiet, A., Sobolowski, S., Kjellström, E., Stegehuis, A., Watkiss, P., Mendlik, T., Landgren, O., Nikulin, G., Teichmann, C. & Jacob, D. 2014, "The European climate under a 2 °c global warming", *Environmental Research Letters*, vol. 9, no. 3.

Wartenburger, R., Hirschi, M., Donat, M.G., Greve, P., Pitman, A.J. & Seneviratne, S.I. 2017, "Changes in regional climate extremes as a function of global mean temperature: An

interactive plotting framework", *Geoscientific Model Development*, vol. 10, no. 9, pp. 3609-3634.

Zhao, C., Liu, B., Piao, S., Wang, X., Lobell, D.B., Huang, Y., Huang, M., Yao, Y., Bassu, S., Ciais, P., Durand, J.-., Elliott, J., Ewert, F., Janssens, I.A., Li, T., Lin, E., Liu, Q., Martre, P., Müller, C., Peng, S., Peñuelas, J., Ruane, A.C., Wallach, D., Wang, T., Wu, D., Liu, Z., Zhu, Y., Zhu, Z. & Asseng, S. 2017, "Temperature increase reduces global yields of major crops in four independent estimates", *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, vol. 114, no. 35, pp. 9326-9331.

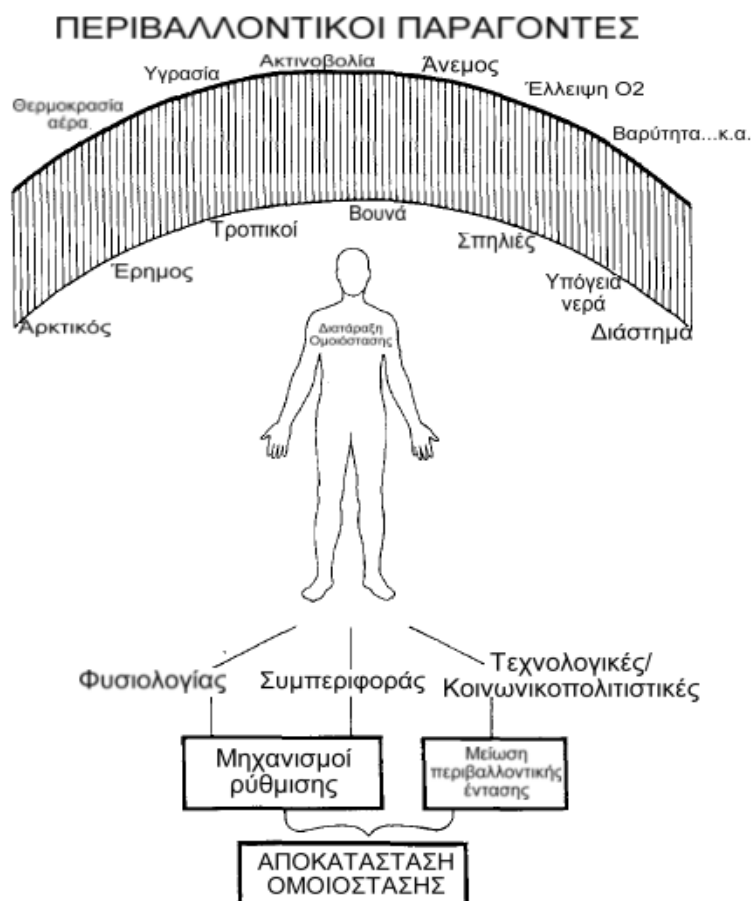
Κεφάλαιο Α

Η επίδραση της κλιματικής αλλαγής στην ανθρώπινη υγεία

A1: Θερμική άνεση

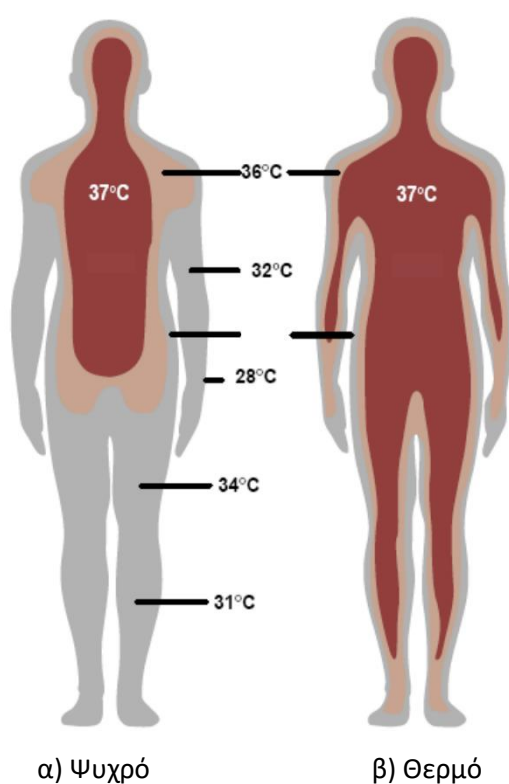
A1.1: Ομοιόσταση και θερμορυθμιστικοί μηχανισμοί

Η ικανότητα του οργανισμού να διατηρεί το εσωτερικό του περιβάλλον σταθερό ανεξάρτητα από τις συνθήκες του εξωτερικού περιβάλλοντος καλείται ομοιόσταση και λειτουργεί σε όλα τα βιολογικά επίπεδα του οργανισμού. Η διατήρηση της ομοιόστασης στις διάφορες κλιματικές μεταβολές διασφαλίζεται μέσω των φυσιολογικών μηχανισμών ρύθμισης και της εκούσιας συμπεριφοράς του ατόμου σε συνδυασμό με διάφορες τεχνολογικές και κοινωνικό-πολιτιστικές τεχνικές (Εικόνα Α1).



Εικόνα Α1: Διαγραμματική απεικόνιση της αλληλεπίδρασης μεταξύ του εξωτερικού περιβάλλοντος και της διατήρησης της ομοιόστασης στον άνθρωπο (Πηγή: Yousef, 1987).

Μια από τις εκφράσεις της ομοιόστασης είναι η διατήρηση μιας ουσιαστικά σταθερής εσωτερικής θερμοκρασίας σώματος μέσα σε ορισμένα φυσιολογικά όρια, η οποία περιγράφεται ως ομοιοθερμία. Ενώ η θερμοκρασία του περιβάλλοντος κυμαίνεται σε μεγάλο εύρος τιμών, η εσωτερική θερμοκρασία του σώματος ρυθμίζεται στα πλαίσια ενός στενού θερμοκρασιακού φάσματος (35 °C έως 41 °C) που κυμαίνεται γύρω από τους 37 °C. Ουσιαστικά, το ανθρώπινο σώμα διαιρείται σε ένα θερμό εσωτερικό πυρήνα και ένα εξωτερικό περίβλημα, με τις θερμοκρασίες να επηρεάζονται σε μεγάλο βαθμό από το περιβάλλον και τη θερμοκρασία του δέρματος να κυμαίνεται σε μεγαλύτερα εύρη τιμών (Wenger, 2002) (Εικόνα Α2).



Εικόνα Α2: Κατανομή των θερμοκρασιών στο ανθρώπινο σώμα κατά τη διάρκεια έκθεσης σε α) ψυχρό και β) θερμό περιβάλλον (Πηγή: Wenger, 2002).

Όταν η θερμική ισορροπία στο ανθρώπινο σώμα διαταράσσεται ενεργοποιούνται φυσιολογικοί μηχανισμοί ρύθμισης του κεντρικού κυκλοφορικού συστήματος, των σωματικών υγρών, της αναπνοής, του μεταβολισμού και της εφίδρωσης (Wenger, 2002). Οι αποκρίσεις αυτές παρατηρούνται σε όλα τα υγιή άτομα ανεξάρτητα από την ηλικία, το φύλο και την εθνότητα. Ωστόσο, σημειώνονται ποσοτικές διαφοροποιήσεις μεταξύ των ατόμων, με την ενδοατομική μεταβλητότητα να παρουσιάζει μικρότερες αποκλίσεις από τη διατομική (Yousef, 1987).

Σε ένα θερμό περιβάλλον οι κυριότεροι θερμοφυσιολογικοί μηχανισμοί είναι η διαστολή των περιφερειακών αιμοφόρων αγγείων και η εφίδρωση. Ο πρώτος μηχανισμός επιτρέπει μέσω του κυκλοφορικού συστήματος τη μεταφορά μεγαλύτερης ποσότητας αίματος από τον πυρήνα στην επιφάνεια του σώματος με αποτέλεσμα την αύξηση της θερμοκρασίας του δέρματος, γεγονός που συνεπάγεται μεγαλύτερη απώλεια θερμότητας από το σώμα καθώς αυξάνεται η θερμοκρασιακή βαθμίδα μεταξύ της επιφάνειας του σώματος και του περιβάλλοντος. Στις περιπτώσεις όπου συμβαίνει το αντίθετο το πλεόνασμα θερμότητας μειώνεται μέσω της αγγειοδιαστολής. Παράλληλα, ο μηχανισμός της εφίδρωσης ελέγχει την απώλεια θερμότητας μέσω της εξάτμισης από την επιφάνεια του σώματος και σχετίζεται με το συντελεστή διαβροχής του δέρματος. Στις περιπτώσεις όπου ο ιδρώτας αποβάλλεται από το σώμα με το σχηματισμό σταγόνων ή απορροφάται από την ενδυμασία μειώνεται η ικανότητα του ως μηχανισμός και δεν προσφέρει το βέλτιστο αποτέλεσμα (Wenger, 2002).

Σε ένα ψυχρό περιβάλλον οι κύριοι θερμορυθμιστικοί μηχανισμοί είναι η συστολή των περιφερειακών αιμοφόρων αγγείων και η παραγωγή θερμότητας από το ρίγος. Μέσω της αγγειοσυστολής μεγαλύτερη ποσότητα αίματος μεταφέρεται από την επιφάνεια του σώματος προς το πυρήνα με αποτέλεσμα την αύξηση του καρδιακού παλμού. Παράλληλα, ελαττώνεται η θερμοκρασιακή βαθμίδα μεταξύ της επιφάνειας του σώματος και του περιβάλλοντος συντελώντας στη διατήρηση της θερμότητας στο σώμα. Η παραγωγή θερμότητας από το ρίγος ξεκινά όταν η θερμοκρασία του πυρήνα υπερβεί ένα ορισμένο κατώτερο όριο, με το ρυθμό μεταβολισμού λόγω ρίγους να αυξάνεται στο διπλάσιο ή και στο τριπλάσιο (Hörpe, 1993).

Η έκθεση του οργανισμού σε πολύ υψηλή περιβαλλοντική θερμοκρασία μπορεί να οδηγήσει σε θερμικές κακώσεις όπως η θερμική εξάντληση και η θερμοπληξία. Η θερμική εξάντληση είναι μια ήπια μορφή κλινικής κατάστασης σχετιζόμενη με τη θερμότητα, με συμπτωματολογία η οποία σχετίζεται με την αυξημένη θερμοκρασία του σώματος (όχι μεγαλύτερη των 40 °C). Τα συμπτώματα της θερμικής εξάντλησης είναι η κόπωση, η ζάλη, ο εμετός, η ναυτία, η ταχυκαρδία και η υπόταση. Αντιθέτως, η θερμοπληξία είναι μια εξαιρετικά σοβαρή κλινική κατάσταση κατά την οποία το ανθρώπινο σώμα αδυνατεί να ρυθμίσει τη θερμοκρασία του εξαιτίας της υπερβολικής θερμότητας και ορίζεται από την αυξημένη θερμοκρασία του σώματος (μεγαλύτερη των 40 °C) και την αφυδάτωση. Η θερμοπληξία μπορεί να προκαλέσει το θάνατο καθώς και μόνιμες βλάβες στον οργανισμό εάν δεν ληφθεί άμεσα ιατρική βοήθεια (Theoharatos et al., 2010).

A1.2: Προσαρμογή και εγκλιματισμός

Ο άνθρωπος επιδεικνύει αξιοσημείωτη ικανότητα προσαρμογής σε έντονες και ταχύτατες μεταβολές των περιβαλλοντικών συνθηκών, γεγονός που του επιτρέπει τη διαβίωση στις περισσότερες κλιματικές περιοχές του πλανήτη. Με την ευρύτερη έννοια ο όρος προσαρμογή ορίζεται ως η βαθμιαία μείωση της αντίδρασης του οργανισμού κατά την επαναλαμβανόμενη έκθεση σε ένα ερέθισμα, συμπεριλαμβανομένων όλων των δράσεων οι οποίοι συντελούν στην κατεύθυνση αυτή, κατά την παραμονή σε ένα περιβάλλον (Nikolopoulou and Steemers, 2003, Nikolopoulou, 2011, Lam et al., 2018). Σε αυτή τη βάση η προσαρμογή διακρίνεται σε τρεις κατηγορίες: την φυσιολογική, την φυσική και την ψυχολογική (Nikolopoulou and Steemers, 2003, Nikolopoulou, 2011).

Η φυσιολογική προσαρμογή σχετίζεται με το σύνολο των αντιδράσεων στο ανθρώπινο σώμα και οι οποίες διακρίνονται σε βραχυπρόθεσμες αντιδράσεις όπως είναι η εφίδρωση, η διαστολή και συστολή των περιφερειακών αιμοφόρων αγγείων καθώς και στις μακροπρόθεσμες όπως είναι ο εγκλιματισμός. Στο πλαίσιο αυτό εγκλιματισμός ορίζεται το σύνολο των φυσιολογικών μεταβολών κατά τη διαδοχική έκθεση ή παραμονή σε ένα θερμό ή ψυχρό περιβάλλον, με αποτέλεσμα τη βαθμιαία μείωση της φυσιολογικής έντασης που υφίσταται ο ανθρώπινος οργανισμός (Wenger, 2002). Οι κυριότερες φυσιολογικές μεταβολές που παρατηρούνται κατά τον εγκλιματισμό σε ένα θερμό περιβάλλον είναι η διαμόρφωση σε χαμηλότερα επίπεδα τιμών του καρδιακού παλμού και της θερμοκρασίας του πυρήνα και η αύξηση του ρυθμού εφίδρωσης (Yousef, 1987, Wenger, 2002).

Η φυσική προσαρμογή περιλαμβάνει όλες εκείνες τις αλλαγές που πραγματοποιεί ο άνθρωπος ώστε να βελτιώσει τη διαβίωση του στο εκάστοτε περιβάλλον. Τέτοιες αλλαγές μπορεί να είναι ατομικές όπως η προσαρμογή της ενδυμασίας ανάλογα με τις κλιματικές συνθήκες, η στάση του σώματος και η μετακίνηση από μια θέση σε μια άλλη που του προκαλεί μικρότερη ένταση καθώς και διαδραστικές όπως η βελτίωση των συνθηκών για παράδειγμα με το άνοιγμα ή κλείσιμο ενός παραθύρου (Nikolopoulou and Steemers, 2003, Nikolopoulou, 2011, Lam et al., 2018).

Η ψυχολογική προσαρμογή σχετίζεται με τις παραμέτρους εκείνες οι οποίες επηρεάζουν τη θερμική αντίληψη των ανθρώπων για το περιβάλλον και τις αλλαγές που συντελούνται σε αυτό, βασιζόμενη στο γεγονός ότι ένα φυσικό ερέθισμα δεν είναι σε άμεση σχέση με το μέγεθος αλλά εξαρτάται από την “πληροφορία” όπου οι άνθρωποι έχουν για συγκεκριμένες καταστάσεις (Nikolopoulou and Steemers, 2003, Knez et al., 2009, Nikolopoulou, 2011, Lam et al., 2018). Τέτοιες παράμετροι είναι ο χρόνος έκθεσης, η

φυσικότητα του περιβάλλοντος καθώς και οι προσδοκίες και εμπειρίες των ανθρώπων (Nikolopoulou and Steemers, 2003, Knez et al., 2009, Nikolopoulou, 2011, Lam et al., 2018).

A1.3: Θερμική άνεση, αίσθηση, επιβάρυνση και ένταση

Η υποκειμενική και ψυχολογική προσέγγιση της ανθρώπινης θερμικής άνεσης (human thermal comfort) περιγράφει την κατάσταση του μυαλού όπου εκφράζει ικανοποίηση με το θερμικό περιβάλλον (ASHRAE, 2013). Βάσει της θερμοφυσιολογίας η άνεση σχετίζεται με την ενεργοποίηση των θερμοϋποδοχών στο δέρμα και στον υποθάλαμο, ως ο ελάχιστος ρυθμός νευρικού σήματος από τους θερμοϋποδοχείς (Mayer, 1993). Επιπλέον, ο ενεργητικός ορισμός της προϋποθέτει θερμική ισορροπία στο ανθρώπινο σώμα, με τη θερμοκρασία δέρματος και τον ρυθμό εφίδρωσης να εντοπίζονται στα όρια της άνεσης (Fanger, 1972).

Η θερμική αίσθηση (thermal sensation) περιγράφει το συνειδητό αίσθημα το οποίο προϋποθέτει υποκειμενική εκτίμηση. Ουσιαστικά, η θερμική άνεση και η θερμική αίσθηση αποτελούν διπολικά φαινόμενα, με διαβάθμιση από το “ψυχρό” έως το “θερμό”, όπου η άνεση ή η ουδέτερη αίσθηση εντοπίζονται στο μέσο της κλίμακας (Epstein and Moran, 2006). Διάφορες κλίμακες έχουν παρουσιαστεί κατά καιρούς, ενώ στον Πίνακα A1 συνοψίζονται η υποκειμενική ταξινόμηση της δυσφορίας με την φυσιολογική αντίδραση.

Πίνακας A1: Θερμική αίσθηση και άνεση σε συνδυασμό με τη φυσιολογική ζώνη θερμικής επίδρασης και την αντίστοιχη επί της εκατό υγρασία του δέρματος (Πηγή: Epstein and Moran, 2006).

Ψυχο- Φυσιολογική κλίμακα ψήφου		Θερμική αίσθηση	Αίσθηση άνεσης	Ζώνη θερμικής επίδρασης	Heat strain index (HSI, %)
	9	Πολύ θερμό	Πολύ μη άνετα	Μη αποκατάσταση θερμότητας	80
+3	8	Θερμό	Μη άνετα		40-60
+2	7	Ζεστό	Ήπια μη άνετα	Αποκατάσταση εξάτμισης ιδρώτα	20
+1	6	Ήπια ζεστό			
0	5	Ουδέτερο	Άνετα	Αποκατάσταση θερμορύθμισης	0
-1	4	Ήπια δροσερό			
-2	3	Δροσερό	Ήπια μη άνετα		
-3	2	Ψυχρό		Αποκατάσταση ρίγους	
	1	Πολύ ψυχρό	Μη άνετα	Μη αποκατάσταση ψύχους	

Οι θεμελιώδεις παράγοντες οι οποίοι επηρεάζουν τη θερμική αίσθηση διακρίνονται σε δυο κατηγορίες, τους περιβαλλοντικούς και αυτούς που σχετίζονται με την εκούσια συμπεριφορά του ατόμου. Οι πρώτοι περιλαμβάνουν τη θερμοκρασία του αέρα, την υγρασία του αέρα, την ταχύτητα του ανέμου και την ακτινοβολία, ενώ οι δεύτεροι την παραγωγή θερμότητας από το μεταβολισμό λόγω δραστηριότητας και την ενδυμασία. Η αλληλεπίδραση των έξι θεμελιωδών παραμέτρων ορίζουν το θερμικό περιβάλλον και την αίσθηση της θερμικής άνεσης (Fanger, 1972, McGregor and Vanos, 2018).

Οι δυναμικές αλληλεπιδράσεις μεταξύ του ανθρώπινου σώματος και του περιβάλλοντος, βάσει των περιβαλλοντικών παραμέτρων και αυτών που σχετίζονται με τη δραστηριότητα του ατόμου, διαμορφώνουν το πλεόνασμα ή την απώλεια θερμότητας στον ανθρώπινο οργανισμό μέσω της ακτινοβολίας, της μεταφοράς, της αγωγής, της εξάτμισης και της αναπνοής. Το καθαρό φορτίο θερμότητας το οποίο προκύπτει και στο οποίο εκτίθεται ο οργανισμός, από τη συνδυασμένη συνεισφορά των παραμέτρων αυτών, ονομάζεται θερμική επιβάρυνση (heat stress) (ACGIH, 2004, Epstein and Moran, 2006, McGregor and Vanos, 2018). Έτσι, ενώ μια ήπια ή μέτρια θερμική επιβάρυνση μπορεί να προκαλέσει δυσφορία αλλά δεν είναι επιζήμια για την ανθρώπινη υγεία, όσο αυξάνεται το επίπεδο επιβάρυνσης προσεγγίζοντας τα όρια αντοχής του οργανισμού τόσο αυξάνεται και ο κίνδυνος θερμικών διαταραχών. Η θερμική επιβάρυνση σχετίζεται με την θερμική ένταση (heat strain) αλλά ως όροι δεν ταυτίζονται μεταξύ τους. Ουσιαστικά, η θερμική ένταση ορίζεται ως το σύνολο των φυσιολογικών αντιδράσεων του οργανισμού ώστε να διατηρήσει μια σταθερή εσωτερική θερμοκρασία σώματος μέσα σε ορισμένα φυσιολογικά όρια, και είναι αποτέλεσμα της θερμικής επιβάρυνσης (ACGIH, 2004, McGregor and Vanos, 2018).

A1.4: Θερμικοί δείκτες (ή βιοκλιματικοί δείκτες)

Η μελέτη της επίδρασης του ατμοσφαιρικού περιβάλλοντος ολοκληρωτικά στον άνθρωπο είναι εξαιρετικά πολύπλοκη διότι πρέπει να συμπεριλάβει τόσο τις σχετικές συνιστώσες των μετεωρολογικών παραμέτρων όσο και τις ανθρώπινες λειτουργίες, μέσω των οποίων ο ανθρώπινος οργανισμός αντιδρά και προσαρμόζεται συνεχώς στο εκάστοτε περιβάλλον. Επιπλέον, η επίδραση αυτή δεν δύναται να περιγραφεί αποκλειστικά ως συνάρτηση μιας και μόνης μετεωρολογικής παραμέτρου διότι το ανθρώπινο σώμα δεν διαθέτει μεμονωμένους αισθητήρες για την αντίληψη της κάθε κλιματικής παραμέτρου, αλλά μέσω των θερμοϋποδοχών ρυθμίζει τη θερμοκρασία του δέρματος και τη ροή του αίματος που διέρχεται από τον υποθάλαμο (Hörpe, 1999). Το γεγονός αυτό οδήγησε στην ανάπτυξη πληθώρας δεικτών οι οποίοι συνδυάζουν περισσότερες παραμέτρους σε μια

τιμή, όπου με τη σειρά της ταξινομείται βάσει της αίσθησης και της φυσιολογικής αντίδρασης του οργανισμού (De Freitas and Grigorieva, 2015, 2017).

Σε αυτή τη βάση οι δείκτες διακρίνονται σε δυο γενικές κατηγορίες: τους εμπειρικούς (empirical or simple indices) και τους λογικούς (rational indices) (McGregor and Vanos, 2018). Οι εμπειρικοί δείκτες αναπτύχθηκαν ιδιαίτερα το πρώτο μισό του 20ου αιώνα και περιορίζονται στον υπολογισμό του συνδυαζόμενου αποτελέσματος της θερμοκρασίας του αέρα, της υγρασίας του αέρα και της ταχύτητας του ανέμου στη θερμική αίσθηση του ατόμου, κυρίως για καθιστική δραστηριότητα (Πίνακας Α2) (De Freitas and Grigorieva, 2015, 2017, McGregor and Vanos, 2018). Επιπλέον, οι δείκτες αυτοί διακρίνονται ανάλογα με τις θερμοκρασιακές συνθήκες, σε δείκτες που αναφέρονται στο ψυχρό περιβάλλον ή στο θερμό περιβάλλον. Οι πρώτοι συνδυάζουν την θερμοκρασία του αέρα και την ταχύτητα του ανέμου, όπως οι δείκτες αποψύξεως, για να περιγράψουν τα απαγόμενα ποσά θερμότητας από τον ατμοσφαιρικό αέρα στη μονάδα του χρόνου ανά μονάδα επιφάνειας του σώματος, ενώ οι δεύτεροι συνδυάζουν τη θερμοκρασία και την υγρασία του αέρα για να περιγράψουν την εξάτμιση στο ανθρώπινο σώμα (De Freitas and Grigorieva, 2015, 2017, McGregor and Vanos 2018).

Πίνακας Α2: Επιλεγμένοι εμπειρικοί θερμικοί δείκτες.

Εμπειρικοί δείκτες	
Δείκτης	Περιγραφή
Effective Temperature (ET, °C) (Yaglou, 1927)	Η θερμοκρασία ήρεμης κορεσμένης ατμόσφαιρας από υδρατμούς με ταχύτητα ανέμου 0.1ms^{-1} , που έχει τις ίδιες επιπτώσεις στην ανθρώπινη αίσθηση με την υπό έρευνα ατμοσφαιρική κατάσταση σε άτομα που ηρεμούν και είναι ντυμένα ελαφριά. Αρχικά ως συνάρτηση της θερμοκρασίας και της υγρασίας του αέρα ενώ αργότερα λήφθηκε υπόψη ο άνεμος και η ακτινοβολία.
Wet-Bulb Globe Temperature (WBGT, °C) (Yaglou and Minard, 1957)	Αναπαριστά την επίδραση της θερμοκρασίας και της υγρασίας στον άνθρωπο και ταξινομείται βάσει της δραστηριότητας.
Discomfort Index (DI, αδιάστατο) (Thom, 1959)	Δίνεται ως συνάρτηση της θερμοκρασίας του ξηρού και υγρού θερμομέτρου και ταξινομείται βάσει του ποσοστού δυσφορίας του πληθυσμού.
Humidex (HU, °C) (Masterton and Richardson, 1979)	Η θερμοκρασία που αισθάνεται ο άνθρωπος στο εξωτερικό περιβάλλον, ως συνάρτηση της θερμοκρασίας και της υγρασίας του αέρα.

Σε αντίθεση, οι λογικοί δείκτες στηρίζονται στη θερμική ισορροπία του ανθρώπινου σώματος έχοντας φυσικό και θερμοφυσιολογικό υπόβαθρο (Πίνακας Α3). Ταυτόχρονα, εξετάζουν όλες τις σχετιζόμενες μετεωρολογικές παραμέτρους καθώς, επίσης, το επίπεδο της δραστηριότητας, την ενδυμασία και τα ανθρωπομετρικά χαρακτηριστικά, όπως το ύψος, το βάρος, την ηλικία και το φύλο.

Πίνακας Α3: Επιλεγμένοι λογικοί θερμικοί δείκτες.

Λογικοί δείκτες	
Δείκτης	Περιγραφή
Heat Stress Index (<i>HSI</i> , %) (Belding and Hatch, 1955)	Ο λόγος της εξάτμισης που απαιτείται για τη διατήρηση της θερμικής ισορροπίας του οργανισμού προς τη μέγιστη εξάτμιση στο πραγματικό περιβάλλον.
Predicted Mean Vote (<i>PMV</i> , αδιάστατο) (Fanger, 1972)	Η μέση προβλεπόμενη ψήφος μιας μεγάλης ομάδας ατόμων ως προς τη θερμική αίσθηση, ως συνάρτηση της δραστηριότητας, της ενδυμασίας, της θερμοκρασίας του αέρα, της υγρασίας του αέρα, της σχετικής ταχύτητας του ανέμου και της μέσης θερμοκρασίας ακτινοβολίας.
Outdoor Standard Effective Temperature (<i>OUT_SET*</i> , °C) (Pickup and de Dear, 2000)	Η ισοδύναμη θερμοκρασία ενός ιδεατού περιβάλλοντος όπου ο άνθρωπος βιώνει την ίδια εφίδρωση και διαμορφώνει την ίδια θερμοκρασία δέρματος με το υπό εξέταση περιβάλλον. Συνθήκες ιδεατού περιβάλλοντος: $T_{mrt}=T_a$, $v=0.15\text{ms}^{-1}$, $f=50\%$.
Physiologically Equivalent Temperature (<i>PET</i> , °C) (Mayer and Höppe, 1987, Höppe, 1999)	Η ισοδύναμη θερμοκρασία σε ένα ιδεατό εσωτερικό περιβάλλον όπου η θερμική ισορροπία στο ανθρώπινο σώμα διατηρείται με τη θερμοκρασία δέρματος και πυρήνα ίσες με εκείνες του υπό εξέταση περιβάλλοντος (εσωτερικό ή εξωτερικό). Συνθήκες ιδεατού εσωτερικού περιβάλλοντος: $T_{mrt}=T_a$, $v=0.1\text{ms}^{-1}$, $VP_a=12\text{hPa}$, $I_{cl}=0.9\text{ clo}$ και ελαφρά δραστηριότητα.
Heat Load (<i>HL</i> , αδιάστατο) (Błażejczyk, 1994, 2001, 2006)	Το φορτίο του θερμορρυθμιστικού συστήματος του ανθρώπινου οργανισμού λόγω της έντασης των διαδικασιών προσαρμογής, ως συνδυασμός τριών βασικών ροών: της καθαρής αποθηκευόμενης θερμότητας, της απορροφούμενης ηλιακής ακτινοβολίας και της τυρβώδους ανταλλαγής λανθάνουσας θερμότητας.
Water Loss Index (<i>SW</i> , gh^{-1}) (Błażejczyk, 1994, 2001, 2006)	Η απώλεια ύδατος μέσω της δυνητικής απώλειας θερμότητας λόγω εξάτμισης στο ανθρώπινο σώμα στο υπό εξέταση περιβάλλον, με τα όρια τιμών να εξαρτώνται από το επίπεδο δραστηριότητας και το βαθμό εγκλιματισμού.
Universal Thermal Climate Index (<i>UTCI</i> , °C) (COST Action 730, Jendritzky et al., 2012, Bröde et al., 2012)	Η θερμοκρασία του αέρα σε ένα ιδεατό περιβάλλον όπου προκαλεί την ίδια φυσιολογική αντίδραση στον οργανισμό όπως το υπό εξέταση περιβάλλον. Συνθήκες ιδεατού περιβάλλοντος: $T_{mrt}=T_a$, $v=0.5\text{ms}^{-1}$ στα 10m, VP_a αναφέρεται σε υγρασία 50% ενώ για υψηλές θερμοκρασίες λαμβάνεται σταθερή 20hPa, η δραστηριότητα αναφέρεται σε άνθρωπο που περπάτα με 1.1ms^{-1} και η αντίσταση της ενδυμασίας προσδιορίζεται ως συνάρτηση της T_a .

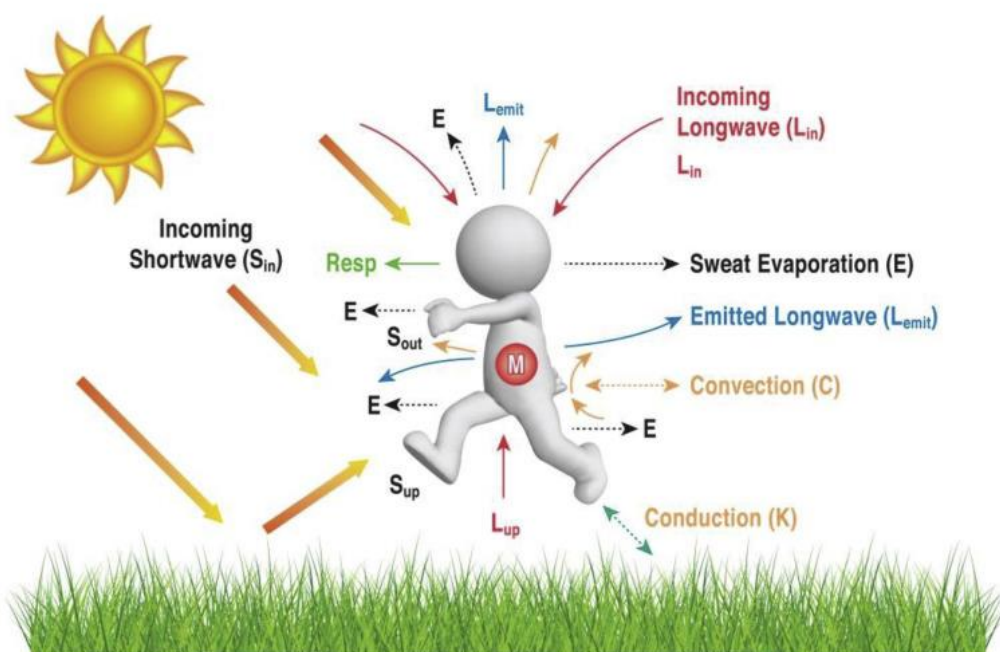
Το γεγονός της ύπαρξης πληθώρας δεικτών οδήγησε την Παγκόσμια Βιομετεωρολογική Εταιρεία (International Society of Biometeorology, ISB) στα πλαίσια της δράσης COST Action 730, υπό την αιγίδα του Παγκόσμιου Οργανισμού Μετεωρολογίας (World Meteorological Organization, WMO), στην ανάπτυξη του δείκτη Universal Thermal Climate Index (UTCI), ώστε να αποτελέσει πρότυπο δείκτη για το εξωτερικό περιβάλλον (Πίνακας Α3). Ο δείκτης περιλαμβάνει θερμοφυσιολογικό υπόβαθρο σε όλο το εύρος των θερμικών ανταλλαγών με το περιβάλλον ενώ είναι εφαρμόσιμος σε όλα τα κλίματα, τις εποχές και τις κλίμακες ενώ ταυτόχρονα αποτελεί χρήσιμο εργαλείο εφαρμογών στη βιομετεωρολογία του ανθρώπου (Jendritzky et al., 2012, Bröde et al., 2012).

A1.5: Μοντέλα και εξίσωση θερμικού ισοζυγίου

Με στόχο τη διατήρηση μιας σταθερής εσωτερικής θερμοκρασίας μέσα σε ορισμένα φυσιολογικά όρια, το ανθρώπινο σώμα βρίσκεται σε μια συνεχή ανταλλαγή θερμότητας με το περιβάλλον (McGregor and Vanos, 2018) (Εικόνα Α3). Οι ροές θερμότητας από και προς το ανθρώπινο σώμα διέπονται από τους θεμελιώδεις νόμους της θερμοδυναμικής και περιγράφονται από την γενικευμένη εξίσωση του θερμικού ισοζυγίου:

$$M + C + R + L + E_d + E_{sw} + E_{res} + E_{rel} + K_d = S$$

OUTDOOR HEAT EXCHANGE



Εικόνα Α3: Σχηματική απεικόνιση των ενεργειακών ροών μεταξύ του ανθρώπινου σώματος και του ατμοσφαιρικού περιβάλλοντος (Πηγή: McGregor and Vanos, 2018).

όπου M η παραγωγή θερμότητας από το μεταβολισμό η οποία συνίσταται στο βασικό ρυθμό μεταβολισμού, στην ελεύθερη παραγωγή ενέργειας από το μεταβολισμό λόγω της δραστηριότητας και στο φόρτο της δραστηριότητας, C η τυρβώδη ανταλλαγή αισθητής θερμότητας, R η ροή θερμότητας μέσω της απορροφούμενης ηλιακής ακτινοβολίας, L η ροή θερμότητας μέσω της μεγάλου μήκους κύματος ακτινοβολία, E_d η ανταλλαγή θερμότητας μέσω διάχυσης των υδρατμών, E_{sw} η ροή θερμότητας λόγω εξάτμισης του ιδρώτα, E_{res} η ξηρή απώλεια θερμότητας από την αναπνοή, E_{rel} η λανθάνουσα απώλεια θερμότητας από την ύγρανση του εισπνεόμενου αέρα, K_d η ροή θερμότητας μέσω αγωγής και S η καθαρή αποθηκευόμενη θερμότητα, με όλες τις ροές εκφρασμένες σε Wm^{-2} .

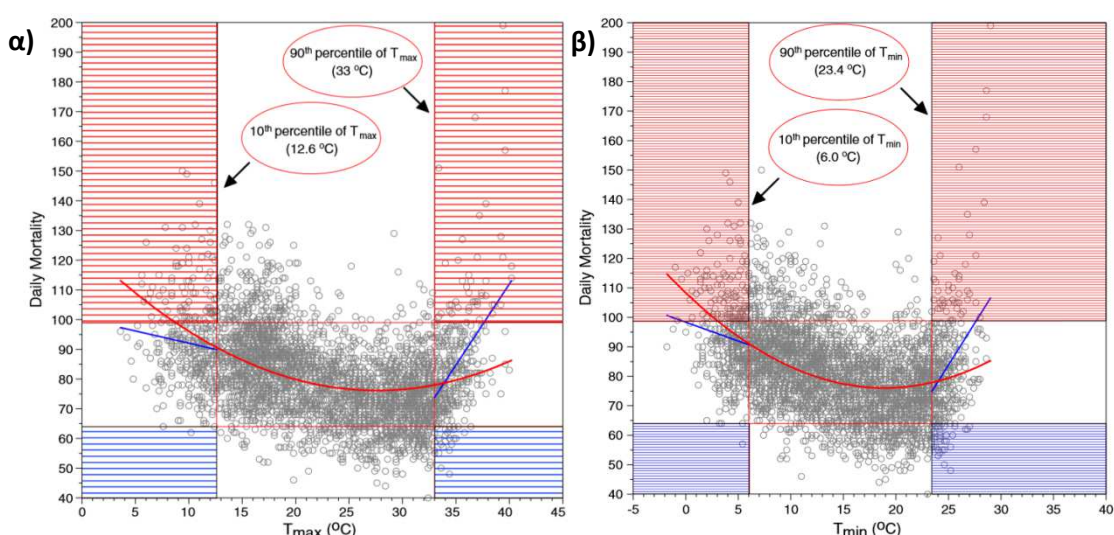
Όλα τα μοντέλα θερμικής ισορροπίας βασίζονται στη γενικευμένη εξίσωση του θερμικού ισοζυγίου, με τις διαφορές τους να εντοπίζονται είτε στους συντελεστές που υπεισέρχονται στον υπολογισμό των ροών, είτε στην παραμετροποίηση των θερμοφυσιολογικών παραμέτρων, είτε στο υποκείμενο θερμοφυσιολογικό μοντέλο με το οποίο είναι συζευγμένα (Πίνακας A4).

Πίνακας A4: Επιλεγμένα μοντέλα θερμικής ισορροπίας.

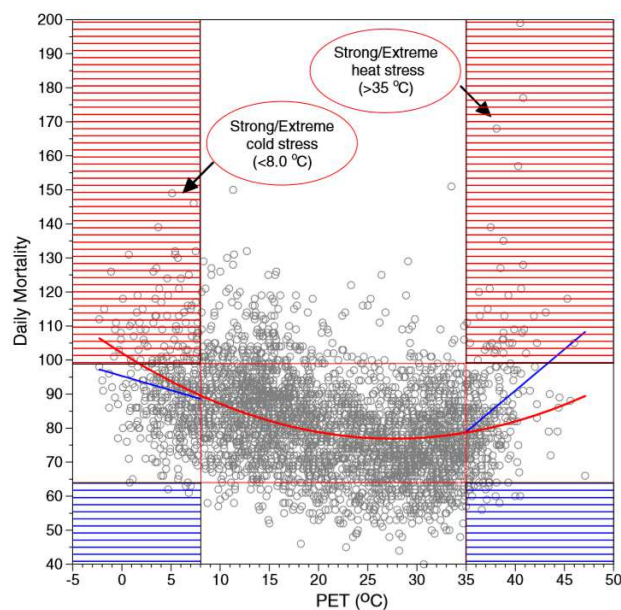
Μοντέλο	Δείκτης
Μοντέλο άνεσης του Fanger (Fanger, 1972)	<i>PMV, PPD</i>
Μοντέλο 24-κόμβων του σώματος (Stolwijk, 1971)	-
Μοντέλο 2-κόμβων του σώματος (Gagge et al., 1971, 1986)	<i>ET*, SET*</i>
Klima Michel Model (KMM) (Jendritzky et al., 1979, 1990)	<i>PMV, PT</i>
Munich Energy-balance Model for Individuals (MEMI) Instationary Munich Energy-balance (IMEM) (Höppe, 1984, 1993, 1999)	<i>PET</i>
COMfort formula (COMFA) (Brown and Gillespie, 1986)	-
Man-ENvironment heat EXchange model (MENEX) (Błażejczyk, 1994, 2001, 2005, 2006)	<i>HL, SW, STI, PhS, PST</i>
Μοντέλο 16-κόμβων του σώματος, τροποποιημένο μοντέλο του Stolwijk (Huizenga et al., 2001)	-
Το τροποποιημένο μοντέλο COMFA για άτομα που πραγματοποιούν φυσική δραστηριότητα (Kenny et al., 2009a, 2009b)	-
Μαθηματικό προγνωστικό μοντέλο της θερμορύθμισης (Fiala et al., 2001, 2012, Jendritzky et al., 2012, Bröde et al., 2012)	<i>UTCI</i>

A2: Σύνδεση ατμοσφαιρικού περιβάλλοντος με τη θνησιμότητα, τη νοσηρότητα και τη θερμική άνεση

Οι Nastos and Matzarakis (2012) μελέτησαν τη σχέση μεταξύ της ημερήσιας θνησιμότητας και των θερμικών συνθηκών, όπως αυτές αποτυπώνονται από την ημερήσια μέγιστη και ελάχιστη θερμοκρασία του αέρα καθώς και από τους θερμικούς δείκτες PET (Physiologically Equivalent Temperature) και UTCI (Universal Thermal Climate Index). Η μελέτη χρησιμοποίησε δεδομένα θνησιμότητας από βιολογικά αίτια (organic-cause mortality) για την περίοδο 1992-2001 στην ευρύτερη περιοχή της Αθήνας. Τα αποτελέσματα υποδεικνύουν ότι η σχέση μεταξύ θνησιμότητας και θερμοκρασίας περιβάλλοντος/θερμικών δεικτών είναι μη γραμμική. Συγκεκριμένα, η σχέση της θνησιμότητας με τη θερμοκρασία και τον PET παρουσιάζει ένα μοτίβο U ενώ η σχέση με τον UTCI ακολουθεί ένα μοτίβο J (Εικόνες A4, A5).



Εικόνα A4: Διάγραμμα διασποράς της ημερήσιας θνησιμότητας σε σχέση με την α) ημερήσια μέγιστη θερμοκρασία του αέρα και β) ημερήσια ελάχιστη θερμοκρασία του αέρα εφαρμόζοντας παράλληλα πολυωνυμική προσαρμογή (Πηγή: Nastos and Matzarakis, 2012).

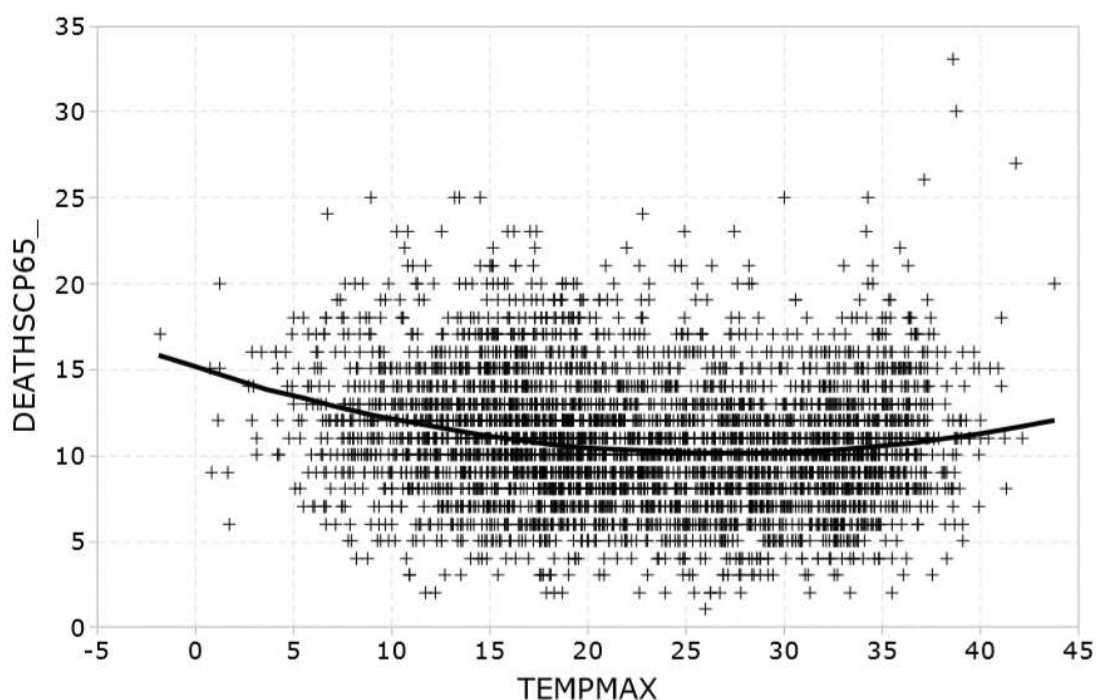


Εικόνα Α5: Διάγραμμα διασποράς της ημερήσιας θνησιμότητας σε σχέση με το θερμικό δείκτη PET (Physiologically Equivalent Temperature) εφαρμόζοντας παράλληλα πολυωνυμική προσαρμογή (Πηγή: Nastos and Matzarakis, 2012).

Παρότι η ημερήσια θνησιμότητα μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας του αέρα, το αποτέλεσμα αυτό αντιστρέφεται πέραν ενός κρίσιμου σημείου. Όταν η ημερήσια ελάχιστη θερμοκρασία υπερβεί τους 23 °C, η ημερήσια μέγιστη θερμοκρασία τους 33 °C και ο PET τους 35 °C (πολύ ισχυρή θερμή επιβάρυνση, strong heat stress) παρατηρείται μια απότομη αύξηση της ημερήσιας θνησιμότητας, με όλες τις τάσεις να είναι στατιστικά σημαντικές ($p=0.000$) (Εικόνες Α4, Α5) (Nastos and Matzarakis, 2012). Σε αντίστοιχη μελέτη για την περιοχή της Αθήνας βρέθηκε ότι η θνησιμότητα ατόμων άνω των 65 ετών αυξάνεται όταν η μέγιστη θερμοκρασία υπερβεί τους 35 °C (Paravantis et al., 2017). Τα αποτελέσματα αυτά αποκαλύπτουν ότι τα ακραία επεισόδια καύσωνα συνδέονται με υψηλότερες ημερήσιες συχνότητες θνησιμότητας. Επίσης, κατά τη διάρκεια της θέρμης περιόδου, το χρονικό διάστημα απόκρισης της θερμοκρασίας και των θερμικών δεικτών στη θνησιμότητα βρέθηκε να είναι 1 ημέρα (Nastos and Matzarakis, 2012).

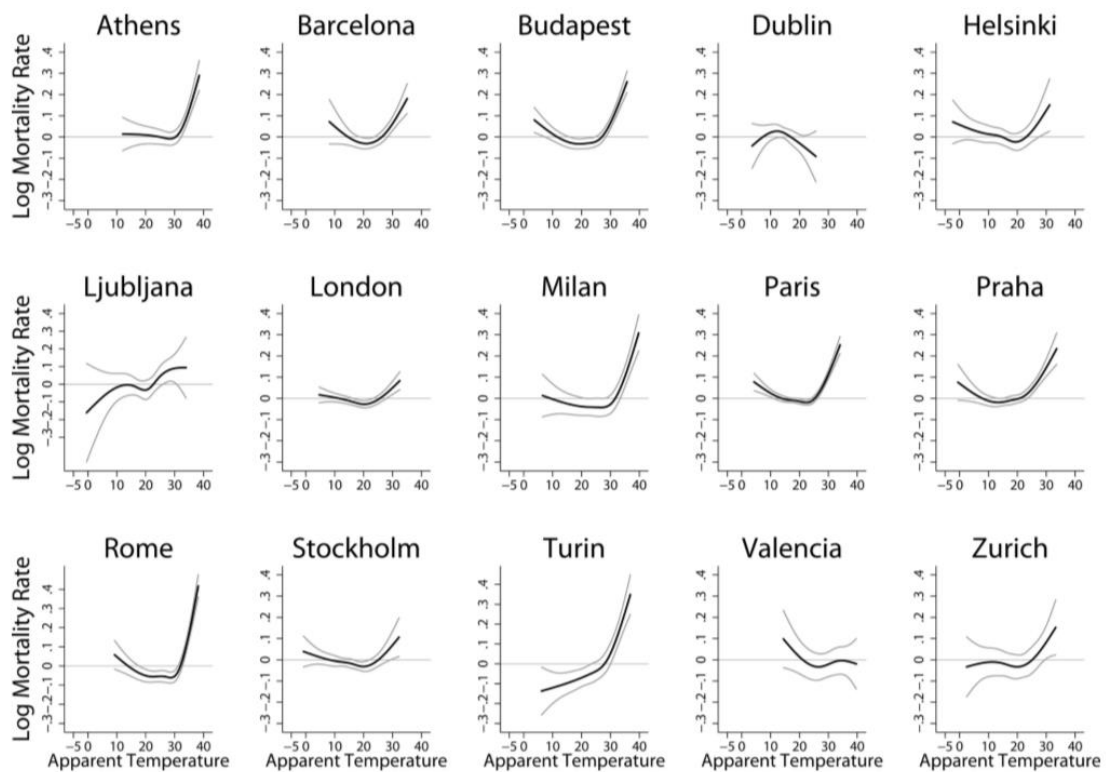
Η μελέτη των Paravantis et al. (2017) εστιάζει στις επιπτώσεις των υψηλών θερμοκρασιών του αέρα και των επεισοδίων καύσωνα στην καρδιαγγειακή και αναπνευστική θνησιμότητα ατόμων άνω των 65 ετών για τα έτη 2002 έως 2012 στην περιοχή της Αθήνας. Η συσχέτιση του ημερήσιου αριθμού καρδιαγγειακής και αναπνευστικής θνησιμότητας ατόμων άνω των 65 ετών με την θερμοκρασία του αέρα επιβεβαίωσε μια καμπύλη απόκρισης σχήματος U στην έκθεση, με χαμηλά επίπεδα θνησιμότητας σε μέτρια θερμοκρασιακά εύρη (20 °C -30 °C) (Εικόνα Α6). Σε υψηλές (35 °C)

και πολύ υψηλές θερμοκρασίες (40 °C) αέρα, η θνησιμότητα αυξάνεται κατά 20% έως 35% αντιστοίχως, με την τάση να είναι στατιστικά σημαντική. Η ανάλυση κατά συστάδες (cluster analysis) αποκάλυψε τον υψηλότερο αριθμό θνησιμότητας κατά 23% για τη συστάδα που συγκροτούσε τις πιο ζεστές ημέρες και κατά 20.6% για τη συστάδα που συγκροτούσε συνθήκες επεισοδίου καύσωνα (Paravantis et al., 2017).



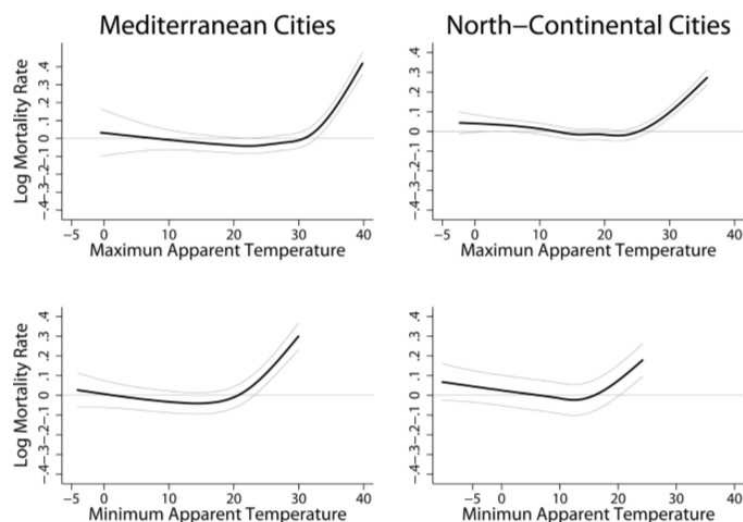
Εικόνα Α6: Ημερήσιος αριθμός καρδιαγγειακής και αναπνευστικής θνησιμότητας ατόμων άνω των 65 ετών ανά μήνα ως συνάρτηση της μέγιστης ημερήσιας θερμοκρασίας (Πηγή: Paravantis et al., 2017).

Στα πλαίσια του ερευνητικού έργου PHEWE (Assessment and Prevention of acute Health Effects of Weather conditions in Europe) (Michelozzi et al., 2007) διερευνήθηκε εκτός των άλλων, η σχέση μεταξύ του θερμικού δείκτη AT (apparent temperature, φαινόμενη θερμοκρασία) και της θνησιμότητας κατά τη θερμή περίοδο του έτους (Απρίλιος - Σεπτέμβριος) σε 15 ευρωπαϊκές πόλεις, μια εκ των οποίων και η Αθήνα (Baccini et al., 2008). Τα δεδομένα θνησιμότητας αφορούσαν ημερήσιο αριθμό θανάτων από όλες τις αιτίες, εξαιρουμένων των εξωτερικών αιτιών, των καρδιαγγειακών παθήσεων και των αναπνευστικών παθήσεων. Τα δεδομένα θνησιμότητας αφορούσαν τη χρονική περίοδο μεταξύ 1992-1996. Η σχέση μεταξύ της μέγιστης τιμής του θερμικού δείκτη AT (apparent temperature, φαινόμενη θερμοκρασία) (υστέρηση 0-3) και του δείκτη θνησιμότητας (log mortality rate) είναι κυρίως της μορφής V ή J ανάλογα με την πόλη (Εικόνα Α7).



Εικόνα Α7: Καμπύλες παλινδρόμησης (ζώνη εμπιστοσύνης 95%) που περιγράφουν, σε λογαριθμική κλίμακα, τη σχέση της ημερήσιας μέγιστης τιμής του θερμικού δείκτη AT (apparent temperature, φαινόμενη θερμοκρασία) και της φυσικής θνησιμότητας σε 15 Ευρωπαϊκές πόλεις (Πηγή: Baccini et al., 2008).

Για την Αθηνά συγκεκριμένα, τα αποτελέσματα υποδεικνύουν μια σχέση της μορφής J, με τον δείκτη θνησιμότητας να αυξάνεται σημαντικά όταν ο θερμικός δείκτης AT υπερβεί τους 30 °C (Εικόνα Α7). Η εκτιμώμενη συνολική μεταβολή της φυσικής θνησιμότητας που συνδέεται με αύξηση της μέγιστης τιμής του θερμικού δείκτη AT κατά 1 °C πάνω από το κατώτατο όριο της κάθε πόλης διαμορφώνεται σε 3.12% στην περιοχή της Μεσογείου (Εικόνα Α8) (Baccini et al., 2008).



Εικόνα Α8: Καμπύλες μετα-ανάλυσης (ζώνη εμπιστοσύνης 95%) που περιγράφουν, σε λογαριθμική κλίμακα, τη σχέση της ημερήσιας μέγιστης και ελάχιστης τιμής του θερμικού δείκτη AT (apparent temperature, φαινόμενη θερμοκρασία) και της φυσικής θνησιμότητας για μεσογειακές και βόρειες ηπειρωτικές πόλεις (Πηγή: Baccini et al., 2008).

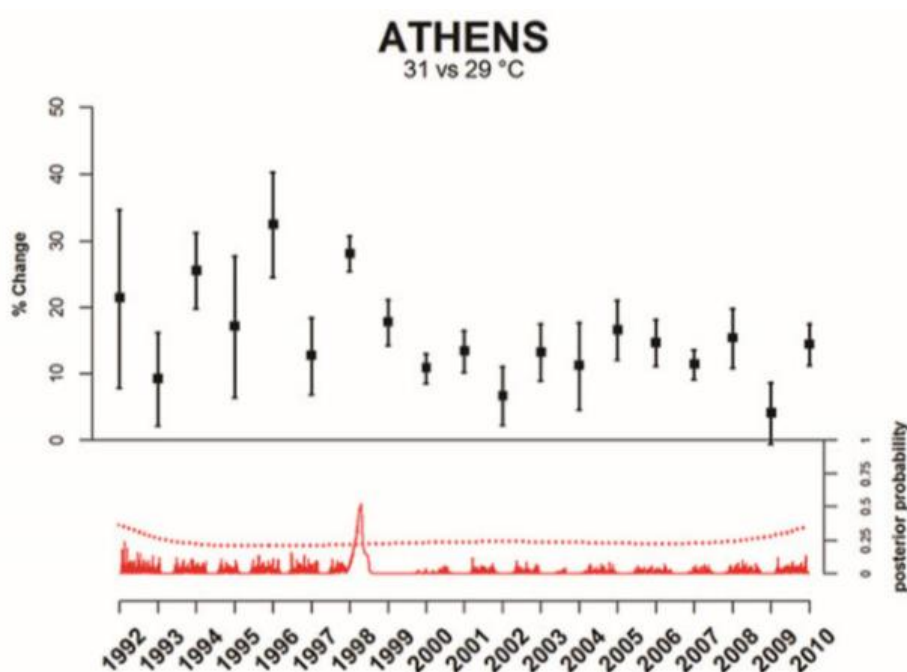
Η πρόσφατη μελέτη των Scortichini et al. (2018) εστιάζει στις διαχρονικές διακυμάνσεις της επίδρασης της θερμοκρασίας περιβάλλοντος σε ένα σταθερό εύρος θερμοκρασίας, στη θνησιμότητα σε 9 ευρωπαϊκές πόλεις για την περίοδο 1990-2010. Τα δεδομένα θνησιμότητας που αναλύθηκαν αφορούσαν θανάτους από όλες τις φυσικές αιτίες. Για την περίπτωση της Αθήνας, τα αποτελέσματα υποδεικνύουν μια ελαφρά αυξανόμενη τάση της μέσης ημερήσιας θερμοκρασίας αέρα (+0.07), με τη θνησιμότητα να παρουσιάζει επίσης μια αυξητική τάση της τάξης του +0.6 για την περίοδο 1992-2010 (Πίνακας Α5).

Πίνακας Α5: Συνολική θνησιμότητα, μέση ημερήσια θερμοκρασία αέρα και αντίστοιχες μέσες τάσεις σε 9 Ευρωπαϊκές πόλεις (1990-2010) (Πηγή: Scortichini et al., 2018).

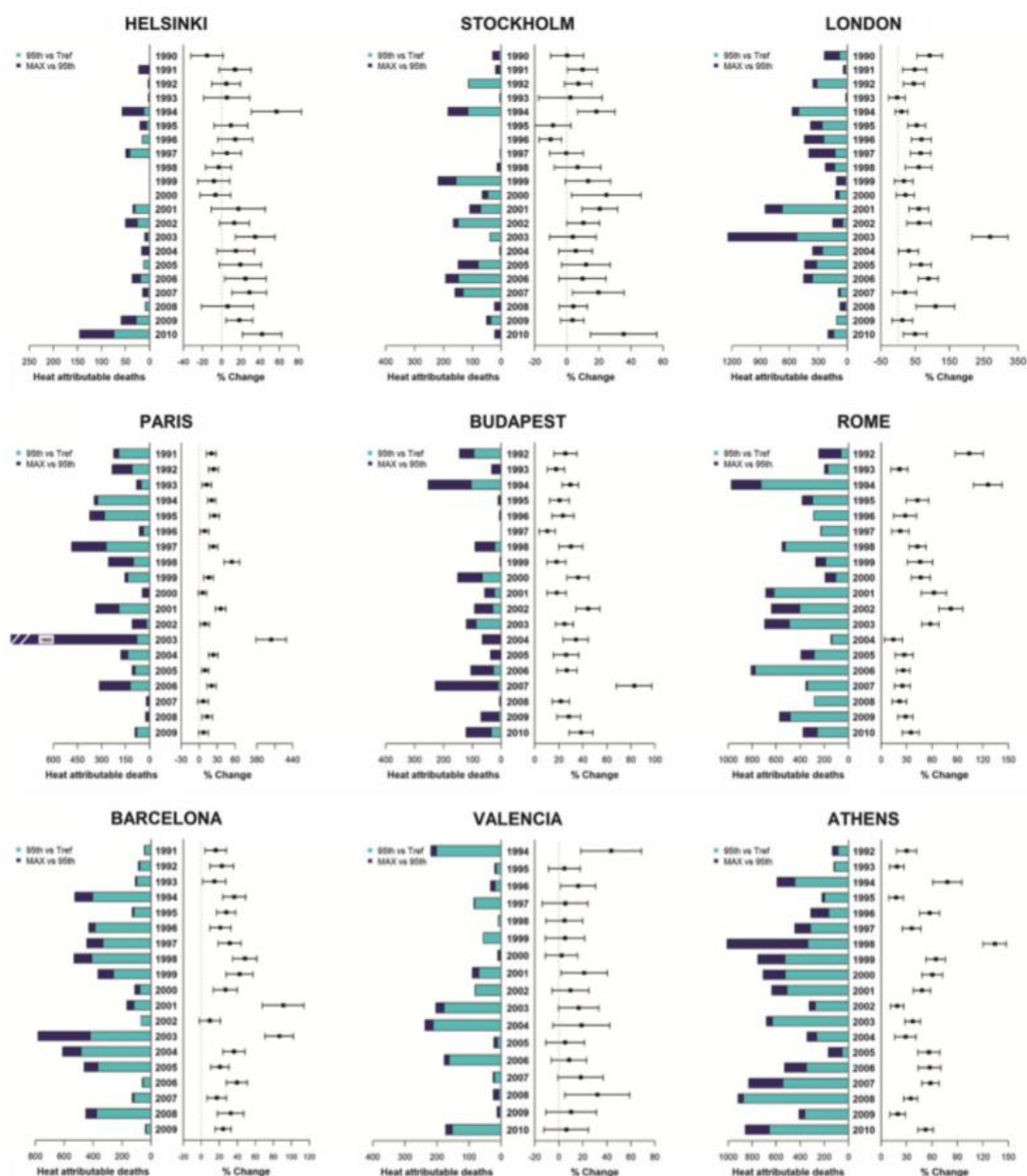
City	Study Period	Total deaths		Mean Temperature (C°)	
		mean daily value	mean trend	mean daily value	mean trend (C°)
HELSINKI ^a	1990–2010	17	0.0	12.5	+ 0.09
STOCKHOLM	1990–2010	29	–0.1	13.2	+ 0.07
LONDON	1990–2010	144	–2.7	15.4	+ 0.03
PARIS	1991–2009	108	–1.4	17.1	+ 0.05
BUDAPEST	1992–2010	65	–1.0	18.4	+ 0.03
ROME	1992–2010	53	+ 0.2	20.9	+ 0.06
BARCELONA	1991–2009	36	–0.1	20.8	+ 0.14
VALENCIA	1994–2010	15	0.0	22.3	–0.02
ATHENS	1992–2010	73	+ 0.6	24.1	+ 0.07

^aHelsinki metropolitan area includes 4 cities: Helsinki, Espoo, Vantaa and Kauniainen

Μια μεταβολή στην διαχρονική τάση παρατηρείται για την Αθήνα και αναγνωρίζεται από την κορυφή στο γράφημα πιθανότητας BCP (Bayesian Change Point), με μια μείωση της επίδρασης μετά το 2000 (Εικόνα A9). Η επίδραση της θερμότητας, λαμβάνοντας υπόψη τόσο τις εκτιμήσεις σχετικού κινδύνου όσο και τις επιπτώσεις, είναι σαφές ότι παρουσιάζει μεγάλη μεταβλητότητα ανά έτος, κυρίως για τους αποδοτέους θανάτους. Ο μεγαλύτερος αντίκτυπος της θερμότητας από την άποψη των αποδοτέων θανάτων παρατηρείται στις μεσογειακές πόλεις (Αθήνα, Βαρκελώνη και Ρώμη) τόσο για ήπιες όσο και για ακραίες θερμοκρασίες περιβάλλοντος, ενώ στις άλλες πόλεις ο αντίκτυπος σχετίζεται κυρίως με ακραίες θερμοκρασίες (Εικόνα A10).



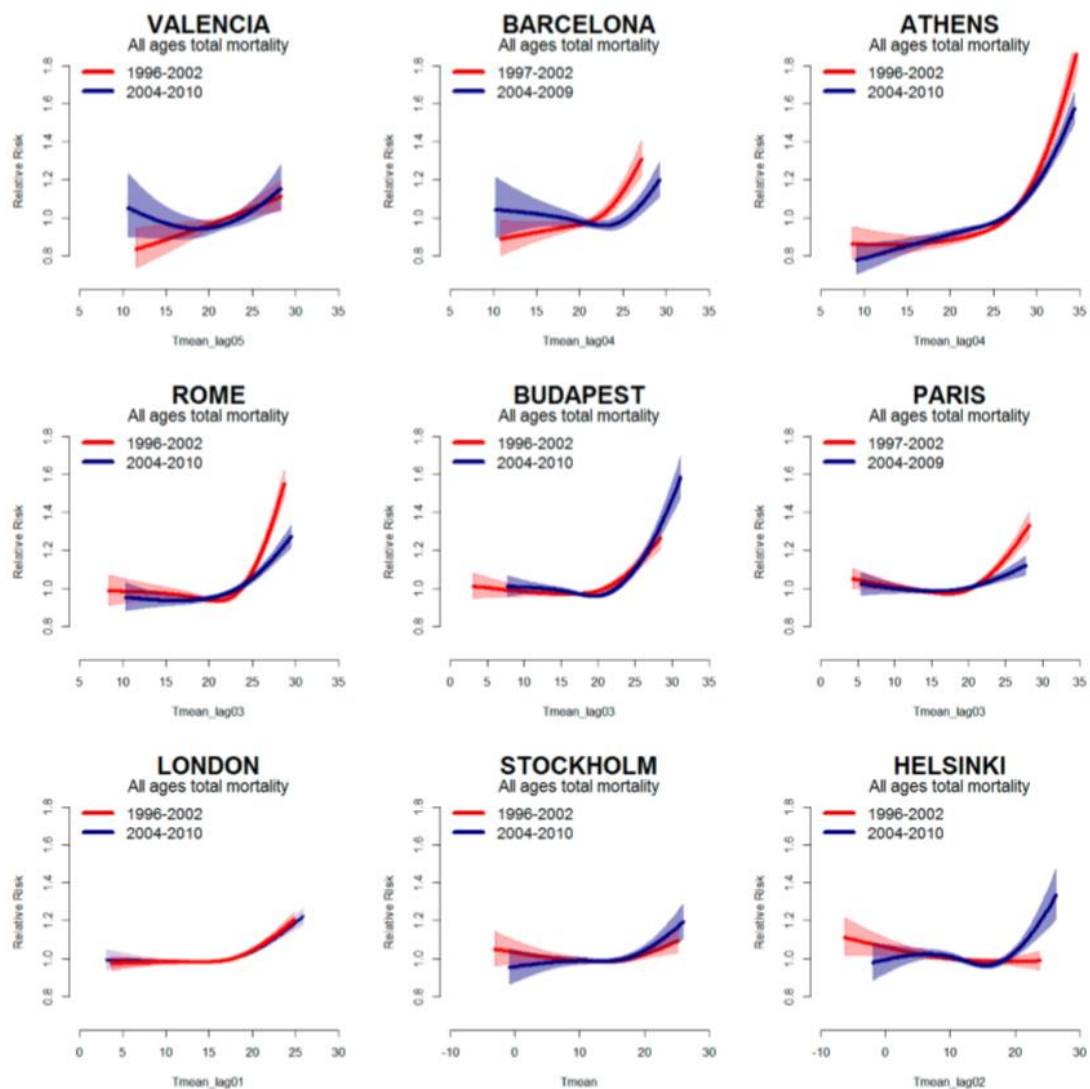
Εικόνα A9: Επίδραση της θερμοκρασίας περιβάλλοντος στη θνησιμότητα στην Αθήνα ανά έτος για την περίοδο 1992-2010. Άνω γράφημα: Επιδράσεις που εκφράζονται ως ποσοστιαία μεταβολή της θνησιμότητας για αύξηση κατά 2 °C της μέσης θερμοκρασίας πέραν του ορίου (29 °C). Κάτω γράφημα: Ύστερη πιθανότητα ενός σημείου αλλαγής κάθε εκτιμώμενης παρατήρησης από την ανάλυση Bayesian Change Point. Η κόκκινη διακεκομμένη γραμμή αντιπροσωπεύει τη στατιστική σημαντικότητα (Πηγή: Scortichini et al., 2018).



Εικόνα Α10: Συνολική θνησιμότητα σχετιζόμενη με τη θερμότητα σε εννέα ευρωπαϊκές πόλεις ανά καλοκαίρι για την περίοδο 1990-2010. Δεξιό γράφημα: Εκτίμηση κινδύνου που αποδίδεται στη θερμότητα. Αριστερό γράφημα: Θάνατοι που αποδίδονται σε ήπια θερμότητα (γαλάζιο) και σε υπερβολική θερμότητα (μπλε) (Πηγή: Scortichini et al., 2018).

Η μελέτη των Scortichini et al. (2018) δείχνει ότι η σχέση μεταξύ θερμοκρασίας αέρα και θνησιμότητας παρουσιάζει μια διαχρονική μεταβλητότητα η οποία εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, με τις θερμοκρασίες κατά τη θερμή περίοδο τους έτους και την ευπάθεια του πληθυσμού να διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο. Σύμφωνα με τη μελέτη των de'Donato et al. (2015), η θνησιμότητα αυξάνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας του αέρα, όμως ο σχετικός κίνδυνος (relative risk) έχει μειωθεί για την περίπτωση της Αθήνας

την περίοδο 2004-2010 συγκριτικά με την περίοδο 1996-2002 (Εικόνα A11). Η μείωση του σχετικού κινδύνου για την Αθήνα μεταξύ των δυο περιόδων παρατηρείται όχι μόνο για τη συνολική θνησιμότητα αλλά και όταν η ανάλυση πραγματοποιείται με ειδική ως προς την αιτία θνησιμότητα (θάνατοι σχετιζόμενοι με αναπνευστικά και καρδιαγγειακά αίτια) (Πίνακας A6) αλλά και για την ηλικιακή κατηγορία 75+ (Εικόνα A12).

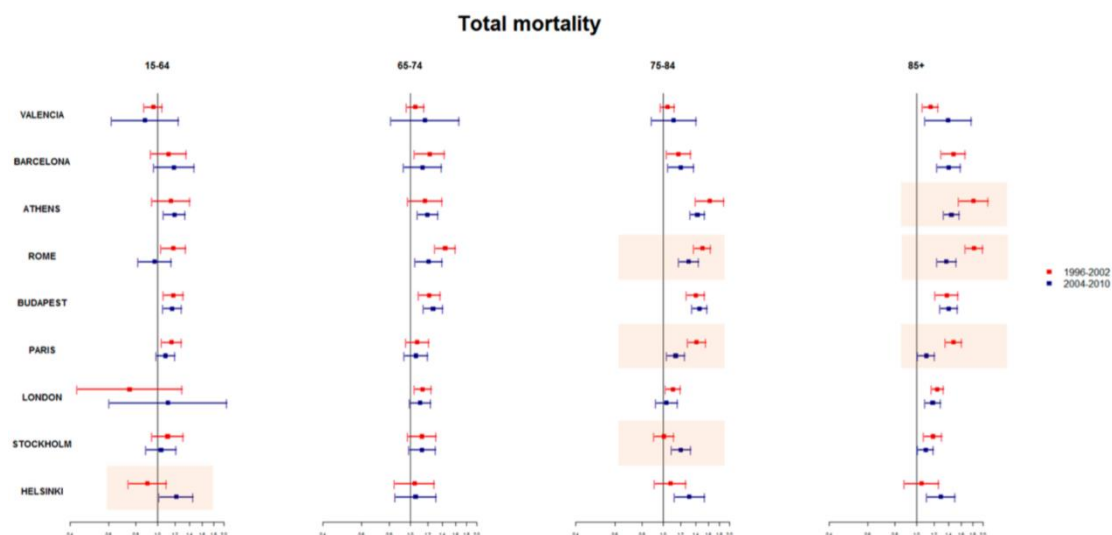


Εικόνα A11: Μέση σχέση θερμοκρασίας-θνησιμότητας (διάστημα εμπιστοσύνης 95%) για τα έτη πριν από το 2003 (κόκκινη γραμμή) και μετά το 2003 (μπλε γραμμή) σε εννέα ευρωπαϊκές πόλεις (Πηγή: de' Donato et al., 2015).

Πίνακας Α6: Εκτιμώμενος σχετικός κίνδυνος (relative risk, RR) (95% CI) για υψηλές θερμοκρασίες αέρα και συνολική ημερήσια θνησιμότητα καθώς και για θνησιμότητα σχετιζόμενη με αναπνευστικά και καρδιαγγειακά αίτια για όλες τις ηλικιακές κατηγορίες μεταξύ του 75ου και 99ου εκατοστημορίου της μέσης θερμοκρασίας αέρα για τις περιόδους πριν και μετά το 2003, για εννέα ευρωπαϊκές πόλεις, 1996-2010 (Πηγή: de'Donato et al., 2015).

Cities	Period	All Causes			Respiratory Causes			Cardiovascular Causes		
		RR	95% CI	P Value ^a	RR	95% CI	P Value ^a	RR	95% CI	P Value ^a
Valencia	1996–2002	1.11	1.04–1.17		0.81	0.53–1.33		1.12	0.85–1.46	
	2004–2010	1.18	1.03–1.36	0.216	1.28	0.86–1.92	0.159	1.27	0.98–1.64	0.507
Barcelona	1996–2002	1.27	1.18–1.36		1.55	1.23–1.96		1.42	1.25–1.60	
	2004–2009	1.26	1.17–1.36	0.946	1.65	1.30–2.10	0.700	1.27	1.10–1.47	0.263
Athens	1996–2002	1.63	1.53–1.75		2.10	1.72–2.56		1.79	1.64–1.96	
	2004–2010	1.35	1.29–1.42	<0.001	1.42	1.23–1.63	0.001	1.53	1.43–1.64	0.006
Rome	1996–2002	1.53	1.45–1.61		2.04	1.65–2.53		1.72	1.59–1.86	
	2004–2010	1.27	1.19–1.35	<0.001	1.64	1.29–2.08	0.180	1.32	1.19–1.46	<0.001
Budapest	1996–2002	1.29	1.22–1.37		1.07	0.76–1.50		0.97	0.88–1.06	
	2004–2010	1.33	1.27–1.40	0.451	1.52	1.24–1.87	0.082	1.44	1.35–1.53	<0.001
Paris	1996–2002	1.31	1.24–1.37		1.72	1.43–2.06		1.25	1.15–1.37	
	2004–2009	1.11	1.06–1.17	<0.001	1.26	1.02–1.55	0.026	1.04	0.95–1.15	0.006
London	1996–2002	1.20	1.16–1.25		1.26	1.15–1.39		1.23	1.15–1.30	
	2004–2010	1.18	1.12–1.23	0.429	1.35	1.19–1.53	0.413	1.22	1.13–1.32	0.958
Stockholm	1996–2002	1.10	1.04–1.17		1.25	1.01–1.54		1.07	0.98–1.17	
	2004–2010	1.12	1.06–1.19	0.628	1.25	1.02–1.53	0.999	1.17	1.07–1.27	0.157
Helsinki	1996–2002	1.02	0.93–1.12		1.42	1.05–1.92		1.00	0.87–1.15	
	2004–2010	1.24	1.14–1.35	0.003	1.06	0.68–1.65	0.287	1.18	1.02–1.35	0.111

^a Significance test of effect modification based on REM index.

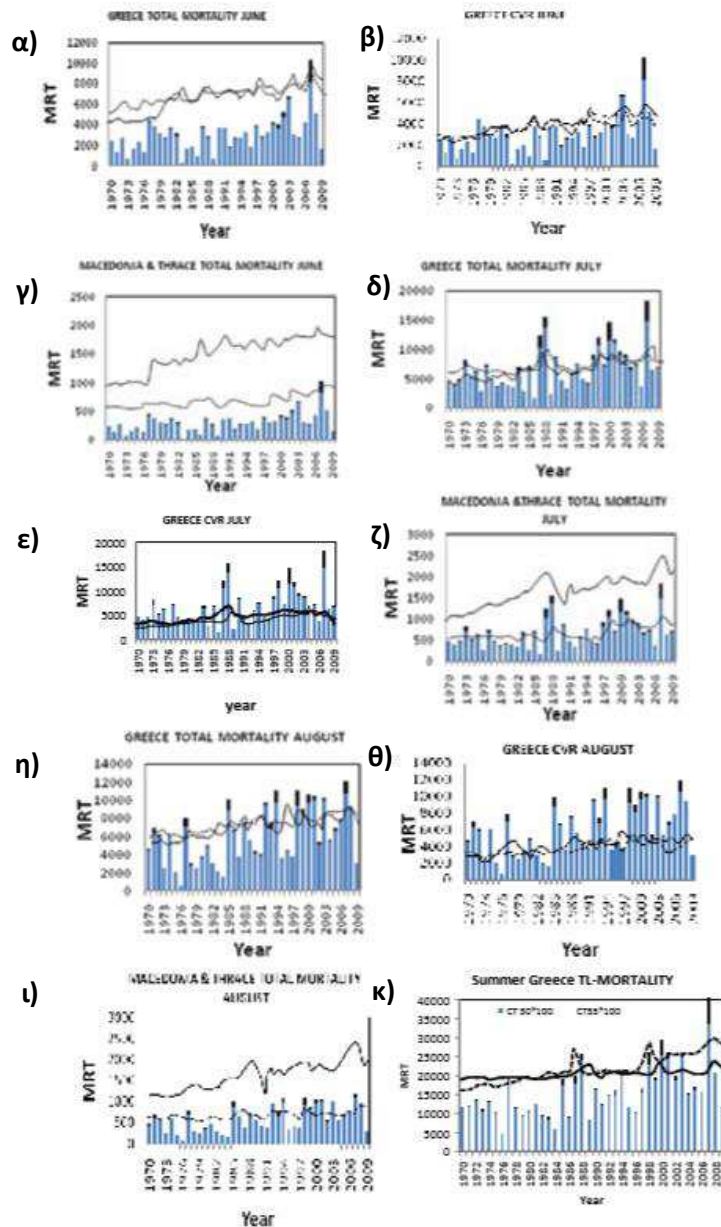


Εικόνα Α12: Εκτιμώμενος σχετικός κίνδυνος (relative risk, RR) (95% CI) για υψηλές θερμοκρασίες αέρα με τη συνολική θνησιμότητα ανά ηλικιακή κατηγορία μεταξύ του 75ου και 99ου εκατοστημορίου της μέσης θερμοκρασίας αέρα, για την περίοδο πριν από το 2003 (κόκκινη γραμμή) και μετά το 2003 (μπλε γραμμή) για εννέα ευρωπαϊκές πόλεις, 1996-2010 (Πηγή: de'Donato et al., 2015).

Σύμφωνα με τους de'Donato et al. (2015), η παρατηρούμενη μείωση στην Αθήνα δεν οφείλεται σε μέτρα που έλαβε το Δημόσιο Σύστημα Υγείας ή στην ικανότητα προσαρμογής του πληθυσμού μιας και η πόλη δεν έχει σχεδιάσει και εφαρμόσει κάποιο σχέδιο πρόληψης. Μια αιτία θα μπορούσε να είναι το γεγονός ότι μετά το ισχυρό επεισόδιο καύσωνα του 2003, το οποίο έπληξε το μεγαλύτερο τμήμα της Ευρώπης, η ατομική ευαισθητοποίηση και η προσαρμοστική ικανότητα θα μπορούσαν να αλλάξουν λόγω της μεγάλης προσοχής από το σύνολο των μέσων ενημέρωσης στις περισσότερες ευρωπαϊκές χώρες. Επίσης, η χρήση κλιματισμού μπορεί να επηρεάσει την απόκριση στη θερμότητα περιορίζοντας τις επιπτώσεις στην υγεία (de'Donato et al., 2015).

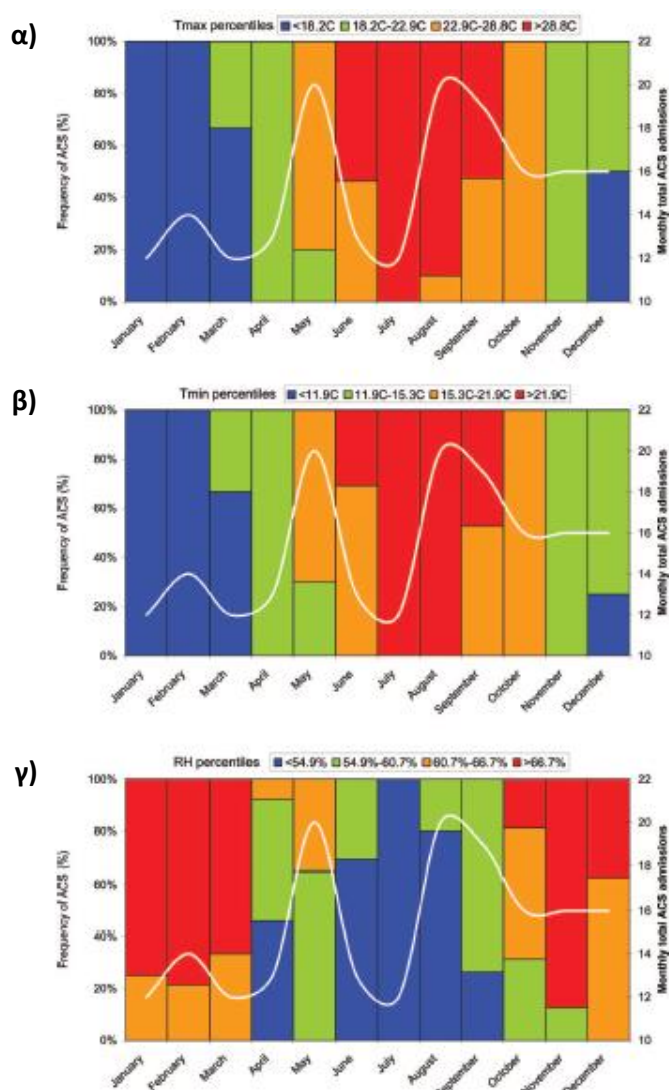
Η μελέτη των Zoumakis et al. (2011) εστίασε σε περιοχές της βόρειας Ελλάδας για να διερευνήσει τη διαχρονική επίδραση των ακραίων θερμοκρασιών στη θνησιμότητα τους καλοκαιρινούς μήνες (Ιούνιο, Ιούλιο και Αύγουστο) για την περίοδο 1970-2009, λαμβάνοντας υπόψη την προσαρμογή (adaptation) του πληθυσμού στο τοπικό κλίμα. Τα αποτελέσματα της μελέτης υποδεικνύουν ότι η υπερέχουσα θνησιμότητα (excess mortality) παρουσιάζει αυξητική τάση, γεγονός που υποδηλώνει έντονη αύξηση του δείκτη θνησιμότητας (mortality rate) κατά τη διάρκεια ακραίων επεισοδίων καύσωνα, δηλαδή των χρονικών περιόδων με ισχυρή και ακραία θερμή επιβάρυνση για τον πληθυσμό (Zoumakis et al. 2011). Οι εξάρσεις της θνησιμότητας, ειδικά κατά τη διάρκεια του Ιουλίου, σχετίζονται με ακραία κύματα καύσωνα που συνέβησαν κατά τη διάρκεια εκτεταμένων θερμών περιόδων (Εικόνα Α13). Τα πιο ισχυρά από αυτά για την περίοδο 1970-2009 συνέβησαν τον Ιούλιο 1987, Ιούλιο 1988, Ιούλιο και Αύγουστο 1998, Ιούλιο 2000, Ιούνιο, Ιούλιο και Αύγουστο 2007 όπου και παρατηρούνται εξάρσεις στο δείκτη θνησιμότητας (Εικόνα Α13).

Σύμφωνα με τη μελέτη (Zoumakis et al., 2011), οι επιπτώσεις των επακόλουθων επεισοδίων καύσωνα μετά το 2007, είναι πιθανόν να έχουν μειωθεί λόγω προσαρμογής του πληθυσμού σε ένα πιο θερμό περιβάλλον. Επίσης, η μεγαλύτερη ευαισθησία του πληθυσμού στα επεισόδια καύσωνα που λαμβάνουν χώρα στις αρχές του καλοκαιριού, όπου ο πληθυσμός δεν έχει εγκλιματιστεί πλήρως στο ζεστό καιρό, είναι σε συμφωνία με το αυξημένο ποσοστό θνησιμότητας κατά τον καύσωνα του Ιουνίου 2007 σε σχέση με τον καύσωνα του Ιουλίου 2007. Τα παραπάνω βρίσκονται σε συμφωνία με τα αποτελέσματα των Theoharatos et al. (2010) που μελέτησαν τα επεισόδια καύσωνα του 2007 στην ευρύτερη περιοχή της Αθήνας και οι οποίοι απέδωσαν την μείωση του αριθμού των εισαγωγών στα νοσοκομεία μεταξύ του πρώτου και του δεύτερου καύσωνα στην ψυχολογική προσαρμογή (psychological adaptation) (Nikolopoulou and Lykoudis 2006), μιας και ο πληθυσμός αναμένει υψηλότερες θερμοκρασίες στα τέλη Ιουλίου από ότι τον Ιούνιο.



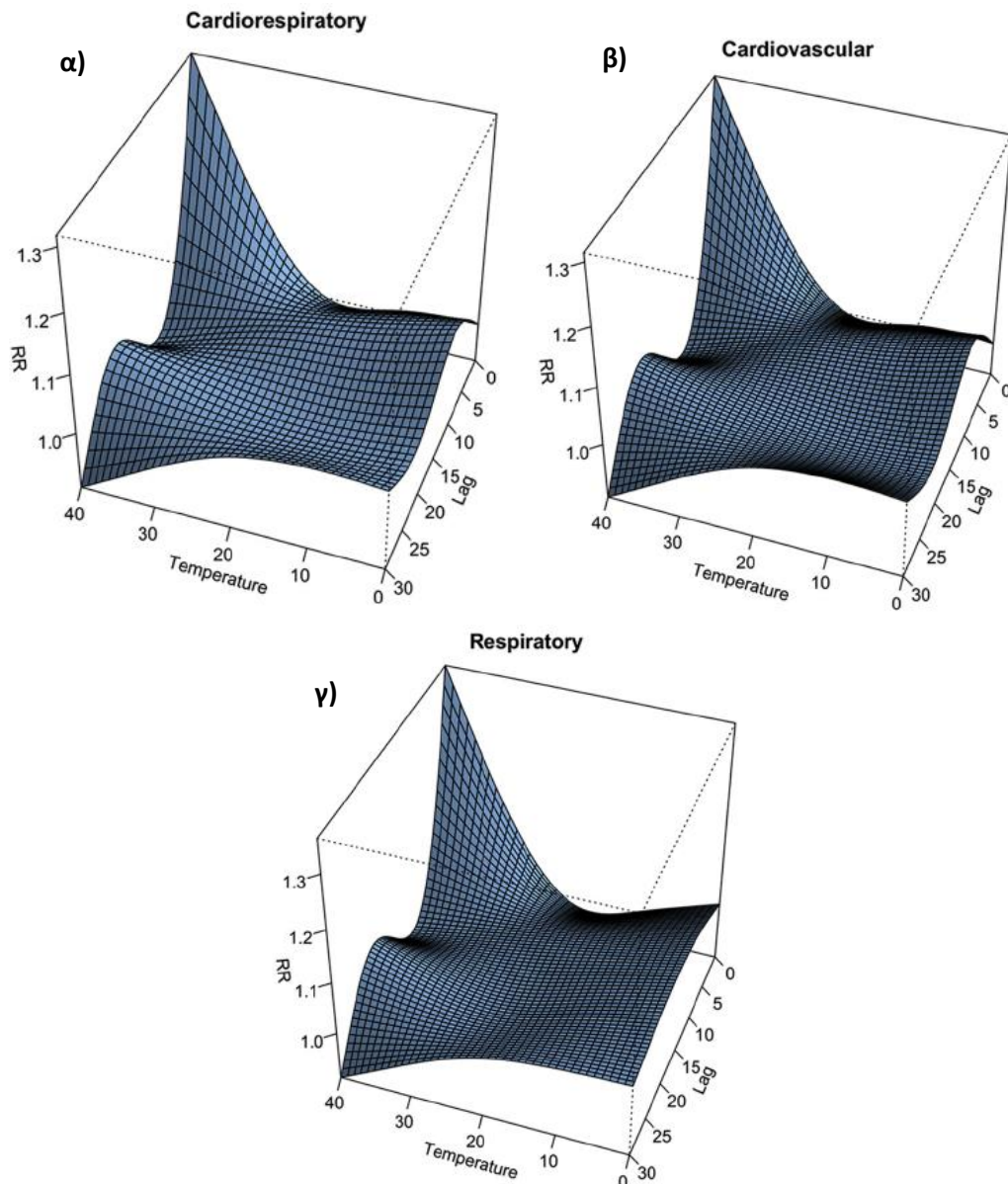
Εικόνα Α13: Διαχρονικές διακυμάνσεις τον Ιούνιο: α) συνολική θνησιμότητα (εκτός από τις εξωτερικές αιτίες) στην Ελλάδα (σταθερή γραμμή) έναντι των τιμών ($\times 100$) της σωρευτικής μέγιστης θερμοκρασίας για τις υπερβάσεις CT30 και CT35 (γράφημα ράβδων), β) CVR-θνησιμότητα (καρδιαγγειακά, εγκεφαλοαγγειακά και αναπνευστικά-CVR) στην Ελλάδα (σταθερή γραμμή), όπου το ποσοστό θνησιμότητας (ανά 10 εκατομμύρια άνθρωποι) δίνεται ως διακεκομμένη γραμμή και γ) η απόλυτη θνησιμότητα (σταθερή γραμμή) για την περιοχή της Μακεδονίας και της Θράκης, όπου το ποσοστό θνησιμότητας (ανά 1 εκατομμύριο άτομα) δίνεται ως διακεκομμένη γραμμή και οι τιμές ($\times 10$) της σωρευτικής μέγιστης θερμοκρασίας για τις υπερβάσεις CT30 και CT35 (γράφημα ράβδων). Ομοίως με τα παραπάνω αλλά για τον Ιούλιο (δ-ζ), τον Αύγουστο (η-ι) και το καλοκαίρι (κ) (Πηγή: Zoumakis et al., 2011).

Σε αντίστοιχη μελέτη, οι Nastos et al. 2013 μελέτησαν την ενδοετήσια μεταβλητότητα των εισαγωγών με οξύ στεφανιαίο σύνδρομο (acute coronary syndrome, ACS) σε σχέση με τις βιοκλιματικές συνθήκες στην περιοχή της Ιεράπετρας στο νοτιοανατολικό τμήμα της Κρήτης. Τα αποτελέσματα της μελέτης δείχνουν μη στατιστικά σημαντική σχέση (C.I. 95%) μεταξύ των μηνιαίων εισαγωγών με οξύ στεφανιαίο σύνδρομο ACS και των μετεωρολογικών παραμέτρων. Τα εποχιακά μέγιστα των εισαγωγών με οξύ στεφανιαίο σύνδρομο (ACS) εμφανίζονται κατά κύριο λόγο κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού και πιθανότατα οφείλονται στην αύξηση του τοπικού πληθυσμού λόγω της έλευσης μεγάλου αριθμού τουριστών που προέρχονται κυρίως από χώρες της κεντρικής και βόρειας Ευρώπης και οι οποίοι είναι περισσότερο ευάλωτοι στις υψηλές θερμοκρασίες (Εικόνα Α14).



Εικόνα Α14: Συχνότητα εισαγωγών με οξύ στεφανιαίο σύνδρομο (ACS) ως συνάρτηση α) της μηνιαίας μέγιστης θερμοκρασίας του αέρα, β) της μηνιαίας ελάχιστης θερμοκρασίας του αέρα και γ) της σχετικής υγρασίας, παράλληλα με την ενδοετήσια ACS στην Ιεράπετρα της Κρήτης για την περίοδο 2004-2007 (Πηγή: Nastos et al., 2013).

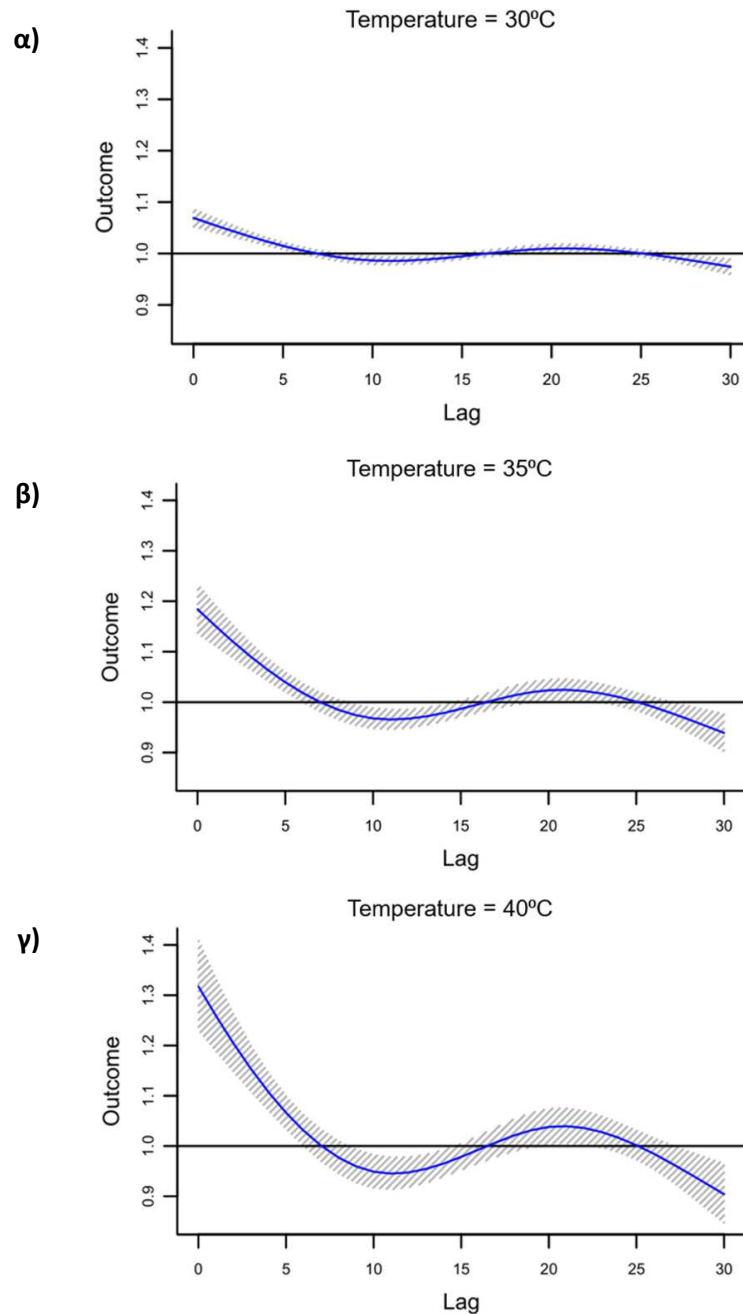
Η μελέτη των Kouis et al. (2019) εξετάζει τη σχέση μεταξύ υψηλής θερμοκρασίας περιβάλλοντος και καρδιαγγειακής καθώς και αναπνευστικής θνησιμότητας για τον πληθυσμό της ευρύτερης περιοχής της Θεσσαλονίκης, λαμβάνοντας υπόψη τον ρόλο της σωματιδιακής ρύπανσης ως δυνητικά συγχυτικού παράγοντα (potential confounder). Τα μετεωρολογικά δεδομένα και τα δεδομένα θνησιμότητας αφορούν την περίοδο 1999-2012.



Εικόνα A15: Τρισδιάστατη γραφική αναπαράσταση της επίδρασης της θερμοκρασίας περιβάλλοντος στην α) καρδιοαναπνευστική, β) καρδιαγγειακή και γ) αναπνευστική θνησιμότητα (Πηγή: Kouis et al., 2019).

Τα αποτελέσματα της έρευνας υποδεικνύουν άμεση επίδραση των υψηλών θερμοκρασιών περιβάλλοντος, καθώς ο κίνδυνος θνησιμότητας αυξάνεται σημαντικά πάνω από τους 33 °C, υποδηλώνοντας μια σημαντική επίδραση των υψηλών θερμοκρασιών στη

θνησιμότητα την ίδια και αλλά και την επόμενη ημέρα ενός επεισοδίου υψηλών θερμοκρασιών (υστέρηση 0-1) και η οποία διατηρείται για μια εβδομάδα (Εικόνα Α15). Ο κίνδυνος θνησιμότητας από καρδιαγγειακά και αναπνευστικά νοσήματα αυξάνεται κατά μέσο όρο 4.4% και 5.9%, αντίστοιχα, την ημέρα ενός επεισοδίου υψηλών θερμοκρασιών αλλά και την επομένη, ενώ ο κίνδυνος μειώνεται απότομα τις επόμενες ημέρες (Εικόνα Α16) (Kouis et al., 2019).



Εικόνα Α16: Καρδιοαναπνευστικός κίνδυνος θνησιμότητας για διαφορετικά επίπεδα θερμοκρασίας α) 30 °C, β) 35 °C και γ) 40 °C την ημέρα του επεισοδίου υψηλών θερμοκρασιών (υστέρηση 0) και τις επόμενες ημέρες (έως την υστέρηση 30) (Πηγή: Kouis et al., 2019).

Η θερμοκρασία κατωφλίου των 33 °C πάνω από την οποία παρατηρείται σημαντική αύξηση του κινδύνου θνησιμότητας για την ευρύτερη περιοχή της Θεσσαλονίκης (Kouis et al., 2019) ομοιάζει με την αντίστοιχη θερμοκρασία κατωφλίου των 29.4 °C που βρέθηκε για άλλες Μεσογειακές πόλεις, όπως η Αθήνα, η Ρώμη, η Βαλένθια, το Τορίνο, το Μιλάνο και η Λιουμπλιάνα (Baccini et al., 2008). Επίσης, τα αποτελέσματα των Kouis et al. 2019 είναι σύμφωνα με τα ευρήματα προηγούμενων μελετών που εξέτασαν την επίδραση των επεισοδίων καύσωνα στη θνησιμότητα κατά τη διάρκεια της καλοκαιρινής περιόδου στη Θεσσαλονίκη για τις περιόδους 1945-2012 (Zoumakis et al., 2013) και 1970-2009 (Zoumakis et al., 2012, 2011).

Η μελέτη αποκαλύπτει επίσης μείωση της θνησιμότητας μετά από ακραίες θερμοκρασίες περιβάλλοντος (Kouis et al., 2019), ένα φαινόμενο το οποίο έχει παρατηρηθεί και σε άλλες αντίστοιχες μελέτες παγκοσμίως και το οποίο στη διεθνή βιβλιογραφία καλείται μετατόπιση θνησιμότητας (mortality displacement ή harvesting effect). Σύμφωνα με το φαινόμενο αυτό, οι υψηλές θερμοκρασίες περιβάλλοντος επηρεάζουν κυρίως μια υποομάδα ατόμων, οι οποίοι είναι ήδη ευαίσθητοι σε χρόνιες καταστάσεις και οι οποίοι θα κατέληγαν μερικές ημέρες αργότερα ανεξαρτήτως των καιρικών συνθηκών.

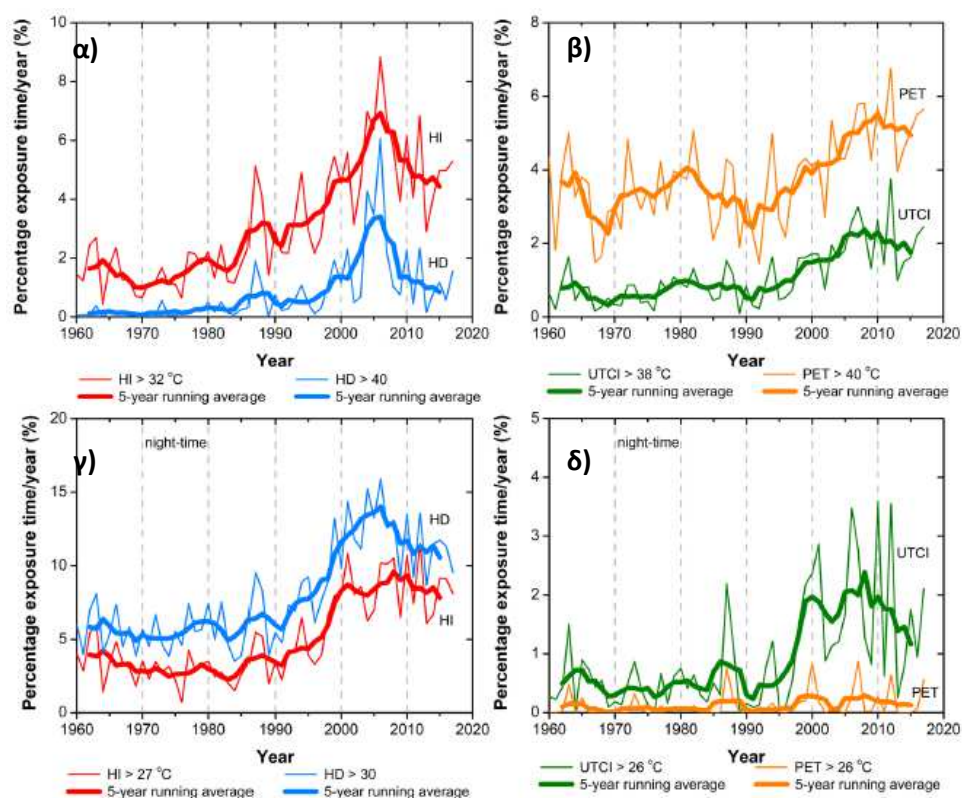
Μια πρόσφατη μελέτη των Fountoulakis et al. (2016) καταδεικνύει ότι η κλιματική αλλαγή και συγκεκριμένα οι υψηλές θερμοκρασίες περιβάλλοντος συσχετίζονται τόσο με τις αυτοκτονίες όσο και με τις απόπειρες αυτοκτονιών στην περιοχή της Θεσσαλονίκης, σε μεγαλύτερο βαθμό από ότι άλλοι παράγοντες όπως για παράδειγμα η ανεργία. Σύμφωνα με τη μελέτη η θερμοκρασία του αέρα είναι η μοναδική παράμετρος η οποία καθορίζει τις αυτοκτονίες των ανδρών και εξηγεί το 51% της διακύμανσης τους. Επίσης, η περίοδος κατά την οποία ο δείκτης αυτοκτονιών εμφανίζει τις υψηλότερες τιμές παρατηρείται μεταξύ Μαΐου και Αυγούστου (Fountoulakis et al., 2016).

Οι Nastos and Matzarakis (2006) μελετώντας την επίδραση των μετεωρολογικών και βιομετεωρολογικών παραμέτρων στην ανθρώπινη υγεία προσδιόρισαν μια στατιστικά σημαντική συσχέτιση μεταξύ του αριθμού των εισαγωγών με συμπτώματα λοίμωξης του αναπνευστικού και των θερμικών δεικτών PMV, PET και SET*. Η μελέτη τους υπέδειξε ότι μείωση κατά 10 μονάδες του δείκτη PMV και κατά 10 °C των δεικτών PET και SET* σχετίζεται με αύξηση της πιθανότητας εμφάνισης λοίμωξης του αναπνευστικού κατά 47%, 12% και 11%, αντίστοιχα (Nastos and Matzarakis, 2006).

Σε αντίστοιχη μελέτη, οι Pantavou et al. 2008, προσδιόρισαν αρνητική ισχυρή συσχέτιση μεταξύ του δείκτη PMV και του αριθμού των περιστατικών με αναπνευστικά και

καρδιαγγειακά συμπτώματα κατά τη θερμή περίοδο. Το αποτέλεσμα αυτό επιβεβαιώνεται και από την πρόσφατη μελέτη των Pantanou et al. 2011, με τη θερμική αίσθηση, τη θερμική επιβάρυνση και την άνεση να προσδιορίζονται μέσω των θερμικών δεικτών HI, ASV, DI, TS.

Η πρόσφατη μελέτη των Katavoutas and Founda (2019) μελέτησε τη διαχρονική εξέλιξη και τις μακροπρόθεσμες τάσεις του θερμικού κινδύνου στην Αθήνα τα τελευταία 60 χρόνια (1960-2017). Τα αποτελέσματα της μελέτης υποδεικνύουν σημαντική αύξηση του κινδύνου που συνδέεται με τη θερμότητα τα τελευταία χρόνια. Συγκεκριμένα, ο χρόνος έκθεσης του πληθυσμού ανά έτος υπό συνθήκες “ζέστη-εξαιρετική προσοχή (hot-extreme caution)”, “μεγάλη δυσφορία (great discomfort)”, “πολύ ισχυρή θερμή επιβάρυνση (very strong heat stress)”, “ακραία θερμή επιβάρυνση (extreme heat stress)” παρουσιάζει στατιστικά σημαντική τάση αύξησης με ρυθμό 0.9%/δεκαετία, 0.4%/δεκαετία, 0.3%/δεκαετία και 0.4%/δεκαετία κατά την περίοδο 1960-2017, αντίστοιχα (Εικόνα A17).

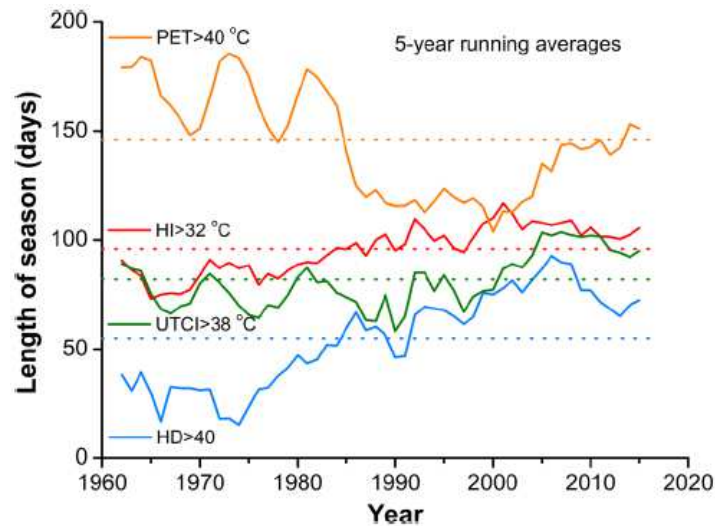


Εικόνα A17: Διαχρονική έκθεση (%) του πληθυσμού της Αθήνας σε συνθήκες α) HI > 32 °C (ζέστη-εξαιρετική προσοχή; hot-extreme caution), HD > 40 (μεγάλη δυσφορία; great discomfort), β) UTCI > 38 °C (πολύ ισχυρή θερμή επιβάρυνση; very strong heat stress), PET > 40 (ακραία θερμή επιβάρυνση; extreme heat stress) και κατά τη διάρκεια της νύχτας γ) HI > 27 (μέτρια ζέστη-προσοχή; warm-caution), HD > 30 (μερική δυσφορία; some discomfort), δ) UTCI > 26 °C (μέτρια θερμή επιβάρυνση; moderate heat stress), PET > 26 °C (ελαφριά θερμή επιβάρυνση; slight heat stress) για την περίοδο 1960-2017 (Πηγή: Katavoutas and Founda, 2019).

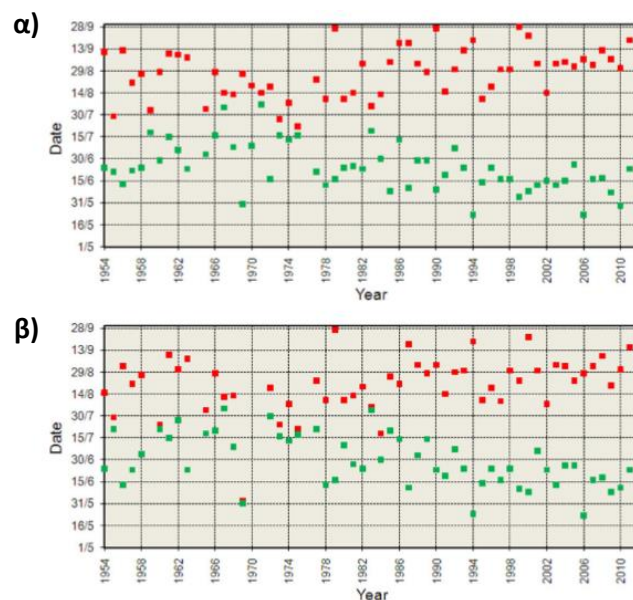
Μέχρι τα μέσα της δεκαετίας του '80, ο χρόνος έκθεσης υπό συνθήκες “ζέστη-εξαιρετική προσοχή; hot-extreme caution” ($HI > 32\text{ }^{\circ}\text{C}$) και “μεγάλη δυσφορία; great discomfort” ($HD > 40$) διαμορφώνεται σε επίπεδα μικρότερα του 2% και 0.6% ετησίως, αντίστοιχα (Εικόνα A17). Τις επόμενες δεκαετίες αποκαλύπτεται μια σημαντική ανοδική τάση στον χρόνο έκθεσης υπό αυτές τις συνθήκες, όπου ένα μέγιστο στον χρόνο έκθεσης στα μέσα της δεκαετίας του 2000 ακολουθείται από μια μείωση μέχρι σήμερα. Για παράδειγμα, ο χρόνος έκθεσης υπό συνθήκες “ζέστη-εξαιρετική προσοχή; hot-extreme caution” ($HI > 32\text{ }^{\circ}\text{C}$) διαμορφώνεται στο 1.4% το 1960, αυξάνεται σε 8.8% το 2006 (σχετική αύξηση κατά 529%) και σε 5.3% το 2017 (σχετική αύξηση κατά 279%). Ακόμα και κατά τις νυχτερινές ώρες, τρεις από τους τέσσερις δείκτες που εξετάστηκαν, υποδεικνύουν ότι ο πληθυσμός εκτίθεται σε σημαντικά υψηλότερα επίπεδα θερμής επιβάρυνσης τις τελευταίες δεκαετίες σε σύγκριση με τις προηγούμενες (Katavoutas and Founda, 2019).

Μία προοδευτική επέκταση της περιόδου θερμής επιβάρυνσης αποκαλύπτεται κατά τη διάρκεια των ετών, με αποτέλεσμα την επιμήκυνση της περιόδου με “ζέστη-εξαιρετική προσοχή (hot-extreme caution)” ($HI > 32\text{ }^{\circ}\text{C}$), “μεγάλη δυσφορία (great discomfort)” ($HD > 40$), “πολύ ισχυρή θερμή επιβάρυνση (very strong heat stress)” ($UTCI > 38\text{ }^{\circ}\text{C}$) κατά 5.6 ημέρες/δεκαετία, 11.3 ημέρες/δεκαετία και 4.3 ημέρες/δεκαετία, αντίστοιχα (Εικόνα A18). Το αποτέλεσμα αυτό αποκαλύπτει τη μετατόπιση νωρίτερα μέσα στο έτος της πρώτης εμφάνισης συνθηκών όπου δημιουργούν θερμή επιβάρυνση στον πληθυσμό της Αθήνας καθώς και μετατόπιση αργότερα μέσα στο έτος της τελευταίας εμφάνισης των συνθηκών αυτών. Συγκεκριμένα, η πρώτη εμφάνιση μεγάλης δυσφορίας ($HD > 40$, great discomfort) στις αρχές της δεκαετίας του 1960 εμφανιζόταν κατά τη διάρκεια του Ιουλίου, ενώ τα τελευταία χρόνια, αυτό συμβαίνει τον Ιούνιο και σε ορισμένες περιπτώσεις ακόμη και στα τέλη Μαΐου. Ταυτόχρονα, η τελευταία εμφάνιση μεγάλης δυσφορίας ($HD > 40$, great discomfort) στις αρχές της δεκαετίας του 1960 συνέβαινε κυρίως τον Αύγουστο και σίγουρα όχι αργότερα από τις αρχές Σεπτεμβρίου, ενώ τα τελευταία χρόνια, αυτό παρατηρείται ακόμα και μετά τα μέσα Σεπτεμβρίου (Katavoutas and Founda, 2019).

Αντίστοιχα αποτελέσματα προκύπτουν και από την μελέτη των Bartzokas et al. (2013) για την Αθήνα, βάσει της οποίας η έναρξη και η διακοπή της περιόδου θερμικής δυσφορίας μέχρι τα μέσα της δεκαετίας του 1980 συνέβαινε στις αρχές Ιουλίου και στο τέλος Αυγούστου, αντίστοιχα, αλλά τις επόμενες δεκαετίες οι ημερομηνίες έναρξης και διακοπής έχουν μετακινηθεί ελαφρώς νωρίτερα και αργότερα, αντίστοιχα, οδηγώντας σε επιμήκυνση της καλοκαιρινής περιόδου με θερμική δυσφορία (Εικόνα A19) (Bartzokas et al., 2013).



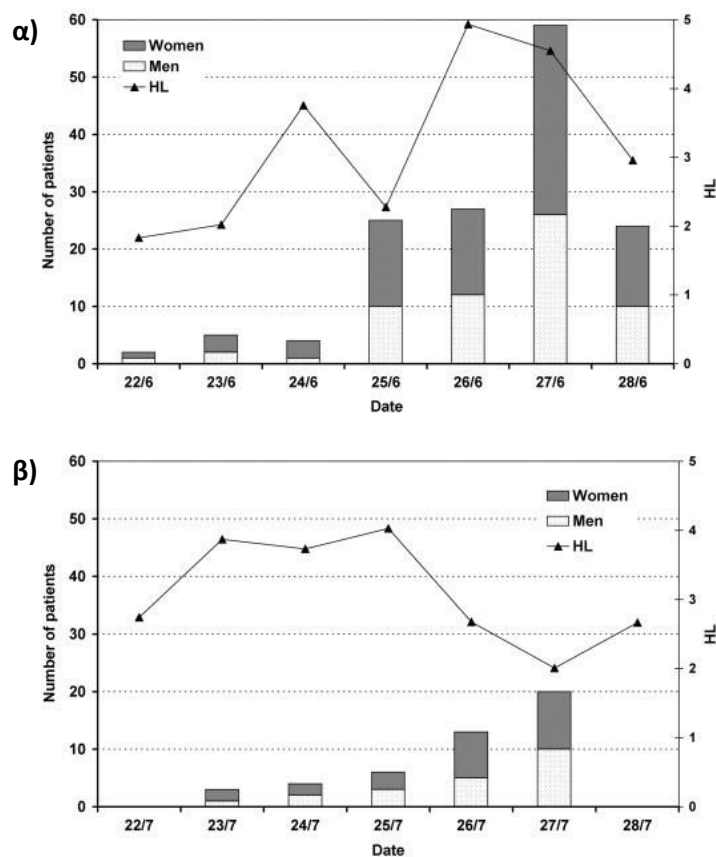
Εικόνα Α18: Διάρκεια της εποχής κατά την οποία παρατηρούνται υπερβάσεις των ορίων ($HI > 32\text{ }^{\circ}\text{C}$ (ζέστη-εξαιρετική προσοχή; hot-extreme caution), $HD > 40$ (μεγάλη δυσφορία; great discomfort), $UTCI > 38\text{ }^{\circ}\text{C}$ (πολύ ισχυρή θερμή επιβάρυνση; very strong heat stress), $PET > 40$ (ακραία θερμή επιβάρυνση; extreme heat stress)) για την περίοδο 1960-2017. Η διάρκεια της εποχής αναφέρεται στην περίοδο (αριθμός ημερών) μεταξύ του πρώτου και του τελευταίου περιστατικού σε ένα έτος όπου παρατηρούνται οι αντίστοιχες υπερβάσεις. Οι διακεκομμένες γραμμές υποδεικνύουν τη μέση τιμή του κάθε ορίου για την περίοδο 1960-2017 (Πηγή: Katavoutas and Founda, 2019).



Εικόνα Α19: Ημερομηνίες έναρξης (πράσινα τετράγωνα) και διακοπής (κόκκινα τετράγωνα) της θερμικής δυσφορίας ($PMV \geq 2$) στην Αθήνα στις 14:00 τοπική ώρα για α) άπνοια και β) χαμηλές ταχύτητες ανέμου (Πηγή: Bartzokas et al., 2013).

A3: Θνησιμότητα, νοσηρότητα και θερμική άνεση κατά τη διάρκεια επεισοδίων καύσωνα

Τα επείγοντα περιστατικά εισαγωγής σε νοσοκομεία με συμπτώματα θερμοπληξίας και θερμικής εξάντλησης καθώς και η θνησιμότητα αυξάνονται σημαντικά κατά τη διάρκεια ενός επεισοδίου καύσωνα. Οι Theoharatos et al. (2010) μελέτησαν τον αριθμό των εισαγωγών στα νοσοκομεία της Αττικής (Ελλάδα) με συμπτώματα θερμοπληξίας και θερμικής εξάντλησης κατά τη διάρκεια δυο ακραίων κυμάτων καύσωνα που έλαβαν χώρα τον Ιούνιο και τον Ιούλιο του 2007, σε συνδυασμό με την ημερήσια τιμή του θερμικού (βιοκλιματικού) δείκτη Heat Load (HL) (Εικόνα A20). Οι συγγραφείς παρατήρησαν μια πτώση της τάξης του 68.5% στον αριθμό των εισαγωγών στα νοσοκομεία μεταξύ του πρώτου καύσωνα (Ιούνιος 2007) και του δεύτερου καύσωνα (Ιούλιος 2007). Η πτώση αυτή υποδεικνύει ότι ένα κύμα καύσωνα έχει μεγαλύτερες επιπτώσεις στον άνθρωπο όταν εκδηλώνεται νωρίτερα μέσα στο καλοκαίρι.

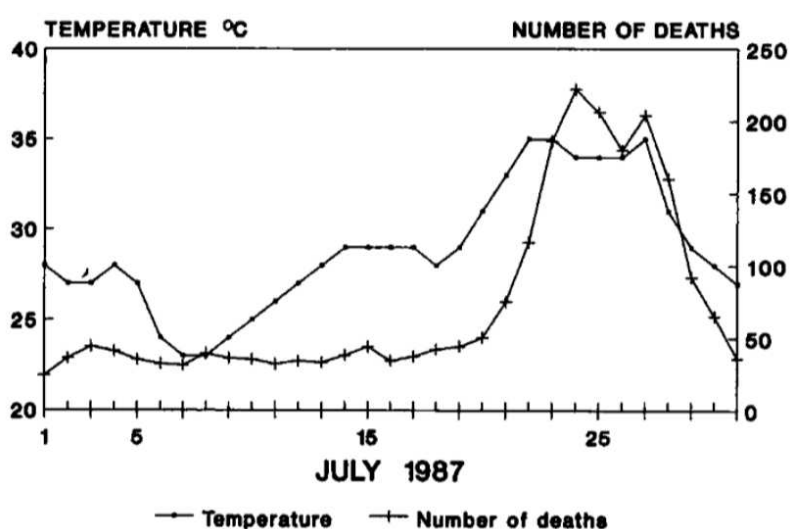


Εικόνα A20: Ημερήσιος αριθμός ασθενών που διαγνώστηκαν με θερμική εξάντληση και θερμοπληξία στα επείγοντα εξωτερικά ιατρεία στο σύνολο των νοσοκομείων της Αττικής κατά τη διάρκεια των ακραίων κυμάτων καύσωνα α) του Ιουνίου 2007 και β) του Ιουλίου 2007 σε συνδυασμό με την ημερήσια τιμή του θερμικού δείκτη Heat Load (HL) (Πηγή: Theoharatos et al., 2010).

Η διάρκεια και η ένταση του καύσωνα παίζουν καθοριστικό ρόλο μιας και ο καύσωνας του Ιουνίου ήταν ισχυρότερος από αυτόν του Ιουλίου με βάση τις τιμές του θερμικού δείκτη HL (Theoharatos et al., 2010). Οι συγγραφείς επίσης απέδωσαν την πτώση του αριθμού των εισαγωγών στα νοσοκομεία μεταξύ του πρώτου και του δεύτερου καύσωνα στην ψυχολογική προσαρμογή (psychological adaptation) (Nikolopoulou and Lykoudis, 2006), μιας και ο πληθυσμός της Αθήνας αναμένει υψηλότερες θερμοκρασίες στα τέλη Ιουλίου από ότι το μήνα Ιούνιο.

Επίσης, η χρονική εξέλιξη του ημερήσιου αριθμού ασθενών με θερμική εξάντληση και θερμοπληξία σε συνδυασμό με την πορεία του θερμικού δείκτη HL κατά τη διάρκεια των κυμάτων καύσωνα αποκάλυψε ότι ο μέγιστος αριθμός ασθενών καταγράφηκε 1 με 2 ημέρες αργότερα από την ημέρα που σημειώθηκαν τα υψηλότερα επίπεδα θερμικής δυσφορίας (Theoharatos et al., 2010). Το αποτέλεσμα αυτό υποδεικνύει πιθανή υστέρηση της επίδρασης της θερμικής δυσφορίας όπως αυτή εκφράζεται από το δείκτη HL στον αριθμό των ασθενών και οι συγγραφείς προτείνουν το επίπεδο συναγερμού κατά τη διάρκεια ενός επεισοδίου καύσωνα να παρατείνεται κατά 3 ή και 4 ημέρες μετά τις μέγιστες τιμές του θερμικού δείκτη HL (Theoharatos et al., 2010).

Σε μια αντίστοιχη μελέτη, οι Katsouyanni et al. (1993) διερεύνησαν τη θνησιμότητα σε διάφορες πόλεις της Ελλάδας κατά τη διάρκεια ενός πολύ ισχυρού επεισοδίου καύσωνα που συνέβη το τελευταίο δεκαήμερο του Ιουλίου του 1987. Τα αποτελέσματα υποδεικνύουν ότι ο μέσος ημερήσιος αριθμός θανάτων αυξήθηκε με την αύξηση της θερμοκρασίας του αέρα και η αύξηση έγινε ιδιαίτερα έντονη όταν η θερμοκρασία του αέρα υπερέβη τους 30 °C (Εικόνα A21, Πίνακας A7).



Εικόνα A21: Μέση ημερήσια θερμοκρασία αέρα και θνησιμότητα τον Ιούλιο του 1987 (Πηγή: Katsouyanni et al., 1993).

Ο μέσος αριθμός θανάτων αυξήθηκε επίσης με την αντίστοιχη αύξηση του βιοκλιματικού δείκτη DI (Discomfort Index), ο οποίος συνδυάζει τη θερμοκρασία του αέρα και την υγρασία (Πίνακας Α7). Και οι δυο τάσεις ήταν στατιστικά σημαντικές. Συγκεκριμένα, ο αριθμός των θανάτων αυξήθηκε με την αύξηση της θερμοκρασίας κατά μέσο όρο περίπου 3 θανάτους την ημέρα όταν η μέση ημερήσια θερμοκρασία ήταν μεταξύ 25 °C και 30 °C, ενώ ο αριθμός αυτός αυξήθηκε κατά περισσότερο από 40 θανάτους ημερησίως όταν η θερμοκρασία υπερέβη τους 30 °C.

Πίνακας Α7: Μέσος ημερήσιος αριθμός θανάτων κατά τη διάρκεια ημερών με διαφορετικά επίπεδα θερμοκρασίας αέρα και δυσφορίας με βάση το δείκτη DI (Discomfort Index) (Πηγή: Katsouyanni et al., 1993).

Temperature (°C)	No. days	No. deaths	
		$\bar{X}$	SD
<25	445	35.61	6.71
≥25 and <30	348	35.95	9.14
≥30	26	85.73	63.82
Discomfort index (°C)			
<25	351	33.88	6.34
≥25 and <27	218	35.27	8.15
≥27	90	53.44	41.02

Η μελέτη επίσης αποκάλυψε ότι οι καταγεγραμμένοι θάνατοι στην Αθήνα κατά το μήνα Ιούλιο (1987) που συνέβη ο καύσωνας ήταν σχεδόν διπλάσιοι από τον αναμενόμενο αριθμό θανάτων όταν εφαρμόστηκαν μοντέλα γραμμικής παλινδρόμησης με βάση τα δεδομένα θνησιμότητας της περιόδου 1981-1986 (Katsouyanni et al., 1993). Η αύξηση της θνησιμότητας έφτασε στο 96.5% στην Αθήνα, στο 32.5% σε άλλες αστικές περιοχές της Ελλάδας εξαιρουμένης της Αθήνας και στο 26.8% σε ημιαστικές και αγροτικές περιοχές (Πίνακες Α8, Α9). Σύμφωνα με τους συγγραφείς το ιδιαίτερα υψηλό ποσοστό αύξησης της θνησιμότητας στην Αθήνα συγκριτικά με άλλες περιοχές της Ελλάδας οφείλεται στην ελαφρώς υψηλότερη θερμοκρασία περιβάλλοντος λόγω της πυκνής δόμησης καθώς και σε κοινωνικούς παράγοντες, όπως στο γεγονός ότι πολλοί ηλικιωμένοι μένουν συχνά χωρίς επίβλεψη σε διαμερίσματα με ανεπαίσθητο αερισμό (Katsouyanni et al., 1993).

Πίνακας Α8: Αριθμός θανάτων κατά τη διάρκεια του Ιουλίου, από το 1981 έως το 1987, για διάφορες πόλεις της Ελλάδας (Πηγή: Katsouyanni et al., 1993).

City or area	Number of deaths						
	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987
Athens	1 905	1 763	1 972	1 983	2 016	2 928	4 093
Thessaloniki	383	358	424	379	436	440	572
Patra	84	81	105	88	119	81	140
Larisa	68	44	65	55	70	64	71
Iraklio	49	46	46	53	50	62	53
Kavala	36	49	50	49	49	38	66
Ioannina	28	22	20	36	27	37	40
Kalamata	27	27	31	45	16	38	27
Hania	38	33	35	34	30	36	37
Serres	36	25	34	38	36	24	58
Trikala	32	20	30	27	21	32	29
Tripoli	11	6	11	17	16	13	11
Arta	9	12	11	12	14	15	16
Florina	8	4	10	11	11	15	5
Korinthos	16	16	22	17	17	14	25
All urban areas (except Athens)	1 536	1 452	1 682	1 627	1 721	1 747	2 396
All other areas	3 200	3 318	3 654	3 637	3 669	3 806	5 015

Πίνακας Α9: Αριθμός θανάτων που καταγράφηκαν τον Ιούλιο του 1987 και αριθμός των "αναμενόμενων" (95% C.I.) θανάτων που υπολογίστηκαν μέσω γραμμικής παλινδρόμησης, βάσει των δεδομένων από το 1981 έως το 1986, σε διάφορες περιοχές της Ελλάδας (Πηγή: Katsouyanni et al., 1993).

City	Observed deaths	Expected deaths (95% C.I.)	Percentage increase	p (one-tailed)
Athens	4 093	2 083 (1 949, 2 217)	96.5	$<10^{-6}$
Thessaloniki	572	451 (404, 498)	26.8	.001
Patra	149	101 (71, 132)	47.5	.01
Larisa	71	66 (47, 85)	7.6	NS
Iraklio	53	59 (51, 67)	- 10.2	NS
Kavala	66	46 (33, 59)	43.5	.01
Ioannina	40	36 (24, 48)	10.0	NS
Kalamata	27	34 (14, 54)	- 20.5	NS
Hania	37	32 (27, 37)	15.6	NS
Serres	58	30 (18, 42)	93.3	.002
Trikala	29	27 (15, 39)	7.4	NS
Tripoli	11	17 (11, 23)	- 35.3	NS
Arta	16	16 (14, 18)	0	NS
Florina	5	16 (12, 20)	- 68.8	NS
Korinthos	25	16 (11, 21)	56.3	.01
All urban areas (except Athens)	2 396	1 808 (1 684, 1 932)	32.5	.0001
All other areas	5 015	3 954 (3 776, 4 132)	26.8	$<10^{-4}$

Στο επεισόδιο καύσωνα του 1987 καταγράφηκαν 2960 εισαγωγές με συμπτωματολογία σχετιζόμενη με την υψηλή θερμοκρασία (θερμοπληξία, θερμική εξάντληση) και 926 θάνατοι στην ευρύτερη περιοχή της Αθήνας (Katsouyanni et al., 1988). Τα θανάσιμα περιστατικά ανήλθαν στο 31% μεταξύ των αποδεκτών περιπτώσεων ασθενειών που σχετίζονται με τη θερμότητα. Ο ρυθμός εισαγωγής στα νοσοκομεία αυξήθηκε περισσότερο από 5 φορές μετά την τρίτη ημέρα του καύσωνα, υποδεικνύοντας ότι για πολλούς ασθενείς η διάρκεια του καύσωνα ήταν ο καθοριστικός παράγοντας για την εμφάνιση θερμικών κακώσεων. Τα θανάσιμα περιστατικά ήταν περισσότερα τις 2 πρώτες ημέρες του καύσωνα από ότι τις υπόλοιπες ημέρες (72% έναντι 32%), γεγονός που συνεπάγεται είτε την αύξηση της αποτελεσματικότητας των ιατρικών υπηρεσιών ή τη μείωση της θερμικής επιβάρυνσης. Η ηλικία έχει σαφώς σημαντική επίδραση στη νοσηρότητα και τη θνησιμότητα που σχετίζεται με τη θερμότητα και μπορεί επίσης να επηρεάσει το ποσοστό θνησιμότητας (Πίνακας A10) (Katsouyanni et al., 1988).

Πίνακας A10: 10-ημερών αθροιστική επίπτωση και θνησιμότητα (ανά 100000) ανά ηλικία και φύλο στην Αθήνα κατά τη διάρκεια του επεισοδίου καύσωνα του 1987 (21-31 Ιουλίου) (Πηγή: Katsouyanni et al., 1988).

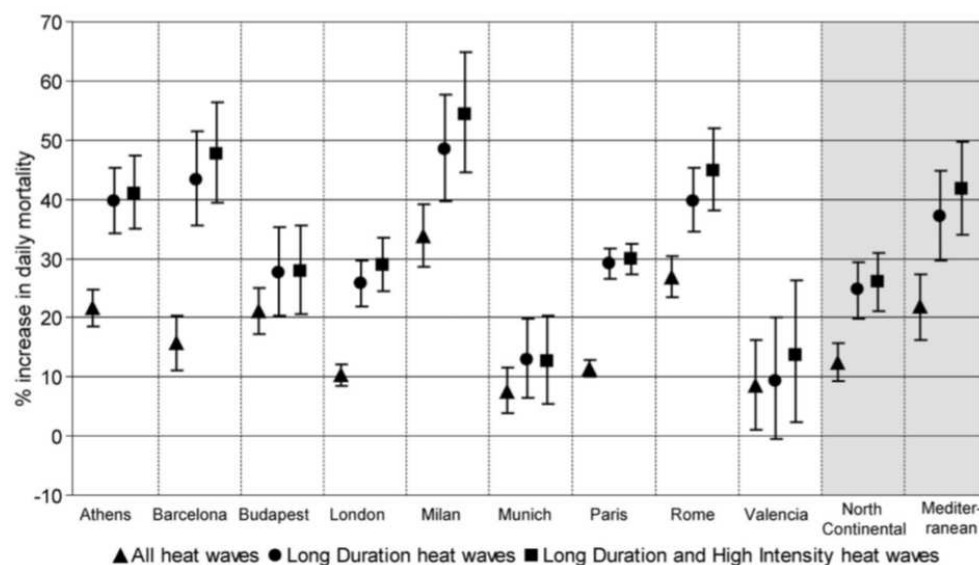
Sex	Age						
	– 39	40–49	50–59	60–69	70–79	80–89	90 +
<i>Incidence</i>							
Male	8	21	51	181	510	2043	3896
Female	4	14	46	173	707	2314	3362
<i>Mortality</i>							
Male	1	4	12	50	169	679	1195
Female	0	2	14	50	226	824	1399

Στα πλαίσια του Ευρωπαϊκού Προγράμματος EuroHEAT (Improving Public Health Responses to extreme weather/heat-waves) διερευνήθηκαν οι επιπτώσεις των επεισοδίων καύσωνα στη θνησιμότητα ανά φύλο, ηλικία και αίτια θανάτου στην Ευρώπη (D'Ippoliti et al., 2010). Η μελέτη επικεντρώθηκε στην ηλικιακή κατηγορία 65+ και η ένταση των επεισοδίων καύσωνα στηρίχθηκε στο θερμικό δείκτη AT (apparent temperature, φαινόμενη θερμοκρασία) κατά τη διάρκεια της καλοκαιρινής περιόδου (Ιούνιος - Αύγουστος). Τα αποτελέσματα υποδεικνύουν στατιστικά σημαντική αύξηση στην ημερήσια θνησιμότητα κατά τη διάρκεια επεισοδίων καύσωνα σε όλες τις Ευρωπαϊκές πόλεις υπό εξέταση. Συγκεκριμένα για την Αθήνα, η αύξηση της ημερήσιας θνησιμότητας ανέρχεται στο 21.6% (90% CI) συνολικά για όλες τις αιτίες θανάτων (Πίνακας A11). Στατιστικά σημαντική αύξηση

της θνησιμότητας παρατηρείται επίσης και ανά αιτία θανάτου (θάνατοι λόγω αναπνευστικών νοσημάτων, καρδιαγγειακών νοσημάτων, εγκεφαλοαγγειακών νοσημάτων), με την αύξηση της ημερήσιας θνησιμότητας για την Αθήνα να είναι μεγαλύτερη για τα αναπνευστικά νοσήματα (34.5%) κατά τη διάρκεια επεισοδίων καύσωνα. Επίσης, οι επιπτώσεις των επεισοδίων καύσωνα στη θνησιμότητα αυξάνεται με την ηλικία.

Πίνακας A11: Επίπτωση των επεισοδίων καύσωνα στην ημερήσια θνησιμότητα (ως % αύξηση και 90% CI) ανά αιτία θανάτου σε άτομα ηλικίας 65+ (Πηγή: D'Ippoliti et al., 2010).

City	All natural deaths		Respiratory deaths		Cardiovascular deaths		Cerebrovascular deaths	
	% increase	(90% CI)	% increase	(90% CI)	% increase	(90% CI)	% increase	(90% CI)
Athens	21.6	(18.5 - 24.8)	34.5	(24.6 - 45.2)	28.4	(24.0 - 33.0)	33.0	(25.9 - 40.4)
Barcelona	15.6	(11.0 - 20.4)	41.3	(26.4 - 57.9)	21.4	(14.0 - 29.4)	25.1	(12.4 - 39.3)
Budapest	21.1	(17.3 - 24.9)	20.6	(2.6 - 41.7)	24.1	(19.3 - 29.1)	24.6	(15.6 - 34.4)
London	10.4	(8.6 - 12.2)	18.0	(13.4 - 22.8)	9.3	(6.6 - 12.1)	10.6	(5.2 - 16.3)
Milan	33.6	(28.5 - 39.0)	92.5	(72.3 - 115.1)	39.2	(31.2 - 47.6)	49.8	(35.6 - 65.6)
Munich	7.6	(3.8 - 11.5)	3.9	(-0.8 - 30.8)	8.2	(2.8 - 13.9)	14.7	(2.4 - 28.6)
Paris	11.4	(10.0 - 12.9)	27.7	(19.4 - 36.6)	12.3	(8.5 - 16.2)	19.7	(12.1 - 27.8)
Rome	26.8	(23.4 - 30.4)	66.9	(51.9 - 83.3)	37.8	(32.5 - 43.3)	48.0	(38.0 - 58.8)
Valencia	8.5	(1.2 - 16.3)	32.4	(9.1 - 60.7)	20.1	(7.9 - 33.6)	1.4	(-17.4 - 24.4)

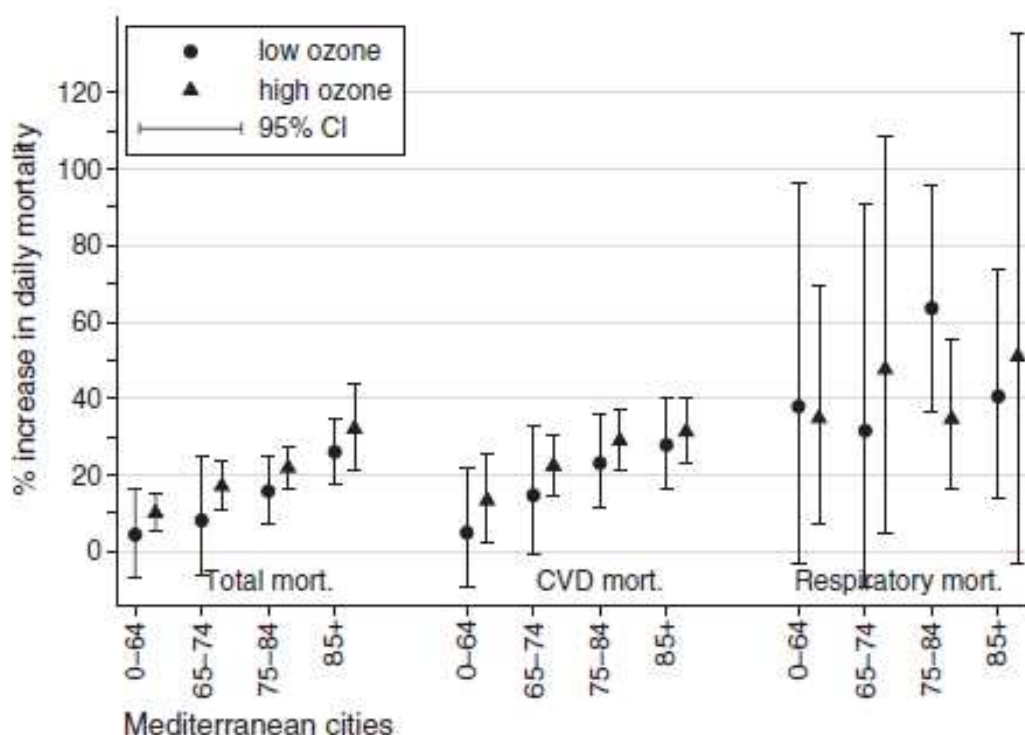


Εικόνα A22: Επίπτωση των επεισοδίων καύσωνα στην ημερήσια θνησιμότητα (ως % αύξηση και 90% CI) ανά διάρκεια και ένταση σε διάφορες Ευρωπαϊκές πόλεις (Πηγή: D'Ippoliti et al., 2010).

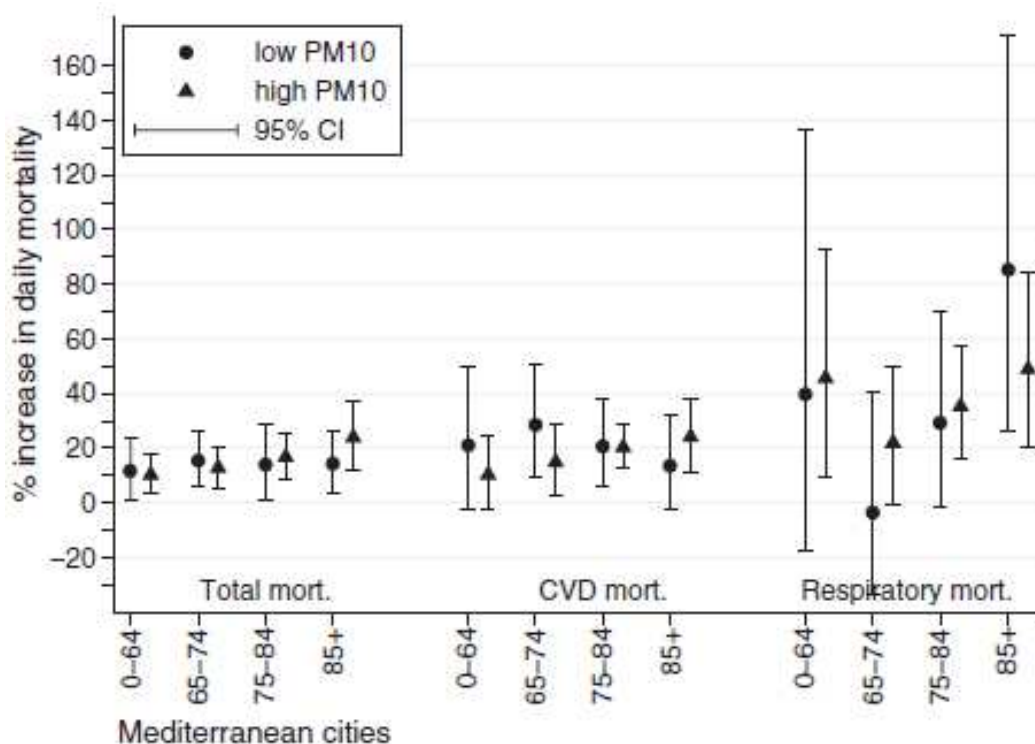
Τα επεισόδια καύσωνα με μεγάλη διάρκεια και ένταση εμφανίζουν μεγαλύτερη επίδραση στην ημερήσια θνησιμότητα, με τη διάρκεια να διαδραματίζει σημαντικότερο ρόλο από την ένταση (Εικόνα A22). Οι επιπτώσεις των επεισοδίων καύσωνα με μεγάλη

διάρκεια στη θνησιμότητα είναι κατά 1.5 έως και 3 φορές μεγαλύτερη από ότι σε καύσωνες με μικρότερη διάρκεια (D'Ippoliti et al., 2010).

Μια άλλη παράμετρος η οποία φαίνεται να διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στη θνησιμότητα κατά τη διάρκεια των επεισοδίων καύσωνα είναι τα επίπεδα της ατμοσφαιρικής ρύπανσης. Τα αποτελέσματα της μελέτης των Analitis et al. (2014), στα πλαίσια του Ευρωπαϊκού Προγράμματος EuroHEAT (Improving Public Health Responses to extreme weather/heat-waves) στο οποίο συμμετείχε και η πόλη της Αθήνας, υποδεικνύουν αύξηση της ημερήσιας θνησιμότητας κατά τη διάρκεια των επεισοδίων καύσωνα κατά 54% τις ημέρες με υψηλά επίπεδα όζοντος σε σύγκριση με τις ημέρες με χαμηλά επίπεδα όζοντος, στην ηλικιακή ομάδα 75-84 (Εικόνα A23). Τις ημέρες επεισοδίων καύσωνα που συνοδεύονται από υψηλά επίπεδα σωματιδιακής ρύπανσης (PM10) η αύξηση είναι 36% και 106% στις ηλικιακές ομάδες 75-84 και 85+, αντίστοιχα, συγκριτικά με τις ημέρες καύσωνα με χαμηλή σωματιδιακή ρύπανση (Εικόνα A24).



Εικόνα A23: Ποσοστό αύξησης της ημερήσιας θνησιμότητας κατά τη διάρκεια επεισοδίων καύσωνα με "χαμηλά" ή "υψηλά" επίπεδα όζοντος ανά αιτία θανάτου και ηλικιακή ομάδα για τις Μεσογειακές πόλεις (Πηγή: Analitis et al., 2014).



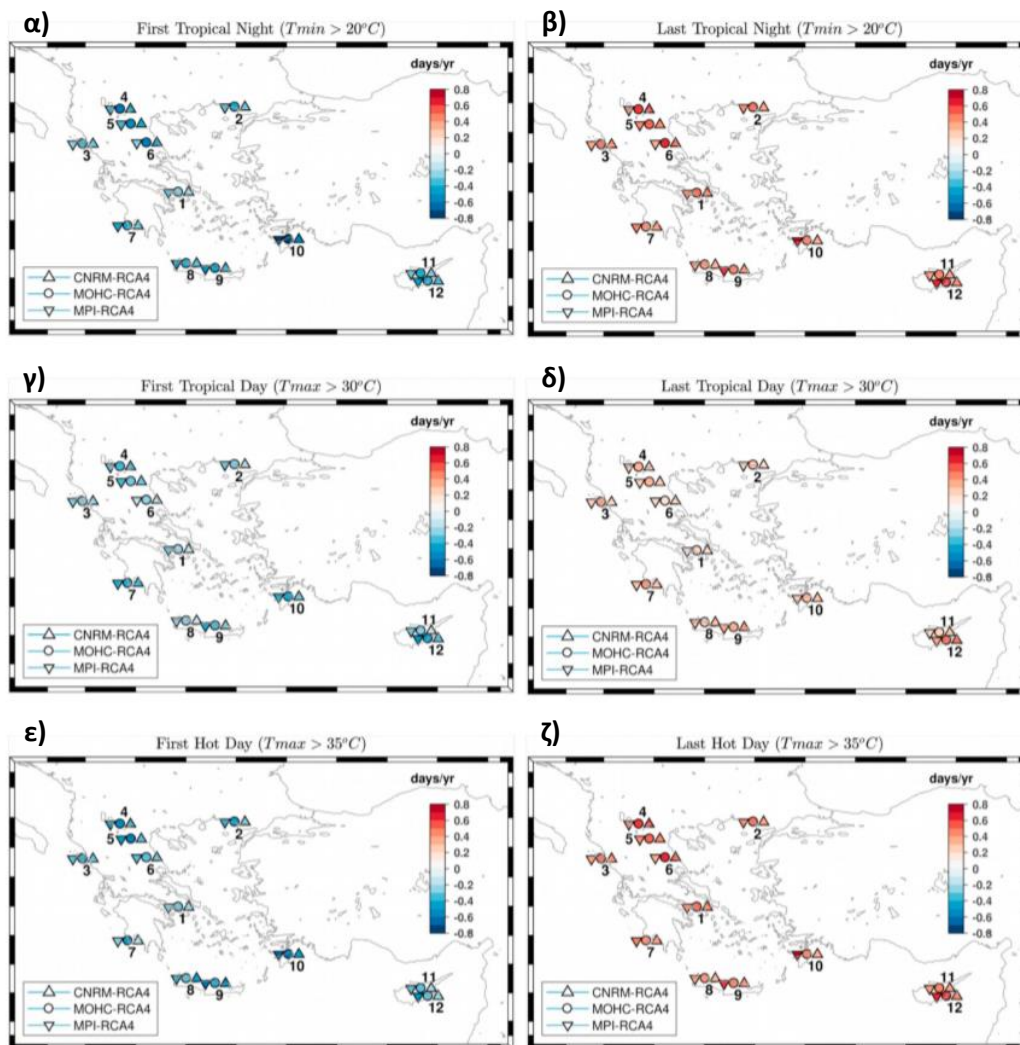
Εικόνα Α24: Ποσοστό αύξησης της ημερήσιας θνησιμότητας κατά τη διάρκεια επεισοδίων καύσωνα με "χαμηλά" ή "υψηλά" επίπεδα σωματιδιακής ρύπανσης (PM10) ανά αιτία θανάτου και ηλικιακή ομάδα για τις Μεσογειακές πόλεις (Πηγή: Analitis et al., 2014).

Α4: Προβολή των επιπέδων δυσφορίας στο μέλλον

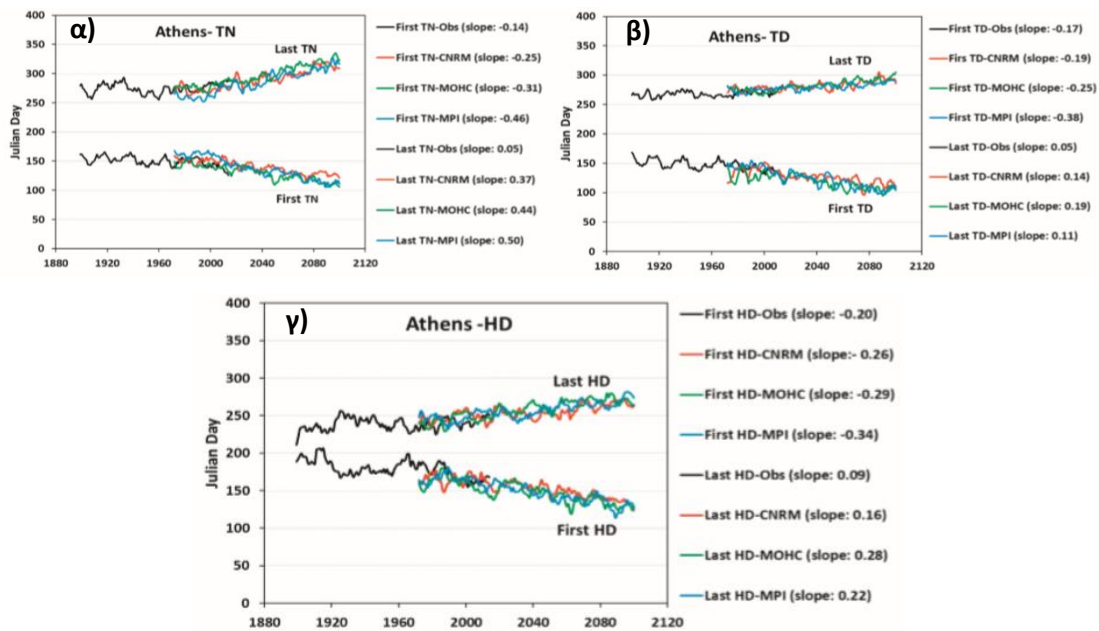
Οι προσομοιώσεις για το μέλλον (1970-2100) υποδεικνύουν μετατόπιση νωρίτερα μέσα στο έτος της πρώτης εμφάνισης τροπικών βραδίων ($T_{\min} > 20^{\circ}\text{C}$), τροπικών ημερών ($T_{\max} > 30^{\circ}\text{C}$) και θερμών ημερών ($T_{\max} > 35^{\circ}\text{C}$) καθώς και αντίστοιχη μετατόπιση αργότερα της τελευταίας εμφάνισης τους, για διάφορες περιοχές στην Ελλάδα αλλά και για την περιοχή της Αθήνας (Εικόνες Α25, Α26) (Founda et al., 2019). Το αποτέλεσμα αυτό υποδεικνύει ότι θα αυξηθεί ο χρόνος έκθεσης του πληθυσμού υπό συνθήκες θερμικής δυσφορίας. Σύμφωνα με τη μελέτη των Katavoutas et al. (2019), η απόλυτη συχνότητα των υπερβάσεων οι οποίες υποδηλώνουν "ζέστη-εξαιρετική προσοχή (hot-extreme caution)" και "μεγάλη δυσφορία (great discomfort)" πρόκειται να αυξηθεί κατά 164% και 171%, αντίστοιχα, στο μακρινό μέλλον (2071-2100) υπό το κλιματικό σενάριο RCP8.5 στην Αθήνα (Εικόνα Α27).

Η μέση τιμή του βιοκλιματικού δείκτη Humidex (HD) κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού στην Αθήνα αναμένεται να αυξηθεί περίπου 2°C στο εγγύς μέλλον (2021-2050) και 5°C στο μακρινό μέλλον (2071-2100) (Keramitsoglou et al., 2017). Με βάση την κλίμακα του δείκτη,

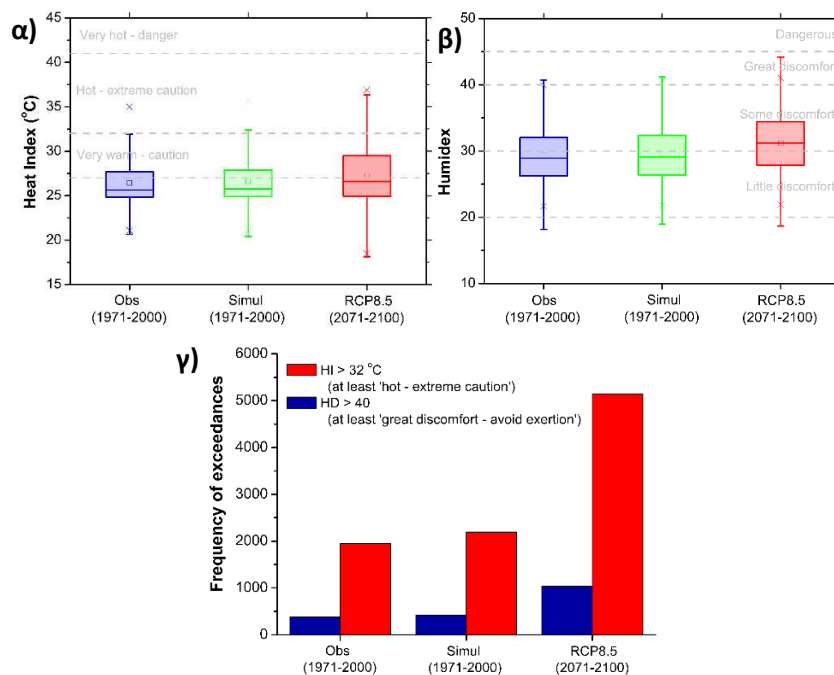
τα επίπεδα τιμών τόσο στο εγγύς όσο και στο μακρινό μέλλον θα υποδηλώνουν “μεγάλη δυσφορία (great discomfort)” για τον πληθυσμό της Αθήνας. Συγκεκριμένα, ο αριθμός συνεχόμενων ημερών με “μεγάλη δυσφορία” αναμένεται να αυξηθεί κατά 12 ημέρες στο εγγύς μέλλον (2021-2050) και κατά 32 ημέρες στο μακρινό μέλλον (2070-2100) (Εικόνα Α28) (Keramitsoglou et al., 2017).



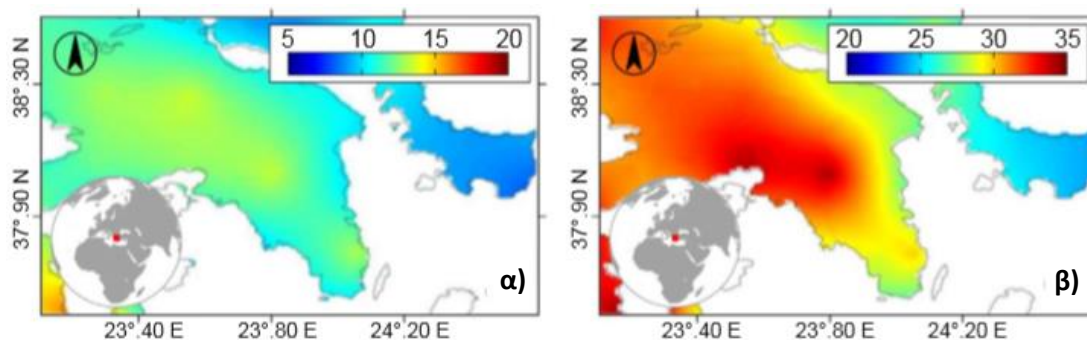
Εικόνα Α25: Προσομοίωση τάσεων για την α) πρώτη και β) τελευταία εμφάνιση τροπικών βραδιών ($T_{min} > 20^{\circ}C$), γ) πρώτη και δ) τελευταία εμφάνιση τροπικών ημερών ($T_{max} > 30^{\circ}C$) και ε) πρώτη και ζ) τελευταία εμφάνιση θερμών ημερών ($T_{max} > 35^{\circ}C$) με βάση τις προσομοιώσεις των μοντέλων CNRM-RCA4, MOHC-RCA4 και MPI-RCA4 για την περίοδο 1970-2100 (Πηγή: Founda et al., 2019).



Εικόνα A26: Χρονική εξέλιξη της πρώτης και τελευταίας εμφάνισης α) τροπικών βραδιών (TN, $T_{\min} > 20^{\circ}\text{C}$), β) τροπικών ημερών (TD, $T_{\max} > 30^{\circ}\text{C}$) και γ) θερμών ημερών (HD, $T_{\max} > 35^{\circ}\text{C}$) από δεδομένα παρατηρήσεων (1896-2017) και προσομοιώσεων για το μέλλον (1970-2100) για την Αθήνα (Πηγή: Founda et al., 2019).

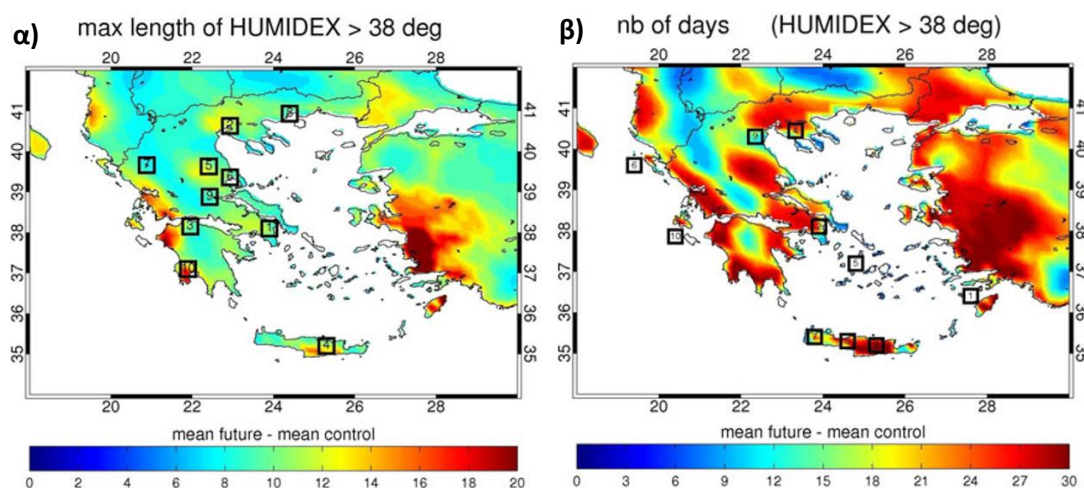


Εικόνα A27: Επίπεδα θερμικής δυσφορίας βάσει των δεικτών α) HI, β) HD καθώς και γ) συχνότητα υπερβάσεων με τουλάχιστον “ζέστη-εξαιρετική προσοχή (hot-extreme caution)” και “μεγάλη δυσφορία (great discomfort)” για την περίοδο αναφοράς (1971-2000, παρατηρήσεις, προσομοιώσεις) και για το μακρινό μέλλον (2071-2100) υπό το κλιματικό σενάριο RCP8.5 στην Αθήνα (Πηγή: Katavoutas et al., 2019).



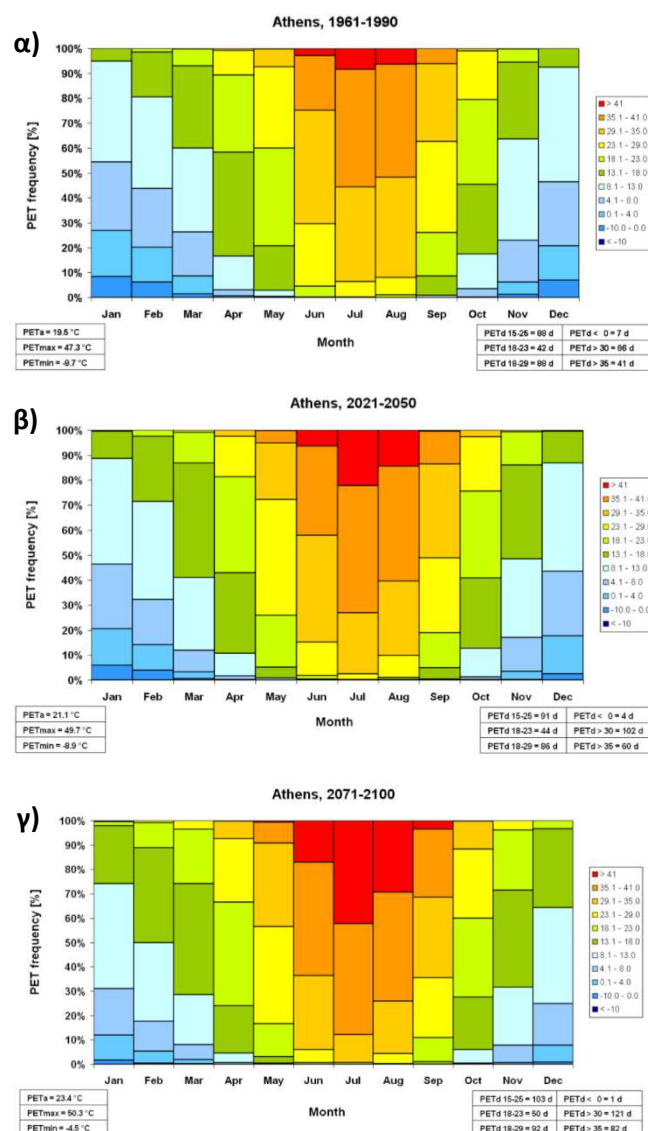
Εικόνα A28: Μεταβολή του αριθμού διαδοχικών ημερών με μεγάλη δυσφορία στην Αθήνα για α) το εγγύς μέλλον 2021-2050 και β) το μακρινό μέλλον 2071-2100 σε σύγκριση με το σημερινό κλίμα (1971-2000) (Πηγή: Keramitsoglou et al., 2017).

Τα επίπεδα θερμικής δυσφορίας αναμένεται να αυξηθούν στις περισσότερες περιοχές της Ελλάδας. Συγκεκριμένα, η μέγιστη διάρκεια ημερών με “μεγάλη δυσφορία (great discomfort)” θα αυξηθεί σε όλες τις περιοχές, τόσο τις παράκτιες όσο και τις νησιωτικές, την περίοδο 2021-2050 (Εικόνα A29) (Giannakopoulos et al., 2011). Στις αστικές περιοχές η αύξηση θα κυμανθεί μεταξύ 10 και 13 ημερών, με εξαίρεση την πόλη της Καλαμάτας στην οποία θα παρατηρηθεί η μεγαλύτερη αύξηση κατά 16 επιπλέον ημέρες. Ο αριθμός ημερών με “μεγάλη δυσφορία (great discomfort)” αναμένεται να αυξηθεί σε όλες τις τουριστικές περιοχές της Ελλάδας. Η υψηλότερη αύξηση κατά 30 (± 6) ημέρες θα παρατηρηθεί στη Ρόδο και στο Ηράκλειο, ενώ η μικρότερη αύξηση κατά 7 (± 2) θα σημειωθεί στα νησιά των Κυκλάδων (Giannakopoulos et al., 2011).



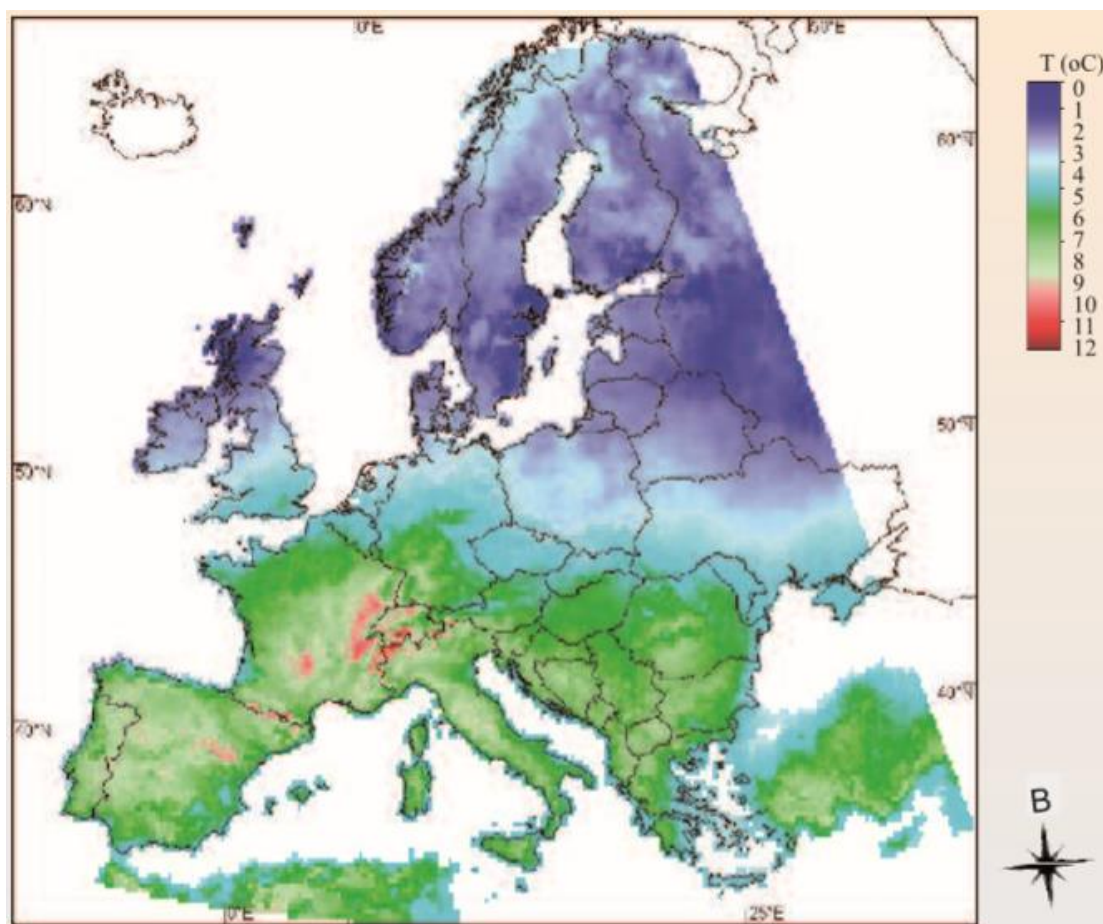
Εικόνα A29: Μεταβολές στην α) μέγιστη διάρκεια ημερών και β) στον αριθμό ημερών με “μεγάλη δυσφορία (great discomfort)” (Humidex > 38 °C) μεταξύ των περιόδων 2021-2050 και 1961-1990 (Πηγή: Giannakopoulos et al., 2011).

Η εφαρμογή του λογικού θερμικού δείκτη PET (Physiologically Equivalent Temperature) στην πόλη της Αθήνας για τις περιόδους 2021-2050 και 2071-2100 αποκαλύπτει μια σημαντική αύξηση της θερμής επιβάρυνσης για τον πληθυσμό σε σχέση με το παρόν κλίμα (Εικόνα A30) (Matzarakis et al., 2014). Συγκεκριμένα, ο αριθμός ημερών με θερμή επιβάρυνση διαμορφώνεται περίπου στις 40 ημέρες στο παρόν κλίμα, οι οποίες παρατηρούνται τους καλοκαιρινούς μήνες (Ιούνιο μέχρι Αύγουστο). Στο εγγύς μέλλον (2021-2050), η ετήσια μέση τιμή του δείκτη PET αναμένεται να αυξηθεί κατά 1.5 °C, ενώ ο αριθμός ημερών με θερμή επιβάρυνση θα αυξηθεί κατά 50%. Οι αλλαγές αυτές θα αυξηθούν περαιτέρω μέχρι τα τέλη του 21ου αιώνα (Matzarakis et al., 2014).



Εικόνα A30: Μηνιαία κατανομή συχνοτήτων του θερμικού δείκτη PET για την Αθήνα για α) την περίοδο αναφοράς (1961-1990), β) το εγγύς μέλλον (2021-2050) και γ) το μακρινό μέλλον (2071-2100) υπό το κλιματικό σενάριο A1B (Πηγή: Matzarakis et al., 2014).

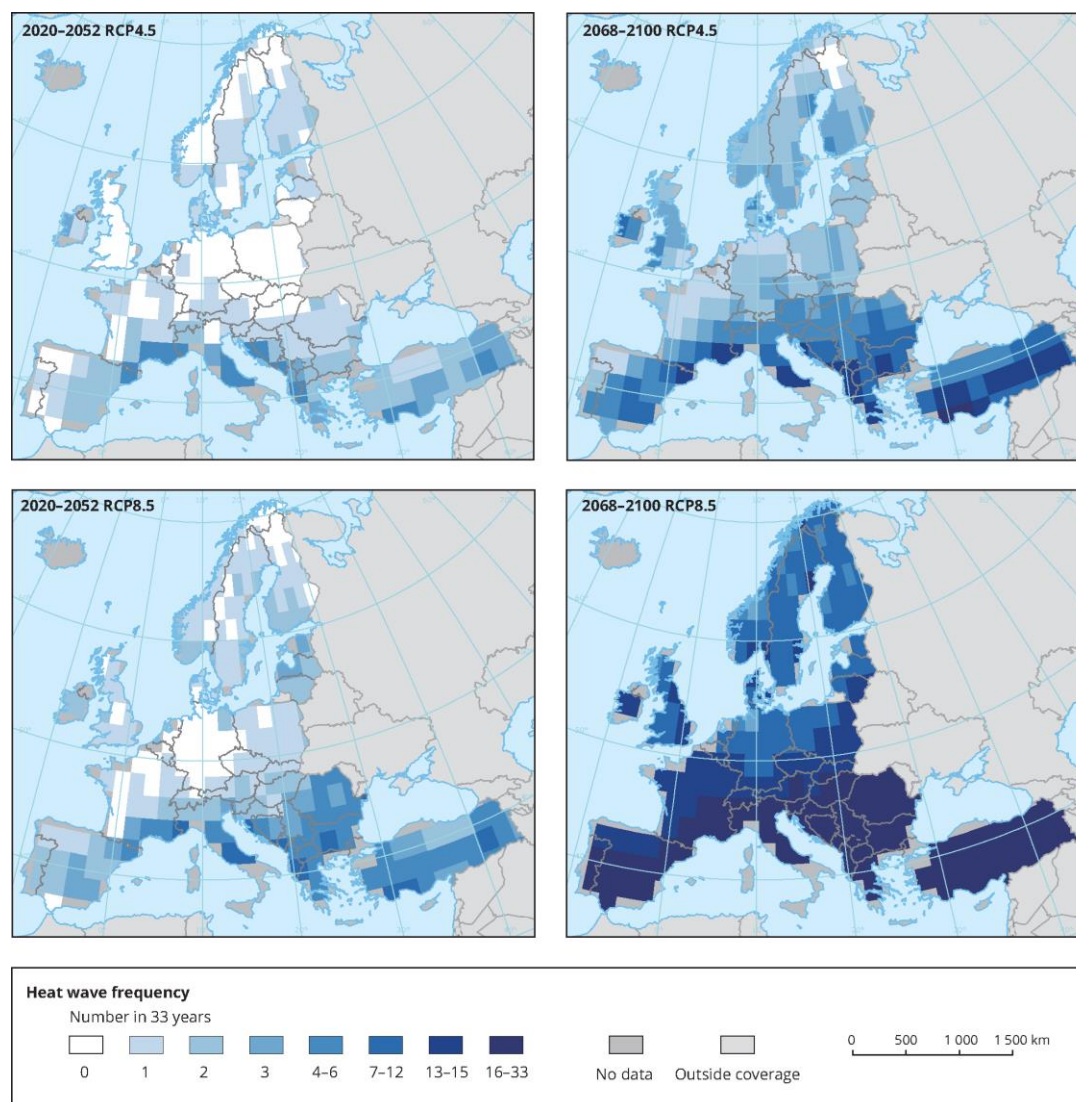
Στον ευρύτερο Ελλαδικό χώρο, ο αριθμός των ημερών με ισχυρή θερμή επιβάρυνση αναμένεται να αυξηθεί την τελευταία δεκαετία του 21^{ου} αιώνα (2091-2100) υπό το κλιματικό σενάριο A1B σε σχέση με την τελευταία δεκαετία του 20^{ου} αιώνα (1991-2000), όπως προκύπτει από την εφαρμογή του θερμοφυσιολογικού δείκτη PET (Εικόνα A31, Ματζαράκης κ.α., 2014). Η παρατηρούμενη αύξηση αναμένεται να υπερβεί τις 30 ημέρες για τις περισσότερες περιοχές της Μεσογείου.



Εικόνα A31: Αποκλίσεις στον αριθμό ημερών με τουλάχιστον ισχυρή θερμή επιβάρυνση ($PET > 35\text{ }^{\circ}\text{C}$) μεταξύ των περιόδων 2091-2100 και 1991-2000 υπό το κλιματικό σενάριο A1B (Πηγή: Ματζαράκης κ.α., 2014).

Λόγω της εξελισσόμενης κλιματικής αλλαγής η οποία λαμβάνει χώρα στον πλανήτη, η συχνότητα εμφάνισης επεισοδίων καύσωνα στο μέλλον αναμένεται να αυξηθεί στις περισσότερες χώρες της Ευρώπης, με την παρατηρούμενη αύξηση να είναι μεγαλύτερη σε περιοχές της Νότιας Ευρώπης και της Μεσογείου (Εικόνα A32, ΕΑΑ, 2019). Η Ελλάδα αναμένεται να επηρεαστεί σε σημαντικό βαθμό τόσο στο εγγύς (2020-2052) όσο και στο απώτερο (2068-2100) μέλλον με βάση και τα δυο σενάρια εκπομπών, RCP4.5 και RCP8.5.

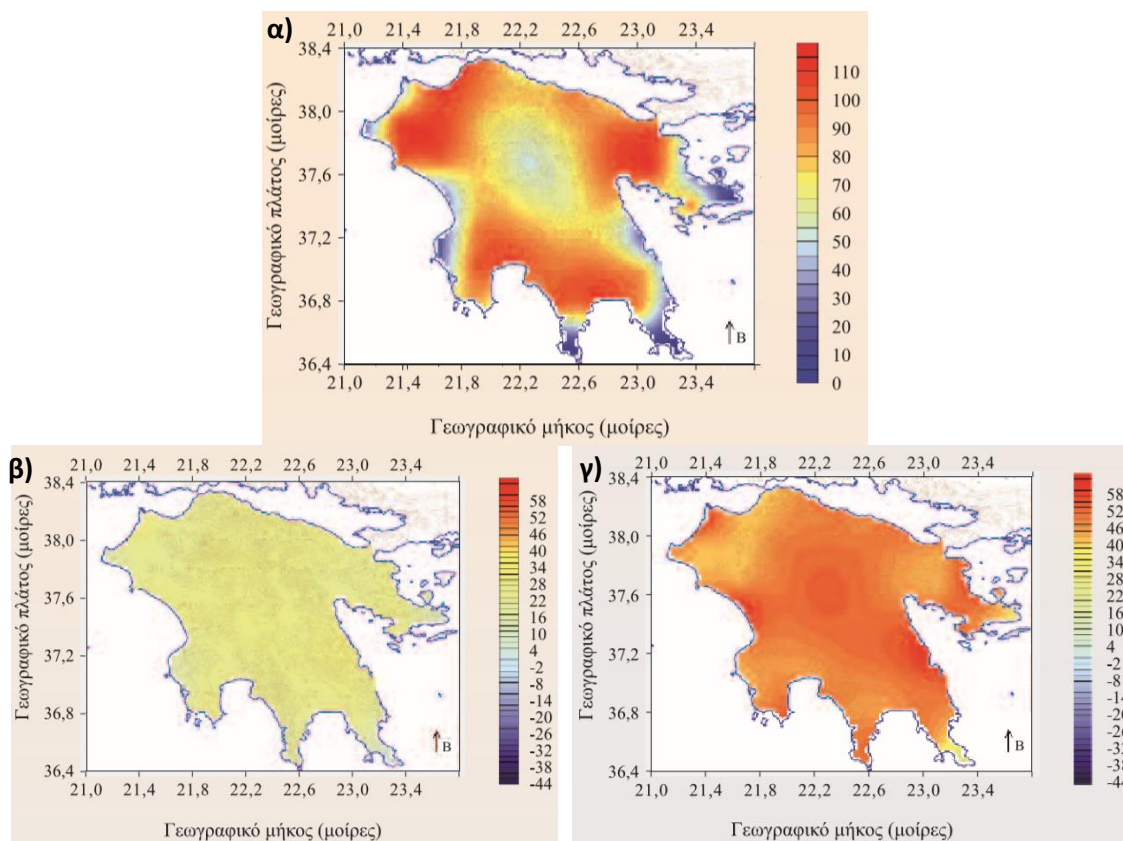
Μια τέτοια αύξηση στη συχνότητα εμφάνισης των επεισοδίων καύσωνα στο μέλλον πιθανότατα να αυξήσει τα περιστατικά εισαγωγής σε νοσοκομεία με συμπτώματα θερμοπληξίας και θερμικής εξάντλησης καθώς και τα επίπεδα θνησιμότητας, σύμφωνα με τα έως τώρα ευρήματα από τις επιπτώσεις ενός επεισοδίου καύσωνα στον πληθυσμό, τα οποία παρουσιάστηκαν στο προηγούμενο υποκεφάλαιο Α3.



Εικόνα Α32: Συχνότητα εμφάνισης επεισοδίων καύσωνα για το εγγύς (2020-2052) και το απώτερο (2068-2100) μέλλον υπό τα σενάρια εκπομπών RCP4.5 και RCP8.5 (ΕΕΑ, 2019).

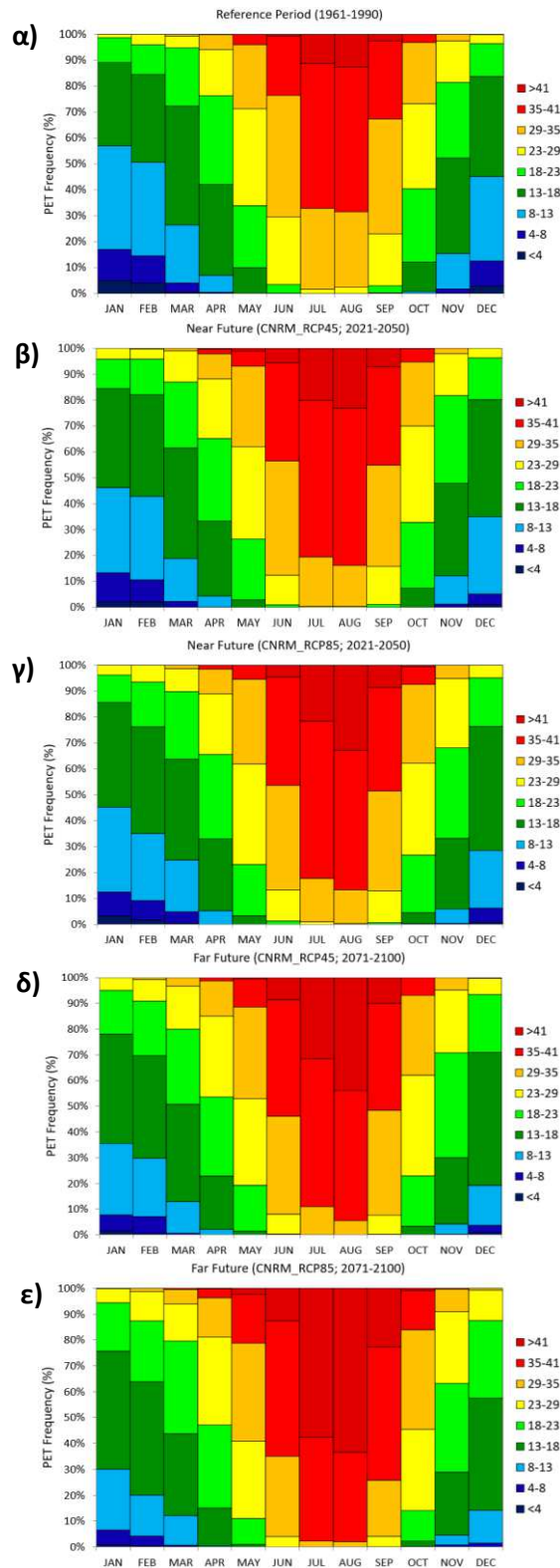
Σύμφωνα με τα αποτελέσματα πρόσφατων μελετών (Nastos et al., 2014, Ματζαράκης κ.α., 2014), στην περιοχή της Πελοποννήσου αναμένεται αύξηση του αριθμού ημερών με ισχυρή θερμή επιβάρυνση μέχρι τα μέσα του 21^{ου} αιώνα, με την αύξηση να είναι μεγαλύτερη στην ενδοχώρα σε σχέση με τις παράκτιες περιοχές λόγω της επίδρασης της θαλάσσιας αύρας κατά τη διάρκεια του θέρους (Εικόνα Α33). Περαιτέρω αύξηση του

αριθμού ημερών με ισχυρή θερμή επιβάρυνση αναμένεται μέχρι τα τέλη του 21^{ου} αιώνα όπου και θα επηρεαστούν οι παράκτιες περιοχές της δυτικής και ανατολικής Πελοποννήσου.



Εικόνα A33: Χωρική κατανομή α) του αριθμού ημερών με PET > 35 °C (ισχυρή θερμή επιβάρυνση) για την περίοδο αναφοράς (1961-1990), β) της μεταβολής του αριθμού ημερών με PET > 35 °C για το εγγύς μέλλον (2031-2050) από την περίοδο αναφοράς και γ) της μεταβολής του αριθμού ημερών με PET > 35 °C για το απώτερο μέλλον (2071-2100) από την περίοδο αναφοράς, υπό το σενάριο εκπομπών A1B (Πηγή: Nastos et al., 2014, Ματζαράκης κ.α., 2014).

Στο νησί της Μήλου, το οποίο αποτελεί ένα σημαντικό τουριστικό προορισμό κατά τους καλοκαιρινούς μήνες, αναμένεται αύξηση του αριθμού ημερών με θερμή επιβάρυνση κατά 21 ημέρες (αύξηση 34%) και μείωση του αριθμού ημερών με ψυχρή επιβάρυνση κατά 5 ημέρες (μείωση 33%) ανά έτος στο εγγύς μέλλον (2021-2050) υπό το σενάριο RCP4.5 (Εικόνα A34β) (Nastos and Matzarakis, 2019). Για την ίδια περίοδο στο μέλλον αλλά βάσει του σεναρίου εκπομπών RCP8.5, η αύξηση στον αριθμό ημερών με θερμή επιβάρυνση αναμένεται μεγαλύτερη και φτάνει τις 24 ημέρες (αύξηση 39%) (Εικόνα A34γ).



Εικόνα Α34: Συχνότητα εμφάνισης του δείκτη PET ανά μήνα στη Μήλο για α) την περίοδο αναφοράς (1961-1990), β) το εγγύς μέλλον (2021-2050) υπό το σενάριο εκπομπών RCP4.5, γ) το εγγύς μέλλον (2021-2050) υπό το σενάριο εκπομπών RCP8.5, δ) το απώτερο μέλλον (2071-2100) υπό το σενάριο εκπομπών RCP4.5 και ε) το απώτερο μέλλον (2071-2100) υπό το σενάριο εκπομπών RCP8.5 (Πηγή: Nastos and Matzarakis, 2019).

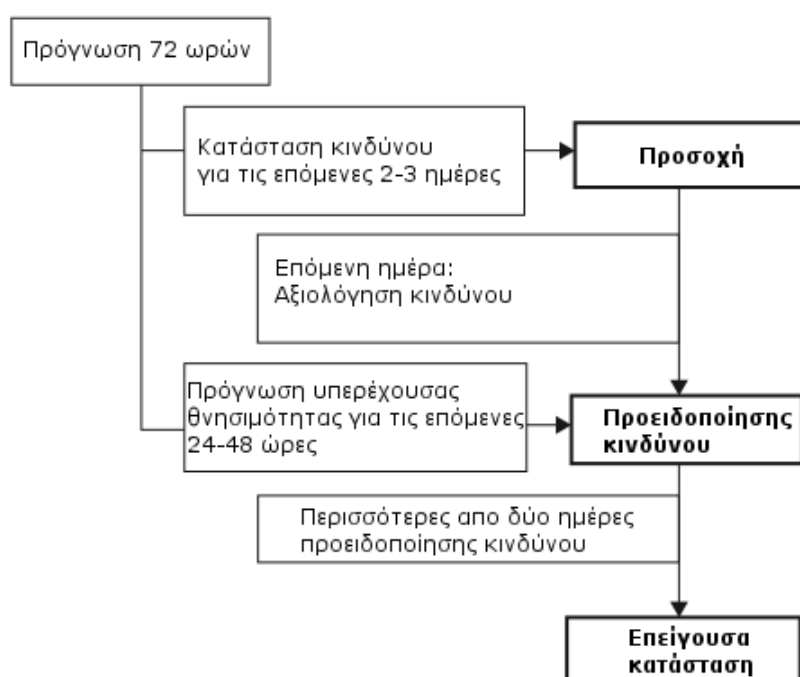
Η μελέτη των Nastos and Matzarakis (2019) αποκαλύπτει επίσης ότι οι μεταβολές στη συχνότητα εμφάνισης του θερμοφυσιολογικού δείκτη PET αναμένεται να είναι μεγαλύτερες μέχρι το τέλος του 21^{ου} αιώνα στη Μήλο. Συγκεκριμένα, στο απώτερο μέλλον (2071-2100), ο αριθμός ημερών με θερμή επιβάρυνση αναμένεται να αυξηθεί κατά 33 ημέρες (αύξηση 54%) υπό το σενάριο RCP4.5 και κατά 54 ημέρες (αύξηση 89%) βάσει του σεναρίου RCP8.5 (Εικόνες A34δ, ε). Παράλληλα με την αύξηση των ημερών με θερμή επιβάρυνση, αναμένεται μείωση των ημερών με ψυχρή επιβάρυνση, η οποία διαμορφώνεται στο 60% (9 ημέρες) και στο 73% (11 ημέρες) με βάση τα σενάρια RCP4.5 και RCP8.5, αντίστοιχα.

A5: Μέτρα πρόληψης

Στα πλαίσια της πρόληψης, για τον μετριασμό της θνησιμότητας, της νοσηρότητας και της δυσφορίας που σχετίζονται με υψηλές θερμοκρασίες περιβάλλοντος, θα πρέπει να αναπτυχθούν και να εφαρμοστούν δράσεις για τη δημόσια υγεία. Τα συστήματα προειδοποίησης για την υγεία θα πρέπει να συνδέουν τις δομές της Δημόσιας Υγείας με την πρόγνωση επικίνδυνων καιρικών φαινομένων (Casanueva et al., 2019, Kovats and Kristie, 2006). Ένα ολοκληρωμένο σύστημα προειδοποίησης απαιτεί:

- αξιόπιστες μετεωρολογικές προβλέψεις για τον πληθυσμό ή την περιοχή ενδιαφέροντος.
- ισχυρή κατανόηση των σχέσεων αιτίας-αποτελέσματος μεταξύ του θερμικού περιβάλλοντος και των επιπτώσεων στην υγεία σε επίπεδο πληθυσμού, συμπεριλαμβανομένης της αναγνώρισης με βάση τα στοιχεία των μετεωρολογικών συνθηκών του “υψηλού κινδύνου”, για την ενεργοποίηση και απενεργοποίηση των κατάλληλων μέτρων.
- αποτελεσματικά μέτρα αντίδρασης που πρέπει να εφαρμοστούν μέσα στο παράθυρο του χρόνου προειδοποίησης (1-3 ημέρες, περίπου).
- συμμετοχή των θεσμικών οργάνων και των φορέων που διαθέτουν επαρκείς πόρους, ικανότητες, γνώσεις και πολιτική βούληση να αναλάβουν ειδικά μέτρα αντιμετώπισης.

Η πλειοψηφία των σύγχρονων συστημάτων προειδοποίησης για επεισόδια καύσωνα που εφαρμόζονται μετά το 2003 έχουν περισσότερα από ένα επίπεδα προειδοποίησης (Εικόνα Α35). Οι διαφορετικές προειδοποιήσεις ξεκινούν στα πλαίσια του κάθε επιπέδου με βάση το επίπεδο εμπιστοσύνης στην πρόγνωση του επεισοδίου καύσωνα ή το μέγεθος του επεισοδίου. Ένα σύστημα ενός επιπέδου θα εκδώσει μια προειδοποίηση όταν το όριο προβλέπεται να ξεπεραστεί μέσα σε λίγες ημέρες. Οι πόλεις στις Η.Π.Α διαθέτουν συστήματα προειδοποίησης δύο ή και τριών επιπέδων. Πολλές πόλεις στην Ευρώπη διαθέτουν σχέδια έκτακτης ανάγκης τα οποία αναπτύσσονται για ακραία επεισόδια καύσωνα (Casanueva et al., 2019, Kovats and Kristie, 2006).



Εικόνα Α35: Παράδειγμα ενός συστήματος προειδοποίησης για επεισόδιο καύσωνα με τρία επίπεδα ειδοποίησης, Προσοχή (attention), Προειδοποίησης κινδύνου (alarm), Επείγουσα κατάσταση (emergency) (Πηγή: Kovats and Kristie, 2006).

Στις Η.Π.Α αλλά και στην Ευρώπη εφαρμόζονται μια σειρά από δράσεις για την προστασία της δημόσιας υγείας κατά τη διάρκεια επεισοδίων καύσωνα, με το επίπεδο υλοποίησης της κάθε δράσης να διαφοροποιείται (Πίνακας Α12) (Casanueva et al., 2019, Kovats and Kristie, 2006).

Πίνακας A12: Μέτρα προστασίας στις Η.Π.Α και στην Ευρώπη κατά τη διάρκεια επεισοδίων καύσωνα. Βαθμός υλοποίησης, (+) σπάνια εφαρμόζεται, (++) συχνά εφαρμόζεται, (+++) πολύ συχνά εφαρμόζεται (Konats and Kristie, 2006).

Μέτρα	Βαθμός υλοποίησης	Σχόλια
Ανακοινώσεις στα μέσα μαζικής ενημέρωσης	+++	Παρέχονται γενικές πληροφορίες για την αποφυγή θερμικής επιβάρυνσης στο ευρύ κοινό
Δελτία τύπου ή ιστοσελίδες	+++	Πιθανή περιορισμένη πρόσβαση, σε σχετικούς επαγγελματίες ή πρόσβαση σε οποιονδήποτε
Ενημερωτικά φυλλάδια	++	Γενικές οδηγίες, και οδηγίες σε διευθυντές νοσηλευτών. Συχνά διανέμονται στις αρχές του καλοκαιριού μέσω των κέντρων υγείας και σε χώρους συνάθροισης ευάλωτων ομάδων του πληθυσμού
Τηλεφωνική γραμμή βοήθειας	++	Είτε λειτουργία μιας ειδικής τηλεφωνικής υπηρεσίας ή ενθάρρυνση του πληθυσμού για επικοινωνία μέσω μιας ήδη προ υπάρχουσας τηλεφωνικής υπηρεσίας για την παροχή συμβουλών υγείας
Άνοιγμα κλιματιζόμενων χώρων για το κοινό	++	Υπάρχουν ενδείξεις ότι τέτοιοι χώροι συχνά δεν χρησιμοποιούνται από άτομα υψηλού κινδύνου, αλλά από άτομα χαμηλού κινδύνου
Νοσοκομεία σε επίπεδο συναγερμού	+	Εφαρμόζεται για τη βελτίωση της επιχειρησιακής ετοιμότητας (π.χ., εάν χρειάζεται να αναπτυχθεί επιπλέον προσωπικό). Πρέπει να βασίζεται σε τοπικές πληροφορίες και να αξιολογείται προσεκτικά
Επίσκεψη στις οικίες ατόμων που ανήκουν σε ευάλωτες ομάδες του πληθυσμού	+	Σημαντικό μέτρο αλλά συνήθως ακριβό. Χρησιμοποιήστε ήδη υπάρχοντα δίκτυα εθελοντών ή επαγγελματιών (π.χ. κοινωνικοί λειτουργοί). Απαιτεί μητρώο ευάλωτων ομάδων του πληθυσμού
Μεταφορά ευπαθών ατόμων από τις οικίες τους σε κλιματιζόμενους χώρους	+	Χρησιμοποιώντας ένα μητρώο ευάλωτων ομάδων του πληθυσμού,

		ειδικοί επαγγελματίες επισκέπτονται ευπαθείς ομάδες στις οικίες τους και εάν κριθεί απαραίτητο τους μεταφέρουν
Εγρήγορση για τους άστεγους	+	Ομάδα υψηλού κινδύνου (π.χ., στις νότιες ΗΠΑ 11 άστεγοι πέθαναν στο κύμα καύσωνα στο Φοίνιξ, Ιούλιος 2005)
Οι εταιρείες παροχής ηλεκτρικού ρεύματος να παύσουν τις διακοπές σε άτομα που δεν έχουν πληρώσει	+++	Οι επιχειρήσεις κοινής ωφέλειας έχουν ξεκινήσει και υποστηρίζουν οικονομικά τα συστήματα παρακολούθησης/προειδοποίησης επικίνδυνων καιρικών φαινομένων (π.χ., στις ΗΠΑ). Ιδιαίτερα σε χώρες όπου ο πληθυσμός βασίζεται στον κλιματισμό (όπως στις ΗΠΑ)
Οι εταιρείες παροχής νερού να παύσουν τις διακοπές σε άτομα που δεν έχουν πληρώσει	+	-
Διανομή ανεμιστήρων	++	Οι ανεμιστήρες είναι αποτελεσματικοί, αλλά όχι όταν η θερμοκρασία του αέρα είναι υψηλότερη από 37 °C

Βιβλιογραφία

ACGIH 2004, “TLVs and BELs. Threshold limit values for chemical substances and physical agents and biological exposure indices”, ACGIH Signature Publications, Cincinnati, pp. 168-176.

Analitis, A., Michelozzi, P., D’Ippoliti, D., de’Donato, F., Menne, B., Matthies, F., ... & Lefranc, A. 2014, “Effects of heat waves on mortality: effect modification and confounding by air pollutants”, Epidemiology, vol. 25, pp. 15-22.

ASHRAE-55 2013, “Thermal environmental conditions for human occupancy”, American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers, Atlanta, USA.

Baccini, M., Biggeri, A., Accetta, G., Kosatsky, T., Katsouyanni, K., Analitis, A., ... & Forsberg, B. 2008, "Heat effects on mortality in 15 European cities", *Epidemiology*, vol. 19, pp. 711-719.

Bartzokas, A., Lolis, C.J., Kassomenos, P.A. & McGregor, G.R. 2013, "Climatic characteristics of summer human thermal discomfort in Athens and its connection to atmospheric circulation", *Nat. Hazards Earth. Syst. Sci.*, vol. 13, pp. 3271–3279.

Belding, H.S. & Hatch, T.F. 1955, "Index for evaluating heat stress in terms of resulting physiological strain", *Heat Pip. Air Cond.*, vol. 27, pp. 129-136.

Błażejczyk, K. 1994, "New climatological-and-physiological model of the human heat balance outdoor (MENEX) and its applications in bioclimatological studies in different scales". In: Błażejczyk K., Krawczyk B. (Eds), *Bioclimatic research of the human heat balance*, Zestyty IGIPZ PAN, pp. 27-58.

Błażejczyk, K., 2001, "Assessment of recreational potential of bioclimate based on the human heat balance". In: Matzarakis A., de Freitas C.R. (Eds), *Proceedings of the first International Workshop on climate, tourism and recreation*, International Society of Biometeorology, Commission on Climate Tourism and Recreation, pp. 133-152.

Błażejczyk, K., 2005, "New Indices to Assess Thermal Risk Outdoors". In: Holmér I., Kuklane K., Gao Ch. (Eds), *Environmental Ergonomics XI*, *Proceedings of the 11th International Conference*, pp. 222-225.

Błażejczyk, K., 2006: MENEX_2005-the revised version of Man-Environment Heat Exchange Model. <http://www.igipz.pan.pl/geoekoklimat/blaz/menex>

Bröde, P., Fiala, D., Błażejczyk, K., Holmér, I., Jendritzky, G., Kampmann, B., Tinz, B., Havenith, G. 2012, "Deriving the operational procedure for the Universal Thermal Climate Index (UTCI)", *Int. J. Biometeorol.*, vol. 56, pp. 481–494.

Brown, R., & Gillespie, T. 1986, "Estimating outdoor thermal comfort using a cylindrical radiation thermo-meter and an energy budget model", *Int. J. Biometeorol.*, vol. 30, pp. 43-52.

Casanueva, A., Burgstall, A., Kotlarski, S., Messeri, A., Morabito, M., Flouris, A.D., Nybo, L., Spirig, C. & Schwierz, C., 2019, "Overview of existing heat-health warning systems in Europe". *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 16, no. 2657.

de'Donato, F., Leone, M., Scortichini, M., De Sario, M., Katsouyanni, K., Lanki, T., ... & Pascal, M. 2015, "Changes in the effect of heat on mortality in the last 20 years in nine European cities. Results from the PHASE project". *International journal of environmental research and public health*, vol. 12, pp. 15567-15583.

De Freitas, C.R., Grigorieva, E.A. 2015, "A comprehensive catalogue and classification of human thermal climate indices", *Int. J. Biometeorol.*, vol. 59, pp. 109-120.

De Freitas, C.R., Grigorieva, E.A. 2017, "A comparison and appraisal of a comprehensive range of human thermal climate indices", *Int. J. Biometeorol.*, vol. 61, pp. 487-512.

D'Ippoliti, D., Michelozzi, P., Marino, C., De'Donato, F., Menne, B., Katsouyanni, K., ... & Atkinson, R. 2010, "The impact of heat waves on mortality in 9 European cities: results from the EuroHEAT project", *Environmental Health*, vol. 9, no. 37.

EEA, 2019, "Number of extreme heat waves in future climates under two different climate forcing scenarios", European Environment Agency, <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/figures/number-of-extreme-heat-waves-1>

Epstein, Y. & Moran, D.S. 2006, "Thermal comfort and the heat stress indices". *Ind. Health*, vol. 44, pp. 388-398.

Fanger, P.O. 1972, "Thermal comfort". McGraw Hill, New York, pp. 244.

Fiala, D., Lomas, K.J. & Stohrer, M. 2001, "Computer prediction of human thermoregulatory and temperature responses to a wide range of environmental conditions", *Int. J. Biometeorol.*, vol. 45, pp. 143-159.

Fiala, D., Havenith, G., Bröde, P., Kampmann, B., Jendritzky, G. 2012, "UTCI-Fiala multi-node model of human heat transfer and temperature regulation". *Int. J. Biometeorol.* vol. 56, pp. 429–441.

Founda, D., Varotsos, K. V., Pierros, F. & Giannakopoulos, C. 2019, "Observed and projected shifts in hot extremes' season in the Eastern Mediterranean", *Global and Planetary Change*, vol. 175, pp. 190-200.

Fountoulakis, K. N., Savopoulos, C., Zannis, P., Apostolopoulou, M., Fountoukidis, I., Kakaletsis, N., ... & Pompili, M. 2016, Climate change but not unemployment explains the changing suicidality in Thessaloniki Greece (2000–2012)", *Journal of Affective Disorders*, vol. 193, pp. 331-338.

Gagge, A.P., Stolwijk, J.A.J. & Nishi, Y. 1971, "An effective temperature scale based on a simple model of human physiological regulatory response", *ASHRAE Trans.*, vol. 77, pp. 247-257.

Gagge, A.P., Fobelets, A.P. & Berglund, L.G. 1986, "A standard predictive index of human response to the thermal environment", *ASHRAE Trans.*, vol. 92, pp. 709-731.

Giannakopoulos, C., Kostopoulou, E., Varotsos, K.V., Tziotziou, K. & Plitharas, A., 2011, "An integrated assessment of climate change impacts for Greece in the near future", *Regional Environmental Change*, vol. 11, pp. 829-843.

Höppe, P.R. 1984 "Die Energiebilanz des Menschen", *Wiss. Mitt. Meteorol. Inst. Univ. München*, vol. 49, no. 201.

Höppe, P.R. 1993, "Heat balance modelling", *Experientia*, vol. 49, pp. 741-746.

Höppe, P., 1999, "The physiological equivalent temperature-a universal index for the biometeorological assessment of the thermal environment", *Int. J. Biometeorol.*, vol. 43, pp. 71-75.

Huizenga, C., Hui, Z. & Arens, E. 2001, "A model of human physiology and comfort for assessing complex thermal environments", *Build. Environ.*, vol. 36, pp. 691-699.

Jendritzky, G., Sönning, W. & Swantes, H.J. 1979, "Ein objektives Bewertungsverfahren zur Beschreibung des thermischen Milieus in der Stadt- und Landschaftsplanung (Klima-Michel-Modell)", *Beiträge der Akademie für Raumforschung und Landesplanung*, 28. Hermann Schroedel, Hannover.

Jendritzky, G., Menz, G., Schmidt-Kessen, W. & Schirmer, H. 1990, "Methodik zur räumlichen Bewertung der thermischen Komponente im Bioklima des Menschen", *Akademie für Raumforschung und Landesplanung*, Hannover.

Jendritzky, G., deDear, R. & Havenith, G. 2012, "UTCI—why another thermal index?", *Int. J. Biometeorol.*, vol. 56, pp. 421–428.

Katavoutas, G. & Founda, D. 2019, "Intensification of thermal risk in Mediterranean climates: evidence from the comparison of rational and simple indices", *Int. J. Biometeorol.*, vol. 63, pp. 1251-1264.

Katavoutas, G., Founda, D., Varotsos, K.V. & Giannakopoulos, C. 2019, "Observed and projected trends in urban thermal risk at a large Mediterranean city based on bioclimatic indices - A case study for Athens (Greece)". In: *Geophysical Research Abstracts of the European Geosciences Union (EGU)*, Vienna, 7-12 April 2019, Austria, vol. 21, EGU2019-13899.

Katsouyanni, K., Trichopoulos, D., Zavitsanos, X., & Touloumi, G. 1988, "The 1987 Athens heatwave", *The Lancet*, vol. 332, no. 573.

Katsouyanni, K., Pantazopoulou, A., Touloumi, G., Tselepidaki, I., Moustris, K., Asimakopoulos, D., ... & Trichopoulos, D. 1993, "Evidence for interaction between air

pollution and high temperature in the causation of excess mortality". *Archives of Environmental Health: An International Journal*, vol. 48, pp. 235-242.

Kenny, N.A., Warland, J.S., Brown, R.D. & Gillespie, T.J. 2009a, "Part A: Assessing the performance of the COMFA outdoor thermal comfort model on subjects performing physical activity", *Int. J. Biometeorol.*, vol. 53, pp. 415–428.

Kenny, N.A., Warland, J.S., Brown, R.D. & Gillespie, T.J. 2009b, "Part B: Revisions to the COMFA outdoor thermal comfort model for application to subjects performing physical activity", *Int. J. Biometeorol.*, vol. 53, pp. 429–441.

Keramitsoglou, I., Sismanidis, P., Analitis, A., Butler, T., Founda, D., Giannakopoulos, C., Giannatou, E., Karali, A., Katsouyanni, K., Kendrovski, V. & Lemesios, G., 2017, "Urban thermal risk reduction: Developing and implementing spatially explicit services for resilient cities", *Sustainable Cities and Society*, vol. 34, pp. 56-68.

Kouis, P., Kakkoura, M., Ziogas, K., Paschalidou, A. K., & Papatheodorou, S. I. 2019, "The effect of ambient air temperature on cardiovascular and respiratory mortality in Thessaloniki, Greece", *Science of the Total Environment*, vol. 647, pp. 1351-1358.

Kovats, R.S. & Kristie, L.E. 2006, "Heatwaves and public health in Europe", *European Journal of Public Health*, vol. 16, pp. 592-599.

Knez, I., Thorsson, S., Eliasson, I. & Lindberg, F. 2009, "Psychological mechanisms in outdoor place and weather assessment: towards a conceptual model", *Int. J. Biometeorol.*, vol. 53, pp. 101-111.

Lam, C.K.C., Gallant, A.J., Tapper, N.J. 2018, "Perceptions of thermal comfort in heatwave and non-heatwave conditions in Melbourne, Australia", *Urban Clim.*, vol. 23, pp. 204-218.

Masterton, J.M. & Richardson, F.A. 1979, "Humidex - A method of quantifying human discomfort due to excessive heat and humidity", *Atmospheric Environment Service of Canada*, CLI 1-79, pp. 1-45.

Matzarakis, A., Endler, C., & Nastos, P. T. 2014, "Quantification of climate-tourism potential for Athens, Greece—recent and future climate simulations", *Global NEST Journal*, vol. 16, pp. 43-51.

Mayer, E. 1993, "Objective criteria for thermal comfort", *Build. Environ.*, vol. 28, pp. 399-403.

Mayer, H. & Höppe, P. 1987, "Thermal comfort of man in different urban environments", *Theor. Appl. Climatol.*, vol. 38, pp. 43-49.

McGregor, G.R., Vanos, J.K. 2018, "Heat: a primer for public health researchers", *Public Health*, vol. 161, pp. 138–146.

Michelozzi, P., Kirchmayer, U., Katsouyanni, K., et al. 2007, "Assessment and prevention of acute health effects of weather conditions in Europe, the PHEWE project: background, objectives, design", *Environ Health.*, vol. 6, no. 12.

Nastos, P.T., & Matzarakis, A. 2006, Weather impacts on respiratory infections in Athens, Greece", *International Journal of Biometeorology*, vol. 50, pp. 358-369.

Nastos, P.T., & Matzarakis, A. 2012, "The effect of air temperature and human thermal indices on mortality in Athens, Greece", *Theoretical and Applied Climatology*, vol. 108, pp. 591-599.

Nastos, P.T., & Matzarakis, A. 2019, "Present and Future Climate—Tourism Conditions in Milos Island, Greece", *Atmosphere*, vol. 10, no. 145.

Nastos, P.T., Giaouzaki, K.N., Kampanis, N.A., & Matzarakis, A. 2013, "Acute coronary syndromes related to bio-climate in a Mediterranean area. The case of Ierapetra, Crete Island, Greece", *International Journal of Environmental Health Research*, vol. 23, pp. 76-90.

Nastos, P.T., Kapsomenakis, I., Giannakopoulos, C., Matzarakis, A., & Zerefos, C.S. 2014, "Present and future projections of human-bioclimatic conditions over Peloponnese, based on regional climate model simulations", In *E-Book of Proceedings, 12th International*

Conference of Meteorology, Climatology and Physics of the Atmosphere, Heraklion, Greece, pp. 28-31.

Nikolopoulou, M. 2011, "1. Abstract 2. Introduction 3. Approaches to outdoor thermal comfort 3.1. The physiological approach 3.2. Field studies 4. Thermal sensation and comfort 4.1. Neutral temperatures", *Frontiers in Bioscience*, vol. 3, pp. 1552-1568.

Nikolopoulou, M. & Steemers, K. 2003, "Thermal comfort and psychological adaptation as a guide for designing urban spaces", *Energ. Buildings*, vol. 35, pp. 95-101.

Nikolopoulou, M. & Lykoudis, S. 2006, "Thermal comfort in outdoor urban spaces: analysis across different European countries", *Building and Environment*, vol. 41, pp. 1455-1470.

Pantavou, K., Theoharatos, G., Nikolopoulos, G., Katavoutas, G. & Asimakopoulos, D. 2008, "Evaluation of thermal discomfort in Athens territory and its effect on the daily number of recorded patients at hospitals' emergency rooms". *International Journal of Biometeorology*, vol. 52, pp. 773-778.

Pantavou, K., Theoharatos, G., Mavrakakis, A. & Santamouris, M. 2011, "Evaluating thermal comfort conditions and health responses during an extremely hot summer in Athens", *Build. Environ.*, vol. 46, pp. 339-344.

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*, vol. 9, no. 606.

Pickup, J. & de Dear, R. 2000, "An outdoor thermal comfort index (OUT_SET*)-Part I-the model and its assumptions". In: de Dear R.J., Kalma J.D., Oke T.R., Auliciems A. (Eds), *Biometeorology and urban climatology at the turn of the millennium*, WCASP-50, WMO/TD No. 1026, pp. 279-283.

Scortichini, M., de'Donato, F., De Sario, M., Leone, M., Åström, C., Ballester, F., ... & Lanki, T. 2018, "The inter-annual variability of heat-related mortality in nine European cities (1990–2010)", *Environmental Health*, vol. 17, no. 66.

Stolwijk, J.A.J., 1971, "A mathematical model of physiological temperature regulation in man", NASA contractor report CR-1855. NASA, Washington DC.

Theoharatos, G., Pantavou, K., Mavrakis, A., Spanou, A., Katavoutas, G., Efstathiou, P., Mpekas, P. & Asimakopoulos, D. 2010, "Heat waves observed in 2007 in Athens, Greece: synoptic conditions, bioclimatological assessment, air quality levels and health effects", *Environ. Res.*, vol. 110, pp. 152-161.

Thom, E.C., 1959, "The discomfort Index", *Weatherwise*, vol. 12, pp. 57-60.

Wenger, C.B., 2002, "Human adaptation to hot environments". In: Pandolf K.B., Burr R.E., Wenger C.B., Pozos R.S. (Eds), *Textbook of military medicine: Medical aspects of harsh environments*, Department of the Army, Office of the Surgeon General, Borden Institute, vol. 1, pp. 51-86.

Yaglou, C.P. 1927, "Temperature, humidity and air movement in industries. The Effective Temperature Index", *J. Ind. Hyg.*, vol. 9, no. 297.

Yaglou, C.P. & Minard, D. 1957, "Control of heat casualties at military training center", *Am. Med. Ass. Arch. Ind. Health*, vol. 16, pp. 302-316.

Yousef, M.K., 1987, "Effects of climatic stresses on thermoregulatory processes in man", *Experientia*, vol. 43, pp. 14-19.

Zoumakis, M., Kassomenos, P., Zoumakis, N., Papadakis, N., Vosniakos, F., ... & Kozyraki, T. 2011, "Human Discomfort due to environmental conditions in Urban Thessaloniki, Greece. Part V. Adaptation to the local climate (preliminary results)", *Journal of Environmental Protection and Ecology*, vol. 12, pp. 921-929.

Zoumakis, M., Papadakis, N., Benos, A., Zoumakis, N., Efstathiou, G., Staliopoulou, M., et al. 2012, "Mortality and bioclimatic discomfort in the municipality of Thessaloniki, Greece". *Protection and restoration of the environment XI Conference*, pp. 1771–1784.

Zoumakis, M., Papadakis, N., Benos, A., Zoumakis, N., Prevezanos, M., Vosniakos, F., et al. 2013, "Heat-related mortality in the municipality of Thessaloniki during the period from 1945 to 2012". J. Environ. Prot. Ecol., vol. 14, pp. 1140–1147.

Ματζαράκης, Α., Νάστος, Π., Ζερεφός, Χ. & Καψωμενάκης, Ι. 2014, "Τουριστική κλιματολογία", Εντός: "Ελληνικός τουρισμός και κλιματική αλλαγή: Πολιτικές προσαρμογής και νέα στρατηγική ανάπτυξης", Τεχνική Έκθεση, Τράπεζα της Ελλάδος, σελ. 71-88.

Κεφάλαιο Β

Η επίδραση της κλιματικής αλλαγής σε ασθένειες που σχετίζονται με κουνούπια φορείς

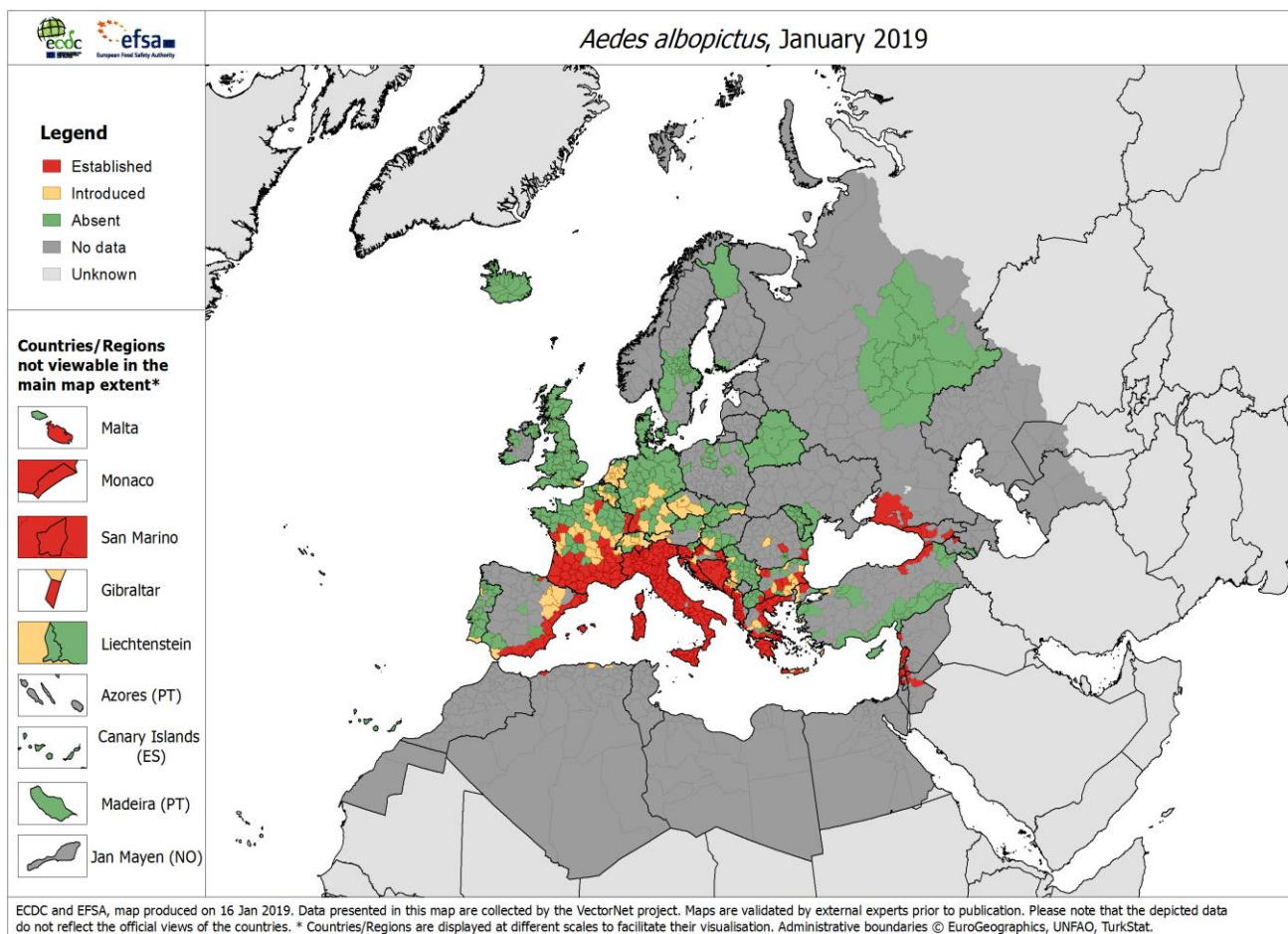
B1: Κουνούπια εισβολείς στην Ελλάδα και την Ευρώπη

Τα κουνούπια ανήκουν στην τάξη των δίπτερων εντόμων. Είναι αιμομυζητικά έντομα που ενοχλούν όχι μόνο τον άνθρωπο αλλά και τα ζώα και τα πτηνά. Μέχρι σήμερα έχουν καταγραφεί 3450 είδη κουνουπιών στον κόσμο και στην Ελλάδα περισσότερα από 50 είδη. Η Ελλάδα είναι μια χώρα που το γεωμορφολογικό της περιβάλλον και οι μικροκλιματικές συνθήκες ευνοούν την ανάπτυξη πληθυσμών μιας πληθώρας ειδών κουνουπιών. Σε όλη τη χώρα σχεδόν, υπάρχουν πολλές τυπικές εστίες αναπαραγωγής κουνουπιών, όπως είναι οι ορυζώνες, τα παραθαλάσσια έλη, τα ποτάμια, οι λίμνες, τα αποστραγγιστικά – αρδευτικά κανάλια, τα δέλτα των ποταμών κ.α. Επίσης, στην Ελλάδα υπάρχει έλλειψη αποχετευτικού δικτύου σε πολλές επαρχίες, γεγονός που έχει ως αποτέλεσμα την ύπαρξη και μεγάλου αριθμού αστικών εστιών αναπαραγωγής κουνουπιών (Kokkotis et al, 2014).

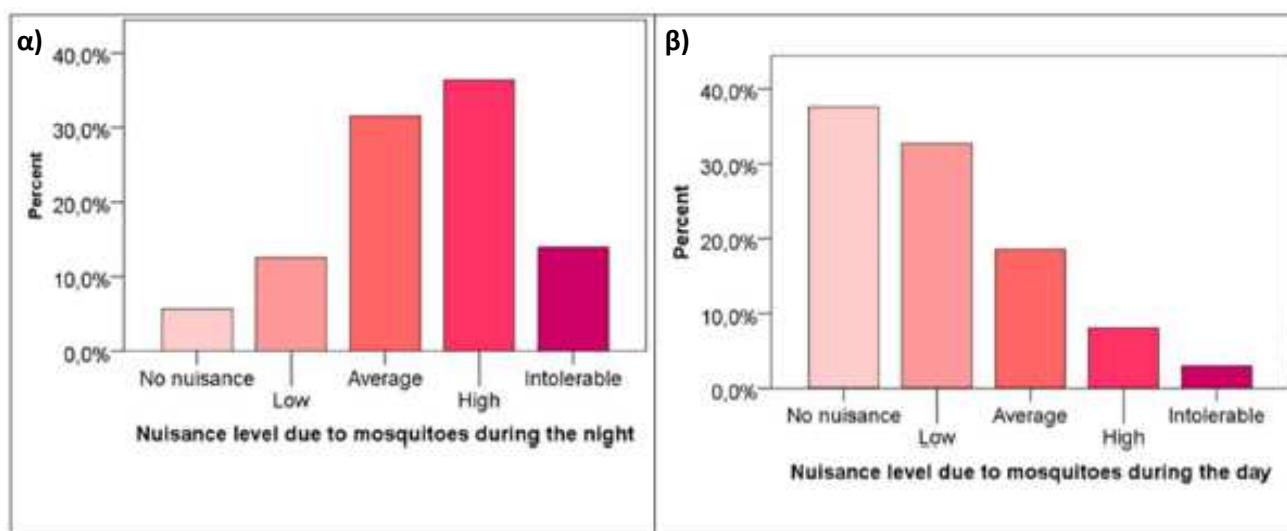
Εκτός από τα ενδημικά είδη κουνουπιών στην Ευρώπη και την Ελλάδα, όπως τα είδη που ανήκουν στα γένη *Culex* και *Anopheles*, η κλιματική αλλαγή αναμένεται να επιφέρει την επέκταση σε ευρύτερες γεωγραφικές ενότητες της Ευρώπης κάποιων άλλων ειδών κουνουπιών, τα οποία ήδη εμφανίζονται σε συγκεκριμένες περιοχές και χαρακτηρίζονται ως κουνούπια «εισβολείς». Η παρακολούθηση/παρατήρηση αυτών των ειδών κρίνεται ως αναγκαία λόγω του γεγονότος ότι μπορούν να αποτελέσουν φορείς (vectors) ασθενειών για τον άνθρωπο. Οι σημαντικότερες κατηγορίες κουνουπιών εισβολέων στην Ευρώπη ανήκουν στο γένος *Aedes* και είναι οι ακόλουθες:

1. *Aedes albopictus*: Το Ασιατικό κουνούπι τύπου «τίγρης», το οποίο κατατάσσεται ως ένα από τα 100 πιο επεκτατικά είδη στον κόσμο και προέρχεται από τις τροπικές και υποτροπικές περιοχές της Νοτιοανατολικής Ασίας (Caminade et al, 2012). Αναπαράγεται με αυγά τα οποία εναποθέτει σε σημεία με παροδική παρουσία νερού σε αστικές και περιαστικές περιοχές. Τις προηγούμενες δεκαετίες το συγκεκριμένο είδος κουνουπιού επεκτάθηκε σε πολλές περιοχές του κόσμου, υποβοηθούμενο και από την μεταφορά των ανθεκτικών στην ξηρασία αυγών του μέσω του εμπορίου αγαθών και ιδιαίτερα των μεταχειρισμένων ελαστικών και φυτών όπως το μπαμπού (Caminade et al, 2012). Το κουνούπι τίγρης, εντοπίστηκε για πρώτη φορά στην Ευρώπη στην Αλβανία το 1979, στη συνέχεια στην Ιταλία το 1990 και πλέον έχει παρουσία σε πλήθος Ευρωπαϊκών χωρών στις οποίες

συμπεριλαμβάνεται και η Ελλάδα σύμφωνα με το Ευρωπαϊκό Κέντρο για την Πρόληψη και τον Έλεγχο Ασθενειών (ECDC) (Εικόνα Β1). Έχει επίσης καθιερώσει την παρουσία του σε πλήθος Μεσογειακών χωρών όπως η Συρία, το Ισραήλ και ο Λίβανος (Failloux et al, 2017). Εκτός από την απλή ενόχληση που προκαλεί λόγω των ισχυρών τσιμπημάτων του, το κουνούπι *Aedes albopictus* συνδέεται και με τη μεταφορά ιών στον άνθρωπο και τα ζώα, όπως ο ιός Chikungunya, ο Δάγγειος ιός (Dengue) κ.α. (Caminade et al, 2012, Failloux et al, 2017). Πάντως, σύμφωνα με τους Bithas et al, 2018, οι πολίτες της Αθήνας φαίνεται να εντοπίζουν την όχληση από τα κουνούπια κυρίως κατά τις νυχτερινές ώρες (Εικόνα Β2), γεγονός που καταδεικνύει ότι η παρουσία του κουνουπιού *Aedes albopictus*, το οποίο δρα και την ημέρα, είναι ακόμα μειωμένη σε σύγκριση με τα ενδημικά είδη στην πρωτεύουσα της Ελλάδας.

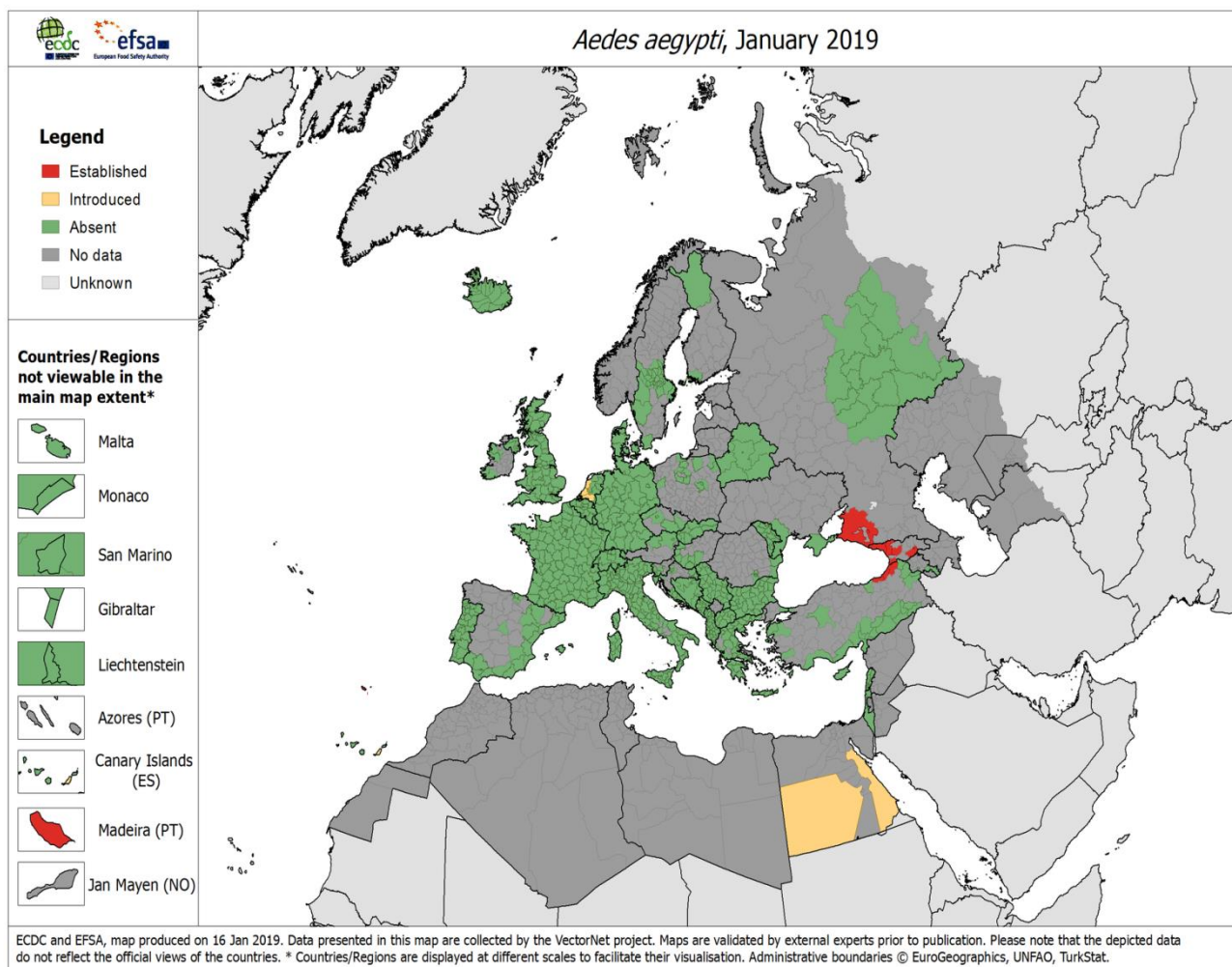


Εικόνα Β1: Κατανομή των κουνουπιών *Aedes albopictus* στην Ευρώπη σε επίπεδο διοικητικών περιφερειών τον Ιανουάριο του 2019 (Πηγή: ECDC)



Εικόνα Β2: Επίπεδα όχλησης του πληθυσμού της Αθήνας από την παρουσία κουνουπιών α) κατά τη νύχτα και β) κατά την ημέρα (Πηγή: Bithas et al, 2018)

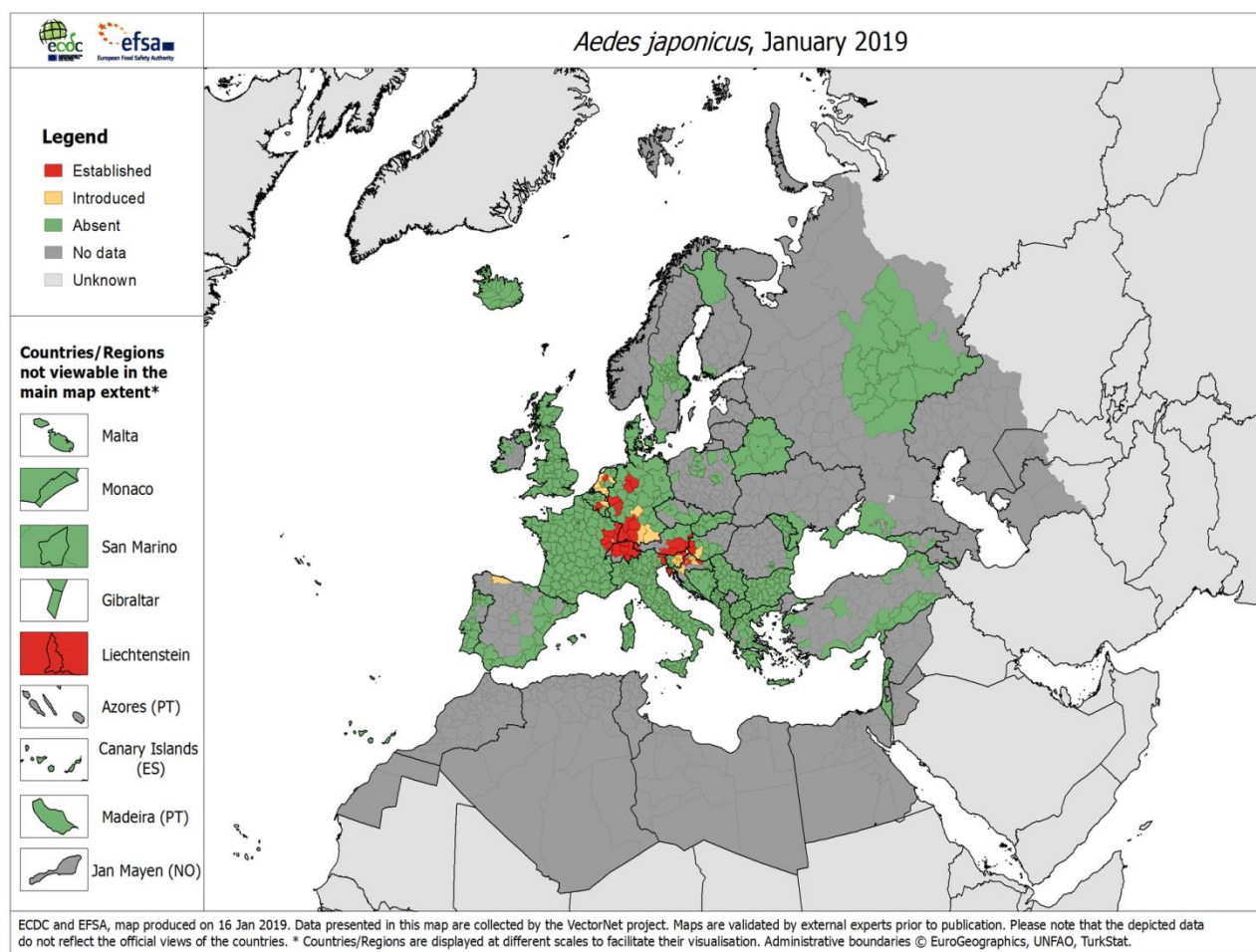
2. Aedes aegypti: Αυτός ο τύπος κουνουπιού ήταν ιδιαίτερα διαδεδομένος στην Νότια Ευρώπη και την Μέση Ανατολή στις αρχές του 20^{ου} αιώνα. Τα θηλυκά κουνούπια γενούν τα αυγά τους πάνω ή κοντά σε υδάτινες επιφάνειες οι οποίες μπορεί να είναι φυσικές αλλά και τεχνητές, γι' αυτό και το συγκεκριμένο είδος κουνουπιού συνδέεται έντονα με την ανθρώπινη παρουσία και τις ανθρώπινες κατοικίες (Bouzid et al, 2014). Με την εξέλιξη της υγιεινής και της διαχείρισης των αστικών υδατικών αποθεμάτων αλλά και των μέτρων ελέγχου των φορέων της ελονοσίας (Malaria) με το εντομοκτόνο DDT, τα κουνούπια *Aedes aegypti* εξαφανίστηκαν από την Ευρώπη μετά το 1950. Μετά από δεκαετίες απουσίας του *Aedes aegypti* από την Ευρασία, το 2004 έκανε ξανά την εμφάνιση του σε περιοχές γύρω από την Μαύρη Θάλασσα και συγκεκριμένα στη Νότια Ρωσία, τη Γεωργία και τη Βορειοανατολική Τουρκία (Failloux et al, 2017, Εικόνα Β3). Επιπροσθέτως, το 2012 καταγράφηκε μια έξαρση της εμφάνισης του *Aedes aegypti* στην Πορτογαλική νήσο Μαδέρα ενώ έχει παρατηρηθεί και η εμφάνιση του στην Ολλανδία (Failloux et al, 2017, Bouzid et al, 2014, Εικόνα Β3). Θεωρείται ως ο κύριος φορέας του Δάγγειου ιού παγκοσμίως (Bouzid et al, 2014).



Εικόνα Β3: Κατανομή των κουνουπιών *Aedes aegypti* στην Ευρώπη σε επίπεδο διοικητικών περιφερειών τον Ιανουάριο του 2019 (Πηγή: ECDC)

3. *Aedes japonicus*: Αυτό το είδος κουνουπιών του γένους *Aedes*, απομονώθηκε για πρώτη φορά στην Ιαπωνία στην περιοχή βόρεια από τις νήσους Ryukyu (Hokkaido, Honshu, Shikoku, και Kyushu), αλλά και στην Κορεατική χερσόνησο όπου η παρουσία του είναι κοινή ακόμα και σε μεγάλες πόλεις, αλλά όχι σε ιδιαίτερη αφθονία. Το διεθνές και διηπειρωτικό εμπόριο, όπως αυτό των χρησιμοποιημένων ελαστικών, αλλά και η ανθεκτικότητα των αυγών του στις χαμηλές χειμερινές θερμοκρασίες, είναι παράμετροι που ευνόησαν την μεταφορά του στην Ευρώπη όπως ακριβώς συνέβη και με το είδος *Aedes albopictus* (Cunze et al, 2016). Παρ' όλα αυτά, τα κουνούπια του είδους *Aedes japonicus*, σε σχέση με εκείνα του είδους *Aedes albopictus*, φαίνεται να προσαρμόζονται πιο εύκολα σε χαμηλότερες θερμοκρασίες και κατά συνέπεια η αναμενόμενη άνοδος της θερμοκρασίας λόγω της κλιματικής αλλαγής δεν αναμένεται να ευνοήσει την άνοδο του πληθυσμού

τους (Cunze et al, 2016). Στην Ευρώπη, πληθυσμοί του γένους *Aedes japonicus* έχουν παρατηρηθεί μέχρι στιγμής σε βορειότερες περιοχές της Αυστρίας, της Γαλλίας, της Γερμανίας, της Ελβετίας, της Ολλανδίας, της Σλοβενίας και του Βελγίου (Εικόνα Β4), ενώ δεν διαφαίνεται πιθανή επέκταση του στη Μεσόγειο. Θεωρείται αποτελεσματικός διαβιβαστής για ασθένειες όπως ο Ιός του Δυτικού Νείλου, ο Δάγγειος ιός κ.α. (Cunze et al, 2016).

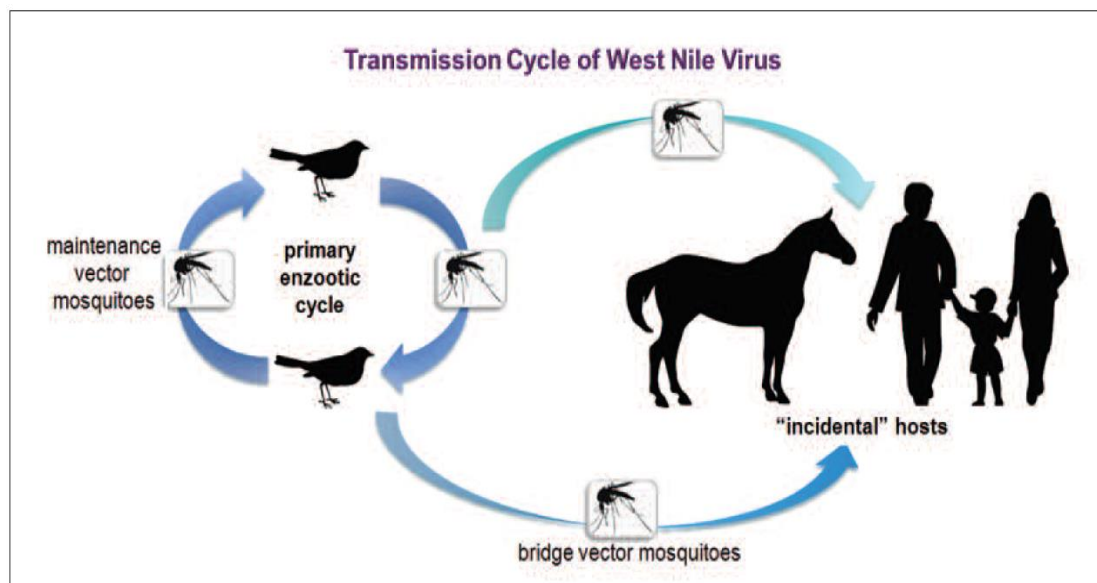


Εικόνα Β4: Κατανομή των κουνουπιών *Aedes japonicus* στην Ευρώπη σε επίπεδο διοικητικών περιφερειών τον Ιανουάριο του 2019 (Πηγή: ECDC)

Β2: Περιγραφή ασθενειών των οποίων η μετάδοση συνδέεται με κουνούπια διαβιβαστές

Οι κυριότερες ασθένειες η μετάδοση των οποίων συνδέεται με κουνούπια διαβιβαστές είναι 1) ο ιός του Δυτικού Νείλου 2) ο Δάγγειος ιός 3) ο ιός Chikungunya και 4) η Ελονοσία:

1. Ιός του Δυτικού Νείλου: Ανήκει στην κατηγορία των φλαβοϊών και διατηρείται στη φύση μέσω ενός ενζωτικού κύκλου πολλαπλασιασμού και μετάδοσης (Mavrouli et al, 2015). Ο κύκλος μετάδοσης του στον άνθρωπο περιλαμβάνει τα πουλιά και τα κουνούπια. Άγρια αλλά και οικόσιτα είδη πτηνών (π.χ. κορακοειδή, σπουργίτια, γλάροι, κουκουβάγιες, διάφορα είδη γερακιών κτλ) μπορούν να αποτελέσουν φορείς του ιού και αναπτύσσουν σημαντικές συγκεντρώσεις του ιού στο αίμα τους γεγονός που τα καθιστά μεταδοτικά. Στη συνέχεια τα κουνούπια που τρέφονται με το αίμα αυτών των πουλιών μπορούν να αποτελέσουν τη γέφυρα της μετάδοσης του ιού σε άλλα υγιή μέχρι πρότινος πουλιά, αλλά και στον άνθρωπο και σε άλλα θηλαστικά (π.χ. άλογα), που αποτελούν τους τελικούς ξενιστές του ιού καθώς οι συγκεντρώσεις στο αίμα τους δεν φτάνουν σε επαρκή επίπεδα έτσι ώστε να τα καταστήσουν μεταδοτικά (Blitvich et al, 2008, Conte et al, 2015) (Εικόνα Β5). Η δυνατότητα των μεταναστευτικών πτηνών να πετούν καλύπτοντας αποστάσεις εκατοντάδων χιλιομέτρων για αρκετές ώρες, με ταχύτητες μέχρι και 100 km/h, έχει ως αποτέλεσμα τη μεταφορά του ιού σε νέες απομακρυσμένες περιοχές.



Εικόνα Β5: Ο κύκλος μετάδοσης του ιού του Δυτικού Νείλου που περιλαμβάνει άγρια και κατοικίδια πτηνά ως φορείς και ορνιθοφιλικά κουνούπια ως διαβιβαστές του ιού, τόσο μεταξύ των πτηνών, όσο και προς τους τελικούς ξενιστές (άνθρωποι και άλογα). (Πηγή: Mavrouli et al, 2015)

Η πλειοψηφία των μολύνσεων από τον ιό του Δυτικού Νείλου σε ανθρώπους είναι ασυμπτωματικές ενώ μόλις το 20% των περιπτώσεων παρουσιάζει συμπτώματα που προσομοιάζουν με εκείνα μια ήπιας γρίπης όπως πυρετός, πονοκέφαλος,

μυαλγία, ναυτία, κούραση, αδυναμία, εμετοί και διάρροιες, τα οποία εξελίσσονται συνήθως 2-14 μέρες μετά τη μόλυνση. Τα συμπτώματα διαρκούν περίπου 2-5 μέρες αλλά στις πιο σοβαρές περιπτώσεις το αίσθημα κόπωσης μπορεί να διατηρηθεί για πάνω από ένα μήνα (Blitvich et al, 2008). Περιστασιακά, σε ποσοστό <1%, συμβαίνει προσβολή του κεντρικού νευρικού συστήματος, με αποτέλεσμα την ανάπτυξη νευροδισιδυτικής νόσου που εκδηλώνεται ως εγκεφαλίτιδα, μηνιγγίτιδα και οξεία χαλαρή παράλυση (Blitvich et al, 2008, Mavrouli et al, 2015). Η εμφάνιση της νευροδισιδυτικής νόσου παρουσιάζεται κυρίως σε ηλικιωμένα άτομα, άνω των 65 ετών, με βεβαρυμμένο ιατρικό ιστορικό, ενώ πολύ πιο σπάνια σε νεότερα άτομα κάτω των 30 ετών. Ανάμεσα στα άτομα που θα παρουσιάσουν εγκεφαλική νόσο η θνησιμότητα προσεγγίζει το 10% ενώ μακροχρόνιες νευρολογικές δυσλειτουργίες παραμένουν σε ένα ποσοστό 50% (Blitvich et al, 2008, Mavrouli et al, 2015).

Στην Ελλάδα, ξεχωρίζει η επιδημία του ιού του Δυτικού Νείλου η οποία ξέσπασε το 2010 στα βόρεια τμήματα της χώρας, και η οποία είχε ως επίκεντρο το δέλτα του Αξιού στο οποίο εκβάλουν τέσσερεις ποταμοί (Αξιός, Αλιάκμονας, Γαλλικός και Λουδίας). Η περιοχή αποτελεί σημαντικό υγρότοπο ο οποίος αξιοποιείται από τα μεταναστευτικά αλλά και τα υδρόβια πουλιά τα οποία αποτέλεσαν την πηγή του ιού (Mavrouli et al, 2015, Bezirtzoglou et al, 2011). Η ευδοκίμηση των κουνουπιών του γένους *Culex* στην περιοχή κατέστησε την μετάδοση από τα πτηνά στους ανθρώπους ανεξέλεγκτη, με αποτέλεσμα να καταγραφούν 262 ασθενείς που νόσησαν τελικά από την ασθένεια, από τους οποίους 197 υπέστησαν σοβαρές νευρολογικές νόσους και 33 τελικά πέθαναν. Κρούσματα του ιού παρατηρήθηκαν στην Ελλάδα και τα επόμενα χρόνια γεγονός που αποτελεί ένδειξη ότι ο ιός μπορεί να καταστεί ενδημικός στην περιοχή μας (Hernández-Triana et al, 2014).

2. Δάγγειος ιός: Οι κύριοι διαβιβαστές του Δάγγειου ιού είναι τα κουνούπια του γένους *Aedes* και συγκεκριμένα τα είδη *Aedes aegypti* (πρωτεύων διαβιβαστής) και *Aedes albopictus* (δευτερεύων διαβιβαστής) (Bouzid et al, 2014). Υπάρχει μια σαφής διάκριση ανάμεσα στα στάδια εξέλιξης του ιού. Το πρώτο στάδιο περιλαμβάνει έναν ενζωτικό κύκλο μετάδοσης, το δεύτερο μια μετάδοση της επιδημίας σε μικρά αγροτικά χωριά και το τρίτο που έχει και μεγαλύτερη υγειονομική σημασία την επέκταση της επιδημίας σε μεγάλα αστικά κέντρα. Τα συμπτώματα της νόσου περιλαμβάνουν ήπιο ή και υψηλό πυρετό, ο οποίος

συνδυάζεται με ισχυρό πονοκέφαλο, πόνο πίσω από τα μάτια, πόνους στους μυς και στις αρθρώσεις αλλά και εμφάνιση εξανθημάτων. Οι ασθενείς και ιδιαίτερα τα μικρά παιδιά που θα υποστούν και μία ενδεχόμενη δεύτερη μόλυνση από κάποιον άλλο από τους τέσσερεις διαφορετικούς ορότυπους του Δάγγειου ιού, έχουν πολύ υψηλότερη πιθανότητα για να νοσήσουν με Δάγγειο αιμορραγικό πυρετό. Τα κλινικά συμπτώματα του Δάγγειου αιμορραγικού πυρετού είναι ο υψηλός πυρετός που συχνά συνδυάζεται με διόγκωση στο συκώτι και στις πιο σοβαρές περιπτώσεις με προβλήματα στο κυκλοφορικό. Χωρίς την κατάλληλη φροντίδα, ο Δάγγειος αιμορραγικός πυρετός μπορεί να οδηγήσει σε μια θνησιμότητα στον άνθρωπο που αγγίζει το 20%. Η τελευταία μεγάλη επιδημία του Δάγγειου πυρετού στην Ευρώπη συνέβη στην Ελλάδα, κατά τα έτη 1927 και 1928, όταν ακόμα τα κουνούπια του είδους *Aedes aegypti* ήταν διαδεδομένα στη χώρα και μετέδιδαν τον ιό (Thomas et al, 2011).

3. Ιός Chikungunya: Είναι ιός «άλφα» (alpha virus) της οικογενείας των Togaviridae και απομονώθηκε για πρώτη φορά σε μια έξαρση του στην Τανζανία το 1953. Προκαλεί υψηλό πυρετό, εξανθήματα και μακράς διάρκειας αρθραλγία (Fischer et al, 2013). Τα τελευταία χρόνια ο ιός επανεμφανίστηκε στην Αφρική αλλά και σε περιοχές της Ινδίας και σε νησιά του Ινδικού ωκεανού. Στην Ευρώπη, η πρώτη επιδημία του ιού συνέβη στην περιοχή της Ραβέννα στη Βόρεια Ιταλία το 2007, με πάνω από 200 κρούσματα (Rezza et al, 2007). Η εισαγωγή του ιού έγινε από έναν ταξιδιώτη από την Ινδία και η διάχυση του μέσω των κουνουπιών *Aedes albopictus* που υπάρχουν στην περιοχή και τα οποία μαζί με τα *Aedes aegypti* αποτελούν τους κύριους διαβιβαστές του (Fischer et al, 2013). Πάντως, σχεδόν όλες οι περιπτώσεις στην περιοχή της Ραβέννα ήταν ήπιες, με μόνο ένα αναφερόμενο περιστατικό θανάτου (Rezza et al, 2007).
4. Ελονοσία: Η ελονοσία είναι νόσος των τροπικών και των παρατροπικών χωρών, η οποία προκαλείται από τα πέντε παράσιτα του γένους πλασμώδιο (*Plasmodium falciparum*, *Plasmodium vivax*, *Plasmodium ovale*, *Plasmodium malariae* και *Plasmodium knowlesi*) και μεταδίδεται στον άνθρωπο μόνο από τα θηλυκά κουνούπια του γένους *Anopheles* (Zeller et al, 2013). Τα συμπτώματα της περιλαμβάνουν πυρετό, πονοκέφαλο, ρίγη, ναυτία και εμετούς, μυϊκούς πόνους, εφίδρωση και πόνο στο στήθος. Είναι μια παλιά ασθένεια στην Ευρώπη η οποία

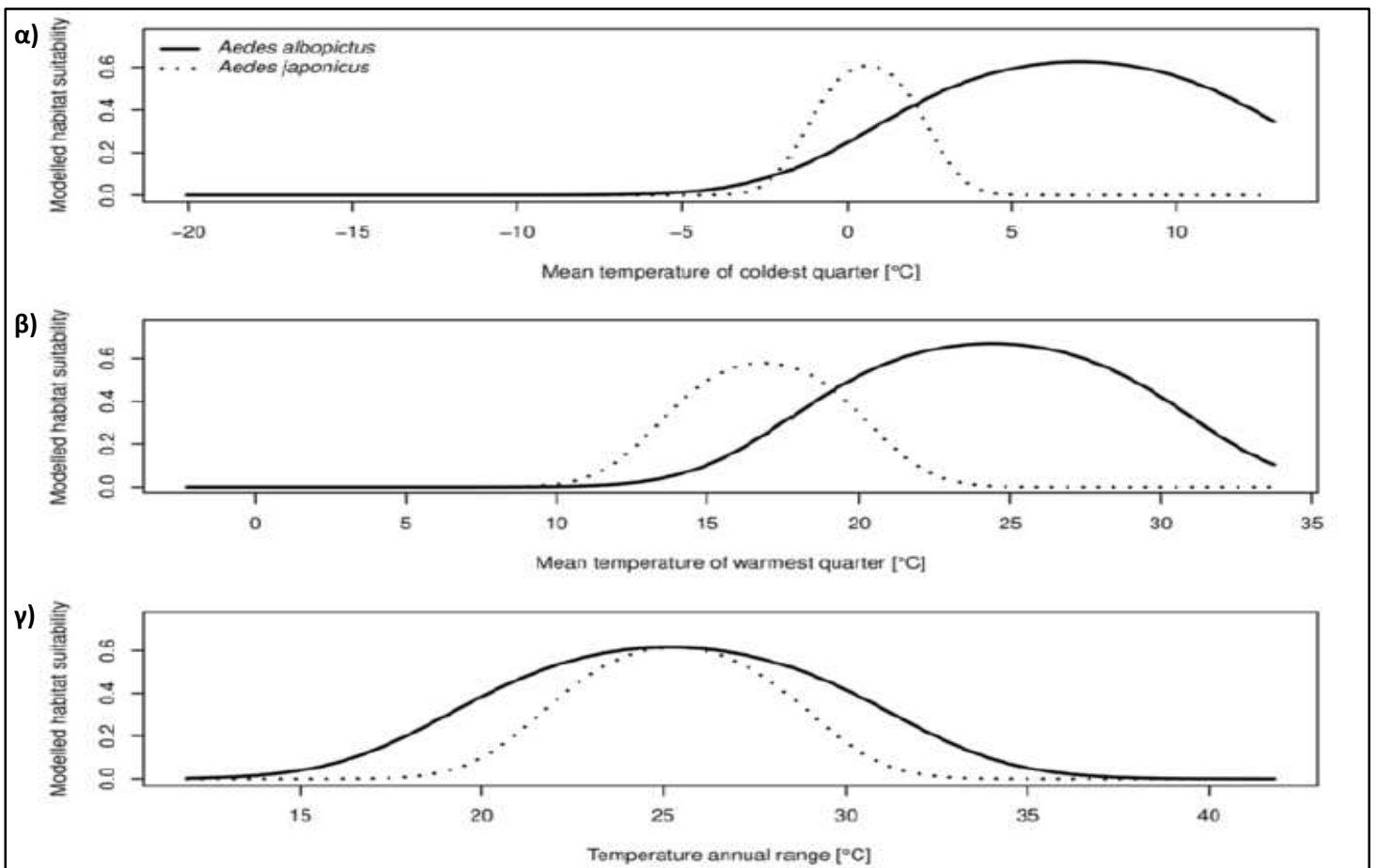
εξαφανίστηκε όμως τη δεκαετία του 1970 από ένα συνδυασμό έγκαιρης διάγνωσης και θεραπείας της νόσου αλλά και μέτρων κατά των κουνουπιών. Στις χώρες που βρίσκονται σε άμεση γειτνίαση με την Ευρώπη, η μετάδοση της ελονοσίας επίσης παρουσιάζει έντονη εξασθένηση. Κατά την περίοδο 2006-2010, στις χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης (ΕΕ) αναφέρθηκαν μόνο σποραδικά κρούσματα ελονοσίας, τα οποία κυμάνθηκαν περίπου στο ποσοστό 1/100000 άτομα και οφείλονταν σχεδόν στο σύνολο τους (>99%) σε εισαγόμενους ταξιδιώτες από ενδημικές περιοχές (Zeller et al, 2013). Παρ' όλα αυτά, κατά το διάστημα Μαΐου – Σεπτεμβρίου του 2011, παρατηρήθηκε τοπική μετάδοση της νόσου σε αγροτικές περιοχές της Ελλάδας (Danis et al, 2011), όπου είδη κουνουπιών του γένους *Anopheles* είναι παρόντα. Αυτό το γεγονός οφείλονταν στη παρουσία εργατών από χώρες στις οποίες ενδημεί το παράσιτο *Plasmodium vivax*. Για το λόγο αυτό ενεργοποιήθηκε ένα σχέδιο έγκαιρης διάγνωσης των συμπτωμάτων σε αυτές τις κατηγορίες μεταναστών, προκειμένου να αποφευχθούν παρόμοια περιστατικά στο μέλλον (Zeller et al, 2013).

B3: Η επίδραση αβιοτικών παραγόντων στους πληθυσμούς των κουνουπιών και στη μετάδοση ασθενειών στον κόσμο και την Ελλάδα

Οι κύριοι αβιοτικοί παράγοντες οι οποίοι επηρεάζουν την διάδοση των κουνουπιών και τη μετάδοση ασθενειών είναι 1) η θερμοκρασία 2) ο υετός 3) η σχετική υγρασία και 4) ο άνεμος.

1. Θερμοκρασία: Οι αυξημένες θερμοκρασίες προκαλούν γενικά αύξηση στους πληθυσμούς των κουνουπιών, μειώνουν το χρονικό διάστημα ανάμεσα στα γεύματα αίματος που έχουν ανάγκη ενώ μειώνουν και τη διάρκεια επώασης του ιού του Δυτικού Νείλου μέσα στα κουνούπια, έτσι ώστε αυτά να καταστούν από μολυσμένα μολυσματικά, τόσο για τους ανθρώπους όσο για τα πουλιά (Paz, 2015). Βεβαίως, ανάλογα και με το είδος των κουνουπιών, οι πολύ υψηλές θερμοκρασίες μπορεί να προκαλέσουν και αντίθετα αποτελέσματα, καθώς κάποια είδη αδυνατούν να προσαρμοστούν σε αυτές. Για παράδειγμα, όπως προκύπτει από την Εικόνα Β6 (Cunze et al, 2016), τα κουνούπια *Aedes albopictus* χρειάζονται για την βιωσιμότητα τους υψηλότερες μέσες θερμοκρασίες από τα *Aedes japonicus*, τόσο στο ψυχρότερο τέταρτο του έτους (Εικόνα Β6α), όσο και στο θερμότερο τέταρτο του έτους (Εικόνα Β6β). Επίσης, όπως προκύπτει από την Εικόνα Β6γ τα κουνούπια του

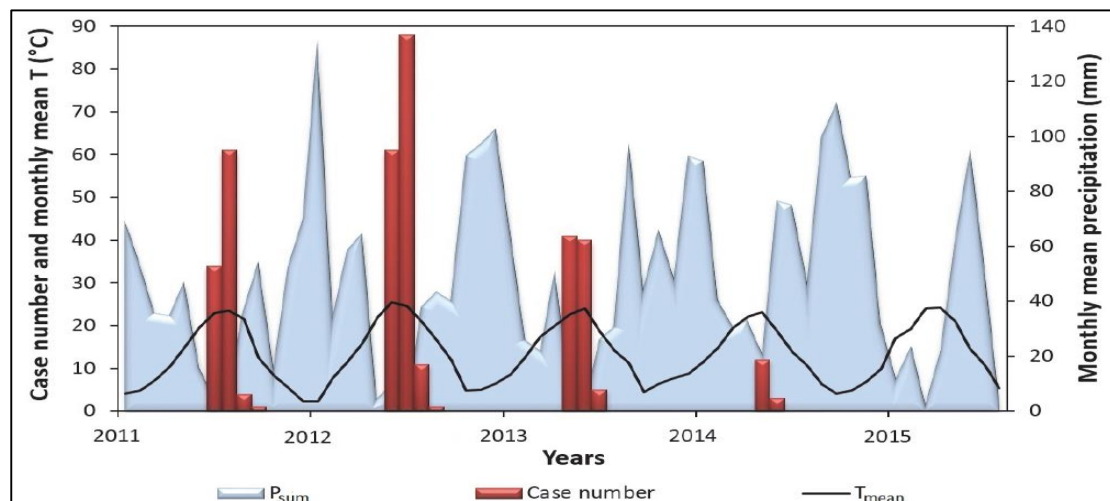
είδους *Aedes albopictus*, μπορούν να προσαρμοστούν ικανοποιητικά σε πολύ περισσότερες τιμές ετήσιου θερμομετρικού εύρους, σε σχέση με τα κουνούπια του είδους *Aedes japonicus* (Cunze et al, 2016). Τα παραπάνω δικαιολογούν την διασπορά των κουνουπιών *Aedes japonicus* σε πολύ μικρότερο τμήμα της Ευρώπης σε σχέση με τα *Aedes albopictus* και κατά κύριο λόγο λόγω σε βορειότερες και ψυχρότερες περιοχές όπως προκύπτει από τις Εικόνες B1 και B3. Τέλος, σε σχέση αποκλειστικά με την διάδοση του ιού του Δυτικού Νείλου, η άνοδος της θερμοκρασίας λόγω της κλιματική αλλαγής μπορεί να έχει και μια έμμεση επίδραση στη επέκταση του, λόγω διαταραχών που μπορεί να προκληθούν στα μεταναστευτικά ταξίδια των πτηνών φορέων του ιού. Συγκεκριμένα έχει παρατηρηθεί ότι αρκετά είδη πουλιών μεταναστεύουν στις περιοχές αναπαραγωγής τους νωρίτερα σε σύγκριση με το φυσιολογικό, λόγω της πρώιμης ανόδου των θερμοκρασιών την άνοιξη (Paz, 2015)



Εικόνα B6: Καμπύλες συμβατότητας των κουνουπιών *Aedes albopictus* και *Aedes japonicus* σε συνάρτηση α) με την μέση θερμοκρασία του ψυχρότερου τετάρτου του έτους β) με τη μέση θερμοκρασία του θερμότερου τετάρτου του έτους και γ) με το ετήσιο εύρος διακύμανσης της θερμοκρασίας. (Πηγή: Cunze et al, 2016)

2. Υετός: Το ενδεχόμενο να υπάρξουν αυξημένα ύψη υετού σε κάποιες περιοχές, είναι πιθανό να οδηγήσει σε άνοδο του πληθυσμού των κουνουπιών, λόγω της αύξησης που θα προκληθεί στην επιφάνεια των στάσιμων υδάτων, τα οποία χρησιμοποιούνται από τα κουνούπια για την ανάπτυξη των προνυμφών. Παρ' όλα αυτά, οι ισχυρές βροχοπτώσεις μπορεί να ελαττώσουν την περιεκτικότητα των στάσιμων υδάτων σε θρεπτικά συστατικά απαραίτητα για τις προνύμφες, μειώνοντας έτσι τον ρυθμό ανάπτυξης τους, ενώ είναι πιθανό και να ξεπλύνουν τα χαντάκια και τα κανάλια αποστράγγισης στα οποία βρίσκονται οι προνύμφες καταστρέφοντας τις (Paz, 2015, Trájer, 2017). Από την άλλη πλευρά, η ισχυρή ξηρασία σε μια περιοχή κάνει το εναπομείναν νερό πολύ πιο πλούσιο σε θρεπτικά συστατικά, διευκολύνοντας την ανάπτυξη των προνυμφών, ενώ μειώνει και τον πληθυσμό των πιθανών θηρευτών των κουνουπιών όπως είναι οι βάτραχοι και οι λιβελλούλες (Mavrouli et al, 2015). Επιπροσθέτως, η μείωση της επιφάνειας των υγροτόπων λόγω ενδεχόμενης ξηρασίας και η συνεπακόλουθη συσσώρευση κουνουπιών και πτηνών γύρω από μικρότερες επιφάνειες, μπορεί να ενισχύσει την μεταξύ τους αλληλεπίδραση ευνοώντας έτσι την διάδοση ασθενειών όπως ο ιός του Δυτικού Νείλου (Paz, 2015, Mavrouli et al, 2015).
3. Σχετική υγρασία: Γενικά τα διαθέσιμα στοιχεία σε σχέση με την επίδραση της σχετικής υγρασίας στη διάδοση των κουνουπιών και κατ' επέκταση των ασθενειών τις οποίες αυτά μεταφέρουν είναι πολύ περιορισμένα (Paz, 2015). Παρ' όλα αυτά, αφού η άνοδος της θερμοκρασίας αυξάνει τον αριθμό των κουνουπιών και τη διάδοση του ιού του Δυτικού Νείλου, ενώ μειώνει τη σχετική υγρασία, είναι αναμενόμενη η αρνητική συσχέτιση που παρατηρήθηκε σε κάποιες περιπτώσεις ανάμεσα στη σχετική υγρασία και τον αριθμό κρουσμάτων του ιού (Paz, 2015, Paz et al, 2013). Κατά συνέπεια η σχετική υγρασία δεν θεωρείται καλός δείκτης για την πρόγνωση πιθανών εξάρσεων του ιού του Δυτικού Νείλου σε σύγκριση με τη θερμοκρασία (Paz et al, 2013).
4. Ταχύτητα ανέμου: Γενικά ο άνεμος θεωρείται ως μέσο διάδοσης και διασποράς των κουνουπιών και κατά συνέπεια όλων των ιών που αυτά μεταφέρουν (Paz, 2015). Ειδικά τα μέτωπα των καταιγίδων και οι ισχυροί άνεμοι που τα συνοδεύουν μπορεί να συνεισφέρουν καθοριστικά προς αυτή την κατεύθυνση (Sellers and Maarouf, 1990, Kay and Farrow, 2000, Reisen et al, 2004).

– Ειδικά για την περίπτωση της Ελλάδας, η επίδραση αβιοτικών παραγόντων στην επέκταση του ιού του Δυτικού Νείλου, μέσω του πληθυσμού των κουνουπιών, έχει μελετηθεί σε κάποιες δημοσιευμένες εργασίες. Συγκεκριμένα, στη μελέτη Trájer, 2017, διαπιστώθηκε ότι κατά τα έτη 2011-2014, τα κρούσματα του ιού στην Ελλάδα εκδηλώθηκαν κατά το διάστημα Ιουλίου-Οκτωβρίου. Ο μήνας που σώρευσε τον μεγαλύτερο αριθμό κρουσμάτων (55.52%) ήταν ο Αύγουστος ενώ το 93.1% των κρουσμάτων καταγράφηκαν το διάστημα Ιουλίου-Αυγούστου όταν η μέση θερμοκρασία ήταν 24.2°C. Το διάστημα Ιουλίου-Αυγούστου ήταν το ξηρότερο στην Ελλάδα για την περίοδο 2011-2014, με ένα μέσο ύψος υετού ίσο με 13.5mm/μήνα, ποσό που αντιστοιχεί στο 27.6% του μέσου μηνιαίου ύψους υετού. Από την Εικόνα B7 προκύπτει ότι το μέγιστο των κρουσμάτων του ιού του Δυτικού Νείλου στην Ελλάδα για το διάστημα 2011-2014 συμπίπτει με το μέγιστο των θερμοκρασιών και το ελάχιστο ύψος υετού. Κατά συνέπεια, οι συσχετίσεις των κρουσμάτων του ιού με τη θερμοκρασία και τον υετό ήταν ισχυρά θετικές και αρνητικές αντίστοιχα. Πάντως, η άνοιξη του έτους 2010, έτος κατά το οποίο και εμφανίστηκε η μεγάλη έξαρση του ιού του Δυτικού Νείλου στη Βόρεια Ελλάδα, χαρακτηρίστηκε από ασυνήθιστα αυξημένες βροχοπτώσεις οι οποίες και ακολούθησαν έναν ιδιαιτέρως ξηρό και θερμό χειμώνα (Papa, 2013). Αυτό καταδεικνύει τις πολλαπλές διαφορετικές επιδράσεις που μπορεί να έχει το ύψος υετού αλλά και η χρονική κατανομή του μέσα στο έτος, στους πληθυσμούς των κουνουπιών και κατ' επέκταση στη διάδοση ασθενειών μέσω αυτών.



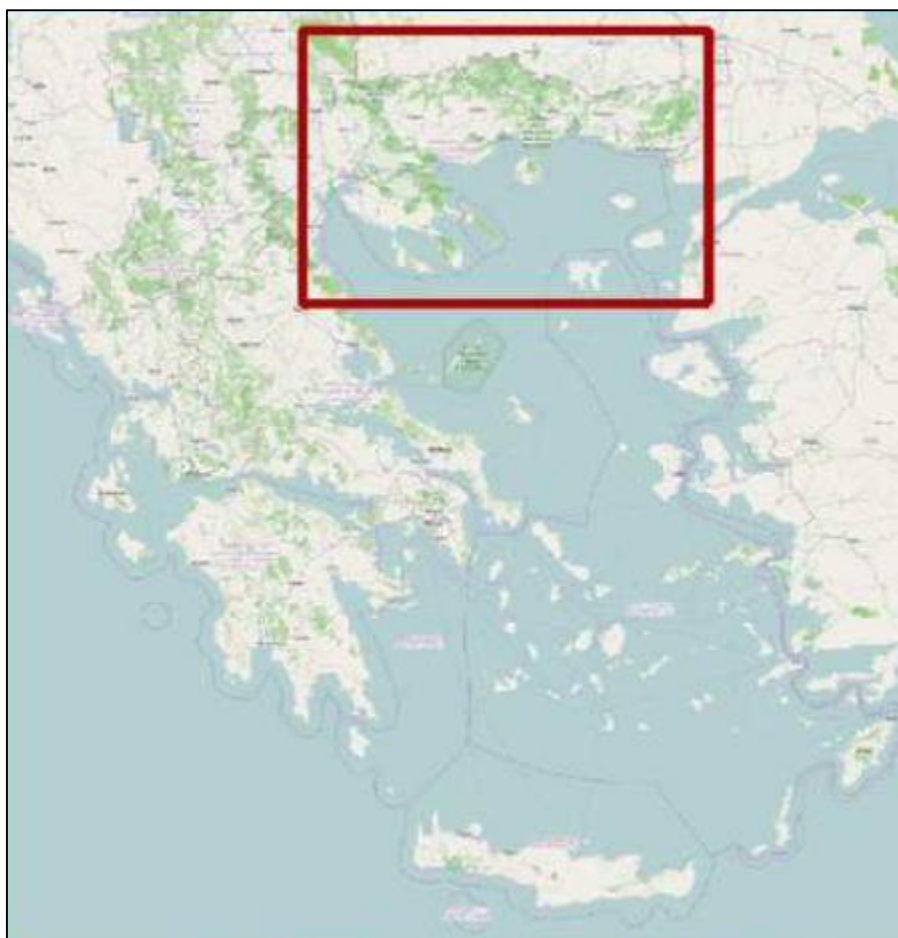
Εικόνα B7: Αποτύπωση των κρουσμάτων (Case number) του ιού του Δυτικού Νείλου στην Ελλάδα κατά τα έτη 2011-2015 σε μηνιαία βάση, σε συνδυασμό με την θερμοκρασία (T_{mean}) και το ύψος του υετού (P_{sum}). Τα δεδομένα των κρουσμάτων του ιού του Δυτικού Νείλου για το έτος 2015 δεν ήταν διαθέσιμα. (Πηγή: Trájer, 2017)

Επίσης σε μια άλλη μελέτη, οι Stilianakis et al, 2016 μελέτησαν τα συνολικά 441 εργαστηριακά επιβεβαιωμένα κρούσματα του ιού του Δυτικού Νείλου σε τμήμα της βόρειας Ελλάδας (Εικόνα Β8) για την περίοδο 2010 – 2014 σε συνάρτηση με αβιοτικούς παράγοντες όπως η θερμοκρασία του αέρα, η θερμοκρασία του εδάφους, η ταχύτητα του ανέμου, το ύψος υετού, η σχετική υγρασία και η περιεκτικότητα του εδάφους σε νερό. Οι τιμές αυτών των αβιοτικών παραμέτρων για τα έτη 2010 – 2014, συγκρίθηκαν με τις αντίστοιχες τιμές της περιόδου 1979 – 2008, οι οποίες αποτέλεσαν ένα κλιματικό μέτρο αναφοράς 30 ετών για τον εντοπισμό τυχόν ακραίων διακυμάνσεων που πιθανά συνδέονται με τα κρούσματα του ιού.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα των Stilianakis et al, 2016, τα οποία περιλαμβάνονται συνοπτικά στον Πίνακα Β1, το 52% των συνολικών κρουσμάτων του ιού του Δυτικού Νείλου εμφανίστηκαν όταν οι θερμοκρασίες εδάφους ήταν πολύ υψηλές (πάνω από το 90° εκατοστημόριο της περιόδου 1979 – 2008), ενώ το αντίστοιχο ποσοστό για τη θερμοκρασία του αέρα ήταν 42%. Όταν οι υπολογισμοί έγιναν εφαρμόζοντας μια χρονική υστέρηση των κρουσμάτων μίας ή και δύο εβδομάδων, τα ποσοστά ήταν ελαφρώς μειωμένα. Αντιθέτως το 41% των κρουσμάτων αντιστοιχήθηκε με χαμηλές τιμές σχετικής υγρασίας, κάτω από το 10° εκατοστημόριο, ενώ τα ποσοστά αν και μειούμενα παρέμειναν υψηλά και όταν τα κρούσματα συνέβησαν 1-3 εβδομάδες μετά τις πολύ χαμηλές τιμές σχετικής υγρασίας. Επιπροσθέτως, το 18% των κρουσμάτων αντιστοιχήθηκε με χαμηλές τιμές υετού, μέχρι το 10° εκατοστημόριο, ενώ τα αποτελέσματα ήταν πιο σαφή σε ότι αφορά την περιεκτικότητα του εδάφους σε νερό, καθώς το 30% - 39% των κρουσμάτων, ανάλογα και με το κριτήριο της χρονικής υστέρησης που ελήφθη υπ' όψιν, συνδέθηκε με τιμές κάτω από το 10° εκατοστημόριο της περιόδου αναφοράς 1979 - 2008. Τέλος οι Stilianakis et al, 2016 αναφέρουν ότι οι ακραία υψηλές τιμές ανέμου διαπιστώθηκε ότι δεν ευνοούν την εμφάνιση κρουσμάτων του ιού του Δυτικού Νείλου στους ανθρώπους. Το τελικό συμπέρασμα των Stilianakis et al, 2016 είναι ότι οι παράμετροι της θερμοκρασίας αέρα και της θερμοκρασίας εδάφους συνδέονται ισχυρά με την εμφάνιση του ιού του Δυτικού Νείλου στους ανθρώπους και για το λόγο αυτό μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως μεταβλητές πρόβλεψης ξεσπασμάτων του ιού. Ειδικά η θερμοκρασία του εδάφους διαπιστώθηκε ότι έχει την ισχυρότερη επίδραση στην επέκταση του ιού, καθώς επηρεάζει άμεσα τον πληθυσμό των κουνουπιών διαβιβαστών, ενισχύοντας την ανάπτυξη των προνυμφών και μειώνοντας τον χρόνο γέννησης των κουνουπιών.

Πίνακας Β1: Αριθμός (ποσοστό) των κρουσμάτων του ιού του Δυτικού Νείλου σε περιοχές της βόρειας Ελλάδας για την περίοδο 2010 – 2014, που αντιστοιχούν σε θερμοκρασίες αέρα και εδάφους πάνω από το 90° και το 95° εκατοστημόριο και σε τιμές σχετικής υγρασίας, υετού, ταχύτητας ανέμου και περιεκτικότητας του εδάφους σε νερό κάτω από το 5° και το 10° εκατοστημόριο, σε σύγκριση με την περίοδο αναφοράς 1979 – 2008. (Πηγή: Stilianakis et al, 2016)

Χρονική Υστέρηση (Εβδομάδες)	0	0	1	1	2	2	3	3
Εκατοστημόριο	5°	10°	5°	10°	5°	10°	5°	10°
	n(%)	n(%)	n(%)	n(%)	n(%)	n(%)	n(%)	n(%)
Υετός	70(16)	80(18)	55(12)	63(14)	59(13)	70(16)	48(11)	55(12)
Σχετική υγρασία	114(26)	182(41)	118(27)	162(37)	100(23)	150(34)	105(24)	140(32)
Περιεκτικότητα του εδάφους σε νερό	141(32)	174(39)	142(32)	170(39)	124(28)	153(35)	122(28)	134(30)
Ταχύτητα ανέμου	29(7)	44(10)	23(5)	31(7)	45(10)	52(12)	58(13)	58(13)
Εκατοστημόριο	95°	90°	95°	90°	95°	90°	95°	90°
Θερμοκρασία αέρα	122(28)	187(42)	108(25)	176(40)	109(25)	180(41)	98(22)	154(35)
Θερμοκρασία εδάφους	128(29)	230(52)	119(27)	217(49)	111(25)	197(45)	113(26)	172(39)



Εικόνα Β8: Χάρτης της Ελλάδας που υποδεικνύει την περιοχή μελέτης των Stilianakis et al, 2016 (Πηγή: Stilianakis et al, 2016)

Β4: Η επίδραση της κλιματικής αλλαγής στην Ελλάδα και την Ευρώπη σε είδη κουνουπιών που αποτελούν δυνητικούς φορείς ασθενειών για τον άνθρωπο

Β4.1: Πιθανές μεταβολές στη γεωγραφική συμβατότητα συγκεκριμένων ειδών κουνουπιών σε διάφορα κλιματικά σενάρια.

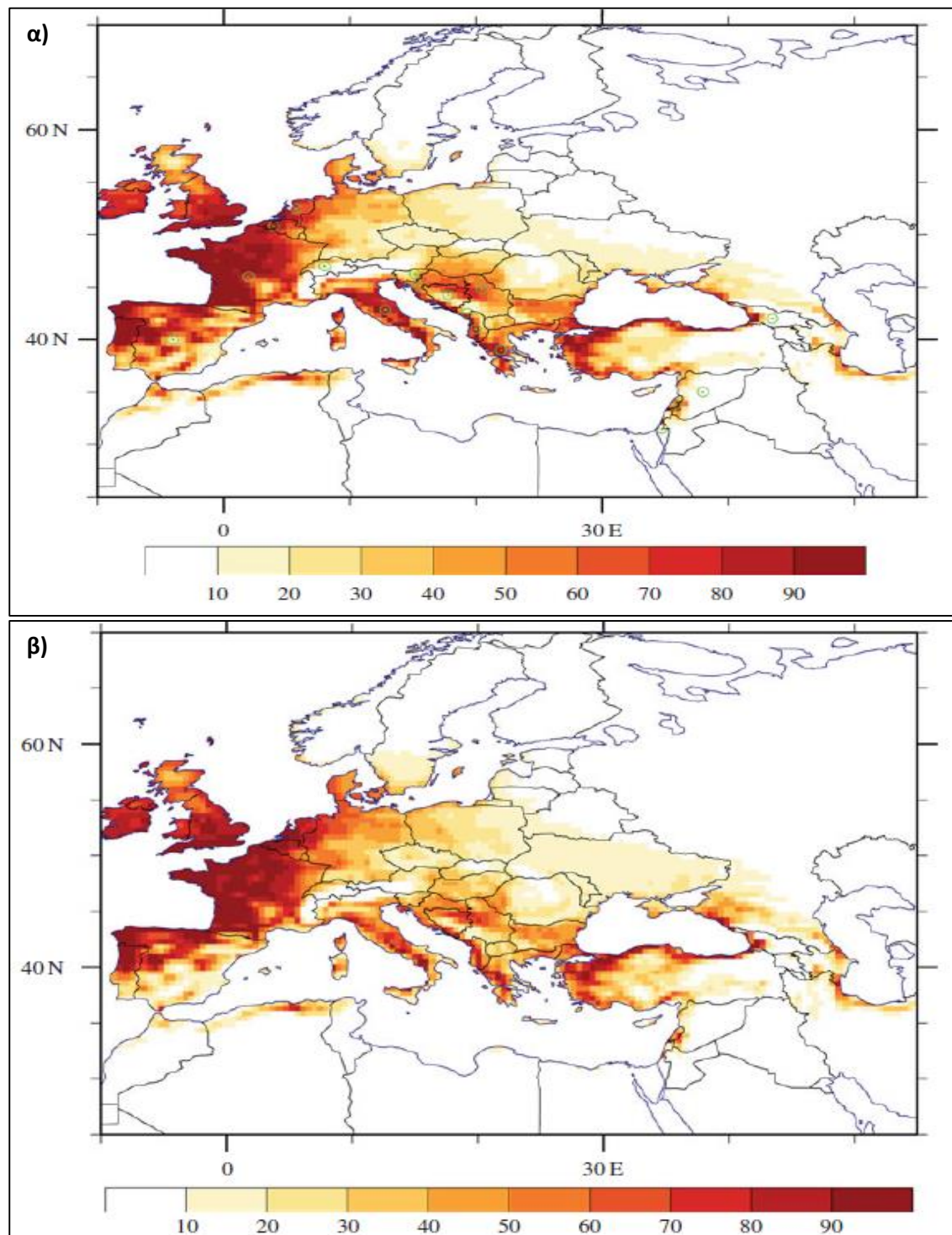
Λόγω της εξελισσόμενης κλιματικής αλλαγής η οποία λαμβάνει χώρα στον πλανήτη, οι πληθυσμοί των κουνουπιών αναμένεται να επηρεαστούν. Κλιματικά μοντέλα έχουν χρησιμοποιηθεί προκειμένου να πραγματοποιήσουν εκτιμήσεις σχετικά με την βιωσιμότητα διαφόρων ειδών κουνουπιών, σε διάφορες γεωγραφικές περιοχές, υπό την προϋπόθεση κλιματικών σεναρίων. Ειδικά για την Ευρώπη, οι διαθέσιμες μελέτες εστιάζουν στη διερεύνηση της πιθανής διασποράς των κουνουπιών εισβολέων του γένους *Aedes*.

Οι Proestos et al, 2015 εφήρμοσαν το κλιματικό μοντέλο EMAC με στόχο να κατασκευάσουν χάρτες που να οριοθετούν τις περιοχές της Ευρώπης στις οποίες είναι συμβατή η

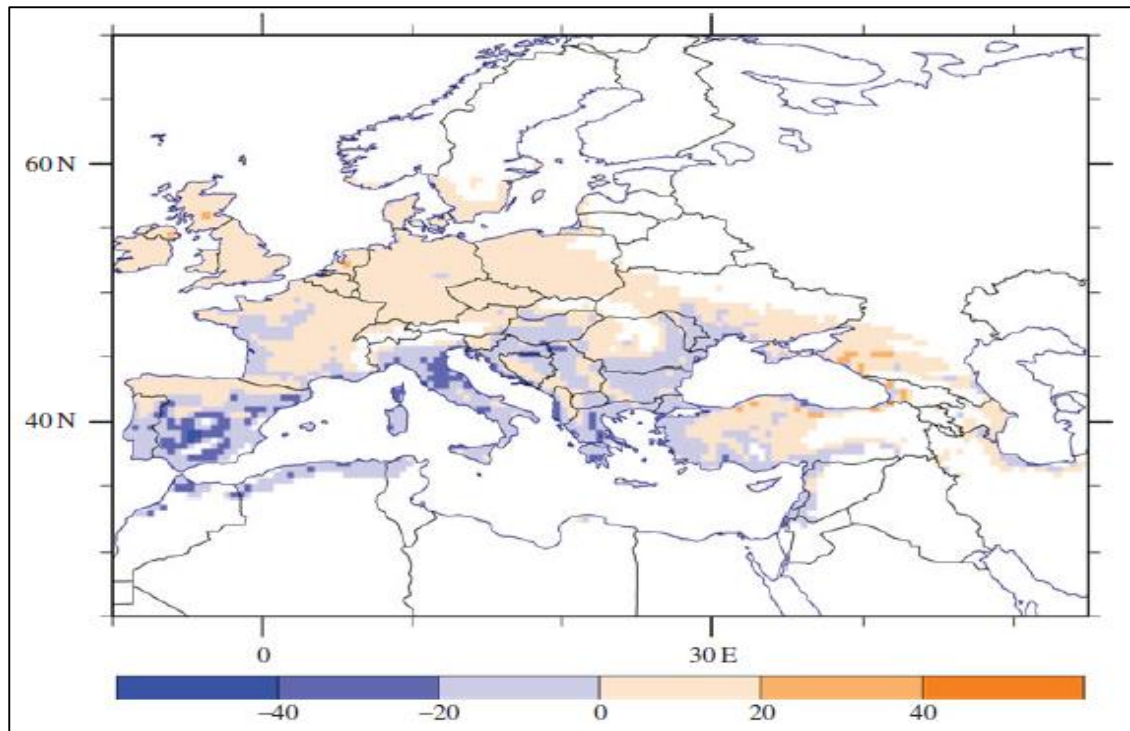
εγκαθίδρυση αποικιών του ασιατικού κουνουπιού τύπου «τίγρης» (*Aedes albopictus*), τόσο στο παρόν αλλά και στο μέλλον με βάση τις προϋποθέσεις που θέτει το κλιματικό σενάριο SRES-A2. Το κλιματικό αυτό σενάριο υποθέτει μέτριες έως υψηλές εκπομπές CO₂ και παραπέμπει σε έναν πολιτικά κατακερματισμένο κόσμο στον οποίο τα έθνη βασίζονται το καθένα σε μια αυτόνομη ανάπτυξη ενώ ο παγκόσμιος πληθυσμός συνεχώς αυξάνεται. Έξι εμπειρικά κριτήρια με βάση την υπάρχουσα βιβλιογραφία (π.χ. Waldock et al, 2013) τέθηκαν από τους Proestos et al, 2015, προκειμένου να ορίσουν με κλιματικούς όρους τις συνθήκες βιωσιμότητας για τα κουνούπια *Aedes albopictus*:

1. Το μέσο ετήσιο ύψος υετού να είναι τουλάχιστον 200mm
2. Η μέση ετήσια θερμοκρασία να είναι τουλάχιστον 8°C. Εργαστηριακά πειράματα έχουν δείξει ότι το κάτω θερμοκρασιακό όριο για την ανάπτυξη των αυγών, των προνυμφών και των νυμφών για τα *Aedes albopictus* είναι αντίστοιχα 12.8°C, 12.5°C και 9.6°C αντίστοιχα. Έτσι το όριο τέθηκε στους 8°C.
3. Για το βόρειο ημισφαίριο η ελάχιστη θερμοκρασία τον Ιανουάριο να είναι πάνω από -4°C, έτσι ώστε να εξασφαλίζεται η επιβίωση των αυγών των κουνουπιών κατά τη διάρκεια του χειμώνα.
4. Η μέγιστη θερμοκρασία του καλοκαιριού να μην υπερβαίνει τους 40°C καθώς τότε τα αυγά των *Aedes albopictus* δεν εκκολάπτονται.
5. Τουλάχιστον 60 μέρες τον χρόνο να έχουν ένα μετρήσιμο ύψος υετού της τάξεως του 1mm.
6. Η σχετική υγρασία το καλοκαίρι να είναι τουλάχιστον 30% και το χειμώνα τουλάχιστον 50%. Τα όρια αυτά τέθηκαν καθώς περιορισμένα δεδομένα στην διεθνή βιβλιογραφία δείχνουν ότι ο βαθμός επιβίωσης των *Aedes albopictus* αλλά και εκκόλαψης των αυγών τους αυξάνεται όταν ανέρχεται η σχετική υγρασία, αλλά και ότι η άνοδος της σχετικής υγρασίας στο 60% - 90% προκαλεί μικρή διαφορά στην επιβίωση των ενήλικων κουνουπιών του είδους.

Με βάση τα παραπάνω κριτήρια το μοντέλο EMAC χρησιμοποιήθηκε για να δημιουργήσει χάρτες συμβατότητας (%) για το είδος κουνουπιού *Aedes albopictus* στην Ευρώπη, τόσο για την πρόσφατη περίοδο 2000 – 2009, όσο και για την μελλοντική περίοδο 2045 – 2054 με βάση το κλιματικό σενάριο SRES-A2 (Εικόνα B9). Οι μεταβολές (%) στη συμβατότητα ανάμεσα στις δύο προαναφερθείσες χρονικές περιόδους διακρίνονται στο χάρτη της Εικόνας B10.



Εικόνα Β9: Χάρτες συμβατότητας (%) του κουνουπιού *Aedes albopictus* σύμφωνα με τα αποτελέσματα του κλιματικού μοντέλου EMAC για την Ευρώπη α) κατά την πρόσφατη περίοδο 2000 – 2009 (οι πράσινες τελείες δείχνουν τις χώρες στις οποίες ήδη υπάρχει καταγραφή του είδους) και β) κατά την μελλοντική περίοδο 2045 – 2054 με βάση το κλιματικό σενάριο SRES-A2. (Πηγή: Proestos et al, 2015)



Εικόνα Β10: Χάρτης που αποτυπώνει τις μεταβολές (%) στη συμβατότητα του κουνουπιού *Aedes albopictus* σε περιοχές της Ευρώπης, ανάμεσα στις περιόδους 2000 – 2009 και 2045 – 2054 (σενάριο SRES-A2), με βάση τα αποτελέσματα του κλιματικού μοντέλου EMAC. Περιοχές με συμβατότητα μικρότερη από 10% δεν ελήφθησαν υπ’ όψιν (Πηγή: Proestos et al, 2015)

Στην Εικόνα Β9α, φαίνεται ότι οι περιοχές της Ευρώπης στις οποίες οι κλιματικές συνθήκες ευνοούν την εισβολή των κουνουπιών *Aedes albopictus* είναι κατά κύριο λόγο οι περιοχές της Μεσογείου. Έτσι χώρες όπως η Ιταλία, η Ελλάδα, η Αλβανία, το Μαυροβούνιο, η Κροατία, η Βοσνία και Ερζεγοβίνη, το Δυτικό και το Βόρειο τμήμα της Τουρκίας αλλά και μεγάλα τμήματα της Ισπανίας και της Πορτογαλίας, έχουν συμβατές συνθήκες για το Ασιατικό κουνούπι «τίγρης». Επίσης η προσαρμογή του κουνουπιού «τίγρης» είναι εφικτή και σε βορειότερες περιοχές της Γαλλίας, της Ολλανδίας, του Βελγίου της Ιρλανδίας και της Νότιας Αγγλίας. Σε πολλές από τις προαναφερθείσες χώρες μάλιστα έχει ήδη καταγραφεί η εμφάνιση κουνουπιών του είδους *Aedes albopictus*. Αντιθέτως, χαμηλός βαθμός συμβατότητας καταγράφεται σε χώρες όπως η Γερμανία, η Τσεχία, η Πολωνία, η Σλοβακία και η Ουκρανία, γεγονός που αποδίδεται κυρίως στις χαμηλές ελάχιστες θερμοκρασίες που καταγράφονται κατά τον χειμώνα, όπως και συνολικά στις χαμηλές μέσες ετήσιες θερμοκρασίες. Βέβαια, οι Proestos et al, 2015 τονίζουν ότι σε κάποιες περιπτώσεις το Ασιατικό κουνούπι τίγρης έχει κάνει την εμφάνιση του και σε πόλεις όπου το μοντέλο EMAC προβλέπει χαμηλή συμβατότητα, γεγονός που οφείλεται στο μικροκλίμα που υπάρχει σε ορισμένες περιοχές αυτών των πόλεων (π.χ. πάρκα), όπου τα όρια θερμοκρασίας και υετού

καταστρατηγούνται. Από την Εικόνα Β9α γίνεται επίσης ξεκάθαρο ότι οι παράκτιες περιοχές της Μεσογείου είναι ιδιαιτέρως κατάλληλες για τα κουνούπια *Aedes albopictus*, λόγω του δροσισμού τους από τη θάλασσα κατά το θέρος, που έχει ως αποτέλεσμα η μέγιστη θερμοκρασία να παραμένει κάτω από το όριο των 40°C. Στην Ελλάδα οι πιο ευάλωτες περιοχές στο κουνούπι τίγρης φαίνεται να βρίσκονται σε τμήματα της Δυτικής αλλά και της κεντρικής ηπειρωτικής χώρας, της Πελοποννήσου και της Ανατολικής Μακεδονίας και της Θράκης.

Σύμφωνα με την Εικόνα Β9β, αλλά και την Εικόνα Β10, η παγκόσμια θέρμανση που θα συμβεί με βάση το σενάριο SRES-A2, οδηγεί σε μια προς βορά μετατόπιση της ζώνης συμβατότητας του κουνουπιού *Aedes albopictus* στην Ευρώπη. Βέβαια η γενική εικόνα δεν αλλάζει με τις Μεσογειακές χώρες να παραμένουν ιδιαιτέρως ευνοϊκές για την εισβολή και εγκατάσταση του Ασιατικού κουνουπιού «τίγρης» κατά την περίοδο 2045 – 2054, με μειωμένη όμως συμβατότητα σε σύγκριση με την περίοδο 2000 – 2009. Αντιθέτως οι βόρειες χώρες λόγω της ανόδου της θερμοκρασίας φαίνεται να αποκτούν χαρακτηριστικά που θα επιτρέψουν στο μέλλον την εγκατάσταση του *Aedes albopictus*. Σε ότι αφορά την Ελλάδα, οι πιο ευαίσθητες περιοχές για την ανάπτυξη του Ασιατικού κουνουπιού «τίγρης» παραμένουν ίδιες κατά την περίοδο 2045 – 2054 σε σχέση με την περίοδο 2000 – 2009, με μειωμένη όμως συμβατότητα όπως και στις υπόλοιπες Μεσογειακές χώρες. Ανοδική τάση του δείκτη συμβατότητας στην Ελληνική επικράτεια διαφαίνεται μόνο σε περιορισμένα τμήματα της Δυτικής και της Ανατολικής Μακεδονίας (Εικόνα Β10).

Η μελέτη των Cunze et al, 2016, εστίασε επίσης στην εκτίμηση της συμβατότητας των ειδών των κουνουπιών *Aedes albopictus* και *Aedes japonicus* στην Ευρώπη, στις παρούσες κλιματικές συνθήκες, αλλά και με βάση τα μελλοντικά κλιματικά σενάρια RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6.0 και RCP 8.5. Το σενάριο RCP 2.6 βασίζεται στην υπόθεση ότι το μέγιστο των παγκόσμιων εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου θα συμβεί κατά την τρέχουσα δεκαετία 2010-2020, ενώ στη συνέχεια θα ακολουθήσει σημαντική μείωση. Σύμφωνα με τα σενάρια RCP 4.5 και RCP 6.0, οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου θα αυξάνονται μέχρι το 2040 και το 2080 αντίστοιχα και μετά θα μειωθούν. Τέλος με βάση το σενάριο RCP 8.5 οι παγκόσμιες εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου θα συνεχίσουν να αυξάνονται καθ' όλη τη διάρκεια του 21^{ου} αιώνα.

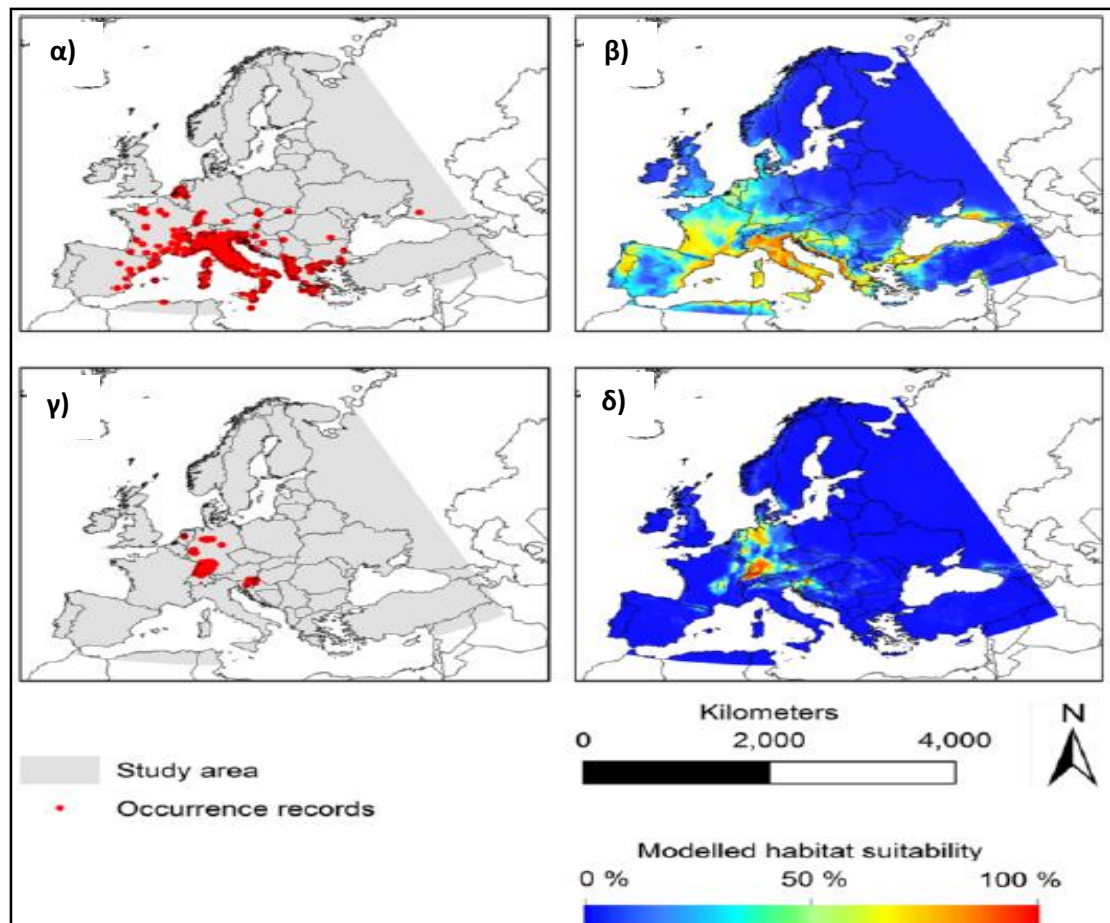
Σύμφωνα με τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων των Cunze et al, 2016, με βάση τις τωρινές κλιματικές συνθήκες οι περιοχές στις οποίες είναι συμβατή η ανάπτυξη των κουνουπιών *Aedes albopictus* και *Aedes japonicus* είναι ξεκάθαρα διακριτές (Εικόνα Β11).

Οι κατάλληλες συνθήκες για την βιωσιμότητα των *Aedes albopictus* εντοπίζονται κυρίως στις Μεσογειακές περιοχές που χαρακτηρίζονται από θερμά και ξηρά καλοκαίρια και ήπιους και υγρούς χειμώνες. Σε ότι αφορά την Ελλάδα, σε συμφωνία με τα αποτελέσματα των Proestos et al, 2015 (Εικόνα B9α), οι Cunze et al, καταλήγουν επίσης στο συμπέρασμα ότι στην παρούσα κλιματική κατάσταση οι βέλτιστες συνθήκες για την ανάπτυξη εγκατάσταση των *Aedes albopictus* υπάρχουν στη Δυτική και την κεντρική ηπειρωτική Ελλάδα και σε τμήματα της Μακεδονίας και της Θράκης. Αντιθέτως τα κουνούπια του είδους *Aedes japonicus* μπορούν να προσαρμοστούν μόνο σε ψυχρότερες περιοχές της κεντρικής Ευρώπης, οι οποίες βρίσκονται κυρίως στην Γερμανία, τη Γαλλία, την Ελβετία, τη βόρεια Ιταλία, την Σλοβενία και την Κροατία, οπότε το συγκεκριμένο είδος κουνουπιού δεν φαίνεται να αποτελεί απειλή για την Ελλάδα. Από την Εικόνα B11 γίνεται ξεκάθαρο ότι οι καταγεγραμμένες εμφανίσεις μέχρι το έτος 2015 για τα *Aedes albopictus* και για τα *Aedes japonicus*, όπως ήταν αναμενόμενο εντοπίζονται στις περιοχές με υψηλή συμβατότητα για το κάθε είδος.

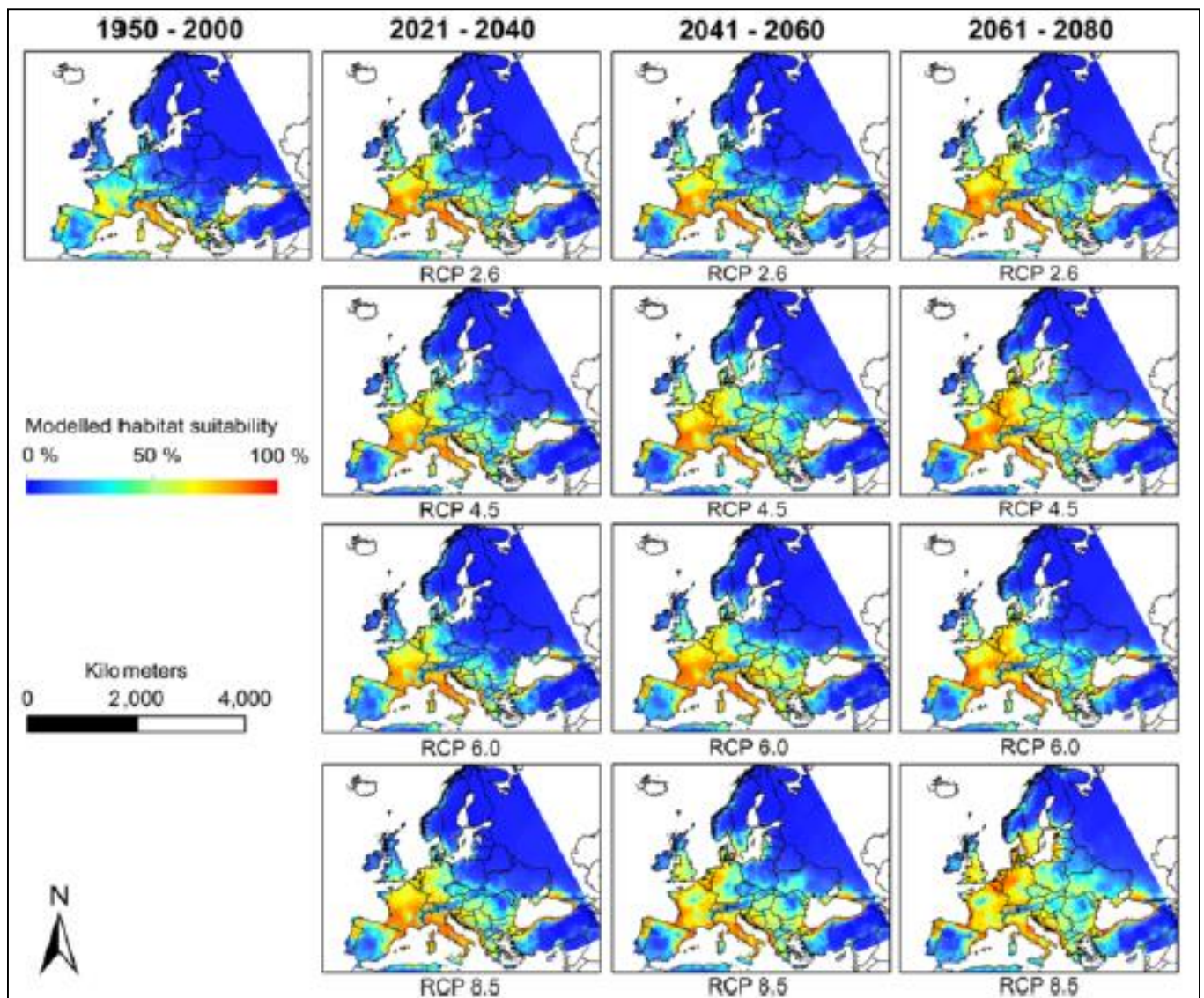
Με βάση όλα τα πιθανά μελλοντικά κλιματικά σενάρια, οι περιοχές συμβατότητας για το κουνούπι *Aedes albopictus* αναμένεται να επεκταθούν προς βορά αλλά και προς τα ανατολικά, με μεγάλα τμήματα της Γαλλίας, του Βελγίου, της Ολλανδίας και της Γερμανίας να αποκτούν υψηλή συμβατότητα (Εικόνα B12). Η ελάχιστη άνοδος στη συμβατότητα για το κουνούπι «τίγρης» αντιστοιχίζεται με το ευνοϊκότερο σενάριο RCP 2.6, το οποίο χαρακτηρίζεται από την μικρότερη άνοδο της θερμοκρασίας, ενώ η μέγιστη άνοδος της συμβατότητας παρατηρείται στο σενάριο RCP 8.5, το οποίο χαρακτηρίζεται από την μεγαλύτερη άνοδο της θερμοκρασίας. Αντιθέτως στις μεσογειακές χώρες η συμβατότητα του *Aedes albopictus* αναμένεται να παραμείνει σταθερή, σύμφωνα με όλα τα κλιματικά σενάρια, ή και να μειωθεί σε κάποιες περιπτώσεις με χαρακτηριστικότερη αυτή της Ιταλίας για το δυσμενέστερο σενάριο RCP 8.5, λόγω των πολύ αυξημένων θερμοκρασιών και της επερχόμενης ξηρασίας. Στην Ελλάδα, η βιωσιμότητα του κουνουπιού «τίγρης» αναμένεται επίσης να παραμείνει σταθερή, με μια τάση ελαφριάς μείωσης, ενώ οι περιοχές ενδιαφέροντος στις οποίες θα πρέπει να υπάρχει αυξημένη επιφυλακή από την πολιτεία εντοπίζονται και πάλι στα Δυτικά και κεντρικά ηπειρωτικά τμήματα της χώρας, την Μακεδονία και τη Θράκη.

Σε αντίθεση με την επεκτατική τάση που αναμένεται να έχει το κουνούπι *Aedes albopictus* μέσα στον 21^ο αιώνα στην Ευρώπη λόγω της κλιματικής αλλαγής, τα κουνούπια του είδους *Aedes japonicus* αναμένεται να έχουν όλο και μικρότερη περιοχή δυνατής δράσης (Εικόνα B13), καθώς έχουν την ανάγκη χαμηλότερων θερμοκρασιών. Συγκεκριμένα, η επερχόμενη

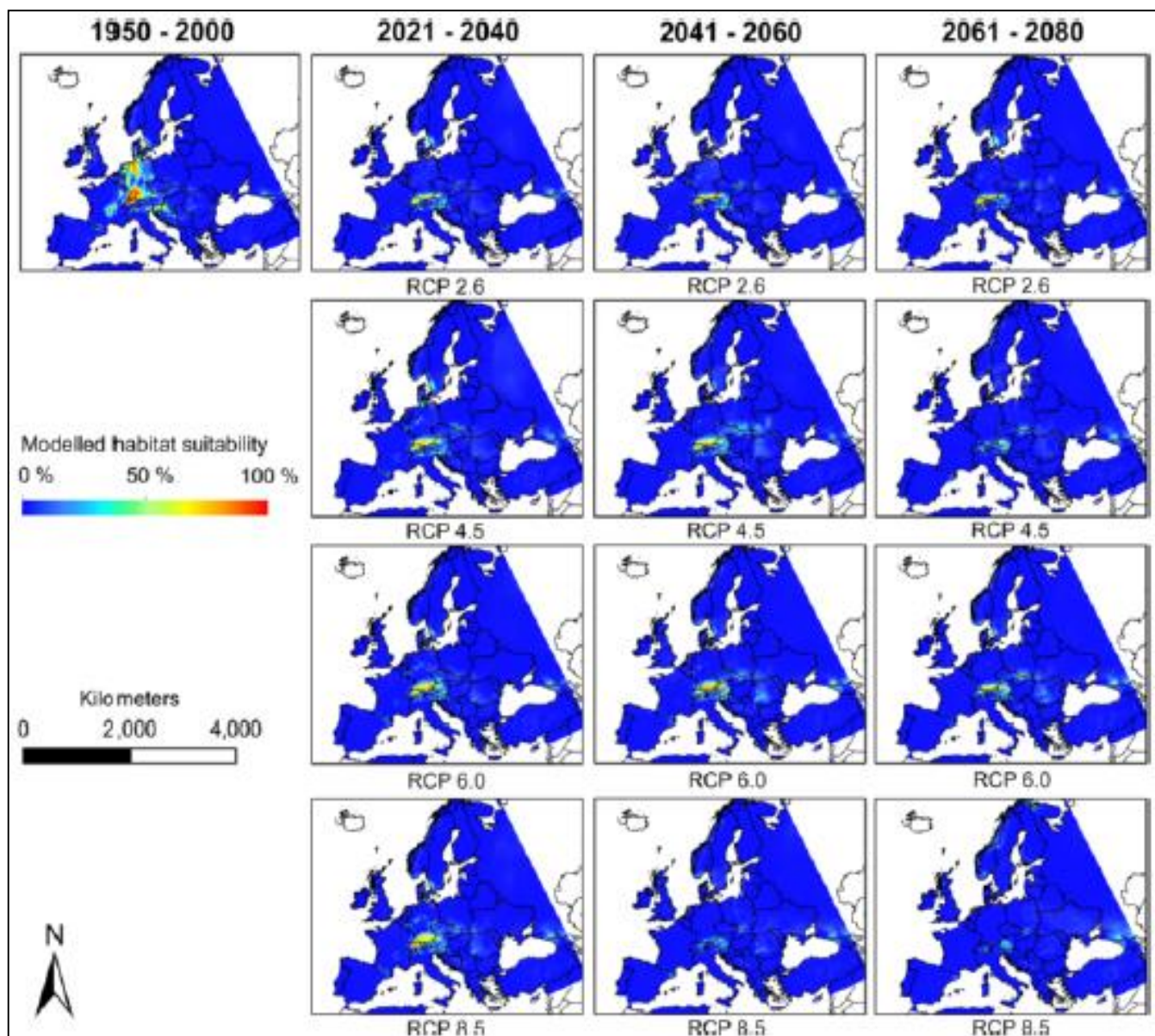
άνοδος της θερμοκρασίας αναμένεται να οριοθετήσει τις περιοχές που ευνοούν την δράση των *Aedes japonicus* μόνο σε τμήματα της νότιας Γερμανίας, της Αυστρίας και στην οροσειρά των Υψηλών Τάτρα (οροσειρά που απλώνεται κατά μήκος των βόρειων συνόρων της Σλοβακίας με τη νότια Πολωνία). Ανάλογα με το κλιματικό σενάριο που επιλέγεται, παρατηρούνται αποκλίσεις στην εξέλιξη της συμβατότητας του είδους *Aedes japonicus*, με τις περιοχές που ευνοούν την προσαρμογή του σχεδόν να απαλείφονται από την Ευρώπη στο δυσμενέστερο σενάριο RCP 8.5, λόγω της πολύ μεγάλης ανόδου της θερμοκρασίας (Εικόνα Β13). Στην Ελλάδα παρατηρείται μηδενική πιθανότητα εγκατάστασης κουνουπιών του είδους *Aedes japonicus*, τόσο υπό τις παρούσες κλιματικές συνθήκες όσο και με βάση όλα τα πιθανά μελλοντικά κλιματικά σενάρια.



Εικόνα Β11: α) Καταγεγραμμένες εμφανίσεις για τα κουνούπια του είδους *Aedes albopictus* στην Ευρώπη μέχρι το έτος 2015 β) Χάρτης συμβατότητας για τα κουνούπια του είδους *Aedes albopictus* με τις παρούσες κλιματικές συνθήκες γ) Καταγεγραμμένες εμφανίσεις για τα κουνούπια του είδους *Aedes japonicus* στην Ευρώπη μέχρι το έτος 2015 δ) Χάρτης συμβατότητας για τα κουνούπια του είδους *Aedes japonicus* με τις παρούσες κλιματικές συνθήκες. (Πηγή: Cunze et al, 2016)



Εικόνα Β12: Χάρτες συμβατότητας για το κουνούπι *Aedes albopictus* υπό τις τωρινές αλλά και τις μελλοντικές κλιματικές συνθήκες με βάση τα σενάρια RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6.0 και RCP 8.5. (Πηγή: Cunze et al, 2016)



Εικόνα B13: Χάρτες συμβατότητας για το κουνούπι *Aedes japonicus* υπό τις τωρινές αλλά και τις μελλοντικές κλιματικές συνθήκες με βάση τα σενάρια RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6.0 και RCP 8.5. (Πηγή: Cunze et al, 2016)

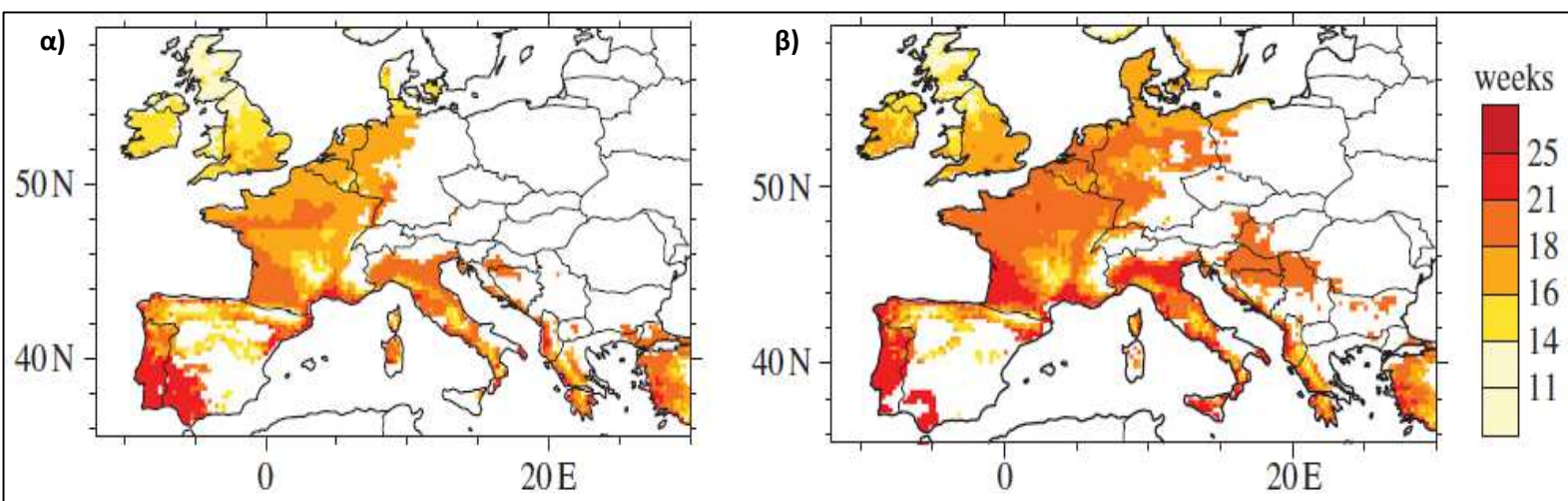
B4.2: Πιθανές μεταβολές στη δυνητική ετήσια διάρκεια της δραστηριότητας του κουνουπιού *Aedes albopictus* με βάση το σενάριο κλιματικής αλλαγής SRES-A1B

Στη μελέτη των Caminade et al, 2012, χρησιμοποιήθηκε ένας συνδυασμός 10 διαφορετικών περιφερειακών κλιματολογικών μοντέλων και εκτιμήθηκε η εξέλιξη που είχε η δυνητική διάρκεια (σε εβδομάδες) της δραστηριότητας των κουνουπιών *Aedes albopictus* στην Ευρώπη ανά έτος κατά τις περιόδους 1960 – 1989 και 1990 – 2009, ενώ έγινε και μια εκτίμηση της δυνητικής διάρκειας της δραστηριότητας τους ανά έτος για την μελλοντική

περίοδο 2030 – 2050, με βάση το σενάριο κλιματικής αλλαγής SRES-A1B. Το σενάριο αυτό γενικά προβλέπει άνοδο του παγκόσμιου πληθυσμού μέχρι τα μέσα του 21^{ου} αιώνα, ενώ χαρακτηρίζεται και από μια ισοδύναμη χρήση ορυκτών και μη ορυκτών ενεργειακών πόρων, καταλήγοντας σε ενδιάμεσες εκπομπές CO₂. Το συνδυαστικό μοντέλο των Caminade et al, 2012, χρησιμοποίησε μέσες εβδομαδιαίες θερμοκρασίες και φωτοπερίόδους στην Ευρώπη, μαζί με ένα κριτήριο επιβίωσης των αυγών των κουνουπιών *Aedes albopictus* κατά τη διάρκεια του χειμώνα. Ως φωτοπερίοδος ορίστηκε η χρονική διάρκεια ανάμεσα στην ανατολή και τη δύση του ηλίου σε κάθε σημείο του χρησιμοποιούμενου πλέγματος. Επίσης, οι περιοχές που έχουν μέση ετήσια βροχόπτωση πάνω από 500mm και μέση θερμοκρασία του μηνός Ιανουαρίου πάνω από 2°C, θεωρήθηκαν ως συμβατές για την επιβίωση των κουνουπιών κατά τη διάρκεια του χειμώνα, με βάση το κριτήριο που τέθηκε (Caminade et al, 2012 supplemental material). Αρχικά χρησιμοποιήθηκε το κριτήριο για την χειμερινή επιβίωση των αυγών, προκειμένου να αποκλειστούν από τη μελέτη περιοχές που δεν αναμένεται να ευνοούν την ανάπτυξη των *Aedes albopictus*, ενώ στη συνέχεια η έναρξη της ανοιξιάτικης εκκόλαψης των αυγών και η φθινοπωρινή διάπαυση (περίοδος ανάσχεσης της δραστηριότητας των κουνουπιών) οριοθετήθηκαν με βάση τις τιμές της θερμοκρασίας και της διάρκειας της φωτοπερίοδου (εκκόλαψη αυγών: θερμοκρασία > 10.5°C & διάρκεια φωτοπερίοδου > 11.25h, διάπαυση: θερμοκρασία < 9.5°C & διάρκεια φωτοπερίοδου < 13.5h).

Οι προσομοιωμένες δυνητικές διάρκειες δραστηριότητας του κουνουπιού *Aedes albopictus* στην Ευρώπη ανά έτος κατά τις περιόδους 1960 – 1989 και 1990 – 2009 διακρίνονται στην Εικόνα B14. Για την περίοδο 1960 – 1989, οι περιοχές στις οποίες η δραστηριότητα του κουνουπιού θα μπορούσε να έχει την μεγαλύτερη διάρκεια (περίπου 5 μήνες) είναι η νότια Γαλλία, η Βορειοδυτική ακτή και τα Νοτιοδυτικά τμήματα της Ισπανίας, η Πορτογαλία, η Ιταλία και η Δυτική Τουρκία. Το παράθυρο της ετήσιας δραστηριότητας του Ασιατικού κουνουπιού «τίγρης» στην Ευρώπη γενικά διευρύνθηκε κατά την περίοδο 1990 – 2009, με τις πιο ισχυρές ανοδικές τάσεις να παρατηρούνται στην βόρεια Ιταλία, την Νοτιοδυτική και την Νοτιοανατολική Γαλλία, την Σικελία και τις βόρειες ακτές της Ισπανίας. Ενίσχυση παρατηρείται και σε βορειότερες περιοχές της Ευρώπης όπως η Γερμανία, η Ολλανδία και το Βέλγιο, λόγω των υψηλότερων χειμερινών θερμοκρασιών, ενώ η διάρκεια δραστηριότητας δείχνει να περιορίζεται ισχυρά στη νότια Ισπανία και την Σαρδηνία λόγω των ξηρότερων συνθηκών. Στην Ελλάδα οι καλύτερες συνθήκες για πιο επιμηκυμένη δράση του κουνουπιού *Aedes albopictus* κατά τις περιόδους 1960 – 1989 και 1990 – 2009 εντοπίζονται στα Δυτικά τμήματα της ηπειρωτικής χώρας, με τάση ενίσχυσης κατά την

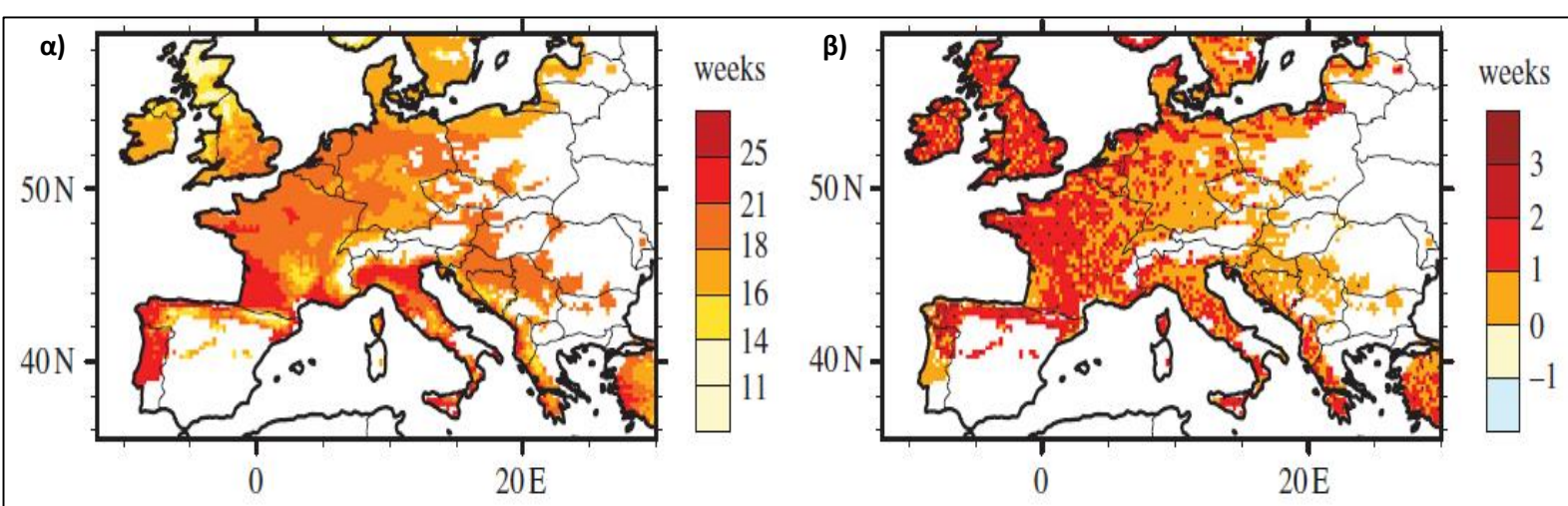
δεκαετία 1990 – 2009. Η δυνατή διάρκεια δραστηριότητας του κουνουπιού «τίγρης» σε αυτά τα τμήματα της Ελλάδας κατά τις προαναφερθείσες περιόδους εκτιμήθηκε στις 15-25 εβδομάδες (Εικόνα Β14). Σε αυτό το σημείο πρέπει να τονισθεί το γεγονός ότι οι χάρτες στην Εικόνα Β14 παρουσιάζουν απλώς δυνητικές διάρκειες δραστηριότητας ανά έτος, δηλαδή αποτυπώνουν απλώς την εφικτή διάρκεια δραστηριότητας των κουνουπιών στη διάρκεια ενός έτους με βάση τις κλιματολογικές συνθήκες κάθε περιοχής. Για παράδειγμα στην Ελλάδα παρουσιάζεται η εφικτή διάρκεια δραστηριότητας των κουνουπιών *Aedes albopictus* κατά τις περιόδους 1960 – 1989 και 1990 – 2009, ενώ το κουνούπι «τίγρης» εντοπίστηκε για πρώτη φορά το 2005.



Εικόνα Β14: Χάρτες δυνητικής διάρκειας (σε εβδομάδες) ανά έτος της δραστηριότητας των κουνουπιών *Aedes albopictus* κατά τις περιόδους α) 1960 – 1989 και β) 1990 – 2009 (Πηγή: Caminade et al, 2012)

Κατά την μελλοντική περίοδο 2030 – 2050, αναμένεται σύμφωνα με τους Caminade et al, 2012 μια ενίσχυση της δυνητικής διάρκειας ανά έτος της δραστηριότητας των κουνουπιών *Aedes albopictus* σε περιοχές της βόρειας Ευρώπης, στις οποίες το Ασιατικό κουνούπι «τίγρης» δείχνει να μπορεί να επεκταθεί (Εικόνα Β15). Αυτή η επέκταση αποδίδεται κυρίως στη υπέρβαση του κριτηρίου επιβίωσης των αυγών των κουνουπιών κατά τη διάρκεια του χειμώνα, λόγω των υψηλότερων θερμοκρασιών που αναμένεται να βιώνουν αυτές οι περιοχές κατά τη διάρκεια του χειμώνα. Αυτό το κριτήριο είναι ο παράγοντας που προφυλάσσει μέχρι στιγμής τις βορειότερες περιοχές της Ευρώπης από την επέκταση του Ασιατικού κουνουπιού «τίγρης», αλλά αναμένεται να ανατραπεί λόγω της κλιματικής αλλαγής. Στις Μεσογειακές περιοχές αναμένεται να προκύψει μια μικτή εικόνα, με τα νότια τμήματα της Πορτογαλίας και της Ισπανίας να γίνονται τελείως ακατάλληλα λόγω των

υπερβολικά θερμών και ξηρών συνθηκών, ενώ αντιθέτως η δυνητική διάρκεια δραστηριότητας του *Aedes albopictus* αναμένεται να επιμηκυνθεί την Ιταλία και την Ελλάδα. Ειδικότερα για την Ελλάδα, οι περιοχές στις οποίες αναμένεται να δραστηριοποιείται το κουνούπι «τίγρης» παραμένουν στα Δυτικά τμήματα της ηπειρωτικής χώρας και το σύνολο της Πελοποννήσου, σε συμφωνία και με τα ευρήματα των Proestos et al, 2015 (Εικόνα B9), ενώ η άνοδος στην δυνητική περίοδο δράσης των κουνουπιών του είδους εκτιμάται περίπου από μία έως δύο εβδομάδες (Εικόνα B15β). Η συνολική περίοδος δράσης των *Aedes albopictus* αναμένεται πάντως να παραμείνει στα επίπεδα των 15 έως 25 εβδομάδων ανά έτος (Εικόνα B15α).



Εικόνα B15: α) Δυνητική διάρκεια (σε εβδομάδες) ανά έτος της δραστηριότητας των κουνουπιών *Aedes albopictus* κατά την περίοδο 2030 – 2050 β) Μεταβολές στη δυνητική διάρκεια δραστηριότητας των κουνουπιών *Aedes albopictus* κατά την περίοδο 2030 – 2050, σε σχέση με την περίοδο 1990 – 2009 (οι μαύρες τελείες σηματοδοτούν σημεία του πλέγματος στα οποία η μέση μεταβολή της διάρκειας των κατάλληλων συνθηκών δραστηριότητας των κουνουπιών ήταν ισχυρή, ήτοι τουλάχιστον διπλάσια από την τυπική απόκλιση του συνδυαστικού κλιματικού μοντέλου) (Πηγή: Caminade et al, 2012)

B5: Εκτίμηση της διάδοσης ασθενειών από κουνούπια φορείς με βάση σενάρια κλιματικής αλλαγής

B5.1: Ιός του Δυτικού Νείλου

Οι Semenza et al, 2016, πραγματοποίησαν μια εκτίμηση της διάδοσης του ιού του Δυτικού Νείλου στην Ευρώπη κατά τα έτη 2025 και 2050, με βάση το κλιματικό σενάριο SRES-A1B.

Το σενάριο αυτό επιλέχθηκε καθώς χαρακτηρίζεται από ισορροπημένη αναλογία ανάμεσα στη χρήση ορυκτών και μη ορυκτών καυσίμων. Η εκτίμηση των Semenza et al, 2016 πραγματοποιήθηκε με βάση ένα μοντέλο πολυπαραγοντικής λογιστικής παλινδρόμησης, το οποίο έλαβε υπ' όψιν για κάθε περιοχή παράγοντες όπως τον πληθυσμό, τις θερμοκρασίες του μηνός Ιουλίου, την πιθανότητα διέλευσης μεταναστευτικών πουλιών που αποτελούν δυνητικούς φορείς του ιού, την ύπαρξη βλάστησης και στάσιμων υδάτων που προσφέρουν ιδανικές συνθήκες για την ανάπτυξη των κουνουπιών του γένους *Culex* τα οποία ενδημούν σε πολλές περιοχές της Ευρώπης και αποτελούν τον κύριο διαβιβαστή της νόσου κ.α.

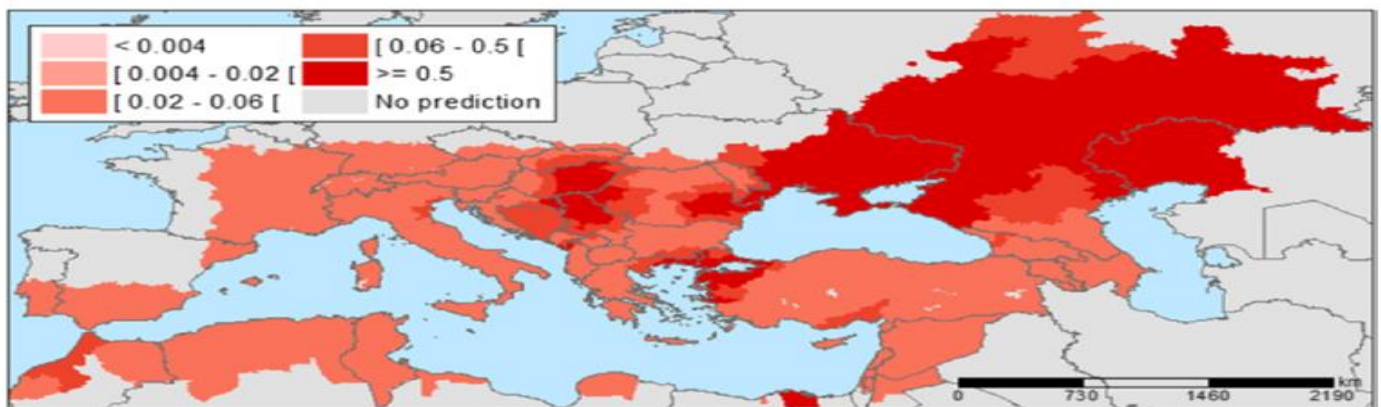


Εικόνα B16: Χάρτης Περιοχών με πιθανά και επιβεβαιωμένα αυτόχθονα κρούσματα του ιού του Δυτικού Νείλου κατά το έτος 2014 στην Ευρώπη και σε γειτονικές χώρες. (Πηγή: Semenza et al, 2016)

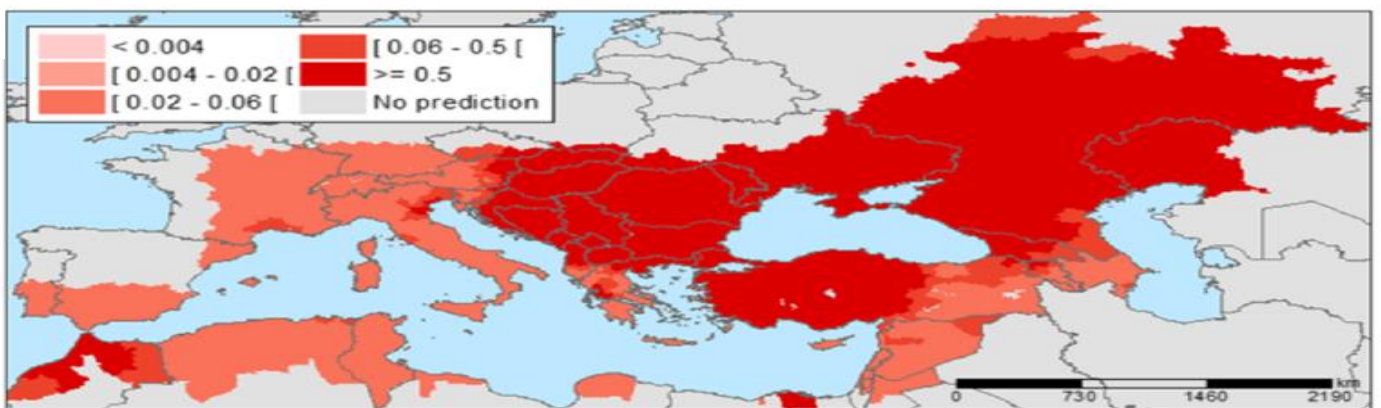
Συνολικά κατά το έτος 2014 κατεγράφησαν σε χώρες της Ευρώπης αλλά και σε χώρες που γειτνιάζουν με την Ευρώπη (Εικόνα B16) 210 πιθανά και επιβεβαιωμένα κρούσματα του ιού του Δυτικού Νείλου, 15 από τα οποία εντοπίστηκαν στην Ελλάδα. Ως επιβεβαιωμένα κρούσματα ορίζονται αυτά που έχουν ταυτοποιηθεί εργαστηριακά, ενώ ως πιθανά εκείνα στα οποία οι ασθενείς είχαν την αναμενόμενη κλινική εικόνα και επιπλέον είτε είχαν κάποια επιδημιολογική διασύνδεση για την μετάδοση του ιού είτε είχαν υποστεί κάποιον εργαστηριακό έλεγχο που υποδεικνύει πιθανή μετάδοση του ιού. Οι περιοχές της Ελλάδας στις οποίες καταγράφηκαν οι 15 αυτές περιπτώσεις βρίσκονται στην Αττική, την Ηλεία και την Ανατολική Μακεδονία και τη Θράκη (Εικόνα B16). Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του μοντέλου των Semenza et al, 2016, κατά τα έτη 2025 και 2050 αναμένεται μια επέκταση των περιοχών με αυξημένη πιθανότητα για κρούσματα του ιού του Δυτικού Νείλου στην Ευρώπη (Εικόνα B17), σε σχέση με τις περιοχές στις οποίες εντοπίστηκαν κρούσματα το

2014 (Εικόνα B16). Οι επέκταση αυτή εστιάζεται κυρίως γύρω από τις περιοχές στις οποίες υπήρξαν και προγενέστερα περιστατικά μετάδοσης του ιού (Εικόνες B16 και B17). Συγκεκριμένα, για το έτος 2025 αυξημένη πιθανότητα για αυτόχθονη μετάδοση του ιού έχουν χώρες όπως η Σερβία, η Ουγγαρία, η Ρουμανία και η Ελλάδα (Εικόνα B17α), οι οποίες επλήγησαν από τον ιό και στο παρελθόν (Εικόνα B16). Στην Ελλάδα, για το έτος 2025, οι περιοχές υψηλού κινδύνου εντοπίζονται στην κεντρική Μακεδονία και ιδιαίτερα στην Ανατολική Μακεδονία και τη Θράκη (Εικόνα B17α). Κατά το έτος 2050, αναμένεται μια περεταίρω επέκταση των περιοχών της Ευρώπης με υψηλή πιθανότητα για κρούσματα του ιού του Δυτικού Νείλου, με επίκεντρο πάντα τις χώρες της Βαλκανικής χερσονήσου και τις χώρες της Κεντρικής Ευρώπης που συνορεύουν με τα Βαλκάνια (Εικόνα B17β). Στην Ελλάδα κατά το έτος 2050, οι περιοχές αυξημένης επικινδυνότητας, οι οποίες παρουσιάζουν εκτιμώμενη πιθανότητα εμφάνισης κρουσμάτων πάνω από 50%, καταλαμβάνουν πλέον ολόκληρη την Μακεδονία και τη Θράκη ενώ αναμένεται να επεκταθούν και σε τμήματα της κεντρικής ηπειρωτικής χώρας με έμφαση στο νομό Αιτωλοακαρνανίας (Εικόνα B17β).

α)



β)



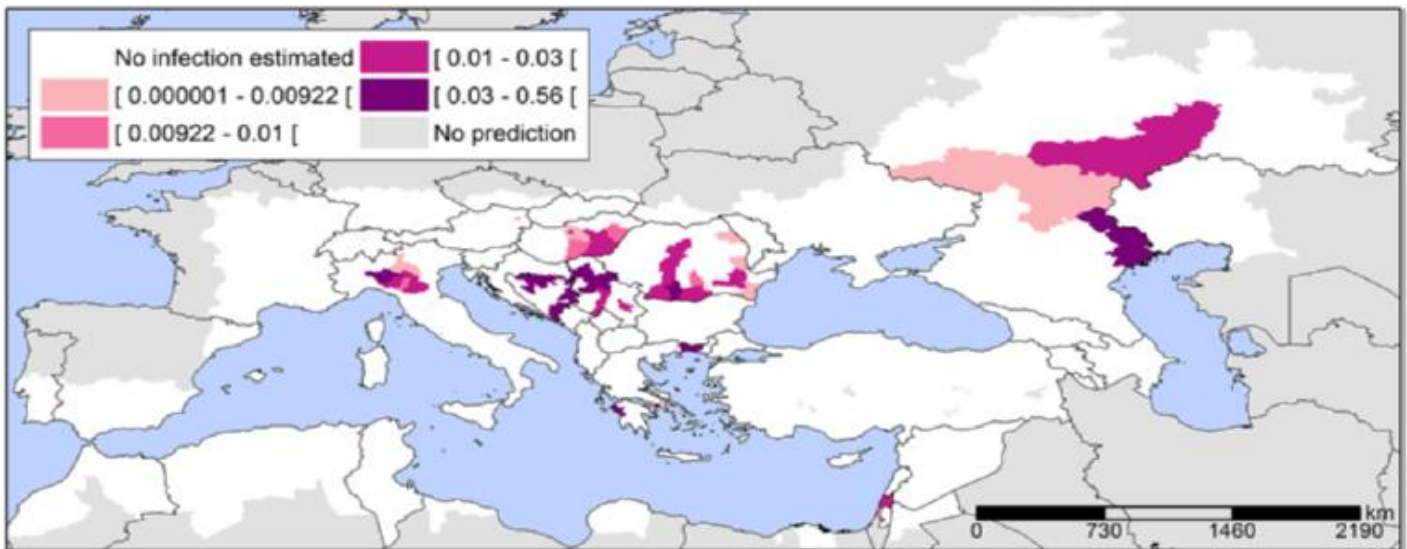
Εικόνα B17: Χάρτες εκτιμώμενης πιθανότητας για τη ύπαρξη αυτόχθονων κρουσμάτων του ιού του Δυτικού Νείλου σε περιοχές της Ευρώπης και γειτονικών χωρών α) για το έτος 2025 β) για το έτος 2050 (Πηγή: Semenza et al, 2016)

Η προαναφερθείσα μελλοντική επέκταση των περιοχών με πιθανότητα εμφάνισης κρουσμάτων του ιού του Δυτικού Νείλου στην Ευρώπη και την Ελλάδα, με βάση το κλιματικό σενάριο SRES-A1B, αποδίδεται από τους Semenza et al, 2016 κυρίως στην αύξηση των περιστατικών ακραίων υψηλών θερμοκρασιών κατά τον μήνα Ιούλιο. Ειδικότερα, οι πολύ υψηλές τιμές θερμοκρασίας μπορεί να οδηγήσουν σε άνοδο του ρυθμού ανάπτυξης των κουνουπιών διαβιβαστών του ιού, σε μείωση του χρονικού διαστήματος που μεσολαβεί ανάμεσα στα γεύματα αίματος των κουνουπιών, σε μείωση του χρόνου επώασης του ιού μέσα στα κουνούπια φορείς και σε άνοδο της μεταδοτικότητας τους (Paz, 2015, Paz and Semenza, 2013, Reisen et al, 2006). Κατά συνέπεια, αυτές οι ακραίες τιμές θερμοκρασιών μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως δείκτης για την λήψη μέτρων προκειμένου να αντιμετωπιστούν τυχόν ξεσπάσματα επιδημιών του ιού. Τα μέτρα αυτά μπορεί να περιλαμβάνουν την ενίσχυση της ιατρικής/εργαστηριακής υποδομής, την καταγραφή των περιοχών αναπαραγωγής των κουνουπιών αλλά και την εφαρμογή μέτρων για την μείωση του πληθυσμού τους.

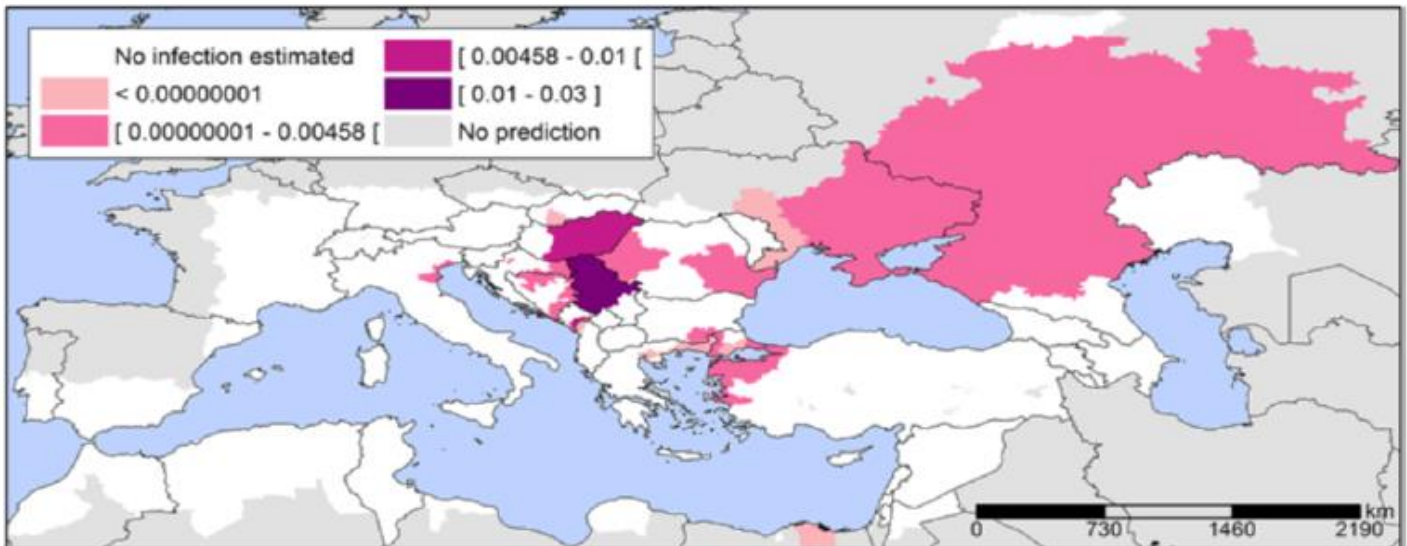
Επιπροσθέτως, ειδική έμφαση δίνεται από τους Semenza et al, 2016 και στην πιθανή μετάδοση του ιού του Δυτικού Νείλου μέσω των μεταγγίσεων αίματος. Λόγω της αναμενόμενης εξάπλωσης των κρουσμάτων του ιού σε ευρύτερες περιοχές της Ευρώπης, μεγαλύτερος πληθυσμός πιθανών αιμοδοτών θα βρίσκεται εκτεθειμένος σε πιθανή μετάδοση του ιού, ιδιαίτερα αν η περίοδος δράσης των κουνουπιών διαβιβαστών διευρυνθεί. Η ασυμπτωματική φάση της μόλυνσης από τον ιό του Δυτικού Νείλου, αν και σχετικά σύντομη σε σχέση με εκείνη άλλων ασθένειών όπως η υπατίτιδα Β ή ο ιός HIV, αυξάνει την πιθανότητα μετάδοσης μέσω μεταγγίσεων, ενώ ο ιός έχει τη δυνατότητα να επιβιώνει μέσα στις φιάλες αίματος. Κατά συνέπεια οι Semenza et al, 2016 εκτίμησαν την πιθανότητα να είχαν μολυνθεί δωρητές αίματος στην Ευρώπη το 2014 αλλά και την πιθανότητα να μολυνθούν το 2025. Από την Εικόνα B18 προκύπτει ότι για το 2014 υψηλή πιθανότητα για μετάδοση του ιού μέσω μεταγγίσεων εντοπίστηκε στα Βόρεια Ιταλία, τα Βαλκάνια και σε χώρες της κεντρικής Ευρώπης που συνορεύουν με χώρες της Βαλκανικής χερσονήσου, ενώ όπως είναι φυσιολογικό η αναμενόμενη επέκταση του ιού στην Ευρώπη το 2025 οδηγεί και σε μια πιθανότητα ευρύτερης διάδοσης του ιού και μεταξύ των αιμοδοτών. Το πρόβλημα εντοπίζεται κυρίως σε χώρες υψηλού ενδιαφέροντος όπως η Σερβία και η Ουγγαρία. Στην Ελλάδα, η πιθανότητα για ύπαρξη μολυσμένων φιαλών αίματος το 2014 ήταν μεγαλύτερη στην Ηλεία, την Ανατολική Μακεδονία και τη Θράκη, συγκριτικά με την Αττική, πιθανώς λόγω και των πιο σύγχρονων υποδομών υγείας της

πρωτεύουσας, ενώ το 2025 ο κίνδυνος εμφανίζεται μειωμένος και εντοπίζεται μόνο σε περιοχές της Μακεδονίας και της Θράκης. Σε ότι αφορά την αντιμετώπιση του ενδεχόμενου κινδύνου μετάδοσης του ιού του Δυτικού Νείλου μέσω της δωρεάς αίματος, οι Semenza et al, 2016 συστήνουν την εφαρμογή στρατηγικών προσυμπτωματικού ελέγχου στους αιμοδότες των ευάλωτων στον ιό περιοχών, στην αναστολή κάποιων αιμοληψιών ή ακόμα και στην εισαγωγή φιαλών αίματος από ασφαλείς περιοχές για να εξασφαλιστεί επάρκεια και να καλυφθούν οι ανάγκες.

α)



β)



Εικόνα Β18: Χάρτες εκτιμώμενων αυτόχθονων κρουσμάτων του ιού του Δυτικού Νείλου στον πληθυσμό των αιμοδότην (ανά 100000) σε περιοχές της Ευρώπης και γειτονικών χωρών α) για το έτος 2014 β) για το έτος 2025 (Πηγή: Semenza et al, 2016)

B5.2: Ιός Chikungunya

Οι Fischer et al, 2013 χρησιμοποίησαν το περιφερειακό κλιματικό μοντέλο COSMO-CLM, προκειμένου να μελετήσουν την πιθανή διάδοση του ιού Chikungunya στην Ευρώπη για τις περιόδους 2011-2040, 2041-2070 και 2071-2100, σε δύο διαφορετικά κλιματικά σενάρια (SRES-A1B και SRES-B1). Όπως έχει προαναφερθεί, το πιο αναμενόμενο κλιματικό σενάριο SRES-A1B βασίζεται σε μια ισορροπημένη χρήση όλων των μορφών ενέργειας και κατά συνέπεια οδηγεί σε ενδιάμεσες εκπομπές CO₂ και αντίστοιχη άνοδο της θερμοκρασίας του πλανήτη. Αντιθέτως, το πιο αισιόδοξο σενάριο SRES-B1 υποθέτει μια γρήγορη παγκόσμια οικονομική ανάπτυξη με έμφαση στις υπηρεσίες, εξασφαλίζοντας παγκόσμιες λύσεις με στόχο την οικονομική και περιβαλλοντική σταθερότητα αλλά και την κοινωνική συνοχή. Το κλιματικό σενάριο SRES-B1 ανταποκρίνεται στον φιλόδοξο στόχο της Ευρωπαϊκής Ένωσης για τη διατήρηση της ανθρωπογενούς προέλευσης άνοδο της θερμοκρασίας του πλανήτη, σε σχέση με την προβιομηχανική περίοδο, κάτω από τους δύο βαθμούς Kelvin.

Η πιθανή ενδοετήσια διάρκεια της περιόδου μετάδοσης του ιού Chikungunya στην Ευρώπη, καθορίστηκε από τους Fischer et al, 2013 με βάση τους μήνες για τους οποίους καλύπτονται τα αναγκαία θερμοκρασιακά κριτήρια. Ως κατώτερο θερμοκρασιακό όριο χρησιμοποιήθηκε η θερμοκρασία των 20°C, η οποία είναι η ελάχιστη για την οποία έχει παρατηρηθεί μετάδοση του ιού παγκοσμίως (Tilston et al, 2009). Επίσης, για να μην υπάρξει υπερεκτίμηση του κινδύνου μετάδοσης του ιού Chikungunya, η παραπάνω ανάλυση συνδυάστηκε και με κριτήρια για την ύπαρξη του κουνουπιού *Aedes albopictus*, το οποίο αποτελεί τον κύριο φορέα και διαβιβαστή της νόσου.

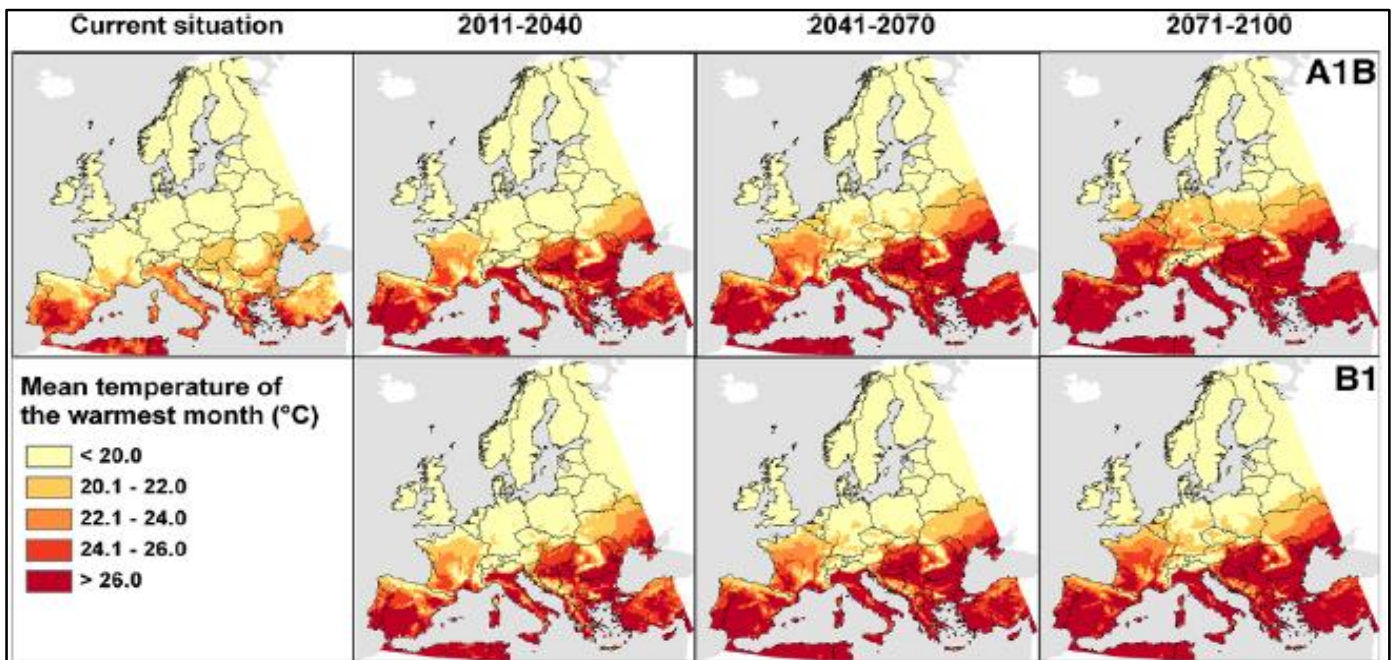
Για τον καθορισμό των ευάλωτων περιοχών της Ευρώπης για ενδεχόμενη δράση του ιού Chikungunya, χρησιμοποιήθηκε η μέση θερμοκρασία του θερμότερου μήνα του έτους η οποία παρουσιάζεται στην Εικόνα B19. Είναι σαφές ότι στην παρούσα κλιματική κατάσταση το κριτήριο υπέρβασης των 20°C υπερκαλύπτεται μόνο σε χώρες της Νότιας Ευρώπης μεταξύ των οποίων και η Ελλάδα. Επίσης, με βάση και τα δύο κλιματικά σενάρια που εξετάζονται (SRES-A1B και SRES-B1), η άνοδος της θερμοκρασίας αναμένεται να επιφέρει την προς βορά χωρική επέκταση των ορίων για πιθανή δράση του ιού Chikungunya στην Ευρώπη κατά τη διάρκεια του 21^{ου} αιώνα. Είναι αξιοσημείωτο ότι μέχρι το έτος 2070 δεν παρατηρούνται ιδιαίτερες διαφορές στην εξέλιξη που θα έχει η μέση θερμοκρασία του θερμότερου μήνα του έτους σε διάφορες περιοχές της Ευρώπης, ανάμεσα στα δύο κλιματικά σενάρια. Παρ' όλα αυτά, αν ισχύσει το δυσμενέστερο κλιματικό σενάριο SRES-A1B, κατά τα τελευταία 30 χρόνια του 21^{ου} αιώνα αναμένεται σημαντική επέκταση της

πιθανής ζώνης δράσης του ιού Chikungunya προς βορειότερες περιοχές της Ευρώπης. Στην Ελλάδα, η επερχόμενη κλιματική αλλαγή φαίνεται να οδηγεί στην υπερκάλυψη του θερμοκρασιακού κριτηρίου σε όλη τη χώρα, με βάση και τα δύο μελετώμενα σενάρια.

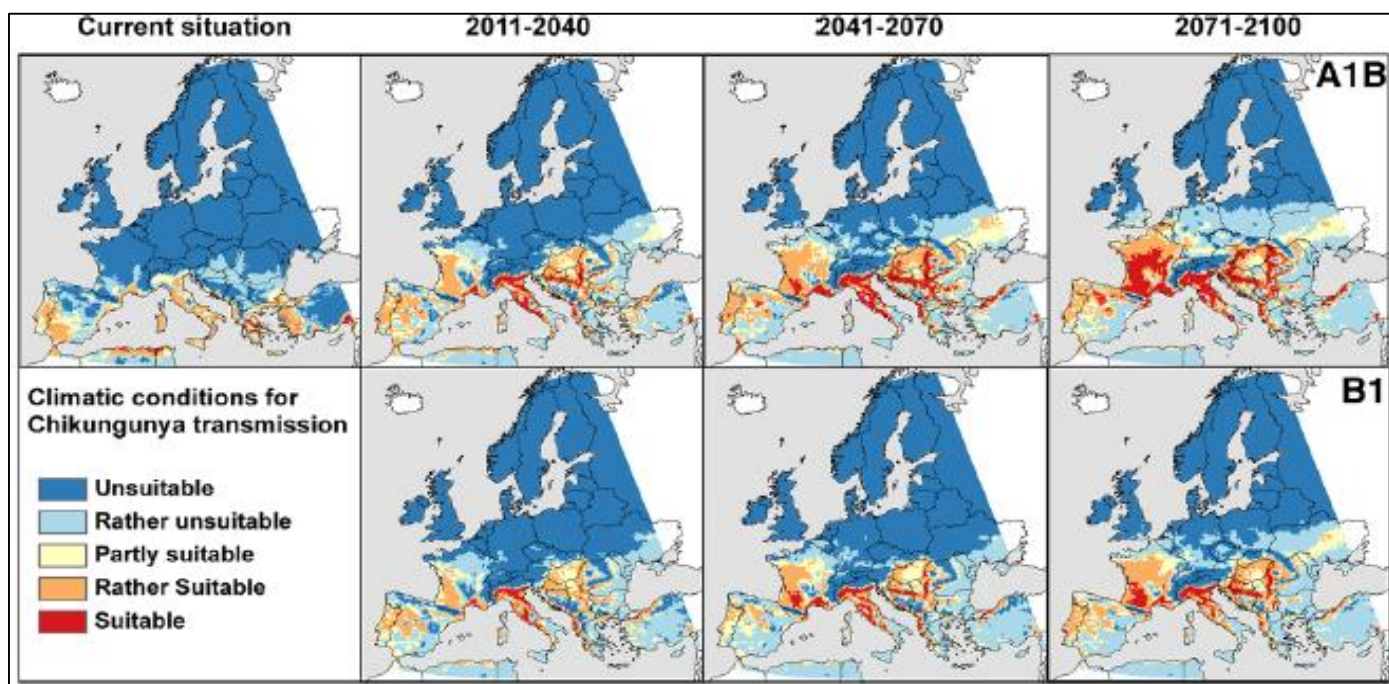
Για την εκτίμηση του πραγματικού κινδύνου ενδεχόμενης μετάδοσης του ιού Chikungunya σε περιοχές της Ευρώπης, η εκπλήρωση του θερμοκρασιακού κριτηρίου για τη δράση του ιού συνδυάστηκε με την ύπαρξη των κατάλληλων συνθηκών για την επιβίωση του κουνουπιού *Aedes albopictus*. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τον παραπάνω συνδυασμό παρουσιάζονται στην Εικόνα B20 και σύμφωνα με αυτά, με βάση την παρούσα κλιματική κατάσταση, υψηλή επικινδυνότητα για μετάδοση του ιού Chikungunya υπάρχει μόνο σε χώρες της Νότιας Ευρώπης. Πρέπει εδώ να υπογραμμιστεί η υψηλή συμβατότητα για μετάδοση του ιού που εντοπίζεται σχεδόν στο σύνολο της Ελλάδας και ιδιαίτερα σε τμήματα της Θεσσαλίας, της Στερεάς Ελλάδας και της Δυτικής Ελλάδας, γεγονός που καταδεικνύει την ανάγκη επιφυλακής των αρμόδιων αρχών. Η επίδραση της κλιματικής αλλαγής, αναμένεται να επεκτείνει τον κίνδυνο για μετάδοση της νόσου Chikungunya σε βορειότερες περιοχές της Ευρώπης (Εικόνα B20), εξέλιξη που θα είναι πολύ πιο ισχυρή στην περίπτωση του χειρότερου κλιματικού σεναρίου SRES-A1B. Σε ότι αφορά την Ελλάδα, σε συμφωνία και με τα αποτελέσματα της ανάλυσης των Proestos et al, 2015, τα οποία παρουσιάζονται συνοπτικά στον χάρτη της Εικόνας B10, η μείωση της συμβατότητας του κουνουπιού *Aedes albopictus* αναμένεται να υποβαθμίσει την πιθανότητα για μετάδοση της νόσου Chikungunya. Εξαίρεση αποτελούν τα δυτικά παράλια της χώρας, όπως και τμήματα της Ανατολικής Μακεδονίας και της Θράκης, στα οποία ο κίνδυνος για διάδοση του ιού θα παραμείνει υψηλός κατά τη διάρκεια του 21^{ου} αιώνα με βάση και τα δύο μελετώμενα κλιματικά σενάρια (Εικόνα B20).

Στην παρούσα φάση, η κάλυψη του θερμοκρασιακού κριτηρίου για τη δράση του ιού Chikungunya στην Ευρώπη εξασφαλίζεται για τουλάχιστον ένα μήνα ή και περισσότερο μόνο σε χώρες τις Μεσογείου (Εικόνα B21). Εντούτοις, με βάση και τα δύο κλιματικά σενάρια, αλλά κυρίως σύμφωνα με το δυσμενέστερο σενάριο SRES-A1B, μέχρι το τέλος του 21^{ου} αιώνα θα εξασφαλίζεται η κάλυψη του συγκεκριμένου κριτηρίου σε αρκετές χώρες της Βόρειας και κεντρικής Ευρώπης (π.χ. Γερμανία, Πολωνία κτλ). Επίσης, μέχρι το τέλος του αιώνα, σε πολλά τμήματα της Νότιας Ευρώπης θα υπερκαλύπτεται το θερμοκρασιακό κριτήριο για τουλάχιστον 5 μήνες, με βάση και τα δύο κλιματικά σενάρια (Εικόνα B21). Στην Ελλάδα, το κριτήριο των 20°C αναμένεται να σταδιακά να πληρείται για περισσότερους μήνες, ενώ η κατάσταση θα επιδεινωθεί πολύ περισσότερο αν επιβεβαιωθούν οι προβλέψεις του σεναρίου SRES-A1B. Ωστόσο, η άνοδος του πλήθους των μηνών με μέση

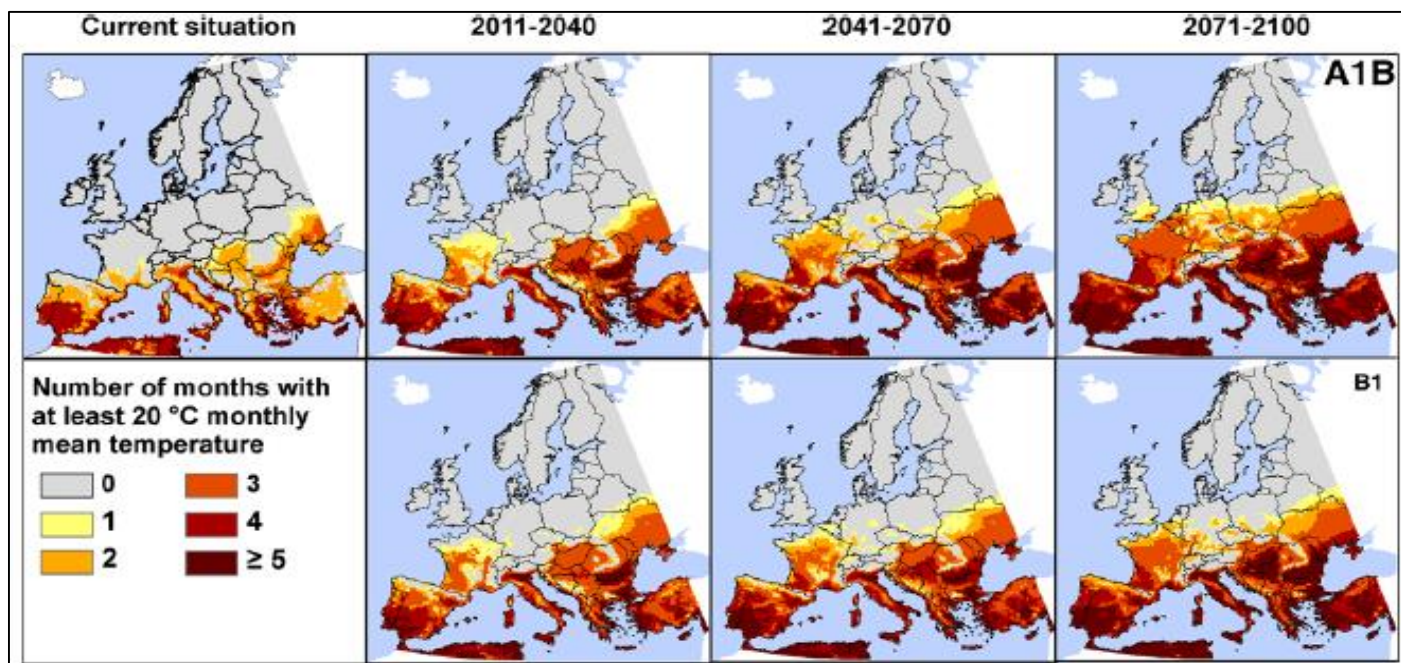
θερμοκρασία άνω των 20°C, δεν αρκεί από μόνη της για να επιμηκύνει τη περίοδο πιθανής μετάδοσης της νόσου Chikungunya, καθώς πρέπει να συνδυάζεται και με την παρουσία των κουνουπιών του είδους *Aedes albopictus*. Υπό αυτήν την προϋπόθεση, με τις παρούσες κλιματικές συνθήκες αξιοσημείωτη περίοδος πιθανής μετάδοσης του ιού Chikungunya εντοπίζεται μόνο σε Μεσογειακές περιοχές, στις οποίες συγκαταλέγεται σχεδόν το σύνολο της Ελλάδας με έμφαση στα κεντρικά ηπειρωτικά τμήματα της χώρας (Εικόνα B22). Εντούτοις, ανεξαρτήτως του κλιματικού σεναρίου που εξετάζεται, τα αποτελέσματα των Fischer et al, 2013 δείχνουν ότι η άνοδος της θερμοκρασίας στην Ευρώπη θα περιορίσει ή και θα εκμηδενίσει την περίοδο μετάδοσης του ιού σε περιοχές της Νότιας Ευρώπης, ενώ θα την επεκτείνει ή και θα την εγκαθιδρύσει σε βορειότερες περιοχές. Στην Ελλάδα, η χρονική διάρκεια της περιόδου πιθανής μετάδοσης του ιού αναμένεται να εκμηδενιστεί στο μεγαλύτερο μέρος της χώρας, με εξαίρεση την Δυτική Ελλάδα, την Ανατολική Μακεδονία και τη Θράκη, όπου αναμένεται ενίσχυση. Κατά συνέπεια, αυτές είναι οι περιοχές της χώρας στις οποίες θα πρέπει σταδιακά κατά τις επόμενες δεκαετίες να μετατοπιστεί το κύριο ενδιαφέρον, αναφορικά με την λήψη μέτρων σχετικών με την πρόληψη αλλά και την αντιμετώπιση μιας ενδεχόμενης επιδημίας του ιού Chikungunya, χωρίς βεβαίως να υποτιμηθεί η πιθανότητα ενός ξεσπάσματος της νόσου και σε άλλες περιοχές.



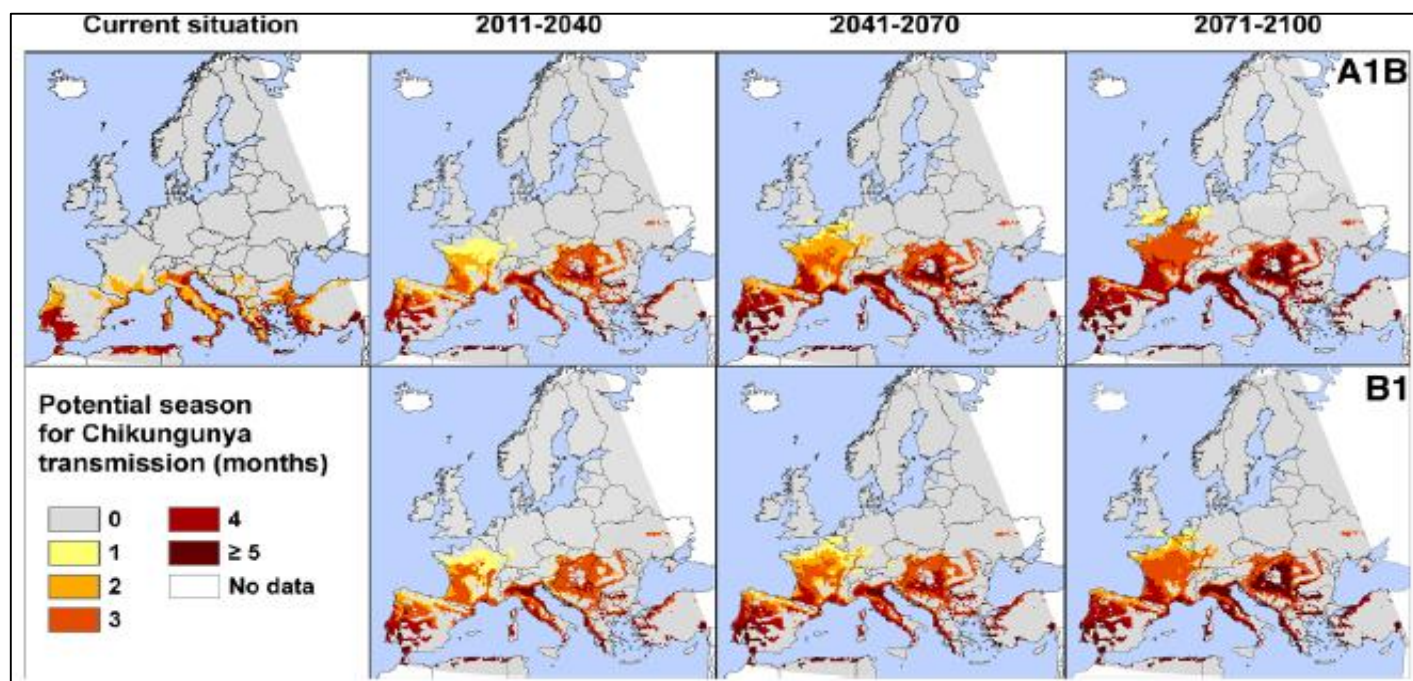
Εικόνα B19: Χάρτες κάλυψης των θερμοκρασιακών απαιτήσεων για τη δράση του ιού Chikungunya στην Ευρώπη στο παρόν αλλά και με βάση τα κλιματικά σενάρια SRES-A1B και SRES-B1, τα οποία χρησιμοποιήθηκαν από το περιφερειακό κλιματικό μοντέλο COSMO-CLM (Πηγή: Fischer et al, 2013)



Εικόνα B20: Χάρτες επικινδυνότητας για τη μετάδοση του ιού Chikungunya στην Ευρώπη στο παρόν αλλά και με βάση τα κλιματικά σενάρια SRES-A1B και SRES-B1 (Πηγή: Fischer et al, 2013)



Εικόνα B21: Χάρτες της Ευρώπης που παρουσιάζουν το κατά τόπους πλήθος των μηνών στους οποίους καλύπτεται το κριτήριο για μέση θερμοκρασία άνω των 20°C, το οποίο είναι αναγκαίο για τη δράση του ιού Chikungunya, στο παρόν αλλά και με βάση τα κλιματικά σενάρια SRES-A1B και SRES-B1 (Πηγή: Fischer et al, 2013)



Εικόνα B22: Χάρτες της Ευρώπης που παρουσιάζουν την κατά τόπους διάρκεια (σε μήνες) της περιόδου δυνατής μετάδοσης του ιού Chikungunya στο παρόν αλλά και με βάση τα κλιματικά σενάρια SRES-A1B και SRES-B1 (Πηγή: Fischer et al, 2013)

B5.3: Δάγγειος ιός

Ο πρωτεύων διαβιβαστής του Δάγγειου ιού παγκοσμίως είναι το κουνούπι *Aedes aegypti* που αυτή τη στιγμή έχει εξαφανιστεί από την Ευρώπη, με εξαίρεση την έξαρση που παρουσίασε το 2012 ο πληθυσμός του στην πορτογαλική νήσο Μαδέρα. Παρ' όλα αυτά, οι Thomas et al, 2011 προχώρησαν σε μια μελέτη της πιθανής εξέλιξης που μπορεί να έχει η διάδοση του Δάγγειου ιού στην Ευρώπη, λόγω της κλιματικής αλλαγής, χρησιμοποιώντας το περιφερειακό κλιματικό μοντέλο COSMO-CLM με υπόβαθρο τα προαναφερθέντα κλιματικά σενάρια SRES-A1B και SRES-B1, για τις περιόδους 2011-2040, 2041-2070 και 2071-2100. Κατά συνέπεια, όλα τα συμπεράσματα των Thomas et al, 2011 μπορεί να ισχύσουν μόνο υπό την προϋπόθεση της επανεμφάνισης/εγκαθίδρυσης του κουνουπιού *Aedes aegypti* στην Ευρώπη.

Οι Thomas et al, 2011, στήριξαν τις εκτιμήσεις τους στις θερμοκρασιακές απαιτήσεις που είναι αναγκαίες για να ολοκληρωθεί η εξωγενής περίοδος επώασης του ιού μέσα στα κουνούπια φορείς και ειδικότερα μέσα στο κουνούπι *Aedes aegypti* που αποτελεί τον κυριότερο διαβιβαστή της νόσου. Η εξωγενής περίοδος επώασης ορίζεται ως το χρονικό

διάστημα που μεσολαβεί ανάμεσα στην πρόσληψη ενός ιού από ένα κουνούπι φορέα και στην στιγμή κατά την οποία το κουνούπι είναι ικανό να μεταδώσει τη νόσο σε κάποιον νέο ξενιστή όπως ο άνθρωπος. Η εξωγενής περίοδος επώασης περιλαμβάνει την αναπαραγωγή, την ωρίμανση αλλά και την εξάπλωση του ιού μέσα στο σώμα του κουνουπιού, μέχρι τελικά να φτάσει στους σιελογόνους αδένες του. Στη συνέχεια τα θηλυκά κουνούπια παραμένουν μεταδοτικά σε όλη τους τη ζωή. Η θερμοκρασία θεωρείται ο σημαντικότερος παράγοντας που επηρεάζει τη διάρκεια της εξωγενούς περιόδου επώασης και πιο συγκεκριμένα οι υψηλότερες θερμοκρασίες μειώνουν τη διάρκεια της και κατά συνέπεια καθιστούν μολυσματικά τα κουνούπια σε μικρότερο χρονικό διάστημα (Watts et al, 1987). Αντιθέτως, αν οι ελάχιστες αναγκαίες θερμοκρασίες για την ολοκλήρωση της εξωγενούς περιόδου επώασης δεν επιτυγχάνονται, τότε τα κουνούπια δεν μπορούν να καταστούν μολυσματικά και η πιθανότητα μετάδοσης του Δάγγειου ιού στους ανθρώπους αποκλείεται. Λόγω της κλιματικής αλλαγής, μέχρι το τέλος του 21^{ου} αιώνα πέντε έως 6 δισεκατομμύρια άνθρωποι σε όλο τον κόσμο αναμένεται ότι θα ζουν σε περιοχές όπου θα είναι πιθανή η μετάδοση του Δάγγειου ιού (Hales et al, 2002).

Τρία θερμοκρασιακά κριτήρια χρησιμοποιήθηκαν από τους Thomas et al, 2011 ως απαραίτητα κατώφλια για την ολοκλήρωση της εξωγενούς περιόδου επώασης του Δάγγειου ιού μέσα στο σώμα των κουνουπιών του είδους *Aedes aegypti*:

- Κριτήριο 1: Οκτώ συνεχόμενες μέρες με μέσες ημερήσιες θερμοκρασίες τουλάχιστον 22°C (Blanc and Caminopetros, 1930)
- Κριτήριο 2: Δώδεκα συνεχόμενες μέρες με μέσες ημερήσιες θερμοκρασίες τουλάχιστον 30°C (Watts et al, 1987)
- Κριτήριο 3: Επτά συνεχόμενες μέρες με μέσες ημερήσιες θερμοκρασίες 32-35°C (Watts et al, 1987)

Με βάση το κριτήριο 1, μεγάλα τμήματα της Ευρώπης αναμένεται να έχουν μέσα στον 21^ο αιώνα τις θερμοκρασιακές προϋποθέσεις για να υποστηρίξουν τη μετάδοση του Δάγγειου ιού (Εικόνα B23). Το γεγονός αυτό επαληθεύεται στην περίπτωση και των δύο κλιματικών σεναρίων, αν και στο δυσμενέστερο σενάριο SRES-A1B, οι περιοχές της Ευρώπης στις οποίες το κριτήριο 1 θα ικανοποιείται είναι σαφώς μεγαλύτερες. Κατά την τριακονταετία 2011-2040, σχεδόν το σύνολο των Μεσογειακών περιοχών αναμένεται ότι θα πληρούν το κριτήριο 1, ενώ κατά την περίοδο 2041-2070 το τμήμα της Ευρώπης που θα ικανοποιεί το κριτήριο 1, σύμφωνα με το κλιματικό μοντέλο COSMO-CLM, θα επεκταθεί προς βορά

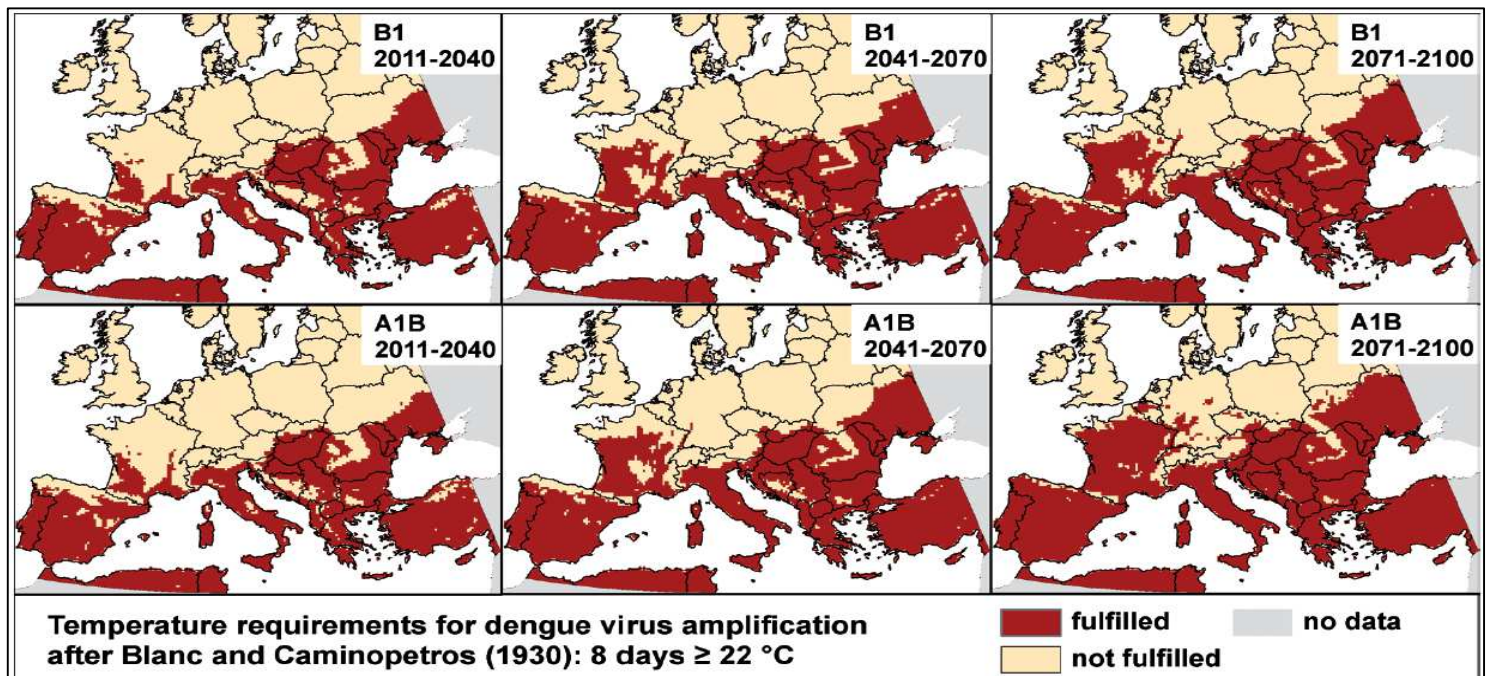
(Εικόνα B23). Κατά συνέπεια στο μέσο του 20^{ου} αιώνα τμήματα της κεντρικής Ευρώπης, όπως π.χ. οι Νότιες περιοχές της Γερμανίας, θα μπορούν να φιλοξενήσουν τη μετάδοση του Δάγγειου ιού. Κατά τα τέλη του αιώνα, ακόμη και τα πιο βόρεια τμήματα της Γαλλίας αλλά και τμήματα του Βελγίου φαίνεται ότι θα γίνουν κατάλληλα για τη μετάδοση του ιού. Στην Ελλάδα, το κριτήριο 1 φαίνεται ότι θα πληρείται καθ' όλη τη διάρκεια του 21^{ου} αιώνα στο σύνολο της χώρας (Εικόνα B23).

Με τη χρήση του κριτηρίου 2, οι περιοχές της Ευρώπης στις οποίες είναι δυνατή η εξάπλωση του Δάγγειου ιού περιορίζονται σημαντικά, σε σύγκριση με αυτές που συνεπάγεται η χρήση του κριτηρίου 1 (Εικόνα B24). Κατά την τρέχουσα τριακονταετία 2011-2040, το κριτήριο 2 δείχνει ότι μόνο το Νοτιοδυτικό τμήμα της Ιβηρικής χερσονήσου, η Σικελία αλλά και η περιοχή της Θεσσαλίας στην Ελλάδα (εστιάζοντας ιδιαίτερα στο νομό Λάρισας), αποτελούν περιοχές που μπορούν να υποστηρίξουν θερμοκρασιακά τη μετάδοση του ιού. Η άνοδος της θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια του αιώνα, ειδικά με βάση το χειρότερο σενάριο εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου SRES-A1B, αναμένεται να επεκτείνουν σημαντικά τις περιοχές γύρω από τη Μεσόγειο θάλασσα που θα είναι κατάλληλες για τη διάδοση του Δάγγειου ιού, ενώ στην Ελλάδα η μετάδοση του ιού θα γίνει εφικτή εκτός από τη Θεσσαλία και στη Δυτική Ελλάδα, την Κεντρική Μακεδονία αλλά και την Ανατολική Μακεδονία και τη Θράκη (Εικόνα B24).

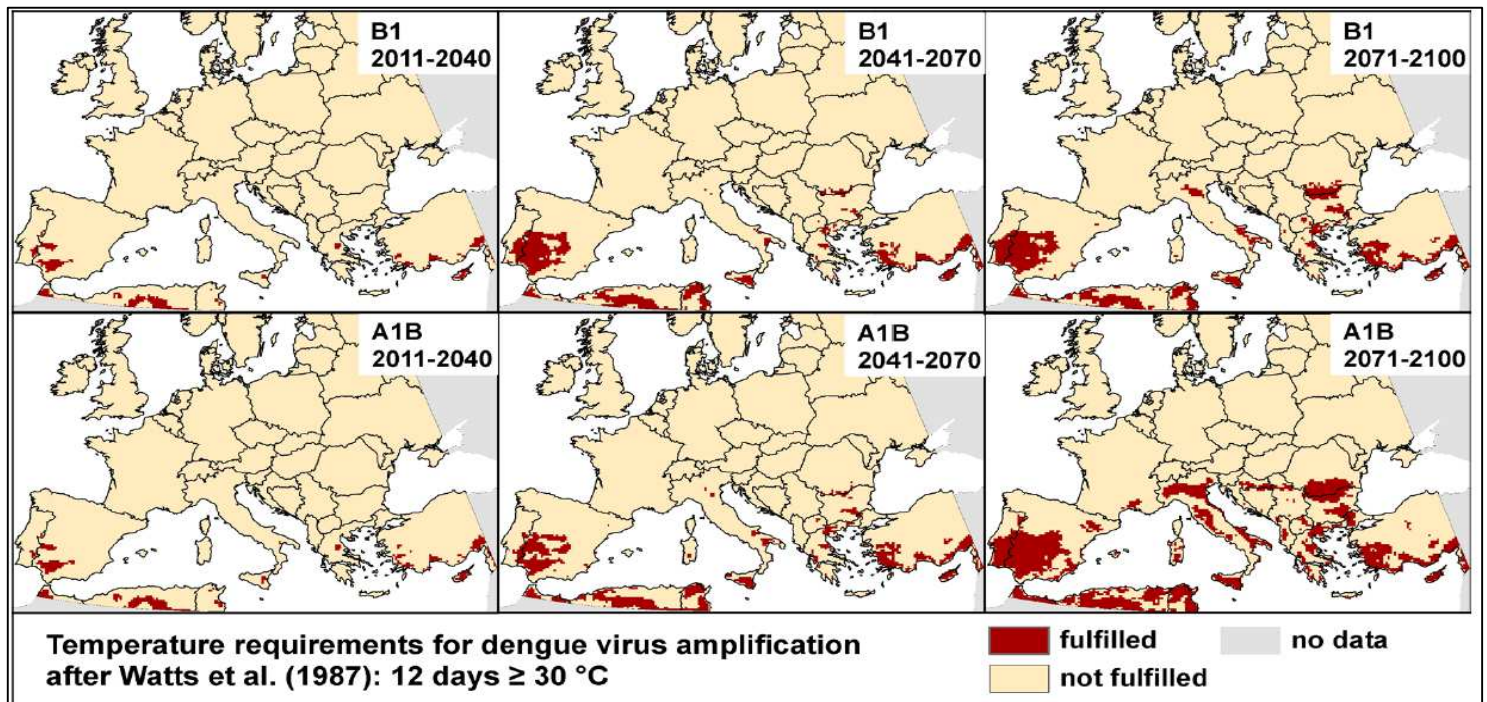
Οι θερμοκρασιακοί περιορισμοί που θέτει το κριτήριο 3 είναι πάρα πολύ αυστηροί και κατά συνέπεια κατά την τρέχουσα τριακονταετία 2011-2040, με βάση αυτό το κριτήριο, οι περιοχές της Ευρώπης που μπορούν να υποστηρίξουν μια ενδεχόμενη μετάδοση του Δάγγειου ιού σχεδόν εξαφανίζονται και οριοθετούνται μόνο σε πολύ θερμά τμήματα στα Νοτιοδυτικά της Ισπανίας (Εικόνα B25). Εντούτοις, με βάση μόνο το χειρότερο κλιματικό σενάριο SRES-A1B, κατά το μέσον του αιώνα μικρές περιοχές στην Σικελία αλλά και την Θεσσαλία στην Ελλάδα (και πάλι με επίκεντρο το νομό Λάρισας), θα γίνουν κατάλληλες για τη διάδοση του ιού, ενώ νέες περιοχές στις οποίες θα ικανοποιείται το κριτήριο 3 είναι πιθανό να προστεθούν κατά το τέλος του αιώνα. Στις περιοχές αυτές συμπεριλαμβάνεται η κοιλάδα του Δούναβη στη Νότια Ρουμανία αλλά και η κεντρική Μακεδονία στην Ελλάδα (Εικόνα B25).

Σχετικά με τη συνολική ενδοετήσια διάρκεια των περιόδων κατά τις οποίες υπάρχουν οι προϋποθέσεις για να ολοκληρωθεί η εξωγενής περίοδος επώασης του Δάγγειου ιού μέσα στα κουνούπια *Aedes aegypti*, αυτή αναμένεται να αυξηθεί κατά τον 21^ο αιώνα και ιδιαίτερα κατά το τέλος του, σε πολλές περιοχές της Ευρώπης (Thomas et al, 2011). Βεβαίως, απαραίτητη προϋπόθεση είναι η επιστροφή του κουνουπιού φορέα *Aedes aegypti* στην ηπειρωτική

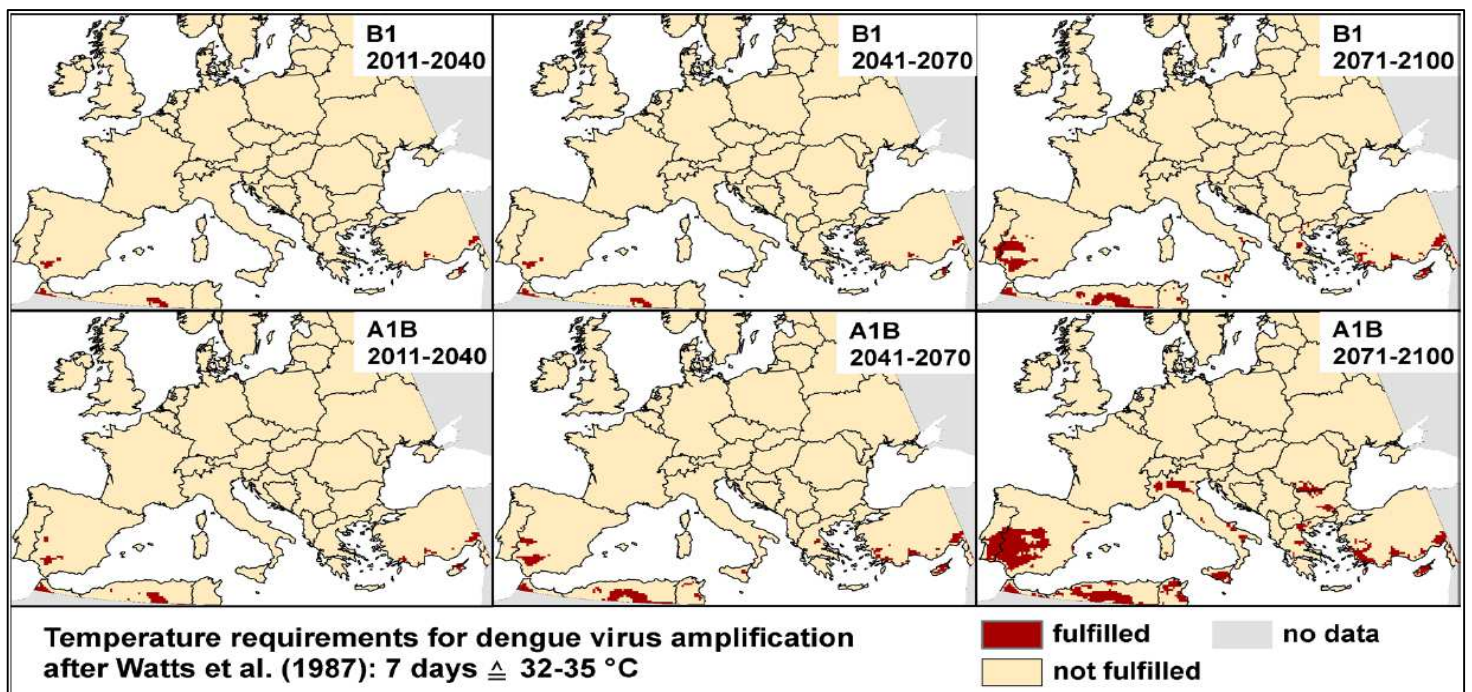
Ευρώπη, που μέχρι σήμερα δεν έχει πραγματοποιηθεί, παρότι οι κατάλληλες συνθήκες για την βιωσιμότητα του υπάρχουν σε πολλά κυρίως παράκτια τμήματα της Νότιας Ευρώπης, μεταξύ των οποίων βρίσκονται και περιοχές της Ελλάδας (Εικόνα Β26). Για το λόγο αυτό, δεν συντρέχουν επί του παρόντος, σύμφωνα και με την εκτίμηση που περιέχεται στην ιστοσελίδα του Ευρωπαϊκού Οργανισμού Περιβάλλοντος (<https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/vector-borne-diseases-2/assessment>), σοβαροί λόγοι ανησυχίας για ξέσπασμα μιας επιδημίας του Δάγγειου ιού στην ηπειρωτική Ευρώπη, καθώς έχουν τεθεί σε εφαρμογή και μέτρα για να αποτρέψουν την επανάκαμψη του κουνουπιού *Aedes aegypti*. Παρ' όλα αυτά, ο Ευρωπαϊκός Οργανισμός Περιβάλλοντος αναγνωρίζει ότι μια άνοδος στην περίοδο δράσης του κουνουπιού *Aedes albopictus* στην Ευρώπη, λόγω της κλιματικής αλλαγής, μπορεί να οδηγήσει σε μικρή άνοδο της πιθανότητας για κάποια κρούσματα του Δάγγειου ιού, καθώς το Ασιατικό κουνούπι «τίγρης» αποτελεί δευτερεύοντα διαβιβαστή του ιού. Όπως επίσης αναφέρεται στην ιστοσελίδα του Ευρωπαϊκού Οργανισμού Περιβάλλοντος, είναι αναγκαίο να πραγματοποιηθούν μελέτες οι οποίες με τη χρήση μοντέλων θα εξετάσουν αν οι επερχόμενες κλιματικές αλλαγές και η συνεπακόλουθη άνοδος της θερμοκρασίας θα διευκολύνουν ή θα δυσχεράνουν μελλοντικά την συμβατότητα του κουνουπιού *Aedes aegypti* στην Ευρώπη.



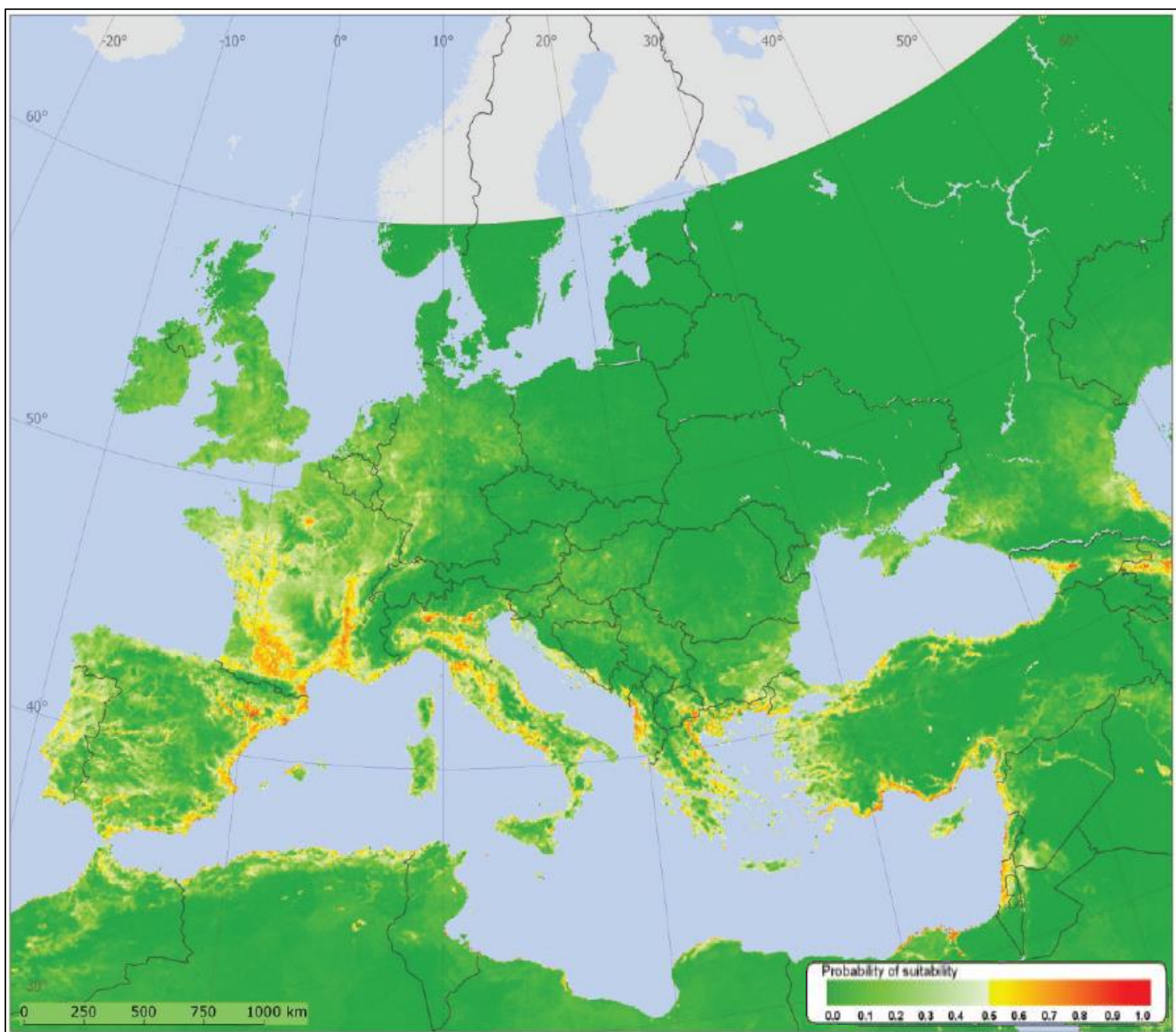
Εικόνα Β23: Χάρτης πιθανής υπερκάλυψης του θερμοκρασιακού κριτηρίου 1 για την ολοκλήρωση της εξωγενούς περιόδου επώασης του Δάγγειου ιού μέσα στο σώμα των κουνουπιών του είδους *Aedes aegypti* (Πηγή: Thomas et al, 2011)



Εικόνα B24: Χάρτης πιθανής υπερκάλυψης του θερμοκρασιακού κριτηρίου 2 για την ολοκλήρωση της εξωγενούς περιόδου επώασης του Δάγγειου ιού μέσα στο σώμα των κουνουπιών του είδους *Aedes aegypti* (Πηγή: Thomas et al, 2011)



Εικόνα B25: Χάρτης πιθανής υπερκάλυψης του θερμοκρασιακού κριτηρίου 3 για την ολοκλήρωση της εξωγενούς περιόδου επώασης του Δάγγειου ιού μέσα στο σώμα των κουνουπιών του είδους *Aedes aegypti* (Πηγή: Thomas et al, 2011)



Εικόνα B26: Χάρτης κλιματικής συμβατότητας για το κουνούπι *Aedes aegypti* στην Ευρώπη
(Πηγή: ECDC)

B5.4: Σύνοψη των επιδράσεων της κλιματικής αλλαγής στη μετάδοση ασθενειών από κουνούπια διαβιβαστές στην Ελλάδα

Μεταξύ των διαφόρων ειδών κουνουπιών του γένους *Aedes*, τα οποία δεν είναι ενδημικά στην Ευρώπη και χαρακτηρίζονται ως κουνούπια εισβολείς, εκείνο το οποίο αποτελεί

απειλή για την Ελλάδα είναι το *Aedes albopictus*, ευρύτερα γνωστό και ως Ασιατικό κουνούπι τίγρης. Οι κλιματικές συνθήκες στην Ελλάδα ευνοούν το συγκεκριμένο είδος κουνουπιού και θεωρείται ότι η παρουσία του είναι πλέον σταθερή στη χώρα. Η κλιματική αλλαγή και η επερχόμενη άνοδος της θερμοκρασίας στην Ευρώπη αναμένεται να μετατοπίσουν τη ζώνη δράσης του κουνουπιού *Aedes albopictus* προς βορά, μειώνοντας την συμβατότητα του στην Ελλάδα, παρ' όλα αυτά η προσαρμογή του στη χώρα θα παραμείνει σε μεγάλο βαθμό εφικτή, με έμφαση στη Δυτική αλλά και την κεντρική ηπειρωτική χώρα, την Πελοπόννησο και την Ανατολική Μακεδονία και τη Θράκη. Επίσης, τις επόμενες δεκαετίες, η δυνητική ενδοετήσια διάρκεια της περιόδου δράσης του κουνουπιού «τίγρης» στην Ελλάδα είναι πιθανό να επιμηκυνθεί λόγω της κλιματικής αλλαγής, με την ενίσχυση να βρίσκεται στα επίπεδα των 1 έως 2 εβδομάδων επιπρόσθετης παρουσίας.

Το Ασιατικό κουνούπι «τίγρης», αποτελεί τον κύριο διαβιβαστή του ιού Chikungunya. Στην Ελλάδα, ο συνδυασμός της ύπαρξης των αναγκαίων θερμοκρασιακών συνθηκών για την μετάδοση του ιού με την παρουσία του *Aedes albopictus*, επιφέρει σημαντική επικινδυνότητα για την πρόκληση αυτοχθόνων κρουσμάτων της νόσου. Η κλιματική αλλαγή, εκτιμάται ότι θα οδηγήσει στην εκπλήρωση των θερμοκρασιακών απαιτήσεων για μετάδοση της νόσου Chikungunya στο σύνολο της χώρας, παρ' όλα αυτά ο περιορισμός της συμβατότητας για τα κουνούπια διαβιβαστές φαίνεται ότι θα υποβαθμίσει την πιθανότητα για μετάδοση της νόσου. Ωστόσο, σχετικά με τον κίνδυνο διάδοσης του ιού Chikungunya, ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί στα Δυτικά παράκτια τμήματα της Ελλάδας, όπως και σε περιοχές της Ανατολικής Μακεδονίας και της Θράκης, όπου ο κίνδυνος μετάδοσης θα παραμείνει υψηλός κατά τον 21ο αιώνα, με βάση τα μελετώμενα κλιματικά σενάρια.

Τα κουνούπια του γένους *Culex*, τα οποία είναι ενδημικά στην Ελλάδα, αποτελούν τον κύριο διαβιβαστή του ιού του Δυτικού Νείλου. Χαρακτηριστική για τη χώρα μας είναι η επιδημία του ιού που ξέσπασε το 2010, με επίκεντρο την Κεντρική Μακεδονία όπου τα κουνούπια *Culex* αφθονούν. Η κλιματική αλλαγή αναμένεται να διαμορφώσει ιδανικές συνθήκες για την περεταίρω ανάπτυξη των κουνουπιών *Culex* στην Ελλάδα και για την αύξηση της μεταδοτικότητας τους σε ότι αφορά τον ιό του Δυτικού Νείλου. Οι περιοχές της χώρας που φαίνεται ότι θα έχουν τις επόμενες δεκαετίες την υψηλότερη πιθανότητα για να εμφανίσουν κρούσματα του ιού είναι η Μακεδονία, η Θράκη αλλά και τμήματα της κεντρικής ηπειρωτικής χώρας με έμφαση στο νομό Αιτωλοακαρνανίας.

Κατά τη διάρκεια του 21^{ου} αιώνα, αναμένεται στην Ελλάδα να ισχύσει η επίτευξη των θερμοκρασιών εκείνων που είναι απαραίτητες για την ολοκλήρωση της εξωγενούς

περιόδου επώασης του Δάγγειου ιού, μέσα στο σώμα των κουνουπιών του είδους *Aedes aegypti*, τα οποία αποτελούν τον πρωτεύοντα διαβιβαστή του. Βέβαια, ανάλογα με το θερμοκρασιακό κριτήριο αλλά και το κλιματολογικό σενάριο που επιλέγεται κατά περίπτωση, προκύπτουν σημαντικές διαφορές στην οριοθέτηση εκείνων των περιοχών που θα μπορούσαν να υποστηρίξουν μια ενδεχόμενη επιδημία του ιού. Σε κάθε περίπτωση, αναγκαία προϋπόθεση για την εμφάνιση ικανού αριθμού κρουσμάτων του Δάγγειου ιού στην Ελλάδα αποτελεί η επανεμφάνιση του κουνουπιού *Aedes aegypti*, καθώς το κουνούπι αυτό έχει εξαφανιστεί συνολικά από την ηπειρωτική Ευρώπη από το 1950. Μικρές πιθανότητες για μετάδοση του Δάγγειου ιού μπορεί να προκύψουν και μέσω του κουνουπιού *Aedes albopictus*, το οποίο αποτελεί δευτερεύοντα φορέα του ιού.

B6: Μέτρα πρόληψης/αντιμετώπισης των κουνουπιών

Λόγω των ασθενειών που μεταφέρονται από τα κουνούπια φορείς και της πιθανής επέκτασής τους με βάση τα πιθανά σενάρια της κλιματικής αλλαγής, είναι κρίσιμο η πολιτεία αλλά και οι πολίτες αυτόνομα να λαμβάνουν τα κατάλληλα μέτρα προστασίας από τους κινδύνους που απορρέουν από τον συγκεκριμένο παράγοντα, όπως αυτά περιγράφονται από τους Manrouli et al, 2015.

A) Μέτρα πρόληψης σε επίπεδο τοπικών αρχών και πολιτείας

- ✓ Αποτελεσματική παρακολούθηση του πληθυσμού των διαφόρων ειδών κουνουπιών με εγκατάσταση ενός εκτενούς δικτύου παγίδων για τη συλλογή ακμαίων κουνουπιών κατά το διάστημα Απριλίου – Οκτωβρίου.
- ✓ Έλεγχος παγιδευμένων, νεκρών αλλά και ελεύθερων πουλιών για τυχόν μετάδοση του ιού του Δυτικού Νείλου
- ✓ Καταγραφή των περιοχών με διαθέσιμα στάσιμα ύδατα (π.χ. έλη, ορυζώνες κλπ) καθώς μπορεί να αποτελέσουν σοβαρές εστίες παραγωγής κουνουπιών
- ✓ Έγκαιρη χρήση εντομοκτόνων, ιδιαίτερα για την εξουδετέρωση των προνυμφών (προνυμφοκτονία). Σε περίπτωση εξάπλωσης κάποιας επιδημίας (π.χ. του ιού του Δυτικού Νείλου), η εξουδετέρωση των ακμαίων κουνουπιών (ακμαιοκτονία) γίνεται με ψεκασμούς από το έδαφος ενώ οι εναέριοι ψεκασμοί συνίστανται μόνο σε ακραία περιστατικά και πάντα με την τήρηση αυστηρών κριτηρίων που έχουν σχέση με τις χρήσεις γης.

Β) Μέτρα πρόληψης σε ατομικό επίπεδο

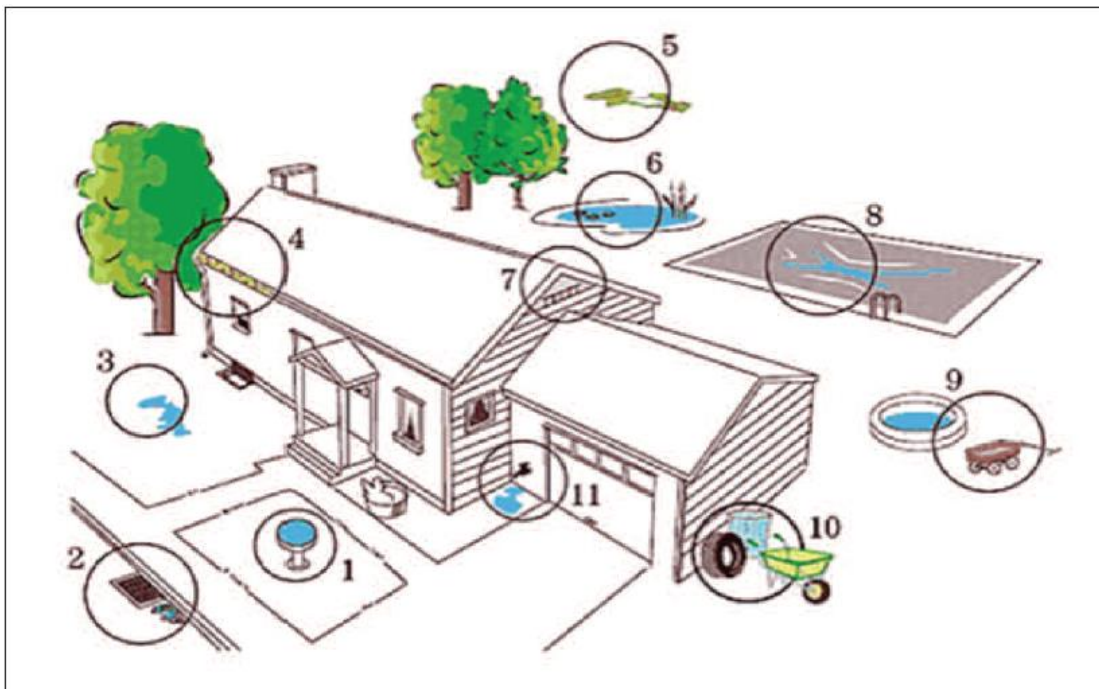
- ✓ Η χρήση των εντομοαπωθητικών σκευασμάτων θα πρέπει να γίνεται στα ακάλυπτα μέρη του σώματος αλλά να μην έρχονται σε επαφή με αμυχές ή κοψίματα, με το στόμα, τα μάτια και τη μύτη.
- ✓ Τα κουνούπια έλκονται από τα σκούρα ρούχα τα οποία θερμαίνουν περισσότερο το ανθρώπινο σώμα, από τα ρούχα με έντονα χρώματα αλλά και από τον ανθρώπινο ιδρώτα. Για το λόγο αυτό συνίσταται η χρήση ανοιχτόχρωμων ρούχων καθώς και τα συχνά λουτρά καθαριότητας. Η χρήση κουνουπιέρας προτείνεται μόνο σε περιοχές με πολύ έντονη παρουσία κουνουπιών αλλά και σε περιπτώσεις που δεν ενδείκνυται η χρήση εντομοαπωθητικών σκευασμάτων όπως στις θηλάζουσες μητέρες και τα βρέφη.

Γ) Μέτρα πρόληψης στο οικιακό και περιοικιακό περιβάλλον (Εικόνα Β27)

- ✓ Θα πρέπει να αποφεύγεται η ύπαρξη φυσικών ή τεχνητών μικρών εστιών συσσώρευσης στάσιμου νερού οι οποίες μπορούν να αποτελέσουν ιδανικό τόπο για την εναπόθεση των αυγών των κουνουπιών. Μικρές λακκούβες στον κήπο ή το χλοοτάπητα θα πρέπει να γεμίζονται και να αποστραγγίζονται. Οι υδρορροές αλλά και τα λούκια απαγωγής των όμβριων υδάτων θα πρέπει να καθαρίζονται καλά έτσι ώστε να μην συγκρατούν νερό. Μικρές διαρροές στις βρύσες του κήπου, το αυτόματο πότισμα, ή άλλες υδραυλικές εγκαταστάσεις, θα πρέπει να επισκευάζονται. Παλιά ελαστικά, βαρέλια και γενικά κάθε τύπος δοχείου που μπορεί να συγκρατήσει νερό θα πρέπει να απομακρύνεται από τους εξωτερικούς χώρους των σπιτιών. Αν υπάρχουν διακοσμητικά στοιχεία όπως σιντριβάνια, μικρές τεχνητές λίμνες κτλ, θα πρέπει το νερό τους να καθαρίζεται/αντικαθίσταται σε τακτά χρονικά διαστήματα, για την απομάκρυνση της οργανικής ύλης των αυγών και των προνυμφών. Τέλος, παιδικά παιχνίδια με νερό θα πρέπει να γυρίζονται ανάποδα όταν δεν χρησιμοποιούνται έτσι ώστε να μην υπάρχει πιθανότητα να συλλέξουν βρόχινο νερό.
- ✓ Οι πισίνες, αποτελούν μεγάλες δεξαμενές νερού οι οποίες διαθέτουν συστήματα καθαρισμού και χλωρίωσης του νερού, με αποτέλεσμα να παρεμποδίζεται η ανάπτυξη των κουνουπιών. Παρ' όλα αυτά, τα καλύμματα τους μπορεί να

συγκρατήσουν μικρές ποσότητες νερού οι οποίες θα πρέπει να απομακρύνονται άμεσα.

- ✓ Πολύ χρήσιμη είναι η χρήση προστατευτικών πλεγμάτων (σήτες) σε παράθυρα, τζάκια, αεραγωγούς και φεγγίτες, για να παρεμποδίζεται η είσοδος των κουνουπιών στο εσωτερικό των σπιτιών.
- ✓ Συνίσταται το πότισμα των φυτών και του γρασιδιού να γίνεται κατά τις πρωινές ώρες που τα κουνούπια τσιμπούν λιγότερο.
- ✓ Ο δροσερός αέρας των κλιματιστικών περιορίζει την δραστηριότητα των κουνουπιών ενώ και η χρήση ανεμιστήρων δυσχεραίνει την προσέγγισή τους.
- ✓ Η χρήση λαμπτήρων κίτρινου χρώματος δεν ευνοεί την προσέλκυση κουνουπιών.



Εικόνα Β27: Τρόποι περιορισμού των κουνουπιών στο οικιακό και περιοικιακό περιβάλλον
1) Καθαρισμός συντριβανιών 2) Καθαρισμός σχαρών φρεατίων 3) Αποστράγγιση λακκουβών 4) Καθαρισμός υδρορροών 5 & 6) Καθαρισμός τεχνητών λιμνών ή άλλων διακοσμητικών κατασκευών 7) Χρήση προστατευτικών πλεγμάτων 8) Απομάκρυνση νερού από κάλυμμα πισίνας 9 & 10) Απομάκρυνση δοχείων, βαρελιών, παιχνιδιών, παλιών ελαστικών και γενικότερα αντικειμένων που μπορεί να συλλέξουν βρόχινο νερό 11) Επισκευή υδραυλικών εγκαταστάσεων με διαρροές. (Πηγή: Mavrouli et al, 2015)

Σε σχέση με την θέληση των ελλήνων πολιτών να δαπανήσουν επιπλέον χρήματα προκειμένου να εφαρμοστούν κεντρικές πολιτικές για την αντιμετώπιση των κουνουπιών,

οι Bithas et al, 2018 χρησιμοποιώντας ερωτηματολόγια στην πόλη της Αθήνας κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η διαθεσιμότητα υπάρχει. Μάλιστα διαπιστώθηκε ότι οι ερωτούμενοι, παρότι δεν ήταν ενημερωμένοι για την πιθανή μετάδοση ιών όπως ο Δάγγειος ιός και ο ιός Chikungunya, κυρίως ενδιαφέρθηκαν για την προστασία της υγείας τους από πιθανές επιπτώσεις παρά για τον περιορισμό της όχλησης από τα κουνούπια. Επίσης, οι Bithas et al, 2018, προχώρησαν σε μια εκτίμηση του οικονομικού αποτυπώματος που θα είχε η ενδεχόμενη εφαρμογή μέτρων πρόληψης με βάση τέσσερα διαφορετικά σενάρια:

- Σενάριο 1: Υψηλή πρόληψη για την αντιμετώπιση τόσο των ενδημικών ειδών κουνουπιών όσο και των ειδών εισβολέων με έμφαση στο *Aedes albopictus*
- Σενάριο 2: Υψηλή πρόληψη για την αντιμετώπιση μόνο των ενδημικών ειδών κουνουπιών
- Σενάριο 3: Μέτρια πρόληψη για την αντιμετώπιση τόσο των ενδημικών ειδών κουνουπιών όσο και των ειδών εισβολέων με έμφαση στο *Aedes albopictus*
- Σενάριο 4: Μέτρια πρόληψη για την αντιμετώπιση μόνο των ενδημικών ειδών κουνουπιών

Τα οικονομικά/κοινωνικά οφέλη από την εφαρμογή του πιο φιλόδοξου Σεναρίου 1 στην Αθήνα αποτιμήθηκαν σε 47.3 εκατομμύρια ευρώ το χρόνο ενώ από την εφαρμογή του πιο μετριοπαθούς Σεναρίου 3 σε 32.3 εκατομμύρια ευρώ το χρόνο. Το ενδεχόμενο εφαρμογής των Σεναρίων 2 και 4, οδηγεί σε μειωμένο οικονομικό όφελος κατά 48% και κατά 65% έναντι των σεναρίων 1 και 3 αντίστοιχα, γεγονός που καταδεικνύει τη μεγάλη σημασία που έχει η αντιμετώπιση του κουνουπιού *Aedes albopictus* για την υγεία του πληθυσμού της Αθήνας. Η τωρινή δαπάνη για την εφαρμογή στρατηγικών αντιμετώπισης των κουνουπιών για την Αθήνα είναι κατά προσέγγιση περίπου 800000 ευρώ το χρόνο. Η εφαρμογή των επιπρόσθετων μέτρων θα αυξήσει φυσιολογικά αυτή τη δαπάνη, αλλά τα αναμενόμενα οφέλη αναμένεται με βεβαιότητα να υπερκαλύψουν κατά πολύ το επιπλέον κόστος (Bithas et al, 2018).

Βιβλιογραφία

Bezirtzoglou, C., Dekas, K. & Charvalos, E. 2011, "Climate changes, environment and infection: Facts, scenarios and growing awareness from the public health community within Europe", *Anaerobe*, vol. 17, no. 6, pp. 337-340.

Bithas, K., Latinopoulos, D., Kolimenakis, A. & Richardson, C. 2018, "Social Benefits From Controlling Invasive Asian Tiger and Native Mosquitoes: A Stated Preference Study in Athens, Greece", *Ecological Economics*, vol. 145, pp. 46-56.

Blanc, G. & Caminopetros, J. 1930, "Recherches experimentales sur la dengue", *Annales de l'Institut Pasteur*, vol. 44, pp. 367–437.

Blitvich, B.J. 2008, "Transmission dynamics and changing epidemiology of West Nile virus.", *Animal health research reviews / Conference of Research Workers in Animal Diseases*, vol. 9, no. 1, pp. 71-86.

Bouزيد, M., Colón-González, F.J., Lung, T., Lake, I.R. & Hunter, P.R. 2014, "Climate change and the emergence of vector-borne diseases in Europe: Case study of dengue fever", *BMC Public Health*, vol. 14, no. 1.

Caminade, C., Medlock, J.M., Ducheyne, E., McIntyre, K.M., Leach, S., Baylis, M. & Morse, A.P. 2012, "Suitability of European climate for the Asian tiger mosquito *Aedes albopictus*: Recent trends and future scenarios", *Journal of the Royal Society Interface*, vol. 9, no. 75, pp. 2708-2717.

Conte, A., Candeloro, L., Ippoliti, C., Monaco, F., De Massis, F., Bruno, R., Di Sabatino, D., Danzetta, M.L., Benjelloun, A., Belkadi, B., El Harrak, M., Declich, S., Rizzo, C., Hammami, S., Ben Hassine, T., Calistri, P. & Savini, G. 2015, "Spatio-temporal identification of areas suitable for west nile disease in the mediterranean basin and Central Europe", *PLoS ONE*, vol. 10, no. 12.

Cunze, S., Koch, L.K., Kochmann, J. & Klimpel, S. 2016, "*Aedes albopictus* and *Aedes japonicus* - two invasive mosquito species with different temperature niches in Europe", *Parasites and Vectors*, vol. 9, no. 1, pp. 1-12.

Danis, K., Baka, A., Lenglet, A., van Bortel, W., Terzaki, I., Tseroni, M., Detsis, M., Papanikolaou, E., Balaska, A., Gewehr, S., Dougas, G., Sideroglou, T., Economopoulou, A.,

Vakalis, N., Tsiodras, S., Bonovas, S. & Kremastinou, J. 2011, "Autochthonous plasmodium vivax malaria in Greece, 2011", *Eurosurveillance*, vol. 16, no. 42, pp. 1.

European Centre for Disease Prevention and Control and European Food Safety Authority. Mosquito maps [internet]. Stockholm: ECDC; 2019. Available from: <https://ecdc.europa.eu/en/disease-vectors/surveillance-and-disease-data/mosquito-maps>

Failloux, A.-., Bouattour, A., Faraj, C., Gunay, F., Haddad, N., Harrat, Z., Jancheska, E., Kanani, K., Kenawy, M.A., Kota, M., Pajovic, I., Paronyan, L., Petric, D., Sarih, M., Sawalha, S., Shaibi, T., Sherifi, K., Sulesco, T., Velo, E., Gaayeb, L., Victoir, K. & Robert, V. 2017, "Surveillance of Arthropod-Borne Viruses and Their Vectors in the Mediterranean and Black Sea Regions Within the MediLabSecure Network", *Current Tropical Medicine Reports*, vol. 4, no. 1, pp. 27-39.

Fischer, D., Thomas, S.M., Suk, J.E., Sudre, B., Hess, A., Tjaden, N.B., Beierkuhnlein, C. & Semenza, J.C. 2013, "Climate change effects on chikungunya transmission in europe: Geospatial analysis of vector's climatic suitability and virus' temperature requirements", *International Journal of Health Geographics*, vol. 12.

Hales, S., De Wet, N., Maindonald, J. & Woodward, A. 2002, "Potential effect of population and climate changes on global distribution of dengue fever: An empirical model", *Lancet*, vol. 360, no. 9336, pp. 830-834.

Hernández-Triana, L.M., Jeffries, C.L., Mansfield, K.L., Carnell, G., Fooks, A.R. & Johnson, N. 2014, "Emergence of West Nile virus lineage 2 in Europe: A review on the introduction and spread of a mosquito-borne disease", *Frontiers in Public Health*, vol. 2, no. DEC.

Kay, B.H. & Farrow, R.A. 2000, "Mosquito (Diptera: Culicidae) dispersal: Implications for the epidemiology of Japanese and Murray Valley encephalitis viruses in Australia", *Journal of medical entomology*, vol. 37, no. 6, pp. 797-801.

Kokkotis, A., Tsaknis, J. & Protopapa, E. 2014, "Climate changes and mosquitoes", *EpitheoreseKlinikesFarmakologias kai Farmakokinetikes*, vol. 32, no. 2, pp. 65-72.

Mavrouli, M., Vrioni, G., Vlahakis, A., Kapsimali, V., Mavroulis, S., Antypas, A. & Tsakris, A. 2015, "West Nile virus: Biology, transmission, clinical manifestations, diagnosis, therapeutic approaches, climatic correlates and prevention", *Acta Microbiologica Hellenica*, vol. 60, no. 1, pp. 7-34.

Papa, A. 2013, "West Nile virus infections in humans-Focus on Greece", *Journal of Clinical Virology*, vol. 58, no. 2, pp. 351-353.

Paz, S. 2015, "Climate change impacts on West Nile virus transmission in a global context", *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, vol. 370, no. 1665, pp. 1-11.

Paz, S. & Semenza, J.C. 2013, "Environmental drivers of West Nile fever epidemiology in Europe and Western Asia--a review.", *International journal of environmental research and public health*, vol. 10, no. 8, pp. 3543-3562.

Paz, S., Malkinson, D., Green, M.S., Tsioni, G., Papa, A., Danis, K., Sirbu, A., Ceianu, C., Katalin, K., Ferenczi, E., Zeller, H. & Semenza, J.C. 2013, "Permissive Summer Temperatures of the 2010 European West Nile Fever Upsurge", *PLoS ONE*, vol. 8, no. 2.

Proestos, Y., Christophides, G.K., Ergüler, K., Tanarhte, M., Waldock, J. & Lelieveld, J. 2015, "Present and future projections of habitat suitability of the Asian tiger mosquito, a vector of viral pathogens, from global climate simulation", *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, vol. 370, no. 1665, pp. 1-16.

Reisen, W.K., Fang, Y. & Martinez, V.M. 2006, "Effects of temperature on the transmission of West Nile virus by *Culex tarsalis* (Diptera: Culicidae)", *Journal of medical entomology*, vol. 43, no. 2, pp. 309-317.

Reisen, W., Lothrop, H., Chiles, R., Madon, M., Cossen, C., Woods, L., Husted, S., Kramer, V. & Edman, J. 2004, "West Nile virus in California", *Emerging Infectious Diseases*, vol. 10, no. 8, pp. 1369-1378.

Rezza, G., Nicoletti, L., Angelini, R., Romi, R., Finarelli, A., Panning, M., Cordioli, P., Fortuna, C., Boros, S., Magurano, F., Silvi, G., Angelini, P., Dottori, M., Ciufolini, M., Majori, G. & Cassone, A. 2007, "Infection with chikungunya virus in Italy: an outbreak in a temperate region", *Lancet*, vol. 370, no. 9602, pp. 1840-1846.

Sellers, R.F. & Maarouf, A.R. 1990, "Trajectory analysis of winds and eastern equine encephalitis in USA, 1980–5", *Epidemiology and infection*, vol. 104, no. 2, pp. 329-343.

Semenza, J.C., Tran, A., Espinosa, L., Sudre, B., Domanovic, D. & Paz, S. 2016, "Climate change projections of West Nile virus infections in Europe: Implications for blood safety practices", *Environmental Health: A Global Access Science Source*, vol. 15.

Stilianakis, N.I., Syrris, V., Petrosiagkis, T., Pärt, P., Gewehr, S., Kalaitzopoulou, S., Mourelatos, S., Baka, A., Pervanidou, D., Vontas, J. & Hadjichristodoulou, C. 2016, "Identification of climatic factors affecting the epidemiology of human west nile virus infections in northern Greece", *PLoS ONE*, vol. 11, no. 9.

Thomas, S.M., Fischer, D., Fleischmann, S., Bittner, T. & Beierkuhnlein, C. 2011, "Risk assessment of dengue virus amplification in Europe based on spatio-temporal high resolution climate change projections", *Erdkunde*, vol. 65, no. 2, pp. 137-150.

Tilston, N., Skelly, C. & Weinstein, P. 2009, "Pan-European Chikungunya surveillance: Designing risk stratified surveillance zones", *International Journal of Health Geographics*, vol. 8, pp. 61.

Trájer, A.J. 2017, "Meteorological conditions associated with west nile fever incidences in mediterranean and continental climates in Europe", *Idojaras*, vol. 121, no. 3, pp. 303-328.

Waldock, J., Chandra, N.L., Lelieveld, J., Proestos, Y., Michael, E., Christophides, G. & Parham, P.E. 2013, "The role of environmental variables on *Aedes albopictus* biology and chikungunya epidemiology", *Pathogens and Global Health*, vol. 107, no. 5, pp. 224-241.

Watts, D.M., Burke, D.S., Harrison, B.A., Whitmire, R.E. & Nisalak, A. 1987, "Effect of temperature on the vector efficiency of *Aedes aegypti* for dengue 2 virus", *American Journal of Tropical Medicine and Hygiene*, vol. 36, no. 1, pp. 143-152.

Zeller, H., Marrama, L., Sudre, B., Van Bortel, W. & Warns-Petit, E. 2013, "Mosquito-borne disease surveillance by the European Centre for Disease Prevention and Control", *Clinical Microbiology and Infection*, vol. 19, no. 8, pp. 693-698.

Κεφάλαιο Γ

Εκτίμηση των διαχρονικών μεταβολών και των προβολών στο μέλλον της θερμικής επιβάρυνσης στον πληθυσμό της Αθήνας και της Θεσσαλονίκης

Γ1: Εισαγωγή

Το παρών τμήμα της έκθεσης στοχεύει στην εκτίμηση και διερεύνηση των διαχρονικών μεταβολών στα επίπεδα (ένταση, χρόνος έκθεσης) της θερμικής επιβάρυνσης/θερμικής δυσφορίας του πληθυσμού στις ευάλωτες αστικές περιοχές της Αθήνας και της Θεσσαλονίκης, στις οποίες περιοχές διαβιεί ο μισός πληθυσμός της Ελλάδας. Μελετάται, επίσης, ο χρόνος εμφάνισης και η διάρκεια της θερμής επιβάρυνσης διαχρονικά, ενώ με τη χρήση κλιματικών μοντέλων με υποβάθμιση κλίμακας στις περιοχές μελέτης, πραγματοποιείται μελλοντική εκτίμηση των επιπέδων θερμικής δυσφορίας αλλά και του χρόνου έκθεσης του πληθυσμού σε συνθήκες θερμικού στρες.

Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκαν δυο απλοί και δυο προηγμένοι θερμικοί (βιοκλιματικοί) δείκτες, οι οποίοι λαμβάνουν υπόψη τη συνδυασμένη επίδραση ατμοσφαιρικών παραμέτρων (θερμοκρασία, υγρασία, ακτινοβολία, άνεμος) στη θερμική ισορροπία του ανθρώπινου οργανισμού. Η ανάλυση βασίστηκε σε υψηλής ποιότητας επίγεια μετεωρολογικά δεδομένα με ωριαίο χρονικό βήμα για την Αθήνα και τριωριαίο χρονικό βήμα για τη Θεσσαλονίκη για τις περιόδους 1960–2017 και 1970–2017, αντίστοιχα. Για τη μελλοντική εκτίμηση των επιπέδων θερμικής επιβάρυνσης χρησιμοποιήθηκαν 3-ωρα μετεωρολογικά δεδομένα, τα οποία προήλθαν από το Περιχικό Κλιματικό Μοντέλο (Regional Climate Model) RCA4 του Σουηδικού Μετεωρολογικού και Υδρολογικού Ινστιτούτου (SMHI, Strandberg et al., 2014) το οποίο τροφοδοτήθηκε ως προς τις αρχικές και τις οριακές συνθήκες από το Παγκόσμιο Μοντέλο Μετεωρολογίας MPI-ESM-LR του Ινστιτούτου Max Planck (Popke et al., 2013).

Στα υποκεφάλαια που ακολουθούν παρουσιάζονται αρχικά τα δεδομένα των επίγειων παρατηρήσεων και των προσομοιώσεων, καθώς και η μεθοδολογία προσδιορισμού των δεικτών και των στατιστικών εργαλείων που εφαρμόζονται. Στη συνέχεια παρουσιάζονται πρώτα τα αποτελέσματα για την Αθήνα και στη συνέχεια τα αποτελέσματα για τη Θεσσαλονίκη, εστιάζοντας στην κατανομή της θερμής επιβάρυνσης ανά δεκαετία και στις διαχρονικές διακυμάνσεις και τάσεις τόσο του χρόνου έκθεσης υπό θερμή επιβάρυνση όσο και της περιόδου εμφάνισης. Τέλος, παρουσιάζονται οι εκτιμήσεις των επιπέδων θερμής επιβάρυνσης στο μέλλον και συγκρίνονται με τις αντίστοιχες στο παρόν κλίμα.

Γ2: Δεδομένα – Μεθοδολογία

Γ2.1: Περιοχές μελέτης και μετεωρολογικά δεδομένα

Οι περιοχές μελέτης εντοπίζονται στα δυο μεγαλύτερα αστικά κέντρα της Ελλάδας, την Αθήνα και τη Θεσσαλονίκη, όπου αμφότερες συγκεντρώνουν το μισό πληθυσμό της χώρας. Η περιοχή της Αθήνας και συγκεκριμένα το Λεκανοπέδιο Αθηνών οριοθετείται ημικυκλικά από τα όρη Αιγάλεω (Δ), Πάρνηθα (Β), Πεντέλη (ΒΑ) και Υμηττός (Α), ενώ στα νότια βρέχεται από το Σαρωνικό κόλπο. Το πολεοδομικό συγκρότημα της Αθήνας αποτελεί την πρώτη σε πληθυσμό και πιο πυκνοκατοικημένη περιοχή της Ελλάδας, με πληθυσμό 3,089,698 σύμφωνα με την απογραφή του 2011 (HSA, 2011) και καλύπτει έκταση 412 km². Το κλίμα της Αθήνας χαρακτηρίζεται ως Csa σύμφωνα με τον επικαιροποιημένο παγκόσμιο χάρτη της κλιματικής ταξινόμησης κατά Köppen-Geiger, υποδηλώνοντας ένα εσωτερικό μεσογειακό κλίμα, ήπιο, με ξηρό και ζεστό καλοκαίρι (Peel et al., 2007). Κατά τη θερμή περίοδο του έτους η πόλη επηρεάζεται από ισχυρούς βορειο-βορειοανατολικούς ανέμους γνωστούς ως «Ετησίες», με συνέπεια να μειώνονται τόσο τα θερμοκρασιακά επίπεδα όσο και ο βαθμός της θερμής επιβάρυνσης. Η περιοχή της Θεσσαλονίκης βρίσκεται στο μυχό του Θερμαϊκού κόλπου με το όρος Χορτιάτη στα ανατολικά ενώ στα βορειοδυτικά απλώνεται η πεδιάδα της Θεσσαλονίκης. Το πολεοδομικό συγκρότημα της Θεσσαλονίκης είναι η δεύτερη πολυπληθέστερη περιοχή της Ελλάδας με πληθυσμό 788.952 σύμφωνα με την απογραφή του 2011 (HSA, 2011).

Στην παρούσα τεχνική έκθεση χρησιμοποιήθηκαν τα ιστορικά κλιματικά αρχεία του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών (NOA). Ο μετεωρολογικός σταθμός του Αστεροσκοπείου Αθηνών (37°58'N, 23°43'E) βρίσκεται σε ένα λόφο (107 m) στο κέντρο της πόλης, παρέχοντας μακροχρόνιες μετεωρολογικές παρατηρήσεις αδιαλείπτως από τα τέλη του 19ου αιώνα στη σημερινή θέση. Ωστόσο, οι μετρήσεις της ηλιακής ακτινοβολίας είναι διαθέσιμες στον ίδιο χώρο από τα τέλη της δεκαετίας του 1950. Οι χρονοσειρές των μετεωρολογικών παραμέτρων της θερμοκρασίας του αέρα και της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας έχουν ελεγχθεί τόσο για την ομοιογένειά τους όσο και για την ακρίβειά τους (Founda et al., 2009, Kazadzis et al., 2018). Με βάση τη διαθεσιμότητα των δεδομένων, στην παρούσα ανάλυση χρησιμοποιήθηκαν οι ωριαίες χρονοσειρές της θερμοκρασίας του αέρα, της σχετικής υγρασίας, της ταχύτητας του ανέμου και της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας για την περίοδο 1960–2017. Αναλύθηκαν συνολικά 508,440 δεδομένα ανά μετεωρολογική παράμετρο, με τις ελλείπουσες τιμές να αντιστοιχούν σε ποσοστό μικρότερο του 0.9%.

Για την περιοχή της Θεσσαλονίκης παραχωρήθηκαν από την Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία (Ε.Μ.Υ.) οι χρονοσειρές για το σταθμό της Μίκρας (40°31'N, 22°58'E) ο οποίος λειτουργεί στο αεροδρόμιο της πόλης σε υψόμετρο 2 m. Με βάση τη διαθεσιμότητα των δεδομένων, στην παρούσα ανάλυση χρησιμοποιήθηκαν οι 3-ωρες χρονοσειρές της θερμοκρασίας του αέρα, της σχετικής υγρασίας, της ταχύτητας του ανέμου και του κλάσματος της νέφωσης για την περίοδο 1970–2017. Στους μετεωρολογικούς σταθμούς της Ε.Μ.Υ. δεν πραγματοποιούνται μετρήσεις της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας και ως εκ τούτου χρησιμοποιήθηκαν οι χρονοσειρές του κλάσματος της νέφωσης. Αναλύθηκαν συνολικά 140,256 δεδομένα ανά μετεωρολογική παράμετρο, με τις ελλείπουσες τιμές να αντιστοιχούν σε ποσοστό μικρότερο του 2.1%.

Γ2.2: Δεδομένα για μελλοντικές εκτιμήσεις

Για τη μελλοντική εκτίμηση των επιπέδων θερμικής επιβάρυνσης χρησιμοποιήθηκαν 3-ωρα δεδομένα της θερμοκρασίας του αέρα και της σχετικής υγρασίας από το πλησιέστερο σημείο του πλέγματος το οποίο εντοπίζεται στη στεριά σε σχέση με τη θέση των σταθμών υπό μελέτη. Τα μετεωρολογικά δεδομένα προήλθαν από το Περιφερικό Κλιματικό Μοντέλο (Regional Climate Model) RCA4 του Σουηδικού Μετεωρολογικού και Υδρολογικού Ινστιτούτου (SMHI, Strandberg et al., 2014) το οποίο τόσο για την περιοχή της Αθήνας όσο και για την περιοχή της Θεσσαλονίκης τροφοδοτήθηκε ως προς τις αρχικές και τις οριακές συνθήκες από το Παγκόσμιο Μοντέλο Μετεωρολογίας MPI-ESM-LR του Ινστιτούτου Max Planck (Pope et al., 2013). Η οριζόντια ανάλυση του μοντέλου RCA4 είναι 0.11° (~ 12 × 12 km) και οι προσομοιώσεις διεξήχθησαν στα πλαίσια του ερευνητικού προγράμματος EURO-CORDEX (<http://www.euro-cordex.net>). Τα δεδομένα των προσομοιώσεων καλύπτουν τρεις περιόδους, την περίοδο ελέγχου (ή αναφοράς) 1971–2000, και τις μελλοντικές περιόδους 2031–2060 και 2071–2100. Τα δεδομένα της θερμοκρασίας του αέρα και της σχετικής υγρασίας με βάση τις μελλοντικές προσομοιώσεις προήλθαν ακολουθώντας τα μελλοντικά σενάρια εκπομπών RCP 4.5 ή/και RCP8.5. Αναφορικά με την επίδοση των μοντέλων σε σχέση με τις επίγειες παρατηρήσεις των σταθμών, η προκαταρκτική ανάλυση αποκάλυψε ένα συστηματικό σφάλμα τόσο για τη θερμοκρασία του αέρα όσο και για τη σχετική υγρασία στην Αθήνα. Ως εκ τούτου, επιλέχθηκε να πραγματοποιηθεί διόρθωση του συστηματικού σφάλματος (bias correction) στα δεδομένα εξόδου του μοντέλου εφαρμόζοντας τη μέθοδο που προτείνεται από τον Canon (2018), η οποία διατηρεί την εξάρτηση μεταξύ των δύο μεταβλητών.

Γ2.3: Δείκτες εκτίμησης της θερμικής επιβάρυνσης

Η επίδραση του θερμικού περιβάλλοντος στον άνθρωπο εκτιμήθηκε βάσει τεσσάρων θερμικών (ή βιοκλιματικών) δεικτών. Οι πρώτοι δύο είναι απλοί εμπειρικοί δείκτες δύο παραμέτρων, οι επονομαζόμενοι Heat Index (HI) και Humidex (HD). Οι συγκεκριμένοι δείκτες ενσωματώνουν στον υπολογισμό τους τις παραμέτρους της θερμοκρασίας του αέρα και της υγρασίας του αέρα και έχουν σχεδιαστεί αποκλειστικά για θερμές συνθήκες περιβάλλοντος. Ο δείκτης HI ορίζει μια φαινόμενη θερμοκρασία του πόσο ζέστη αισθάνεται ο άνθρωπος όταν οι προαναφερθείσες παράμετροι συνδυάζονται μεταξύ τους (NOAA, 2018a). Οι υπολογισμοί βασίζονται στην ανάλυση πολλαπλής παλινδρόμησης της θερμοκρασίας και της υγρασίας του αέρα (Rothfusz, 1990), η οποία βασίστηκε στους πρωτότυπους πίνακες δεδομένων της φαινόμενης θερμοκρασίας (Steadman, 1979). Ως εκ τούτου, ο HI εξάγεται με βάση την ακόλουθη εξίσωση, η οποία ισχύει για θερμοκρασίες αέρα άνω των 20 °C:

$$\begin{aligned} HI = & -8.784695 + 1.61139411 \cdot T + 2.338549 \cdot RH - 0.14611605 \cdot T \cdot RH - 1.2308094 \cdot 10^{-2} \cdot T^2 \\ & - 1.6424828 \cdot 10^{-2} \cdot RH^2 + 2.211732 \cdot 10^{-3} \cdot T^2 \cdot RH + 7.2546 \cdot 10^{-4} \cdot T \cdot RH^2 \\ & - 3.582 \cdot 10^{-6} \cdot T^2 \cdot RH^2 \end{aligned}$$

όπου T είναι η θερμοκρασία του αέρα (°C) και RH είναι η σχετική υγρασία (%). Ο Πίνακας Γ1 παρουσιάζει τα κατώφλια του δείκτη HI όσον αφορά το βαθμό κινδύνου από τη συνεχή έκθεση στην υπερβολική θερμότητα (NOAA, 2018a).

Ο δείκτης HD προτάθηκε πρώτη φορά από τους Masterson και Richardson (1979) της Υπηρεσίας Περιβάλλοντος του Καναδά. Οι παράμετροι της θερμοκρασίας του αέρα και της υγρασίας συνδυάζονται και το αποτέλεσμα αντανακλά την αντιληπτή θερμοκρασία (Environment Canada, 2018) σύμφωνα με την ακόλουθη εξίσωση, η οποία είναι έγκυρη για θερμοκρασίες αέρα άνω των 21 °C:

$$HD = T + \frac{5}{9} \cdot (e - 10)$$

όπου e είναι η τάση ατμών (hPa). Ο Πίνακας Γ2 παρουσιάζει τα κατώφλια του δείκτη HD όσον αφορά το βαθμό άνεσης (Environment Canada, 2018). Σύμφωνα με την οδηγία που έχει εκδώσει η Υπηρεσία Περιβάλλοντος του Καναδά, τιμές του δείκτη HD υψηλότερες από 40 θεωρούνται εξαιρετικά υψηλές και ο πληθυσμός θα πρέπει να περιορίζει όλες τις

περιττές εξωτερικές δραστηριότητες (Environment Canada, 2018). Επιπλέον, όταν ο δείκτης HD διαμορφώνεται μεταξύ των τιμών 35 και 40 τότε ορισμένοι τύποι δραστηριότητας θα πρέπει επίσης να περιορίζονται. Αξίζει να επισημανθεί ότι η κλίμακα του δείκτη HD έχει βαθμονομηθεί για πληθυσμούς που ζουν σε εύκρατες περιοχές του Καναδά.

Πίνακας Γ1: Κατώφλια του δείκτη HI όσον αφορά το βαθμό κινδύνου από τη συνεχή έκθεση στην υπερβολική θερμότητα (NOAA, 2018a).

HI (°C)	Ταξινόμηση	Γενικές επιπτώσεις σε ομάδες υψηλού κινδύνου	Classification	General affect on people in high risk groups
≥ 54	Εξαιρετικά ζεστό – Εξαιρετικός κίνδυνος	Θερμοπληξία/ηλίαση πολύ πιθανή με συνεχή έκθεση	Extremely hot – Extreme danger	Heat/Sunstroke highly likely with continued exposure
41 – 54	Πάρα πολύ ζεστό – Κίνδυνος	Ηλίαση, θερμικές κράμπες και εξάντληση πιθανή, πιθανή θερμοπληξία με παρατεταμένη έκθεση και / ή φυσική δραστηριότητα	Very hot – Danger	Sunstroke, heat cramps and exhaustion likely, possible heatstroke with prolonged exposure and/or activity
32 – 41	Πολύ ζεστό – Εξαιρετική προσοχή	Ηλίαση, θερμικές κράμπες ή θερμική εξάντληση πιθανή με παρατεταμένη έκθεση και / ή φυσική δραστηριότητα	Hot – Extreme caution	Sunstroke, heat cramps, or heat exhaustion possible with prolonged exposure and/or physical activity
27 – 32	Πολύ θερμό – Προσοχή	Πιθανή κόπωση με παρατεταμένη έκθεση και / ή φυσική δραστηριότητα	Very warm – Caution	Fatigue possible with prolonged exposure and/or physical activity

Πίνακας Γ2: Κατώφλια του βαθμού άνεσης σύμφωνα με το δείκτη HD (Environment Canada, 2018).

HD	Βαθμός άνεσης	Degree of comfort
> 45	Κίνδυνος – πιθανή θερμοπληξία	Dangerous – heat stroke possible
40 – 45	Μεγάλη δυσφορία – αποφυγή άσκησης	Great discomfort – avoid exertion
30 – 39	Μερική δυσφορία	Some discomfort
20 – 29	Μικρή δυσφορία	Little discomfort

Εκτός από τους ανωτέρω απλούς δείκτες, χρησιμοποιήθηκαν επίσης δύο λογικοί (rational) θερμικοί δείκτες, ο Universal Thermal Climate Index (UTCI) και ο Physiologically Equivalent Temperature (PET). Οι συγκεκριμένοι δείκτες βασίζονται στο ενεργειακό ισοζύγιο του ανθρώπου και έχουν θερμοφυσιολογικό υπόβαθρο. Ένα πλεονέκτημα των παραπάνω δεικτών είναι ότι εκφράζονται ως ισοδύναμες θερμοκρασίες (°C), έτσι ώστε τα

αποτελέσματα να είναι περισσότερο κατανοητά από άλλες ειδικότητες, από τους φορείς λήψης αποφάσεων ακόμη και από τους πολίτες.

Συγκεκριμένα, ο δείκτης UTCI βασίζεται στο πιο εξελιγμένο μοντέλο πολλαπλών κόμβων της θερμоруθμισης (Fiala et al., 2012) το οποίο είναι συζευγμένο με ένα δυναμικό μοντέλο ενδυμασίας (Havenith et al. 2012). Έτσι, για κάθε συνδυασμό θερμοκρασίας αέρα, ταχύτητας ανέμου, ακτινοβολίας και υγρασίας, ο UTCI ορίζεται ως η ισοδύναμη θερμοκρασία αέρα στις συνθήκες αναφοράς όπου θα αποσπάσει την ίδια δυναμική απόκριση από το μοντέλο φυσιολογίας του ανθρώπου (Bröde et al., 2012, Jendritzky et al., 2012). Το μοντέλο UTCI θεωρεί ένα άτομο που περπατά με ταχύτητα $1.1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ με το ρυθμό παραγωγής θερμότητας από το μεταβολισμό να διαμορφώνεται στα $135 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$. Ο δείκτης αναπτύχθηκε ώστε να μπορεί να εφαρμοστεί σε όλα τα κλίματα, τις εποχές και τις χωρικές κλίμακες. Ο Πίνακας Γ3 παρουσιάζει τα κατώφλια του UTCI όσον αφορά το βαθμό της θερμικής επιβάρυνσης.

Πίνακας Γ3: Κατώφλια θερμικής επιβάρυνσης σύμφωνα με το δείκτη UTCI (Bröde et al. 2012).

UTCI (°C)	Κατηγορία επιβάρυνσης	Stress category
> 46	Ακραία θερμή επιβάρυνση	Extreme heat stress
38 – 46	Πολύ ισχυρή θερμή επιβάρυνση	Very strong heat stress
32 – 38	Ισχυρή θερμή επιβάρυνση	Strong heat stress
26 – 32	Μέτρια θερμή επιβάρυνση	Moderate heat stress
9 – 26	Δεν υπάρχει θερμική επιβάρυνση	No thermal stress
9 – 0	Ήπια ψυχρή επιβάρυνση	Slight cold stress
0 – -13	Μέτρια ψυχρή επιβάρυνση	Moderate cold stress
-13 – -27	Ισχυρή ψυχρή επιβάρυνση	Strong cold stress
-27 – -40	Πολύ ισχυρή ψυχρή επιβάρυνση	Very strong cold stress
< -40	Ακραία ψυχρή επιβάρυνση	Extreme cold stress

Αντίθετα, ο δείκτης PET βασίζεται σε ένα κλασικό θερμοφυσιολογικό μοντέλο 2-κόμβων (Munich Energy-balance Model for Individuals, MEMI). Ο δείκτης PET αντανακλά την ισοδύναμη θερμοκρασία αέρα του περιβάλλοντος αναφοράς υπό του οποίου διατηρείται το ενεργειακό ισοζύγιο του ανθρώπου και οι θερμοκρασίες σώματος είναι ίσες με αυτές του περιβάλλοντος υπό εξέταση (Hörre, 1999). Δεδομένου ότι η αρχική κλίμακα του δείκτη PET αναπτύχθηκε για τη Δυτική και την Κεντρική Ευρώπη και λαμβάνοντας υπόψη ότι η περιοχή μελέτης έχει μεσογειακό κλίμα, στην παρούσα μελέτη επιλέχθηκε να

χρησιμοποιηθεί η κλίμακα του PET η οποία είναι προσαρμοσμένη σε μεσογειακό κλίμα (Cohen et al., 2013). Ως εκ τούτου, ο Πίνακας Γ4 παρουσιάζει τα κατώφλια του δείκτη PET όσον αφορά το βαθμό της θερμικής αίσθησης και της θερμικής επιβάρυνσης για Μεσογειακό κλίμα (Cohen et al., 2013).

Πίνακας Γ4: Κατώφλια θερμικής αίσθησης και θερμικής επιβάρυνσης σύμφωνα με το δείκτη PET για Μεσογειακό κλίμα (Cohen et al., 2013).

PET (°C)	Θερμική αίσθηση / Βαθμός θερμοφυσιολογικής επιβάρυνσης	Thermal sensation / Physiological stress level
> 40	Πάρα πολύ ζεστό / Ακραία θερμή επιβάρυνση	Very hot / Extreme heat stress
34 – 40	Πολύ ζεστό / Ισχυρή θερμή επιβάρυνση	Hot / Strong heat stress
28 – 34	Θερμό / Μέτρια θερμή επιβάρυνση	Warm / Moderate/heat stress
26 – 28	Ήπια θερμό / Ήπια θερμή επιβάρυνση	Slightly warm / Slight heat stress
19 – 26	Άνεση / Δεν υπάρχει θερμική επιβάρυνση	Comfortable / No stress
15 – 19	Ήπια δροσερό / Ήπια ψυχρή επιβάρυνση	Slightly cool / Slight cold stress
12 – 15	Δροσερό / Μέτρια ψυχρή επιβάρυνση	Cool / Moderate cold stress
8 – 12	Κρύο / Ισχυρή ψυχρή επιβάρυνση	Cold / Strong cold stress
< 8	Πολύ κρύο / Ακραία ψυχρή επιβάρυνση	Very cold / Extreme cold stress

Οι εμπειρικοί δείκτες HI και HD δεν λαμβάνουν υπόψη τις παραμέτρους της ακτινοβολίας και της ταχύτητας του ανέμου, ενώ παραλείπουν επίσης παράγοντες που σχετίζονται με την εκούσια συμπεριφορά του ατόμου όπως ο μεταβολικός ρυθμός και η μόνωση της ενδυμασίας (Alfano et al., 2011). Επίσης, οι συγκεκριμένοι δείκτες δεν στηρίζονται στο ενεργειακό ισοζύγιο μεταξύ του ανθρώπινου σώματος και του θερμικού περιβάλλοντος (Alfano et al., 2011). Αντίθετα, οι δείκτες UTCI και PET έχοντας θερμοφυσιολογικό υπόβαθρο και εφαρμόζοντας την εξίσωση του ενεργειακού ισοζυγίου, περιγράφουν με πιο ολοκληρωμένο τρόπο το θερμικό περιβάλλον του ανθρώπου και θεωρούνται προηγμένοι δείκτες σε σύγκριση με τους δείκτες HI και HD (De Freitas and Grigorieva, 2015, 2017).

Στην παρούσα ανάλυση επιλέχθηκαν τέσσερις θερμικοί (ή βιοκλιματικοί) δείκτες από τους πιο δημοφιλείς στο πεδίο της ανθρώπινης βιομετεωρολογίας με σκοπό να αποτυπώσουν τη διαχρονική εξέλιξη του βιοκλίματος στον αστικό πληθυσμό τόσο στο παρόν όσο και στο μελλοντικό κλίμα. Οι επιλεγμένοι δείκτες έχουν υιοθετηθεί και χρησιμοποιούνται επιχειρησιακά από δημόσιες και τοπικές μετεωρολογικές υπηρεσίες παγκοσμίως, παρέχοντας προειδοποιήσεις σχετικά με τα επίπεδα θερμικής επιβάρυνσης

στον πληθυσμό. Συγκεκριμένα, οι δείκτες HI και HD χρησιμοποιούνται σε επιχειρησιακή βάση από τις Εθνικές Μετεωρολογικές Υπηρεσίες των Η.Π.Α. και του Καναδά, αντίστοιχα. Ο δείκτης PET έχει υιοθετηθεί από τη Γερμανική Μετεωρολογική Υπηρεσία και ενσωματώνεται επίσης στη γερμανική κατευθυντήρια οδηγία για τον αστικό και περιφερειακό σχεδιασμό (VDI, 1998). Πρόσφατα, ο δείκτης PET υιοθετήθηκε από τη μετεωρολογική υπηρεσία του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών (NOA) για την παροχή προγνώσεων της θερμικής επιβάρυνσης και της θερμικής αίσθησης στον πληθυσμό. Ο δείκτης UTCI ως ο πιο σύγχρονος από όλους προέρχεται από τη σύζευξη ενός μοντέλου θερμοφυσιολογίας με ένα μοντέλο ενδυμασίας τα οποία αμφότερα βρίσκονται στην αιχμή της τεχνολογίας (Jendritzky et al., 2012).

Οι προσομοιώσεις του δείκτη UTCI πραγματοποιήθηκαν υιοθετώντας μια υπορουτίνα Fortran από τον επίσημο ιστότοπο του ερευνητικού προγράμματος στα πλαίσια του οποίου αναπτύχθηκε ο δείκτης (COST Action 730, <http://www.utci.org>). Οι προσομοιώσεις του δείκτη PET πραγματοποιήθηκαν με το μοντέλο ακτινοβολίας RayMan (Matzarakis et al., 2007, Matzarakis et al., 2010) το οποίο ενσωματώνει το θερμοφυσιολογικό μοντέλο 2-κόμβων MEMI (Hörpe 1999). Οι μετεωρολογικές παράμετροι οι οποίες επηρεάζουν το ενεργειακό ισοζύγιο του ανθρώπου και αποτελούν τα δεδομένα εισόδου στα μοντέλα υπολογισμού των δεικτών UTCI και PET είναι η θερμοκρασία του αέρα, η υγρασία του αέρα, η ταχύτητα του ανέμου και η μέση ακτινοβολός θερμοκρασία (mean radiant temperature). Το μοντέλο UTCI απαιτεί η μέτρηση της ταχύτητας του ανέμου να είναι στα 10 μέτρα, ενώ το μοντέλο MEMI απαιτεί η μέτρηση να πραγματοποιείται στο μέσο όρο ύψους του κέντρου βάρους ενός όρθιου ατόμου (1.1 m). Δεδομένου ότι το ύψος μέτρησης της ταχύτητας του ανέμου τόσο στο σταθμό του Αστεροσκοπείου Αθηνών όσο και στο σταθμό της Ε.Μ.Υ. στη Θεσσαλονίκη είναι στα 10 μέτρα, εφαρμόστηκε ο λογαριθμικός νόμος κατανομής του ανέμου για να υπολογιστεί η ταχύτητα του ανέμου στα 1.1 m, προκειμένου να υπολογιστεί ο δείκτης PET.

Η μέση ακτινοβολός θερμοκρασία προσομοιώθηκε με το μοντέλο ακτινοβολίας RayMan (Matzarakis et al. 2007, Matzarakis et al. 2010), χρησιμοποιώντας ως δεδομένα εισόδου τις μετεωρολογικές παραμέτρους της θερμοκρασίας του αέρα, της σχετικής υγρασίας, της ταχύτητας του ανέμου (1.1 m) και της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας για το σταθμό του Αστεροσκοπείου Αθηνών. Στην περίπτωση του σταθμού στη Θεσσαλονίκη λόγω της μη διαθεσιμότητας της παραμέτρου της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας χρησιμοποιήθηκε αντ' αυτής η παράμετρος του κλάσματος της νέφωσης για την προσομοίωση της μέσης ακτινοβόλου θερμοκρασίας. Επιπλέον, οι μη μετεωρολογικές παράμετροι όπως η ημέρα

του έτους, η τοπική ώρα, η ζώνη ώρας, το γεωγραφικό μήκος, το γεωγραφικό πλάτος, το υψόμετρο και η λευκαύγεια (albedo), για τον κάθε σταθμό αντίστοιχα, εισήχθησαν στο μοντέλο ακτινοβολίας RayMan για τον υπολογισμό της μέσης ακτινοβόλου θερμοκρασίας.

Με βάση τα παραπάνω δημιουργήθηκαν ωριαίες χρονοσειρές για όλους τους θερμικούς δείκτες για την περίοδο 1960–2017 για το σταθμό της Αθήνας. Αντίστοιχα, για το σταθμό της Θεσσαλονίκης δημιουργήθηκαν 3-ωρες χρονοσειρές για όλους τους θερμικούς δείκτες για την περίοδο 1970–2017. Η αθροιστική συνάρτηση κατανομής (Cumulative Distribution Function, CDF) προσδιορίστηκε εφαρμόζοντας έναν αριθμό "βημάτων" στο φάσμα τιμών του κάθε δείκτη και υπολογίζοντας την αντίστοιχη συχνότητα. Η ανάλυση γραμμικής παλινδρόμησης υιοθετήθηκε για την εκτίμηση των γραμμικών τάσεων, ενώ η μη παραμετρική στατιστική μέθοδος Mann-Kendall εφαρμόστηκε για να εκτιμηθεί το επίπεδο σημαντικότητας των τάσεων καθώς και το έτος έναρξης όταν οι τάσεις ήταν στατιστικά σημαντικές (διάστημα εμπιστοσύνης 95%). Ο χρόνος εμφάνισης της πρώτης και της τελευταίας θερμής επιβάρυνσης υπολογίστηκε μετρώντας τον αριθμό ημερών από την 1η Ιανουαρίου μέχρι την εμφάνιση της ανά έτος. Η «εποχή θερμής επιβάρυνσης» (heat stress season) ορίστηκε το χρονικό διάστημα (αριθμός ημερών) μεταξύ των ημερομηνιών της πρώτης και της τελευταίας εμφάνισης θερμής επιβάρυνσης. Στο σημείο αυτό πρέπει να επισημανθεί ότι η «εποχή θερμής επιβάρυνσης» αποτυπώνει το χρονικό εύρος εμφάνισης της επιβάρυνσης και δεν υποδηλώνει ότι ο πληθυσμός υφίσταται αποκλειστικά και μόνο θερμή επιβάρυνση το συγκεκριμένο χρονικό διάστημα.

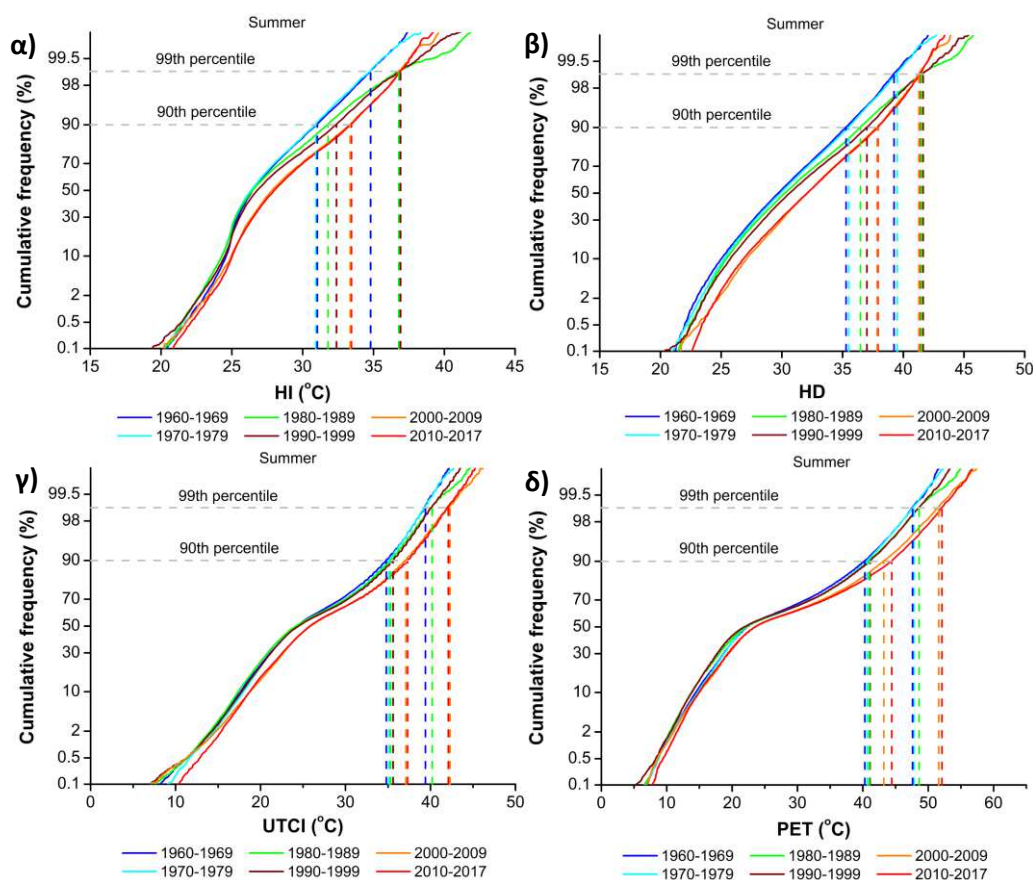
Στη συγκεκριμένη μελέτη, οι όροι «κίνδυνος» ή «έκθεση» χρησιμοποιούνται σε ένα ελεύθερο πλαίσιο και όχι στο πλαίσιο των αυστηρών ορισμών τους. Ως εκ τούτου, ο όρος θερμικός κίνδυνος αναφέρεται στην αυξημένη θερμή επιβάρυνση που υφίσταται ο αστικός πληθυσμός όταν εκτίθεται σε ένα δυσμενές θερμικά περιβάλλον, όπως υποδεικνύεται από τις κλίμακες των επιλεγμένων δεικτών.

Γ3: Αποτελέσματα στην περιοχή της Αθήνας

Γ3.1: Ενδο-δεκαετή και πολύ-δεκαετή κατανομή της θερμής επιβάρυνσης στην Αθήνα

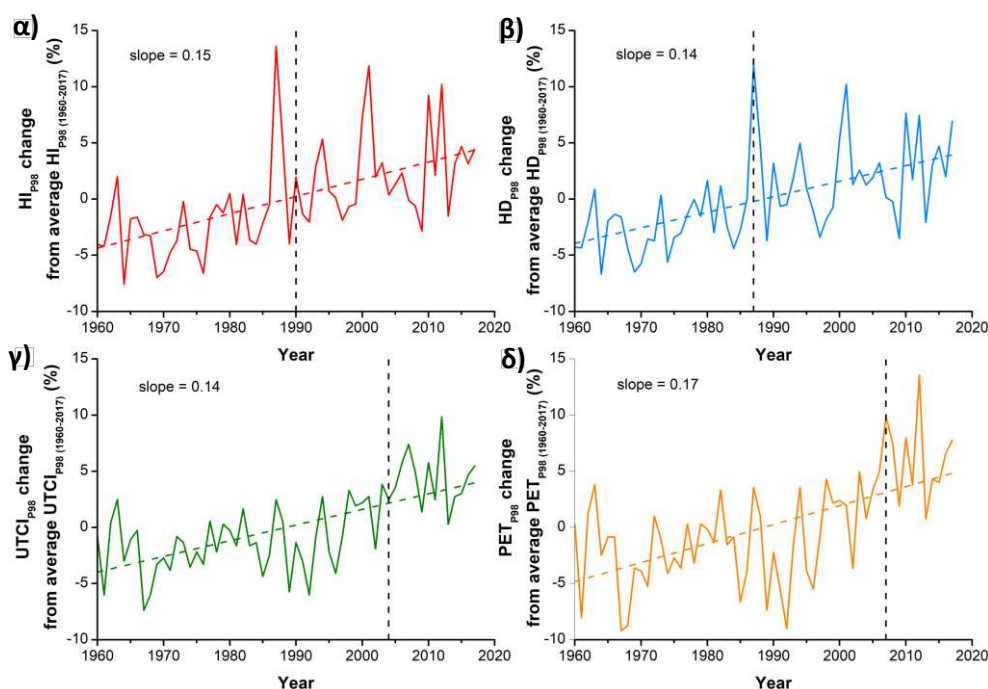
Προκειμένου να εκτιμηθούν πιθανές μεταβολές στην κατανομή της θερμής επιβάρυνσης μεταξύ των δεκαετιών, παράχθηκαν οι καμπύλες της αθροιστικής συνάρτησης κατανομής (CDFs) των επιλεγμένων δεικτών για το καλοκαίρι (Ιούνιος, Ιούλιος και Αύγουστος) για την περίοδο μελέτης (Εικόνα Γ1). Μια οπτική επιθεώρηση των αποτελεσμάτων αποκαλύπτει προοδευτικές μετατοπίσεις των κατανομών προς υψηλότερες

τιμές από τη δεκαετία του 1960. Τις τελευταίες δύο δεκαετίες, συγκεκριμένα, οι καμπύλες κατανομής έχουν σαφώς μετατοπιστεί προς υψηλότερες τιμές από τις αντίστοιχες καμπύλες των προηγούμενων δεκαετιών και ιδιαίτερα από εκείνες των δεκαετιών του 1960 και του 1970. Οι συγκεκριμένες μετατοπίσεις παρατηρούνται σε όλο το φάσμα της κατανομής, αλλά είναι περισσότερο εμφανής στα ανώτερα επίπεδα των εκατοστημορίων (percentiles). Οι παρατηρούμενες μετατοπίσεις αποκαλύπτουν έναν αυξανόμενο κίνδυνο θερμικού στρες από τη δεκαετία του 1960, ο οποίος μεγιστοποιείται τις δύο τελευταίες δεκαετίες. Ενδεικτικά αναφέρουμε ότι τις δεκαετίες του 1960 και του 1970, το 95ο εκατοστημόριο του UTCI είναι 36.7 °C, υποδηλώνοντας «πολύ ισχυρή θερμή επιβάρυνση» (very strong heat stress), ενώ τις δεκαετίες του 2000 και του 2010 το αντίστοιχο εκατοστημόριο αυξήθηκε κατά 2.3 °C και 2.4 °C, αντίστοιχα, υποδεικνύοντας «ακραία θερμή επιβάρυνση» (extreme heat stress) (Εικόνα Γ1γ). Η μετατόπιση των καμπυλών κατανομής τις δεκαετίες του 1980 και του 1990 προς υψηλότερες τιμές σε σύγκριση με τη δεκαετία του 1960 είναι περισσότερο εμφανής πέραν του 70ου εκατοστημορίου για τους απλούς δείκτες (Εικόνα Γ1α, β) και πέραν του 97ου εκατοστημορίου για τους λογικούς δείκτες (Εικόνα Γ1γ, δ).



Εικόνα Γ1: Αθροιστική συχνότητα κατανομής (CDF) των δεικτών α) HI, β) HD, γ) UTCI και δ) PET ανά δεκαετία το καλοκαίρι για την περίοδο 1960–2017 στην Αθήνα.

Η Εικόνα Γ2 παρουσιάζει τη διακύμανση ανά έτος του 98ου εκατοστημορίου των δεικτών, εκφρασμένη ως η διαφορά από τη μέση τιμή του αντίστοιχου εκατοστημορίου για όλη την περίοδο (1960–2017). Τα αποτελέσματα αποκαλύπτουν μια σημαντική αυξητική τάση των μεταβολών για όλους του δείκτες. Συγκεκριμένα, μέχρι τα μέσα της δεκαετίας του 1980 παρατηρούνται αρνητικές μεταβολές για τους απλούς δείκτες, γεγονός που υποδηλώνει ότι ο θερμικός κίνδυνος για τον πληθυσμό είναι μικρότερος από τη συνεχιζόμενη έκθεση του σε υπερβολικά υψηλές θερμοκρασίες συγκριτικά με τις μέσες συνθήκες ολόκληρης της περιόδου (Εικόνα Γ2α, β). Τη συγκεκριμένη περίοδο η μεταβολή διαμορφώνεται έως και στο -7%, με τη μέση μεταβολή να είναι -3.0% και -2.7% για τον HI και τον HD, αντίστοιχα. Από τη δεκαετία του 1980 και ύστερα, η μεταβολή αποκτά θετικό πρόσημο φτάνοντας έως και το +10% σε συγκεκριμένα έτη, με τη μέση μεταβολή να διαμορφώνεται στα +2.5% και +2.2% για τον HI και τον HD, αντίστοιχα.



Εικόνα Γ2: Ποσοστιαία μεταβολή του 98ου εκατοστημορίου από τη μέση τιμή της περιόδου μελέτης (1960–2017) στην Αθήνα για τους δείκτες α) HI, β) HD, γ) UTCI και δ) PET. Η μαύρη διακεκομμένη γραμμή υποδεικνύει το έτος κατά το οποίο η χρονοσειρά γίνεται στατιστικά σημαντική. Η γραμμή τάσης και η κλίση απεικονίζονται επίσης.

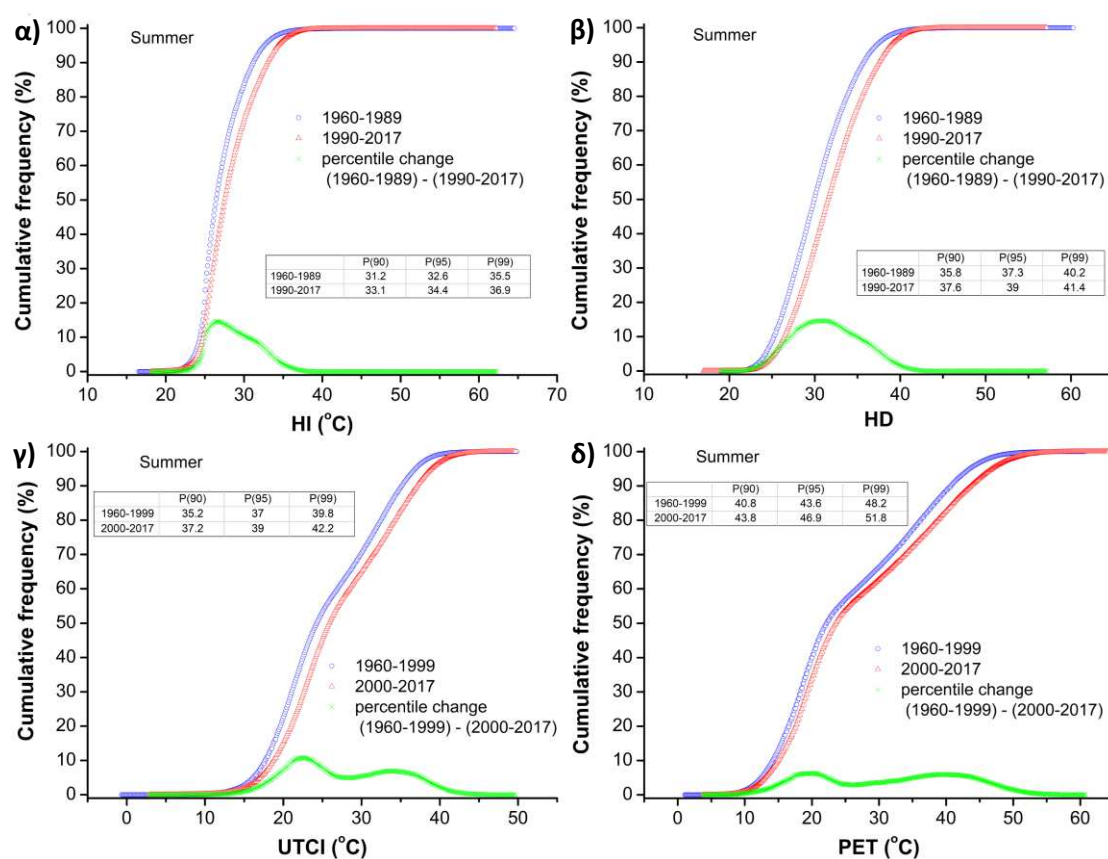
Στην περίπτωση των λογικών δεικτών, ωστόσο, η περίοδος με αρνητικές μεταβολές παρατηρείται έως και τα τέλη της δεκαετίας του 1990 (Εικόνα Γ2γ, δ). Την περίοδο πριν από τα τέλη της δεκαετίας του 1990, η μεταβολή διαμορφώνεται έως και στο -7% για τον UTCI

και έως το -9% για τον PET, από τις μέσες συνθήκες «ακραίας θερμής επιβάρυνσης» ολόκληρης της περιόδου. Αντιθέτως, οι συνθήκες «ακραίας θερμής επιβάρυνσης» έχουν αυξηθεί έως και +10% και έως +13,5% για τον UTCI και τον PET, αντίστοιχα, τις δύο τελευταίες δεκαετίες. Η στατιστική μέθοδος Mann-Kendall υποδεικνύει ότι η αυξητική τάση της ποσοστιαίας μεταβολής της «ακραίας θερμής επιβάρυνσης» από τη μέση κατάσταση ολόκληρης της περιόδου είναι στατιστικά σημαντική για όλους τους δείκτες. Ωστόσο, η αυξητική τάση καθίσταται στατιστικά σημαντική νωρίτερα για τους απλούς δείκτες, περίπου στα τέλη της δεκαετίας του 1980, σε σύγκριση με τους λογικούς δείκτες όπου αυτό συμβαίνει, περίπου στα μέσα της δεκαετίας του 2000.

Οι Εικόνες Γ3α, β απεικονίζουν τις καμπύλες της αθροιστικής συνάρτησης κατανομής (CDFs) των απλών δεικτών (HI και HD) το καλοκαίρι για δυο υποπεριόδους (1960–1989 και 1990–2017) μαζί με τη διαφορά τους. Όσον αφορά τους λογικούς δείκτες, επιλέχθηκαν οι υποπερίοδοι 1960–1999 και 2000–2017 για την ίδια ανάλυση (Εικόνες Γ3γ, δ), σύμφωνα με τα ευρήματα που παρατηρήθηκαν στις Εικόνες Γ1γ, δ. Τα αποτελέσματα αποκαλύπτουν σημαντικές διαφορές μεταξύ των κατανομών των υπό εξέταση υποπεριόδων σε ένα ευρύ φάσμα τιμών των εκατοστημορίων. Στο εύρος τιμών μεταξύ 24 °C και 35 °C, ο δείκτης HI διαφέρει κατά τουλάχιστον 2 εκατοστιαίες μονάδες μεταξύ των δύο υποπεριόδων και η διαφορά φτάνει έως και τις 14.6 ποσοστιαίες μονάδες (Εικόνα Γ3α). Στα ανώτερα εκατοστημόρια (P90, P95, P99) παρατηρούνται υψηλότερες τιμές του δείκτη HI κατά τουλάχιστον 1.4 °C την περίοδο 1990–2017 σε σύγκριση με την περίοδο 1960–1989. Σύμφωνα με τα κατώφλια του δείκτη HI, το 90ο εκατοστημόριο της περιόδου 1960–1989 αντιστοιχεί στην κατηγορία «Πολύ θερμό – Προσοχή», ενώ τις τελευταίες τρεις δεκαετίες αντιστοιχεί στην κατηγορία «Πολύ ζεστό – Εξαιρετική προσοχή», γεγονός που υποδεικνύει αύξηση του θερμικού κινδύνου για τον πληθυσμό της Αθήνας κατά μια βαθμίδα στην κλίμακα του δείκτη. Αντίστοιχα αποτελέσματα παρατηρούνται επίσης για το δείκτη HD, με μια σημαντική μετατόπιση της κατανομής την περίοδο 1990–2017 προς υψηλότερες τιμές του δείκτη σε σύγκριση με την περίοδο 1960–1989 (Εικόνα Γ3β). Οι τιμές HD διαφέρουν κατά τουλάχιστον 2 ποσοστιαίες μονάδες στην περιοχή τιμών του δείκτη μεταξύ 24 και 40, ενώ η μέγιστη διαφορά διαμορφώνεται στις 14.6 ποσοστιαίες μονάδες, και παρατηρείται στο σημείο κλίμακας 31.

Στην περίπτωση των λογικών δεικτών, παρατηρούνται σημαντικές διαφορές σε όλο το φάσμα των εκατοστημορίων μεταξύ των περιόδων 1960–1999 και 2000–2017. Συγκεκριμένα, στο εύρος τιμών του UTCI μεταξύ 17 °C και 40 °C παρατηρούνται διαφορές τουλάχιστον 2 ποσοστιαίων μονάδων, ενώ η διαφορά στις δύο παρατηρούμενες κορυφές

είναι της τάξεως των 10 και 6 ποσοστιαίων μονάδων, περίπου στους 23 °C και 34 °C, αντίστοιχα (Εικόνα Γ3γ). Στα ανώτερα εκατοστημόρια (P90, P95, P99), οι τιμές UTCI είναι σταθερά υψηλότερες τουλάχιστον κατά 2 °C τις τελευταίες δύο δεκαετίες σε σύγκριση με την προηγούμενη περίοδο. Οι παρατηρούμενες αλλαγές στο 95ο εκατοστημόριο αποκαλύπτουν αύξηση στο βαθμό καταπόνησης από «ισχυρή θερμή επιβάρυνση» την περίοδο 1960–1999 σε «πολύ ισχυρή θερμή επιβάρυνση» την περίοδο 2000–2017. Ομοίως, οι τιμές PET μεταξύ 14 °C και 49 °C διαφέρουν τουλάχιστον κατά 2 ποσοστιαίες μονάδες μεταξύ των εξεταζόμενων υποπεριοδών, με τη μέγιστη διαφορά να φτάνει έως και τις 6 ποσοστιαίες μονάδες (Εικόνα Γ3δ). Σημαντικές διαφορές μεταξύ των δύο υποπεριοδών παρατηρούνται στα ανώτερα εκατοστημόρια (P90, P95, P99) του δείκτη PET, με τις διαφορές να είναι μεγαλύτερες των 3 °C.



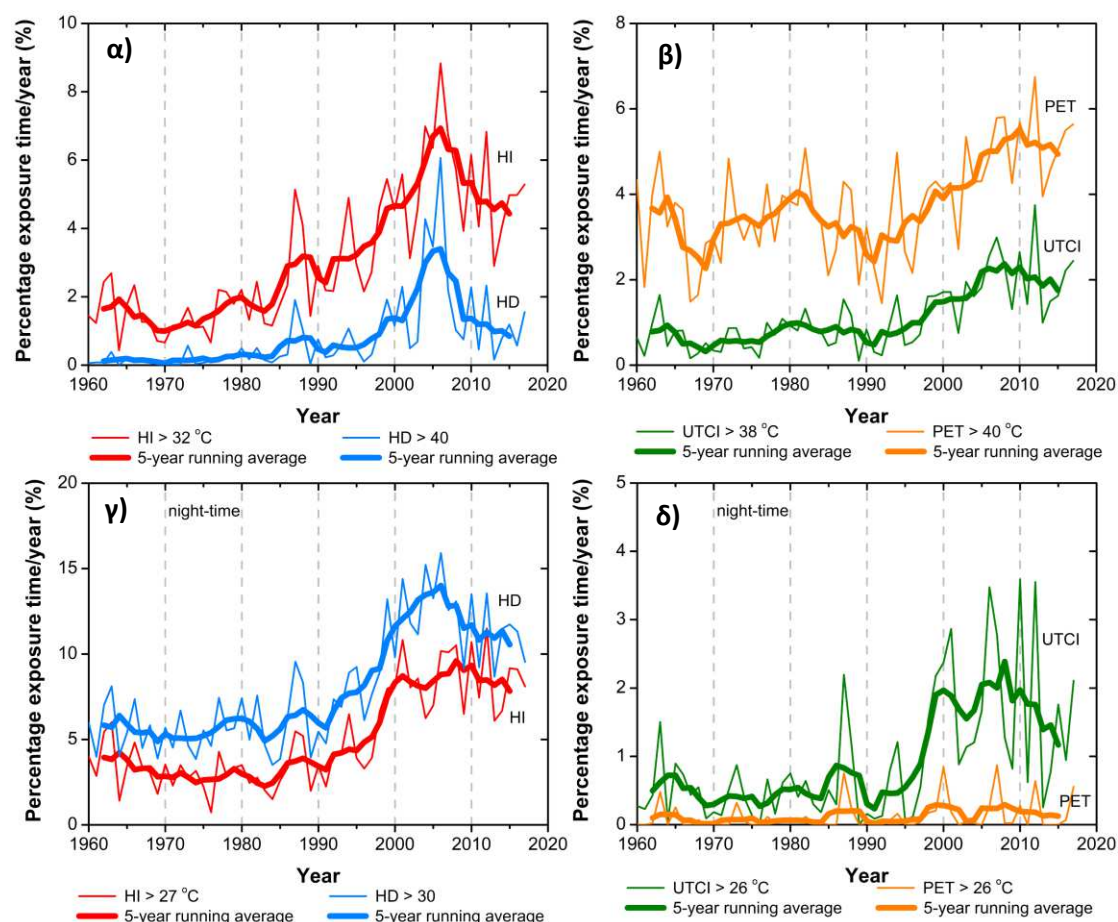
Εικόνα Γ3: Αθροιστική συχνότητα κατανομής (CDF) των δεικτών α) HI, β) HD κατά τις δύο υποπεριοδούς 1960–1989 και 1990–2017 το καλοκαίρι και των δεικτών γ) UTCI, δ) PET κατά τις δύο υποπεριοδούς 1960–1999 και 2000–2017 το καλοκαίρι στην Αθήνα. Η εκατοστιαία μεταβολή (percentile change) μεταξύ των υπό εξέταση υποπεριοδών απεικονίζεται επίσης.

Γ3.2: Διαχρονικές διακυμάνσεις και τάσεις του χρόνου έκθεσης υπό θερμή επιβάρυνση στην Αθήνα

Η Εικόνα Γ4 παρουσιάζει το χρόνο έκθεσης (σε %) ανά έτος υπό συνθήκες θερμής επιβάρυνσης, όπως αυτές αντικατοπτρίζονται από τις υπερβάσεις συγκεκριμένων κατωφλίων των ανώτερων κατηγοριών των δεικτών. Η ανάλυση δεν περιορίστηκε εποχιακά και ως εκ τούτου τα αποτελέσματα βασίζονται σε πιθανές ωριαίες υπερβάσεις καθ' όλη τη διάρκεια του έτους. Μέχρι τα μέσα της δεκαετίας του 1980, ο χρόνος έκθεσης υπό συνθήκες «πολύ ζεστό – εξαιρετική προσοχή» ($HI > 32^{\circ}C$) και «μεγάλη δυσφορία - αποφυγή άσκησης» ($HD > 40$) είναι ως επί το πλείστον μικρότερος από 2% και 0.6% ετησίως, αντίστοιχα (Εικόνα Γ4α). Στη συνέχεια παρατηρείται μια σημαντική ανοδική τάση του χρόνου έκθεσης υπό αυτές τις συνθήκες, με ένα μέγιστο να διαμορφώνεται στα μέσα της δεκαετίας του 2000 το οποίο ακολουθείται από μια μείωση μέχρι σήμερα. Συγκεκριμένα, ο χρόνος έκθεσης υπό συνθήκες «πολύ ζεστό – εξαιρετική προσοχή» ($HI > 32^{\circ}C$) διαμορφώνεται στο 1.4% το 1960, αυξανόμενος στο 8.8% το 2006 (σχετική αύξηση κατά 529%) και στο 5.3% το 2017 (σχετική αύξηση κατά 279%). Τα υψηλά ποσοστά του χρόνου έκθεσης τα έτη 2007 και 2012 αντικατοπτρίζουν τη μεγάλη συχνότητα εμφάνισης επεισοδίων καύσωνα (Founda and Giannakopoulos, 2009, Theoharatos et al., 2010, Founda and Santamouris, 2017, Katavoutas and Founda, 2019). Επίσης, το υψηλό ποσοστό το έτος 2006 σχετίζεται με τα υψηλά ποσοστά υγρασίας που παρατηρήθηκαν στα τέλη της άνοιξης και στις αρχές του φθινοπώρου. Ο χρόνος έκθεσης υπό συνθήκες «πολύ ζεστό – εξαιρετική προσοχή» ($HI > 32^{\circ}C$) και «μεγάλη δυσφορία - αποφυγή άσκησης» ($HD > 40$) παρουσιάζει στατιστικά σημαντική αυξητική τάση, η οποία διαμορφώνεται στο 0.9%/δεκαετία και στο 0.4%/δεκαετία την περίοδο 1960–2017, αντίστοιχα (Πίνακας Γ5). Με βάση τον απόλυτο αριθμό του χρόνου έκθεσης που εκφράζεται ως ο αριθμός ωρών που υπερβαίνει τα κατώφλια των δεικτών που αναλύονται, ο ρυθμός αύξησης είναι περίπου 79 ώρες/δεκαετία για $HI > 32^{\circ}C$ και 31 ώρες/δεκαετία για $HD > 40$.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του δείκτη UTCI, ο χρόνος έκθεσης ανά έτος υπό «πολύ ισχυρή θερμή επιβάρυνση» δεν υπερβαίνει το 1% μέχρι τα μέσα της δεκαετίας του 1990 (Εικόνα Γ4β). Στη συνέχεια, τα αποτελέσματα υποδεικνύουν μια σταδιακή και συνεχή ανοδική τάση. Ως εκ τούτου, ο χρόνος έκθεσης υπό συνθήκες «πολύ ισχυρής θερμής επιβάρυνσης» ($UTCI > 38^{\circ}C$) διαμορφώνεται στο 0.7% το 1960, αυξανόμενος στο 1.7% το 2001 (σχετική αύξηση κατά 143%) και στο 2.4% το 2017 (σχετική αύξηση κατά 243%). Η ανάλυση τάσεων Mann-Kendall αποκαλύπτει μια στατιστικά σημαντική αυξητική τάση στο χρόνο έκθεσης υπό αυτές τις συνθήκες με ρυθμό 0.3%/δεκαετία την περίοδο 1960–2017

(Πίνακας Γ5). Με βάση τα απολυτά δεδομένα, ο ρυθμός αύξησης διαμορφώνεται στις 27 ώρες/δεκαετία. Ο χρόνος έκθεσης βάσει του PET παρουσιάζει μεγαλύτερες διακυμάνσεις ανά έτος, ενώ μια δεκαετή μεταβλητότητα είναι ιδιαίτερα εμφανής πριν από τη δεκαετία του 1990 (Εικόνα Γ4β). Για όλη την περίοδο μελέτης παρατηρείται στατιστικά σημαντική αύξηση της τάξης του 0.4%/δεκαετία (32 ώρες/δεκαετία) στο χρόνο έκθεσης υπό συνθήκες «ακραίας θερμής επιβάρυνσης» ($PET > 40^{\circ}\text{C}$) (Πίνακας Γ5).



Εικόνα Γ4: Χρόνος έκθεσης (%) του πληθυσμού υπό συνθήκες α) $HI > 32^{\circ}\text{C}$ και $HD > 40$, β) $UTCI > 38^{\circ}\text{C}$ και $PET > 40^{\circ}\text{C}$ για όλες τις ώρες της ημέρας και γ) $HI > 27^{\circ}\text{C}$ και $HD > 30$, δ) $UTCI > 26^{\circ}\text{C}$ και $PET > 26^{\circ}\text{C}$ κατά τη διάρκεια της νύχτας για την περίοδο 1960–2017 στην Αθήνα. Οι έντονες καμπύλες υποδεικνύουν τον 5-ετή κινούμενο μέσο.

Είναι ιδιαίτερα σημαντικό να αναλυθεί ο πιθανός χρόνος έκθεσης υπό συνθήκες θερμής επιβάρυνσης κατά τη διάρκεια της νύχτας (Εικόνες Γ4γ, δ). Η επίδραση των υψηλών θερμοκρασιών στον πληθυσμό κατά τη διάρκεια της νύχτας έχει αποδειχτεί ιδιαίτερα επιβαρυντική σε σύγκριση με τις υψηλές θερμοκρασίες κατά τη διάρκεια της ημέρας (Tan et al., 2010, Gabriel and Endlicher, 2011). Το συνολικό μοτίβο του χρόνου έκθεσης κατά τη

διάρκεια της νύχτας είναι παρόμοιο με εκείνο που περιλαμβάνει όλες τις ώρες του 24ωρου για όλους τους δείκτες με εξαίρεση τον PET (Εικόνες Γ4γ, δ). Μέχρι τα τέλη της δεκαετίας του 1980 για τους απλούς δείκτες και μέχρι τα μέσα της δεκαετίας του 1990 για το UTCI, ο χρόνος έκθεσης υπό τις εξεταζόμενες συνθήκες θερμής επιβάρυνσης είναι μικρότερος σε σύγκριση με το χρόνο έκθεσης των επόμενων δεκαετιών (Εικόνα Γ4γ, δ).

Πίνακας Γ5: Τάση του χρόνου έκθεσης (%) ανά έτος υπό συνθήκες θερμής επιβάρυνσης όπως αντικατοπτρίζονται από τις υπερβάσεις συγκεκριμένων κατωφλίων, τόσο για όλες τις ώρες της ημέρας όσο και για τη νύχτα κατά την περίοδο 1960–2017. Οι τιμές p-value της μεθόδου Mann-Kendall (η έντονη γραφή υποδηλώνει στατιστικά σημαντική τάση στο διάστημα εμπιστοσύνης 95%) και το έτος όπου η τάση των χρονοσειρών γίνεται στατιστικά σημαντική παρουσιάζονται επίσης.

Όλες οι ώρες του 24ωρου	Τάση του χρόνου έκθεσης ανά έτος (κλίση $\pm$ τυπικό σφάλμα)	p-value	Έτος
HI > 32 °C	+0.09 $\pm$ 0.010	3.57E-10	1993
HD > 40	+0.04 $\pm$ 0.008	1.05E-08	1987
UTCI > 38 °C	+0.03 $\pm$ 0.005	2.49E-07	2001
PET > 40 °C	+0.04 $\pm$ 0.008	8.23E-05	2008
Νυχτερινές ώρες			
HI > 27 °C	+0.12 $\pm$ 0.015	9.67E-08	2001
HD > 30	+0.15 $\pm$ 0.018	7.67E-09	1998
UTCI > 26 °C	+0.03 $\pm$ 0.006	1.97E-04	2005
PET > 26 °C	+0.003 $\pm$ 0.002	5.20E-01	–

Το συγκεκριμένο αποτέλεσμα βρίσκεται σε συμφωνία με την ανάλυση τάσεων Mann-Kendall, βάσει της οποίας ο χρόνος έκθεσης ανά έτος παρουσιάζει στατιστικά σημαντική αύξηση κατά τη διάρκεια της νύχτας την περίοδο 1960-2017 σε όλους τους δείκτες, με εξαίρεση τον PET (Πίνακας Γ5). Συγκεκριμένα, ο χρόνος έκθεσης υπό συνθήκες τουλάχιστον «πολύ θερμό – προσοχή» (HI > 27 °C), «μερική δυσφορία» (HD > 30) και «μέτρια θερμή επιβάρυνση» (UTCI > 26 °C) έχει αυξηθεί κατά 1.2%/δεκαετία, 1.5%/δεκαετία και 0.3%/δεκαετία, αντίστοιχα, κατά τη διάρκεια της νύχτας. Με βάση τα απόλυτα δεδομένα, ο αριθμός ωρών που υπερβαίνουν τα αντίστοιχα κατώφλια αυξάνεται κατά 55 ώρες/δεκαετία, 66 ώρες/δεκαετία και 13 ώρες/δεκαετία, αντίστοιχα. Αν και η συχνότητα του χρόνου έκθεσης υπό τουλάχιστον «ήπια θερμή επιβάρυνση» (PET > 26 °C) έχει αυξηθεί τα τελευταία χρόνια κατά τη διάρκεια της νύχτας, δεν προκύπτει ακόμη στατιστικά

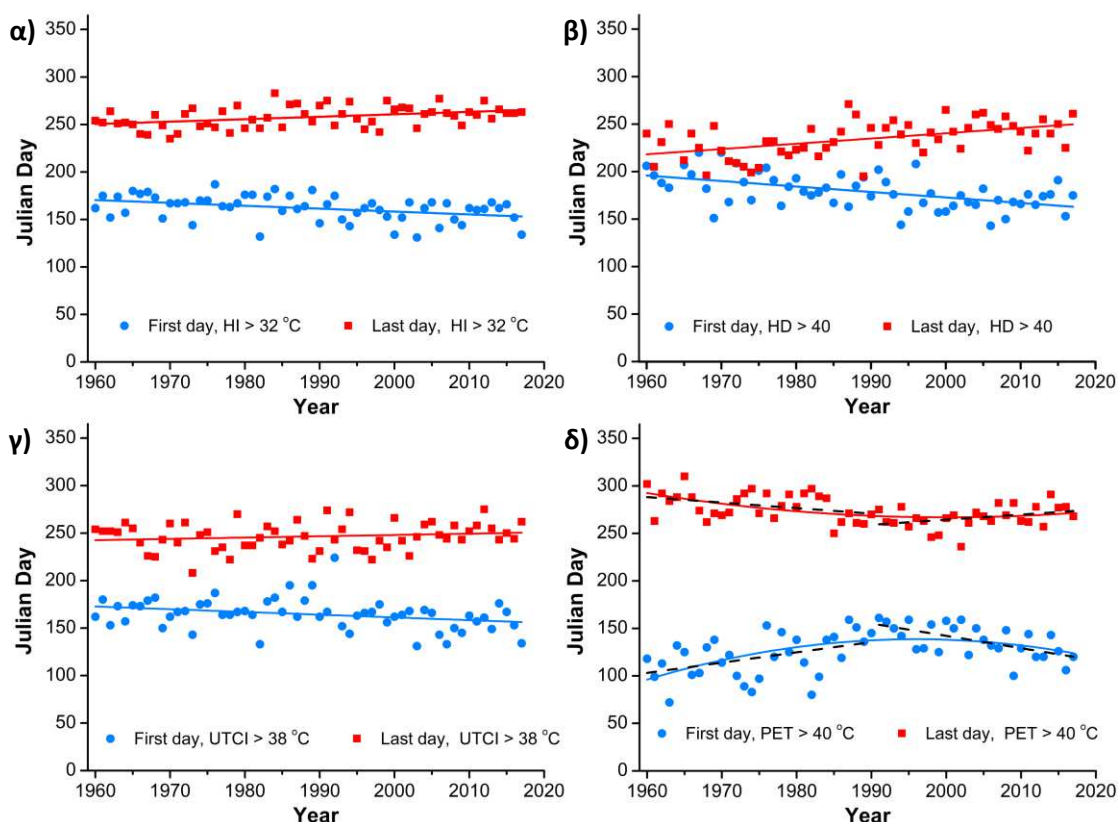
σημαντική αυξητική τάση με βάση τη μέθοδο Mann-Kendall (Πίνακας Γ5). Η σχετικά χαμηλή συχνότητα εμφάνισης με βάση τον PET πιθανόν να συνδέεται με τους περιορισμούς του δείκτη να ποσοτικοποιήσει τις επιπτώσεις της υγρασίας (που εμφανίζει υψηλότερες τιμές κατά τη διάρκεια της νύχτας), η οποία αναγνωρίζεται ως μια σημαντική αδυναμία του PET (Chen and Matzarakis, 2018). Ο συνδυασμός της μικρής ευαισθησίας του PET στην υγρασία του αέρα (Provençal et al., 2016) και της απουσίας ηλιακής ακτινοβολίας κατά τη διάρκεια της νύχτας είναι πιθανώς η αιτία των σχετικά μειωμένων τιμών του PET κατά τη διάρκεια αυτής της χρονικής περιόδου του 24ωρου.

Γ3.3: Διακυμάνσεις και τάσεις της περιόδου εμφάνισης συνθηκών θερμής επιβάρυνσης στην Αθήνα

Στην Εικόνα Γ5 παρουσιάζεται η πρώτη ημέρα και η τελευταία ημέρα εντός του έτους όπου σημειώνονται υπερβάσεις συγκεκριμένων κατωφλίων των ανώτερων κατηγοριών των υπό εξέταση δεικτών κατά την περίοδο 1960–2017. Η εξέταση των αποτελεσμάτων με βάση τους δείκτες HI και HD δείχνει ότι οι χρονοσειρές της πρώτης και της τελευταίας ημέρας υπό συνθήκες τουλάχιστον «πολύ ζεστό – εξαιρετική προσοχή» ($HI > 32\text{ }^{\circ}\text{C}$) και με «μεγάλη δυσφορία - αποφυγή άσκησης» ($HD > 40$) αποκλίνουν με την πάροδο των ετών, ως αποτέλεσμα των αντίστοιχων αρνητικών και θετικών γραμμικών τάσεων (Εικόνα Γ5α, β). Το αποτέλεσμα αυτό συνεπάγεται αφενός ότι η ημερομηνία της πρώτης εμφάνισης συνθηκών «πολύ ζεστό – εξαιρετική προσοχή» μετατοπίζεται νωρίτερα μέσα στο έτος κατά 3 ημέρες/δεκαετία και αφετέρου ότι η ημερομηνία της τελευταίας εμφάνισης συνθηκών «πολύ ζεστό – εξαιρετική προσοχή» μετατοπίζεται αργότερα κατά 2.6 ημέρες/δεκαετία (Πίνακας Γ6). Οι αντίστοιχες μετατοπίσεις για το δείκτη HD είναι πιο έντονες και οι κλίσεις των γραμμών τάσης είναι πιο απότομες από εκείνες του HI. Συνεπώς, η πρώτη εμφάνιση της «μεγάλης δυσφορίας – αποφυγή άσκησης» μετατοπίζεται νωρίτερα κατά 5.8 ημέρες/δεκαετία, ενώ η τελευταία εμφάνιση μετατοπίζεται αργότερα κατά 5.5 ημέρες/δεκαετία κατά τη διάρκεια των ετών. Οι χρονοσειρές των ημερομηνιών της πρώτης και της τελευταίας εμφάνισης των υπό εξέταση συνθηκών θερμής επιβάρυνσης παρουσιάζουν στατιστικά σημαντική τάση μείωσης και αύξησης, αντίστοιχα (Πίνακας Γ6). Στην περίπτωση του HD, για παράδειγμα, τα παραπάνω αποτελέσματα αποκαλύπτουν ότι η πρώτη εμφάνιση «μεγάλης δυσφορίας – αποφυγή άσκησης» στις αρχές της δεκαετίας του 1960 εμφανίζεται κατά τη διάρκεια του Ιουλίου, ενώ τα τελευταία χρόνια αυτό συμβαίνει κατά τη διάρκεια του Ιουνίου και σε ορισμένες περιπτώσεις ακόμη και στα τέλη Μαΐου. Παράλληλα, η τελευταία εμφάνιση «μεγάλης δυσφορίας – αποφυγή άσκησης» στις αρχές

της δεκαετίας του 1960 παρατηρείται κυρίως τον Αύγουστο και σίγουρα όχι αργότερα από τις αρχές Σεπτεμβρίου, ενώ τα τελευταία χρόνια αυτό παρατηρείται και μετά τα μέσα Σεπτεμβρίου.

Τα αντίστοιχα αποτελέσματα βάσει του UTCI αποκαλύπτουν ότι οι μετατοπίσεις νωρίτερα μέσα στο έτος της πρώτης εμφάνισης με «πολύ ισχυρή θερμή επιβάρυνση» ($UTCI > 38^{\circ}C$) είναι πιο εμφανής από τις μετατοπίσεις αργότερα της τελευταίας εμφάνισης (Εικόνα Γ5γ). Ως εκ τούτου, η πτωτική τάση της χρονοσειράς είναι στατιστικά σημαντική, υποδεικνύοντας ότι το πρώτο επεισόδιο με «πολύ ισχυρή θερμή επιβάρυνση» μετατοπίζεται νωρίτερα κατά 2.9 ημέρες/δεκαετία (Πίνακας Γ6). Αν και υπάρχει μια ελαφρώς αυξητική τάση της τελευταίας ημέρας εμφάνισης με «πολύ ισχυρή θερμή επιβάρυνση» κατά 1.4 ημέρες/δεκαετία, η τάση αυτή δεν είναι στατιστικά σημαντική (Πίνακας Γ6).



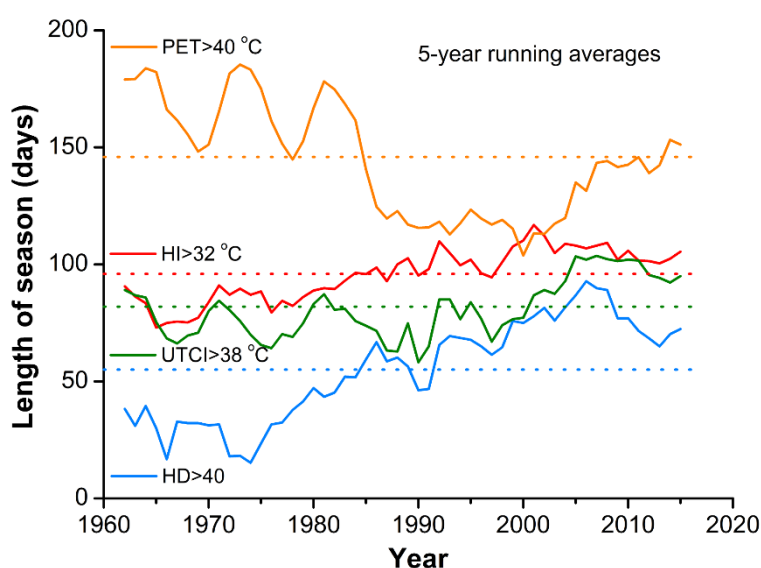
Εικόνα Γ5: Ημερομηνίες (Julian Day) της πρώτης και τελευταίας εμφάνισης όπου α) $HI > 32^{\circ}C$, β) $HD > 40$, γ) $UTCI > 38^{\circ}C$ και δ) $PET > 40^{\circ}C$ μέσα σε ένα ημερολογιακό έτος για την περίοδο 1960–2017 στην Αθήνα. Η ημερομηνία εκφρασμένη ως Julian Day είναι μια ημέρα του έτους που κυμαίνεται μεταξύ του 1 (1η Ιανουαρίου) και του 365 (ή 366 εάν είναι δίσεκτο) (31η Δεκεμβρίου). Οι γραμμές τάσης απεικονίζονται επίσης.

Αντίθετα, τα αποτελέσματα του PET αποκαλύπτουν ένα ανεστραμμένο πεπλατυσμένο μοτίβο σχήματος U για την πρώτη ημέρα εμφάνισης συνθηκών με «ακραία θερμή επιβάρυνση» ($PET > 40\text{ }^{\circ}\text{C}$) και ένα πεπλατυσμένο μοτίβο σχήματος U για την τελευταία ημέρα εμφάνισης των ίδιων συνθηκών (Εικόνα Γ5δ). Τα αποτελέσματα που αντιστοιχούν στις περιόδους πριν και μετά το 1990 αποκαλύπτουν αντίθετη τάση. Μέχρι τις αρχές της δεκαετίας του 1990, η πρώτη ημέρα με «ακραία θερμή επιβάρυνση» μετατοπίζεται αργότερα μέσα στο έτος ενώ η τελευταία ημέρα με «ακραία θερμή επιβάρυνση» μετατοπίζεται νωρίτερα. Καμία από αυτές τις τάσεις δεν είναι στατιστικά σημαντική (Πίνακας Γ6). Στη συνέχεια, οι τάσεις αντιστρέφονται ακολουθώντας το γενικό μοτίβο που παρατηρείται στους υπόλοιπους δείκτες. Ως εκ τούτου, η πρώτη εμφάνιση «ακραίας θερμής επιβάρυνσης» μετατοπίζεται νωρίτερα κατά 1.3 ημέρες/δεκαετία, ενώ η τελευταία εμφάνιση «ακραίας θερμής επιβάρυνσης» μετατοπίζεται αργότερα, αλλά η αντίστοιχη αυξητική τάση δεν είναι στατιστικά σημαντική (Πίνακας Γ6).

Πίνακας Γ6: Τάση της πρώτης και της τελευταίας ημέρας εμφάνισης καθώς και της διάρκειας της περιόδου για συγκεκριμένες υπερβάσεις κατωφλίων της θερμής επιβάρυνσης κατά την περίοδο 1960–2017. Οι τιμές p-value της μεθόδου Mann-Kendall (η έντονη γραφή υποδηλώνει στατιστικά σημαντική τάση στο διάστημα εμπιστοσύνης 95%) και το έτος όπου η τάση των χρονοσειρών γίνεται στατιστικά σημαντική παρουσιάζονται επίσης.

	Τάση της πρώτης/τελευταίας ημέρας εμφάνισης (κλίση $\pm$ τυπικό σφάλμα)	p-value (πρώτης/τελευταίας)	Έτος (πρώτης/τελευταίας)
HI > 32 °C	−0.30 ($\pm$ 0.096) / +0.26 ($\pm$ 0.080)	9.43E-04 / 1.14E-02	2000 / 2006
HD > 40	−0.58 ($\pm$ 0.125) / +0.55 ($\pm$ 0.130)	1.42E-05 / 2.27E-03	1982 / 2004
UTCI > 38 °C	−0.29 ($\pm$ 0.124) / +0.14 ($\pm$ 0.112)	5.37E-03 / 3.72E-01	2009 / –
PET _{1960–1990} > 40 °C	+1.08 ($\pm$ 0.421) / −0.58 ($\pm$ 0.276)	6.61E-02 / 5.18E-02	– / –
PET _{1991–2017} > 40 °C	−1.30 ($\pm$ 0.337) / +0.54 ($\pm$ 0.282)	2.64E-04 / 1.39E-01	2009 / –
	Τάση της διάρκειας της περιόδου (κλίση $\pm$ τυπικό σφάλμα)	p-value	Έτος
HI > 32 °C	+0.56 $\pm$ 0.130	1.77E-04	1999
HD > 40	+1.13 $\pm$ 0.196	9.41E-07	1987
UTCI > 38 °C	+0.43 $\pm$ 0.177	5.42E-02	–
PET _{1960–1990} > 40 °C	−1.66 $\pm$ 0.555	1.03E-02	1988
PET _{1991–2017} > 40 °C	+1.83 $\pm$ 0.471	1.43E-03	2013

Η μετατόπιση νωρίτερα της πρώτης εμφάνισης μέσα στο έτος καθώς και η μετατόπιση αργότερα της τελευταίας εμφάνισης μέσα στο έτος συνθηκών θερμής επιβάρυνσης οδηγεί σε μια προοδευτική επέκταση της «εποχής θερμής επιβάρυνσης» (heat stress season) με την πάροδο των ετών την περίοδο 1960–2017. Η Εικόνα Γ6 παρουσιάζει τη διάρκεια της «εποχής θερμής επιβάρυνσης» (heat stress season) για όλους τους δείκτες κατά τη διάρκεια της περιόδου μελέτης. Τα αποτελέσματα υποδεικνύουν στατιστικά σημαντική επιμήκυνση της εποχής υπό συνθήκες με «πολύ ζεστό – εξαιρετική προσοχή» ($HI > 32\text{ }^{\circ}\text{C}$) και με «μεγάλη δυσφορία – αποφυγή άσκησης» ($HD > 40$) κατά 5.6 ημέρες/δεκαετία και κατά 11.3 ημέρες/δεκαετία, η οποία άρχισε το 1999 και το 1987, αντίστοιχα (Πίνακας Γ6). Τα αντίστοιχα αποτελέσματα βάσει του UTCI αποκαλύπτουν μια επιμήκυνση της εποχής με «πολύ ισχυρή θερμή επιβάρυνση» ($UTCI > 38\text{ }^{\circ}\text{C}$) κατά 4.3 ημέρες/δεκαετία από τη δεκαετία του 1960, όμως η διαμορφούμενη αυξητική τάση δεν είναι ακόμη στατιστικά σημαντική. Η παρατηρούμενη επιμήκυνση της εποχής βάσει του UTCI οφείλεται κυρίως στη μετατόπιση νωρίτερα της πρώτης εμφάνισης με «πολύ ισχυρή θερμή επιβάρυνση» παρά στη μετατόπιση αργότερα της τελευταίας εμφάνισης, ενώ η επιμήκυνση της εποχής είναι ιδιαίτερα εμφανής μετά το 2000.



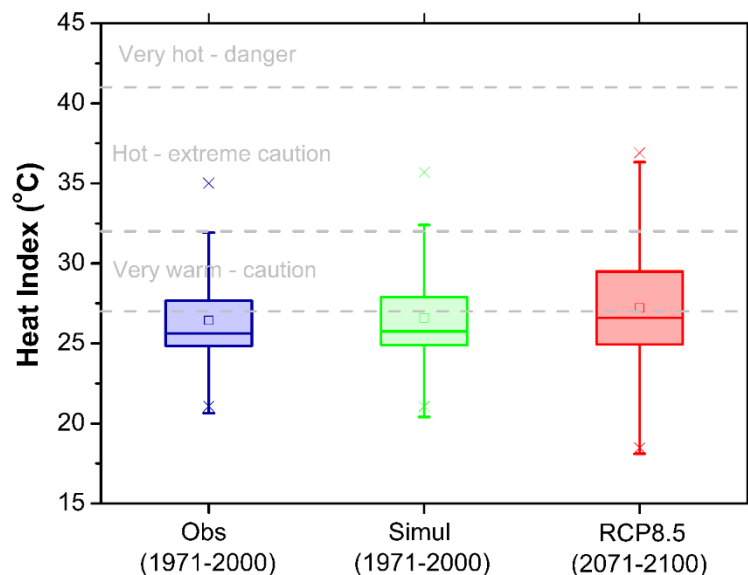
Εικόνα Γ6: 5-ετης κινούμενος μέσος της περιόδου υπέρβασης των ορίων θερμής επιβάρυνσης των δεικτών HI, HD, UTCI και PET για την περίοδο 1960–2017 στην Αθήνα. Η διάρκεια της «εποχής» αναφέρεται στον αριθμό ημερών μεταξύ της πρώτης και της τελευταίας εμφάνισης όπου παρατηρούνται οι εν λόγω υπερβάσεις σε ένα ημερολογιακό έτος. Οι διακεκομμένες γραμμές υποδεικνύουν τους αντίστοιχους μέσους όρους σε κάθε κατώφλι κατά την περίοδο 1960–2017.

Αντίθετα, τα αποτελέσματα βάσει του PET αποκαλύπτουν ένα πεπλατυσμένο μοτίβο σχήματος U για την εποχή με «ακραία θερμή επιβάρυνση», με πτωτική τάση μέχρι τις αρχές της δεκαετίας του 1990 και με αυξητική τάση την αμέσως επόμενη περίοδο (Εικόνα Γ6). Τα αποτελέσματα της μεθόδου Mann-Kendall υποδεικνύουν ότι και οι δυο τάσεις πριν και μετά το 1990 είναι στατιστικά σημαντικές (Πίνακας Γ6). Είναι εμφανές ότι το μοτίβο της εποχής με «ακραία θερμή επιβάρυνση» βάσει του PET διαφοροποιείται συγκριτικά με το μοτίβο των άλλων δεικτών. Εξετάζοντας τα πρωτογενή δεδομένα από τα οποία προέκυψαν τα συγκεκριμένα αποτελέσματα αποκαλύπτεται ότι ο δείκτης PET μπορεί να λάβει υψηλές τιμές ακόμη και κατά τις μεσημεριανές ώρες του Απριλίου όταν η ημέρα είναι ανέφελη και επικρατούν χαμηλές ταχύτητες ανέμου, συνθήκες οι οποίες ευνοούν τη διαμόρφωση υψηλών τιμών μέσης ακτινοβόλου θερμοκρασίας. Άλλες μελέτες έχουν επίσης αναφέρει ότι ο δείκτης PET παρουσιάζει μεγάλες διακυμάνσεις και λαμβάνει υψηλές τιμές, με αποτέλεσμα να εντοπίζει συχνότερα συνθήκες που οδηγούν σε θερμή επιβάρυνση (Blazejczyk et al., 2012, Provençal et al., 2016). Αναφέρεται επίσης ότι ο PET παρουσιάζει ισχυρή ευαισθησία στην παράμετρο της μέσης ακτινοβόλου θερμοκρασίας σε σύγκριση με άλλους δείκτες (Provençal et al., 2016). Η διακύμανση της χρονικής διάρκειας της εποχής με «ακραία θερμή επιβάρυνση» βάσει του PET προκύπτει από τις αντίστοιχες μετατοπίσεις μέσα στο έτος της πρώτης και της τελευταίας εμφάνισης με «ακραία θερμή επιβάρυνση» (Εικόνα Γ5δ). Ως εκ τούτου, η κύμανση της χρονικής διάρκειας της εποχής με «ακραία θερμή επιβάρυνση» για τον PET συνδέεται ενδεχομένως με τις αντίστοιχες παρατηρούμενες διακυμάνσεις της ηλιακής ακτινοβολίας στο σταθμό του Αστεροσκοπείου στην Αθήνα (NOA) τόσο στις αρχές του καλοκαιριού και της άνοιξης όσο και στα τέλη του καλοκαιριού και του φθινοπώρου (Kazadzis et al., 2018).

Γ3.4: Εκτίμηση των επιπέδων θερμής επιβάρυνσης στο μέλλον για την Αθήνα

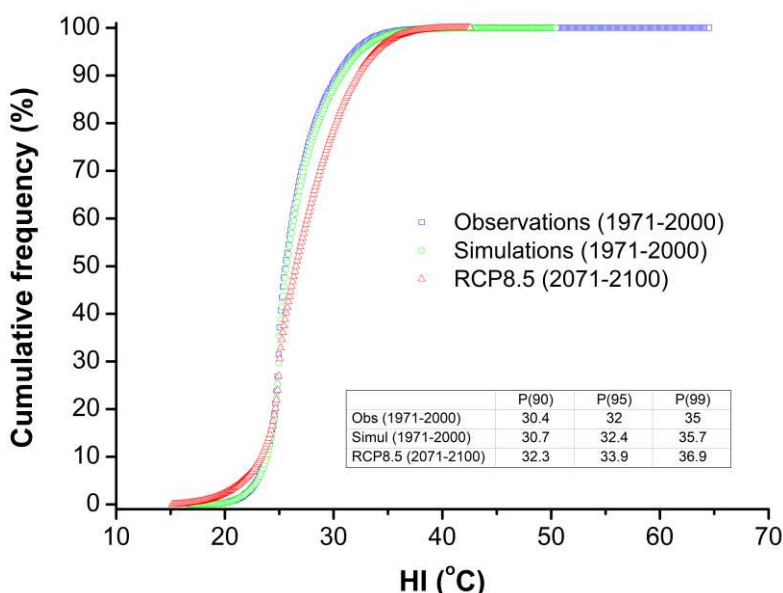
Είναι επίσης ιδιαίτερα σημαντικό να αναλυθούν τα επίπεδα της θερμικής επιβάρυνσης που πρόκειται να διαμορφωθούν στο μέλλον. Η εκτίμηση της επιβάρυνσης για τον πληθυσμό της Αθήνας στηρίχθηκε αποκλειστικά στους απλούς δείκτες HI και HD. Η συγκεκριμένη επιλογή ελήφθη ώστε να αποφευχθούν πιθανές στρεβλώσεις από την εφαρμογή των λογικών δεικτών (UTCI, PET) λόγω της μεγάλης αβεβαιότητας που υπεισέρχεται στην εκτίμηση των παραμέτρων της ταχύτητας του ανέμου και της ακτινοβολίας στο μέλλον, ιδιαίτερα όταν το χρονικό βήμα είναι μικρό (3-ωριαίο), μεταβλητών οι οποίες χρησιμοποιούνται ως δεδομένα εισόδου στα μοντέλα για τον υπολογισμό του UTCI και του PET.

Η Εικόνα Γ7 παρουσιάζει με τη μορφή θηκογράμματος τα επίπεδα τιμών του δείκτη HI την περίοδο αναφοράς (1971–2000) με βάση τα δεδομένα επίγειων παρατηρήσεων και προσομοιώσεων καθώς και προβολή του HI στο απώτερο μέλλον (2071–2100) βάσει προσομοιώσεων υπό το μελλοντικό σενάριο εκπομπών RCP8.5 στην Αθήνα. Μια οπτική επιθεώρηση της Εικόνας Γ7 αποκαλύπτει συμφωνία αποτελεσμάτων για την περίοδο αναφοράς (1971–2000) μεταξύ των επίγειων παρατηρήσεων και των προσομοιώσεων. Ενδεικτικά αναφέρουμε ότι η διαφορά της μέσης τιμής του HI μεταξύ προσομοιώσεων και παρατηρήσεων είναι της τάξης των 0.16 °C και η διαφορά της διαμέσου είναι της τάξης των 0.12 °C για την περίοδο αναφοράς (1971–2000). Η μέση και η διάμεσος τιμή του HI την περίοδο 2071–2100 είναι κατά 0.77 °C και 0.98 °C, αντίστοιχα, μεγαλύτερη σε σύγκριση με την περίοδο 1971–2000 βάσει των παρατηρήσεων. Η παρατηρούμενη αύξηση στη μέση τιμή του HI την περίοδο 2071–2100 οδηγεί σε υπέρβαση του κατώτερου κατωφλίου στη κλίμακα του δείκτη με αποτέλεσμα ο βαθμός κινδύνου από τη συνεχή έκθεση να διαμορφώνεται στην κατηγορία «πολύ θερμό – προσοχή» (Very warm – Caution). Παρότι η διαφορά στο 1ο τεταρτημόριο τιμών του HI την περίοδο 2071–2100 δεν είναι σημαντική σε σύγκριση με την περίοδο 1971–2000, η παρατηρούμενη διαφορά στο 3ο τεταρτημόριο είναι σημαντική και διαμορφώνεται στους 1.75 °C.



Εικόνα Γ7: Θηκόγραμμα του HI (Heat Index) για την περίοδο αναφοράς (1971–2000) με βάση τα δεδομένα επίγειων παρατηρήσεων και προσομοιώσεων καθώς και προβολή του HI στο απώτερο μέλλον (2071–2100) βάσει προσομοιώσεων υπό το μελλοντικό σενάριο εκπομπών RCP8.5 στην Αθήνα.

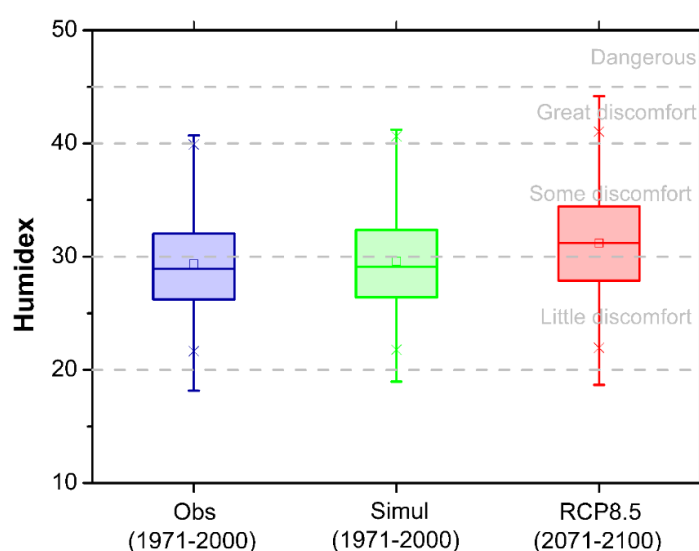
Τα προηγούμενα αποτελέσματα είναι περισσότερο εμφανή στην Εικόνα Γ8, η οποία απεικονίζει τις καμπύλες της αθροιστικής συνάρτησης κατανομής (CDFs) του δείκτη HI για το παρόν (1971–2000) και το μέλλον (2071–2100). Μια οπτική επιθεώρηση των αποτελεσμάτων αποκαλύπτει ότι η κατανομή του HI για τη μελλοντική περίοδο 2071–2100 έχει μετατοπιστεί προς υψηλότερες τιμές από τις αντίστοιχες κατανομές της περιόδου 1971–2000. Η μετατόπιση προς υψηλότερες τιμές είναι ιδιαίτερα εμφανής μετά το 40ο εκατοστημόριο (percentile) της κατανομής και μεγιστοποιείται στα ανώτερα επίπεδα των εκατοστημίων. Συγκεκριμένα, στο 90ο, 95ο και 99ο εκατοστημόριο (P90, P95, P99) παρατηρούνται υψηλότερες τιμές του δείκτη HI κατά τουλάχιστον 1.9 °C την περίοδο 2071–2100 σε σύγκριση με την περίοδο 1971–2000. Σύμφωνα με τα κατώφλια του δείκτη HI, το 90ο εκατοστημόριο της περιόδου 1971–2000 αντιστοιχεί στην κατηγορία «πολύ θερμό – προσοχή», ενώ στη μελλοντική περίοδο 2071–2100 αντιστοιχεί στην κατηγορία «πολύ ζεστό – εξαιρετική προσοχή», γεγονός που υποδεικνύει αύξηση του θερμικού κινδύνου στο μέλλον για τον πληθυσμό της Αθήνας κατά μια βαθμίδα στην κλίμακα του δείκτη στο συγκεκριμένο εκατοστημόριο. Θα πρέπει επίσης να επισημανθεί ότι στα πολύ χαμηλά εκατοστημόρια και συγκεκριμένα κάτω από το 10ο εκατοστημόριο παρατηρείται αντιστροφή των αποτελεσμάτων, με την κατανομή του HI για τη μελλοντική περίοδο 2071–2100 να μετατοπίζεται προς χαμηλότερες τιμές από τις αντίστοιχες κατανομές της περιόδου 1971–2000.



Εικόνα Γ8: Αθροιστική συχνότητα κατανομής (CDF) του HI (Heat Index) για την περίοδο αναφοράς (1971–2000) με βάση τα δεδομένα επίγειων παρατηρήσεων και προσομοιώσεων καθώς και προβολή του HI στο απώτερο μέλλον (2071–2100) βάσει προσομοιώσεων υπό το μελλοντικό σενάριο εκπομπών RCP8.5 στην Αθήνα.

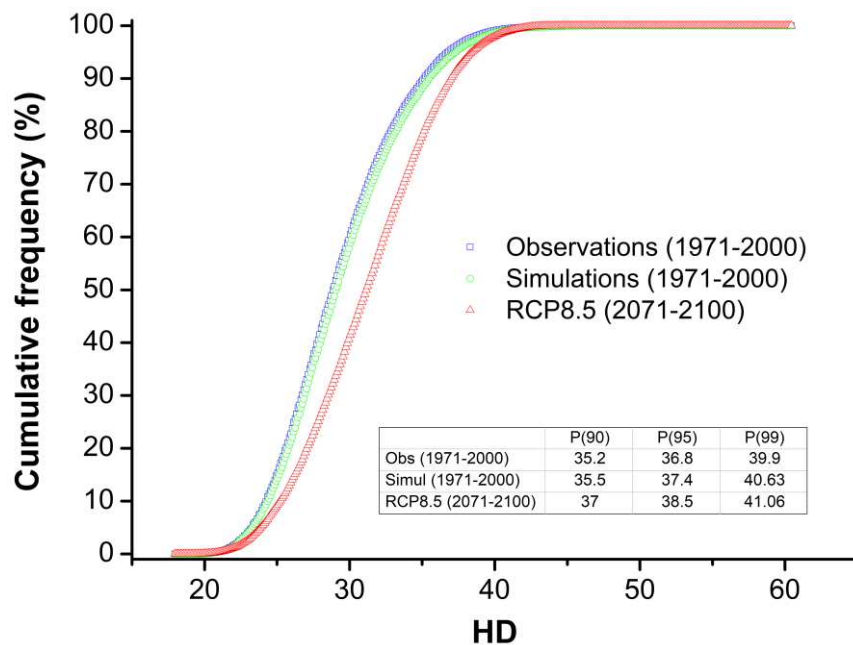
Η Εικόνα Γ8 αποκαλύπτει επίσης ότι η συχνότητα των περιπτώσεων με $HI > 27^{\circ}C$, η οποία υποδεικνύει τουλάχιστον «πολύ θερμό – προσοχή», διαμορφώνεται στο 44.9% την περίοδο 2071–2100, ενώ η αντίστοιχη συχνότητα την περίοδο 1971–2000 διαμορφώνεται στο 30.2%, υποδεικνύοντας μια διαφορά της τάξης του 14.7% και μια σχετική αύξηση των συγκεκριμένων συνθηκών κατά 48.7% στο μέλλον. Επιπλέον, η συχνότητα των περιπτώσεων με $HI > 32^{\circ}C$, η οποία υποδεικνύει τουλάχιστον «πολύ ζεστό – εξαιρετική προσοχή», προσδιορίζεται στο 4.8% την περίοδο 1971–2000 και αυξάνεται στο 10.7% την περίοδο 2071–2100, οδηγώντας σε μια σχετική αύξηση των συγκεκριμένων συνθηκών κατά 122.9% στο μέλλον (2071–2100).

Τα αποτελέσματα από την εφαρμογή του δείκτη HD (Εικόνες Γ9, Γ10) βρίσκονται σε συμφωνία με τα προηγούμενα αποτελέσματα του HI, παρόλα αυτά υπάρχουν ορισμένες μικρές διαφορές τόσο ποιοτικές, όσο και ποσοτικές. Η επίδοση του μοντέλου κρίνεται ικανοποιητική, με τη διαφορά της μέσης τιμής του HD μεταξύ των προσομοιώσεων και των επίγειων παρατηρήσεων να διαμορφώνεται στις 0.25 μονάδες στην κλίμακα του δείκτη και η διαφορά της διαμέσου να διαμορφώνεται στις 0.19 μονάδες για την περίοδο αναφοράς (1971–2000). Η μέση και η διάμεσος τιμή του HD την περίοδο 2071–2100 είναι κατά 1.85 μονάδες και 2.29 μονάδες, αντίστοιχα, μεγαλύτερη σε σύγκριση με την περίοδο 1971–2000 βάσει των παρατηρήσεων. Η παρατηρούμενη αύξηση τόσο στη μέση τιμή όσο και στη διάμεσο τιμή στο μέλλον οδηγεί σε αύξηση του βαθμού δυσφορίας από «μικρή» την περίοδο 1971–2000 σε «μερική» την περίοδο 2071–2100.



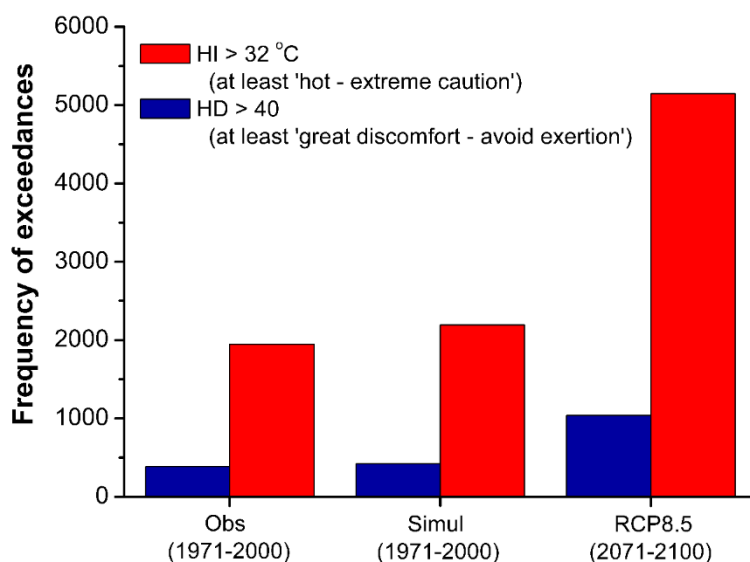
Εικόνα Γ9: Θηκόγραμμα του Humidex (HD) για την περίοδο αναφοράς (1971–2000) με βάση τα δεδομένα επίγειων παρατηρήσεων και προσομοιώσεων καθώς και προβολή του HD στο απώτερο μέλλον (2071–2100) βάσει προσομοιώσεων υπό το μελλοντικό σενάριο εκπομπών RCP8.5 στην Αθήνα.

Η κατανομή του HD για τη μελλοντική περίοδο 2071–2100 μετατοπίζεται προς υψηλότερες τιμές από τις αντίστοιχες κατανομές της περιόδου 1971–2000 σε όλο το φάσμα της κατανομής (Εικόνα Γ10), σε αντίθεση με ότι παρατηρήσαμε στο δείκτη HI όπου οι δυο κατανομές τέμνονται στα χαμηλά εκατοστημόρια (Εικόνα Γ8). Η συχνότητα των περιπτώσεων με $HD > 30$, η οποία υποδεικνύει τουλάχιστον «μερική δυσφορία», διαμορφώνεται στο 58.5% την περίοδο 2071–2100, ενώ η αντίστοιχη συχνότητα την περίοδο 1971–2000 είναι σαφώς μικρότερη και διαμορφώνεται στο 39.6%, αποκαλύπτοντας μια διαφορά της τάξης του 18.9% και μια σχετική αύξηση των συγκεκριμένων συνθηκών κατά 47.9% στο μέλλον. Επιπλέον, η συχνότητα των περιπτώσεων με $HD > 40$, η οποία υποδεικνύει τουλάχιστον «μεγάλη δυσφορία – αποφυγή άσκησης», προσδιορίζεται στο 0.9% την περίοδο 1971–2000 και αυξάνεται στο 2.0% την περίοδο 2071–2100, οδηγώντας σε μια σχετική αύξηση των συγκεκριμένων συνθηκών κατά 122.2% στο μέλλον (2071–2100). Το 99ο εκατοστημόριο του HD την περίοδο 1971–2000 αντιστοιχεί στην κατηγορία «μερική δυσφορία», ενώ στη μελλοντική περίοδο 2071–2100 αντιστοιχεί στην κατηγορία «μεγάλη δυσφορία – αποφυγή άσκησης», γεγονός που υποδεικνύει αύξηση του θερμικού κινδύνου στο μέλλον για τον πληθυσμό της Αθήνας κατά μια βαθμίδα στην κλίμακα του δείκτη στο συγκεκριμένο εκατοστημόριο.



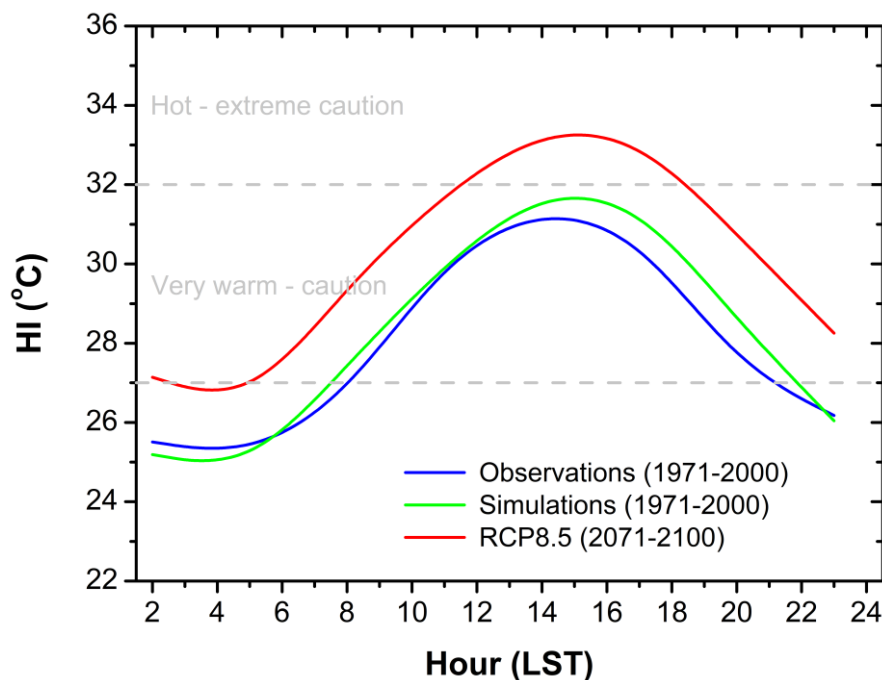
Εικόνα Γ10: Αθροιστική συχνότητα κατανομής (CDF) του HD (Humidex) για την περίοδο αναφοράς (1971–2000) με βάση τα δεδομένα επίγειων παρατηρήσεων και προσομοιώσεων καθώς και προβολή του HD στο απώτερο μέλλον (2071–2100) βάσει προσομοιώσεων υπό το μελλοντικό σενάριο εκπομπών RCP8.5 στην Αθήνα.

Η Εικόνα Γ11 απεικονίζει τον απόλυτο αριθμό υπερβάσεων βάσει των 3-ωρων τιμών της τριαντακονταετίας αναφοράς (1971–2000) και της μελλοντικής τριαντακονταετίας (2071–2100) όταν $HI > 32\text{ }^{\circ}\text{C}$ (τουλάχιστον «πολύ ζεστό – εξαιρετική προσοχή») και $HD > 40$ (τουλάχιστον «μεγάλη δυσφορία – αποφυγή άσκησης»). Οι υπερβάσεις την περίοδο 1971–2000 βάσει των επίγειων παρατηρήσεων διαμορφώνονται στις 382 περιπτώσεις όπου ο πληθυσμός της Αθήνας υπόκειται σε «μεγάλη δυσφορία – αποφυγή άσκησης» ($HD > 40$) και στις 1947 περιπτώσεις υπό συνθήκες με «πολύ ζεστό – εξαιρετική προσοχή» ($HI > 32\text{ }^{\circ}\text{C}$). Οι αντίστοιχες υπερβάσεις στο μέλλον (2071–2100) αναμένεται να αυξηθούν σημαντικά και να διαμορφωθούν στις 1037 περιπτώσεις για τον HD και στις 5144 για τον HI, οδηγώντας σε αύξηση κατά 171% και κατά 164%, αντίστοιχα. Εάν αναγάγουμε τις ανωτέρω υπερβάσεις ώστε να εκφράζουν το χρόνο έκθεσης σε μια τριαντακονταετία βάσει των 3-ωρων μετρήσεων από όπου εξήχθησαν καταλήγουμε ότι, ο χρόνος έκθεσης διαμορφώνεται στο 1.2% για $HD > 40$ και στο 5.9% για $HI > 32\text{ }^{\circ}\text{C}$ στο μέλλον (2071–2100). Εάν ληφθεί υπόψη ότι οι συγκεκριμένοι δείκτες έχουν σχεδιαστεί για θερμές συνθήκες περιβάλλοντος και υπολογίζονται για θερμοκρασίες αέρα υψηλότερες των $\sim 20\text{ }^{\circ}\text{C}$, τότε καθίσταται εμφανές ότι τα ανωτέρω ποσοστά έκθεσης αποτελούν σημαντικό ποσοστό της θέρμης περιόδου ανά έτος.



Εικόνα Γ11: Συχνότητα υπερβάσεων (απόλυτος αριθμός 3-ωρων) όταν $HI > 32\text{ }^{\circ}\text{C}$ (τουλάχιστον «πολύ ζεστό – εξαιρετική προσοχή») και $HD > 40$ (τουλάχιστον «μεγάλη δυσφορία – αποφυγή άσκησης») για την περίοδο αναφοράς (1971–2000) με βάση τα δεδομένα επίγειων παρατηρήσεων και προσομοιώσεων καθώς και για το απώτερο μέλλον (2071–2100) βάσει προσομοιώσεων υπό το μελλοντικό σενάριο εκπομπών RCP8.5 στην Αθήνα.

Τέλος, στην Εικόνα Γ12 παρουσιάζεται για το μήνα Ιούλιο η μέση ημερήσια διακύμανση των επιπέδων θερμικής επιβάρυνσης όπως αντανακλάται στο δείκτη HI για την τριαντακονταετία αναφοράς (1971–2000) και για τη μελλοντική τριαντακονταετία (2071–2100). Ο πληθυσμός της Αθήνας την περίοδο 2071–2100 το μήνα Ιούλιο θα υπόκειται σε συνθήκες «πολύ ζεστό – εξαιρετική προσοχή» μεταξύ 11:00 και 18:00 τοπική ώρα πρότυπο (local standard time, LST). Αντιθέτως, τέτοιες συνθήκες δεν παρατηρούνται κατά τη διάρκεια του εικοσιτετραώρου την περίοδο 1971–2000. Τις υπόλοιπες ώρες του εικοσιτετραώρου οι συνθήκες κατατάσσονται στην κατηγορία «πολύ θερμό – προσοχή» την περίοδο 2071–2100, με εξαίρεση το χρονικό διάστημα από 03:00 έως 06:00 όπου οριακά οι τιμές δεν εντάσσονται στη συγκεκριμένη κατηγορία. Επίσης, η μέγιστη τιμή του δείκτη τις μεσημβρινές ώρες είναι κατά 2.0 μονάδες της κλίμακας του δείκτη υψηλότερη την περίοδο 2071–2100 σε σύγκριση με την περίοδο 1971–2000, ενώ η διαφορά μεγιστοποιείται τις απογευματινές ώρες (20:00 LST) και διαμορφώνεται στις 3.3 μονάδες. Ακόμη και κατά τις πρώτες πρωινές ώρες όπου παρατηρούνται οι χαμηλότερες τιμές του δείκτη, η διαφορά είναι κατά 1.3 μονάδες υψηλότερη την περίοδο 2071–2100 συγκριτικά με την περίοδο 1971–2000.



Εικόνα Γ12: Μέση ημερήσια διακύμανση του δείκτη HI (Heat Index) το μήνα Ιούλιο για την περίοδο αναφοράς (1971–2000) με βάση τα δεδομένα επίγειων παρατηρήσεων και προσομοιώσεων καθώς και προβολή του HI στο απώτερο μέλλον (2071–2100) βάσει προσομοιώσεων υπό το μελλοντικό σενάριο εκπομπών RCP8.5 στην Αθήνα.

Γ3.5: Συζήτηση και συμπεράσματα για την Αθήνα

Η παρούσα ανάλυση αποκαλύπτει μια σημαντική αύξηση των συνθηκών θερμής επιβάρυνσης για τον πληθυσμό στο αστικό περιβάλλον της Αθήνας (Ελλάδα) τα τελευταία 58 χρόνια (1960–2017). Για την εκτίμηση των επιπέδων της θερμικής επιβάρυνσης, σε ωριαία βάση, χρησιμοποιήθηκαν δύο προηγμένοι θερμικοί (ή βιοκλιματικοί) δείκτες (UTCI, PET) και δύο απλοί δείκτες (HI, HD). Τα αποτελέσματα της μελέτης υποδεικνύουν μια αισθητή και σταθερή μετατόπιση της κατανομής της θερμικής επιβάρυνσης σε υψηλότερα επίπεδα τιμών τις τελευταίες δεκαετίες σε σύγκριση με τις προηγούμενες δεκαετίες για όλους τους θερμικούς δείκτες. Η παρατηρούμενη μετατόπιση είναι εμφανής σε όλο το φάσμα τιμών της κατανομής και δεν περιορίζεται μόνο στο άνω άκρο της. Το συγκεκριμένο εύρημα αποκαλύπτει ότι ο αστικός πληθυσμός της Αθήνας φαίνεται να υφίσταται ένα σημαντικό αλλά ταυτόχρονα αυξανόμενο ποσοστό θερμής επιβάρυνσης με την πάροδο των ετών από τη δεκαετία του 1960. Το θερμικό περιβάλλον στην Αθήνα έχει αλλάξει με την πάροδο των δεκαετιών λόγω της αστικοποίησης και του φαινομένου της αστικής θερμικής νησίδας (Founda, 2011, Santamouris, 2015) παράλληλα με την παγκόσμια και περιφερειακή αύξηση της θερμοκρασίας (IPCC, 2014, EEA, 2017). Σύμφωνα με την Εθνική Υπηρεσία Ωκεανών και Ατμόσφαιρας των ΗΠΑ (NOAA, 2018b), τα δέκα πιο θερμά έτη σε παγκόσμια κλίμακα παρατηρούνται μετά το 1998, ενώ για την περιοχή των Αθηνών παρατηρούνται μετά το 1999. Το συγκεκριμένο γεγονός φαίνεται να αντανακλάται στις παρατηρούμενες μετατοπίσεις της κατανομής της θερμικής επιβάρυνσης προς υψηλότερες τιμές ανά δεκαετία. Επίσης, τα αποτελέσματα της μελέτης βρίσκονται σε συμφωνία με την παρατηρούμενη αύξηση της θερμής επιβάρυνσης τόσο σε παγκόσμια κλίμακα (Knutson και Ploshay 2016) όσο και στην περιοχή της Αθήνας κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού τις μεσημβρινές ώρες (Bartzokas et al., 2013, Katavoutas et al., 2015).

Στα πλαίσια της αυξανόμενης επιβάρυνσης των τοπικών κοινωνιών λόγω της κλιματικής αλλαγής, ο χρόνος έκθεσης του πληθυσμού ανά έτος υπό συνθήκες «πολύ ζεστό – εξαιρετική προσοχή» (HI), «μεγάλη δυσφορία – αποφυγή άσκησης» (HD), «πολύ ισχυρή θερμή επιβάρυνση» (UTCI) και «ακραία θερμή επιβάρυνση» (PET) παρουσιάζει στατιστικά σημαντική αυξητική τάση με ρυθμό 0.9 %/δεκαετία, 0.4 %/δεκαετία, 0.3 %/δεκαετία και 0.4 %/δεκαετία την περίοδο 1960–2017, αντίστοιχα. Ακόμη και κατά τη διάρκεια των νυχτερινών ωρών, ο χρόνος έκθεσης υπό συνθήκες θερμής επιβάρυνσης υποδεικνύει στατιστικά σημαντική αυξητική τάση για τρεις από τους τέσσερις δείκτες, δηλαδή τον HI, HD και UTCI, την περίοδο 1960–2017. Το συγκεκριμένο εύρημα υποδηλώνει ότι ακόμα και κατά τη διάρκεια των νυχτερινών ωρών, όπου το ανθρώπινο σώμα προσπαθεί να ηρεμήσει

και να επανέλθει, ο πληθυσμός της Αθήνας εκτίθεται σε υψηλότερα ποσοστά θερμής επιβάρυνσης τις τελευταίες δεκαετίες σε σύγκριση με τις δεκαετίες του 1960 και του 1970. Επιπλέον, ο ρυθμός αύξησης του χρόνου έκθεσης σε συνθήκες θερμής επιβάρυνσης τις νυχτερινές ώρες είναι υψηλότερος σε σύγκριση με τον αντίστοιχο ρυθμό αύξησης που προκύπτει από όλες τις ώρες του 24ωρου για τους απλούς δείκτες. Παρά την παρατηρούμενη στατιστικά σημαντική αυξητική τάση στο χρόνο έκθεσης υπό συνθήκες θερμής επιβάρυνσης για όλη την περίοδο μελέτης (1960–2017), τα τελευταία έτη παρατηρείται μια κάμψη στα επίπεδα τιμών. Η μείωση αυτή είναι ιδιαίτερα εμφανής στους απλούς δείκτες (HI, HD) και σχετίζεται τόσο με την πτωτική τάση στη συχνότητα εμφάνισης υψηλών θερμοκρασιών κατά την τελευταία δεκαετία (για παράδειγμα εκτιμήθηκε ότι ο αριθμός των περιπτώσεων με θερμοκρασία αέρα υψηλότερη από 30 °C μειώθηκε σε ποσοστό 130 ωρών/δεκαετία μετά το 2007) όσο και με την πτωτική τάση στη συχνότητα εμφάνισης υψηλών τιμών σχετικής υγρασίας, παράμετροι οι οποίες αμφότερες επηρεάζουν τους δείκτες HI και HD.

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης αναδεικνύουν επίσης ότι παρότι ο χρόνος έκθεσης υπό συνθήκες θερμής επιβάρυνσης παρουσιάζει αυξητική τάση για όλους τους δείκτες, η τάση για τους απλούς δείκτες (HI, HD) καθίσταται στατιστικά σημαντική περίπου μια δεκαετία νωρίτερα σε σύγκριση με τους λογικούς δείκτες (UTCI, PET) (Πίνακας Γ5). Αυτό οφείλεται πιθανότατα στο γεγονός ότι οι δείκτες HI και HD προκύπτουν από τη συνδυασμένη επίδραση της θερμοκρασίας και της υγρασίας του αέρα και ως εκ τούτου οδηγούνται κυρίως από τις τάσεις της θερμοκρασίας του αέρα. Ενδεικτικά αναφέρουμε ότι η θερμοκρασία του αέρα το 2010 έχει αυξηθεί κατά 1.9 °C και η σχετική υγρασία έχει μειωθεί κατά 1.4% σε σύγκριση με τη δεκαετία του 1960. Όσον αφορά το δείκτη HI, η αύξηση της θερμοκρασίας του αέρα κατά 1.9 °C έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση του HI κατά περίπου 1.6 °C όταν η σχετική υγρασία διατηρείται σταθερή (~ 46%). Αντιθέτως, η μείωση της σχετικής υγρασίας κατά 1.4% έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση του HI κατά 0.08 °C όταν η θερμοκρασία του αέρα διατηρείται σταθερή (~ 27 °C). Συνεπώς, η θερμοκρασία του αέρα έχει μεγαλύτερη επίδραση στο δείκτη HI από ότι η σχετική υγρασία και επομένως, η τάση της θερμοκρασίας του αέρα επηρεάζει σε μεγαλύτερο βαθμό το δείκτη συγκριτικά με την τάση της υγρασίας. Αντιθέτως, οι λογικοί δείκτες UTCI και PET δε λαμβάνουν υπόψη μόνο την λανθάνουσα θερμότητα της θερμικής επιβάρυνσης, αλλά η ολοκληρωμένη θεώρηση τους εμπλέκει περισσότερες από δύο μετεωρολογικές παραμέτρους οι οποίες δρουν σε συνέργεια και μπορούν είτε να επιταχύνουν είτε να επιβραδύνουν την τάση των δεικτών.

Η μελέτη εξέτασε επίσης πιθανές τάσεις στο χρόνο εμφάνισης συνθηκών θερμής επιβάρυνσης και κατά συνέπεια πιθανή επιμήκυνση της περιόδου έκθεσης υπό αυτές τις συνθήκες. Η πρώτη εμφάνιση συνθηκών θερμής επιβάρυνσης φαίνεται να μετατοπίζεται νωρίτερα μέσα στο έτος με την πάροδο των ετών την περίοδο 1960–2017. Επίσης, η τελευταία εμφάνιση συνθηκών θερμής επιβάρυνσης φαίνεται να μετατοπίζεται αργότερα την ίδια περίοδο. Συνεπώς, παρατηρείται μια προοδευτική επιμήκυνση της εποχής υπό συνθήκες με «πολύ ζεστό – εξαιρετική προσοχή» (HI), «μεγάλη δυσφορία – αποφυγή άσκησης» (HD) και «πολύ ισχυρή θερμή επιβάρυνση» (UTCI) με ρυθμό 5.6 ημέρες/δεκαετία, 11.3 ημέρες/δεκαετία και 4.3 ημέρες/δεκαετία, αντίστοιχα. Τα αντίστοιχα αποτελέσματα βάσει του δείκτη PET υποδεικνύουν μια στατιστικά σημαντική επιμήκυνση της εποχής με «ακραία θερμή επιβάρυνση» κατά 18.3 ημέρες/δεκαετία, η οποία όμως παρατηρείται μόνο μετά το 1990, ακολουθώντας το γενικό μοτίβο των υπόλοιπων δεικτών. Οι παρατηρούμενες διαφορές στην επιμήκυνση της «εποχής θερμής επιβάρυνσης» (heat stress season) μεταξύ των δεικτών πιθανότατα σχετίζονται τόσο με τη διαφορετική θεώρηση του κάθε δείκτη όσο και με τις διαφορετικές ατμοσφαιρικές μεταβλητές που υπεισέρχονται στους υπολογισμούς του κάθε δείκτη. Συγκεκριμένα, οι διαφορές αυτές πιθανότατα αντανakλούν τη διαφορετική ευαισθησία του κάθε δείκτη στις εμπλεκόμενες ατμοσφαιρικές παραμέτρους, όπως για παράδειγμα στη διαφορετική απόκριση των δεικτών στις μεταβολές της θερμοκρασίας του αέρα, της υγρασίας, της ακτινοβολίας ή της ταχύτητας του ανέμου (Provençal et al., 2016).

Ο σαφής καθορισμός του χρόνου εμφάνισης συνθηκών θερμής επιβάρυνσης μέσα στα έτος για μια μακρά περίοδο (1960–2017) είναι μείζονος σημασίας μιας και παρέχει επαρκείς πληροφορίες για την έγκαιρη προετοιμασία των τοπικών αρχών αλλά και της πολιτείας για τον μετριασμό των επιπτώσεων του θερμικού κινδύνου στον πληθυσμό. Επιπλέον, η επιμήκυνση της περιόδου υπό συνθήκες θερμής επιβάρυνσης έχει ως αποτέλεσμα την πρόσθετη κατανάλωση ενέργειας ώστε να ικανοποιηθούν οι απαιτήσεις ψύξης στο δομημένο περιβάλλον. Η παρατηρούμενη επιμήκυνση της περιόδου θερμικού στρες με βάση τους δείκτες HI, HD και UTCI είναι σε συμφωνία με τη συνεχιζόμενη παγκόσμια και περιφερειακή αύξηση της θερμοκρασίας (IPCC, 2014, EAA, 2017) καθώς και με την επιμήκυνση της περιόδου δυσφορίας την περίοδο του καλοκαιριού τις μεσημβρινές ώρες στην Αθήνα (Bartzokas et al., 2013).

Τέλος, η μελέτη εξέτασε τις θερμικές συνθήκες και τα επίπεδα δυσφορίας του πληθυσμού στο μελλοντικό κλίμα και συγκεκριμένα την περίοδο 2071–2100 υπό το μελλοντικό σενάριο εκπομπών RCP8.5 στην Αθήνα. Τα αποτελέσματα αποκαλύπτουν μια

μετατόπιση της κατανομής των δεικτών την περίοδο 2071–2100 προς υψηλότερες τιμές σε σύγκριση με την αντίστοιχη κατανομή της περιόδου αναφοράς (1971–2000). Η μετατόπιση προς υψηλότερες τιμές στο μέλλον είναι ιδιαίτερα εμφανής μετά το 40ο εκατοστημόριο της κατανομής με βάση το δείκτη HI, ενώ παρατηρείται σε όλο το φάσμα της κατανομής με βάση το δείκτη HD. Την περίοδο 2071–2100 αναμένεται αύξηση των συνθήκων με τουλάχιστον «μεγάλη δυσφορία – αποφυγή άσκησης» και «πολύ ζεστό – εξαιρετική προσοχή» κατά 171% και κατά 164%, αντίστοιχα, σε σύγκριση με την περίοδο 1971–2000. Η διαφορά του δείκτη HI στα ανώτερα εκατοστημόρια της κατανομής είναι κατά ~ 1.9 °C υψηλότερη την περίοδο 2071–2100 από ότι την περίοδο 1971–2000. Αντίστοιχα, για το δείκτη HD, η διαφορά είναι από 1.2 έως 1.8 μονάδες υψηλότερη την περίοδο 2071–2100 συγκριτικά με την περίοδο 1971–2000.

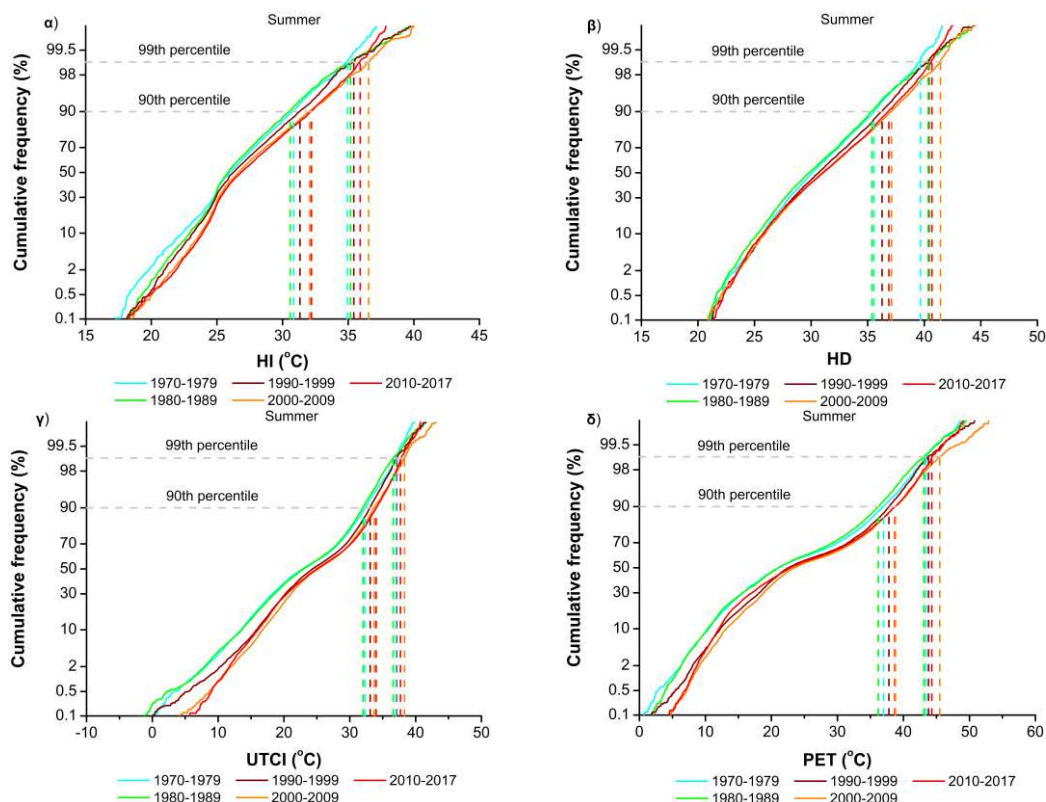
Γ4: Αποτελέσματα στην περιοχή της Θεσσαλονίκης

Γ4.1: Ενδο-δεκαετή και πολύ-δεκαετή κατανομή της θερμής επιβάρυνσης στη Θεσσαλονίκη

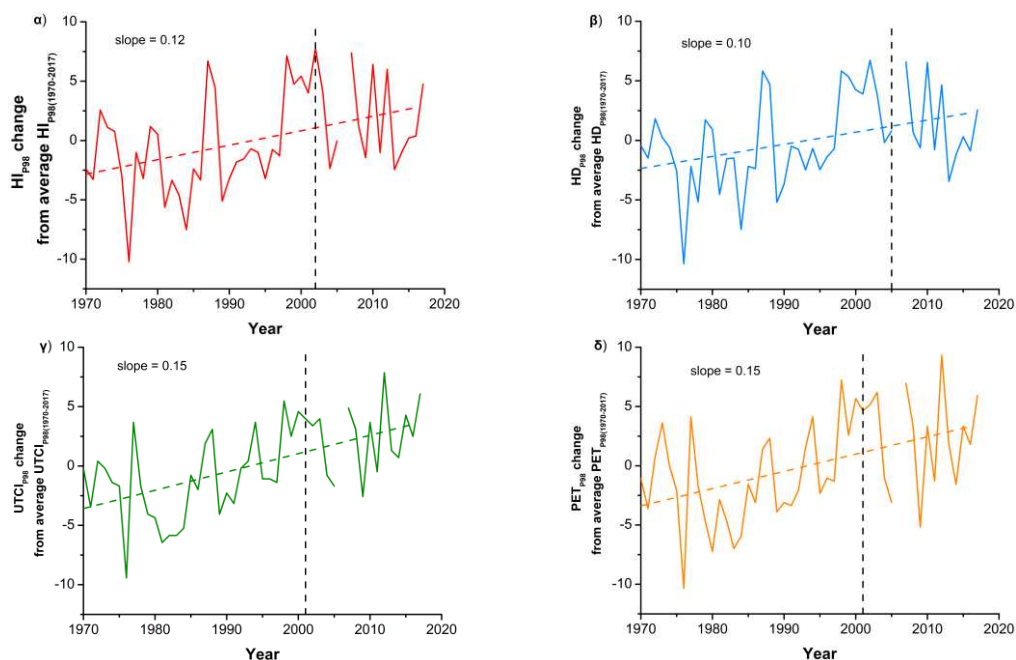
Η Εικόνα Γ13 παρουσιάζει τις καμπύλες της αθροιστικής συνάρτησης κατανομής (CDFs) των υπό εξέταση δεικτών για την καλοκαιρινή περίοδο (Ιούνιος, Ιούλιος και Αύγουστος) ανά δεκαετία για την περίοδο 1970–2017. Τα αποτελέσματα αποκαλύπτουν προοδευτικές μετατοπίσεις των κατανομών προς υψηλότερες τιμές από τη δεκαετία του 1970, οι οποίες παρατηρούνται σχεδόν σε όλο το φάσμα της κατανομής και μεγιστοποιούνται τις δύο τελευταίες δεκαετίες. Οι προοδευτικές μετατοπίσεις προς υψηλότερες τιμές ανά δεκαετία βρίσκονται σε συμφωνία με τις αντίστοιχες μετατοπίσεις που παρατηρήθηκαν στην Αθήνα (Εικόνα Γ1), παρότι παρατηρούνται ποσοτικές διαφορές. Επίσης, στους προηγμένους δείκτες (UTCI, PET), η μετατόπιση των καμπυλών κατανομής προς υψηλότερες τιμές είναι ιδιαίτερα εμφανής και στα κατώτερα επίπεδα των εκατοστημορίων (percentiles).

Η Εικόνα Γ14 παρουσιάζει τη διακύμανση ανά έτος του 98ου εκατοστημορίου των δεικτών, εκφρασμένη ως η διαφορά από τη μέση τιμή του αντίστοιχου εκατοστημορίου για όλη την περίοδο (1970–2017). Τα αποτελέσματα αποκαλύπτουν μια στατιστικά σημαντική αυξητική τάση των μεταβολών για όλους του δείκτες. Μέχρι τα τέλη της δεκαετίας του 1990 παρατηρούνται κυρίως αρνητικές μεταβολές για τους δείκτες, γεγονός που υποδηλώνει ότι ο θερμικός κίνδυνος για τον πληθυσμό είναι μικρότερος από τη συνεχιζόμενη έκθεση του σε ένα δυσμενές θερμικά περιβάλλον συγκριτικά με τις μέσες συνθήκες ολόκληρης της περιόδου. Ωστόσο, οι αρνητικές μεταβολές τις πρώτες τρεις δεκαετίες βαίνουν συνεχώς

μειούμενες και από τα τέλη της δεκαετίας του 1990 και ύστερα, η μεταβολή αποκτά κυρίως θετικό πρόσημο φτάνοντας έως και το +9% σε συγκεκριμένα έτη.

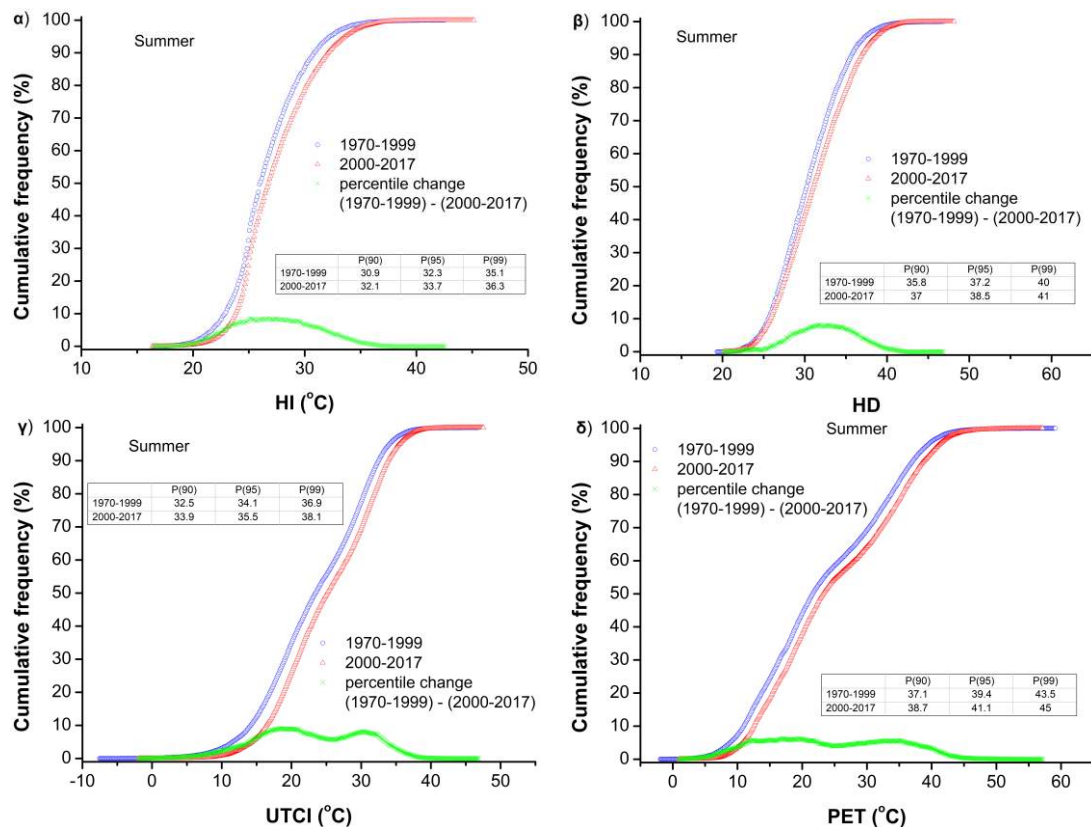


Εικόνα Γ13: Αθροιστική συχνότητα κατανομής (CDF) των δεικτών α) HI, β) HD, γ) UTCI και δ) PET ανά δεκαετία το καλοκαίρι για την περίοδο 1970–2017 στη Θεσσαλονίκη.



Εικόνα Γ14: Ποσοστιαία μεταβολή του 98ου εκατοστημορίου από τη μέση τιμή της περιόδου μελέτης (1970–2017) στη Θεσσαλονίκη για τους δείκτες α) HI, β) HD, γ) UTCI και δ) PET. Η γραμμή τάσης και η κλίση απεικονίζονται επίσης.

Η Εικόνα Γ15 απεικονίζει τις καμπύλες της αθροιστικής συνάρτησης κατανομής (CDFs) των δεικτών το καλοκαίρι για δυο υποπεριόδους (1970–1999 και 2000–2017) μαζί με τη διαφορά τους. Τα αποτελέσματα αποκαλύπτουν σημαντικές διαφορές μεταξύ των κατανομών των υπό εξέταση υποπεριοδών σε ένα ευρύ φάσμα τιμών των εκατοστημορίων. Στο εύρος τιμών μεταξύ 21 °C και 34 °C, ο δείκτης HI διαφέρει κατά τουλάχιστον 2 εκατοστημιαίες μονάδες μεταξύ των δύο υποπεριοδών και η διαφορά φτάνει έως και τις 8.6 ποσοστιαίες μονάδες (Εικόνα Γ15α). Στα ανώτερα εκατοστημόρια (P90, P95, P99), οι τιμές του δείκτη HI είναι υψηλότερες κατά τουλάχιστον 1.2 °C την περίοδο 2000–2017 σε σύγκριση με την περίοδο 1970–1999. Η διαφορά της τιμής του δείκτη HI στο 90ο εκατοστημόριο (P90) μεταξύ των δυο υποπεριοδών αποκαλύπτει αύξηση του θερμικού κινδύνου κατά μια βαθμίδα στην κλίμακα του δείκτη, από «πολύ θερμό – προσοχή» την περίοδο 1970–1999 σε «πολύ ζεστό – εξαιρετική προσοχή» την περίοδο 2000–2017.



Εικόνα Γ15: Αθροιστική συχνότητα κατανομής (CDF) των δεικτών α) HI, β) HD, γ) UTCI και δ) PET κατά τις δύο υποπεριόδους 1970–1999 και 2000–2017 το καλοκαίρι στη Θεσσαλονίκη. Η εκατοστημιαία μεταβολή (percentile change) μεταξύ των υπό εξέταση υποπεριοδών απεικονίζεται επίσης.

Η Εικόνα Γ15α αποκαλύπτει επίσης ότι η συχνότητα των περιπτώσεων με $HI > 27\text{ }^{\circ}\text{C}$, η οποία υποδεικνύει τουλάχιστον «πολύ θερμό – προσοχή», διαμορφώνεται στο 38.4% την

περίοδο 1970–1999, ενώ η αντίστοιχη συχνότητα την περίοδο 2000–2017 διαμορφώνεται στο 46.7%, υποδεικνύοντας μια διαφορά της τάξης του 8.3% και μια σχετική αύξηση των συγκεκριμένων συνθηκών κατά 21.6% τις δυο τελευταίες δεκαετίες. Επιπλέον, η συχνότητα των περιπτώσεων με $HI > 32\text{ }^{\circ}\text{C}$, η οποία υποδεικνύει τουλάχιστον «πολύ ζεστό – εξαιρετική προσοχή», προσδιορίζεται στο 5.6% την περίοδο 1970–1999 και αυξάνεται στο 10.1% την περίοδο 2000–2017, οδηγώντας σε μια σχετική αύξηση των συγκεκριμένων συνθηκών κατά 79.8% την περίοδο 2000–2017.

Αντίστοιχα αποτελέσματα παρατηρούνται επίσης για το δείκτη HD, με μια σημαντική μετατόπιση της κατανομής την περίοδο 2000–2017 προς υψηλότερες τιμές του δείκτη σε σύγκριση με την περίοδο 1970–1999 (Εικόνα Γ15β). Οι τιμές του HD μεταξύ των δυο υποπεριόδων διαφέρουν κατά τουλάχιστον 2 ποσοστιαίες μονάδες στην περιοχή τιμών του δείκτη από 26 έως 39, με τη διαφορά να φτάνει έως και τις 8.2 ποσοστιαίες μονάδες στο σημείο κλίμακας 31.8. Η συχνότητα των περιπτώσεων με «μερική δυσφορία» ($HD > 30$) διαμορφώνεται στο 58.2% την περίοδο 2000–2017, σημειώνοντας αύξηση κατά 12.8% σε σύγκριση με την αντίστοιχη συχνότητα (51.6%) της περιόδου 1970–1999.

Τα αποτελέσματα με βάση τους προηγμένους δείκτες (UTCI, PET) αποκαλύπτουν σημαντική μετατόπιση της κατανομής των δεικτών την περίοδο 2000–2017 προς υψηλότερες τιμές, σε όλο το φάσμα των εκατοστημορίων, σε σύγκριση με την κατανομή της περιόδου 1970–1999 (Εικόνες Γ15γ, δ). Συγκεκριμένα, στο εύρος τιμών του UTCI μεταξύ $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ και $36\text{ }^{\circ}\text{C}$ παρατηρούνται διαφορές τουλάχιστον 2 ποσοστιαίων μονάδων, ενώ η διαφορά στις δύο παρατηρούμενες κορυφές είναι της τάξεως των 9 και 8 ποσοστιαίων μονάδων, περίπου στους $18.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ και $30.5\text{ }^{\circ}\text{C}$, αντίστοιχα (Εικόνα Γ15γ). Στα ανώτερα εκατοστημόρια (P90, P95, P99), οι τιμές του δείκτη UTCI είναι σταθερά υψηλότερες κατά τουλάχιστον $1.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ τις τελευταίες δύο δεκαετίες σε σύγκριση με την προηγούμενη περίοδο. Ενδεικτικά, αναφέρουμε την περίπτωση του 99ου εκατοστημορίου (P99), στο οποίο παρατηρείται αύξηση του βαθμού καταπόνησης κατά μια βαθμίδα στην κλίμακα του δείκτη, από «ισχυρή θερμή επιβάρυνση» την περίοδο 1970–1999 σε «πολύ ισχυρή θερμή επιβάρυνση» την περίοδο 2000–2017. Επιπλέον, η συχνότητα των περιπτώσεων με «ισχυρή θερμή επιβάρυνση» ($UTCI > 32\text{ }^{\circ}\text{C}$) διαμορφώνεται στο 19.2% την περίοδο 2000–2017, έχοντας σημειώσει αύξηση κατά 61.3% σε σύγκριση με την αντίστοιχη συχνότητα (11.9%) της περιόδου 1970–1999. Ομοίως, οι τιμές PET μεταξύ $7.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ και $41.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ διαφέρουν κατά τουλάχιστον 2 ποσοστιαίες μονάδες μεταξύ των εξεταζόμενων υποπεριόδων, με τη μέγιστη διαφορά να φτάνει έως και τις 6 ποσοστιαίες μονάδες (Εικόνα Γ15δ). Σημαντικές διαφορές

μεταξύ των δύο υποπεριοδών παρατηρούνται στα ανώτερα εκατοστημόρια (P90, P95, P99) του δείκτη PET, με τις διαφορές να είναι μεγαλύτερες του 1.5 °C.

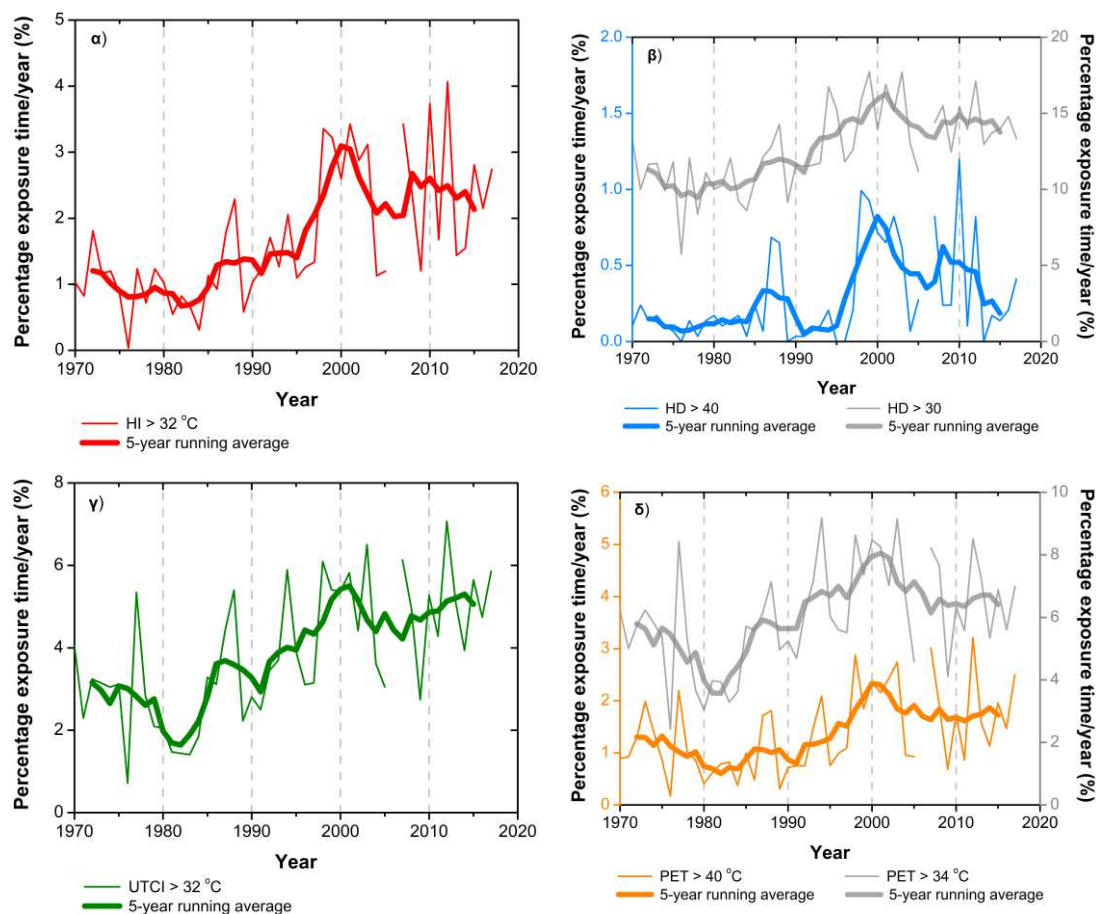
Γ4.2: Διαχρονικές διακυμάνσεις και τάσεις του χρόνου έκθεσης υπό θερμή επιβάρυνση στη Θεσσαλονίκη

Η Εικόνα Γ16 παρουσιάζει το χρόνο έκθεσης (σε %) ανά έτος υπό συνθήκες θερμής επιβάρυνσης, όπως αυτές αντικατοπτρίζονται από τις υπερβάσεις συγκεκριμένων κατωφλίων των ανώτερων κατηγοριών των δεικτών. Τα αποτελέσματα βασίζονται σε πιθανές 3-ωριαίες υπερβάσεις καθ' όλη τη διάρκεια του έτους. Μέχρι τα τέλη της δεκαετίας του 1990, ο χρόνος έκθεσης υπό συνθήκες τουλάχιστον «πολύ ζεστό – εξαιρετική προσοχή» ($HI > 32\text{ }^{\circ}\text{C}$) είναι ως επί το πλείστον μικρότερος από 2.0% ετησίως (Εικόνα Γ16α). Στη συνέχεια παρατηρείται μια σημαντική ανοδική τάση του χρόνου έκθεσης υπό αυτές τις συνθήκες. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι ο χρόνος έκθεσης υπό συνθήκες «πολύ ζεστό – εξαιρετική προσοχή» ($HI > 32\text{ }^{\circ}\text{C}$) διαμορφώνεται στο 1.0% το 1970, αυξανόμενος στο 3.4% το 2001 (σχετική αύξηση κατά 240%) και στο 2.7% το 2017 (σχετική αύξηση κατά 170%). Ο χρόνος έκθεσης υπό συνθήκες τουλάχιστον «πολύ ζεστό – εξαιρετική προσοχή» ($HI > 32\text{ }^{\circ}\text{C}$) παρουσιάζει στατιστικά σημαντική αυξητική τάση, με το ρυθμό αύξησης να διαμορφώνεται στο 0.4%/δεκαετία την περίοδο 1970–2017 (Πίνακας Γ7).

Παρόμοια αποτελέσματα παρατηρούνται από την εφαρμογή του δείκτη HD (Εικόνα Γ16β). Μέχρι τις αρχές της δεκαετίας του 1990, ο χρόνος έκθεσης υπό συνθήκες τουλάχιστον «μερικής δυσφορίας» ($HD > 30$) και «μεγάλης δυσφορίας – αποφυγή άσκησης» ($HD > 40$) διαμορφώνεται κυρίως σε επίπεδα χαμηλότερα των 12.0% και 0.2% ετησίως, αντίστοιχα. Τις επόμενες δυο δεκαετίες παρατηρείται μια σταδιακή αύξηση του χρόνου έκθεσης υπό τις συγκεκριμένες συνθήκες. Ο ρυθμός αύξησης για όλη την περίοδο μελέτης (1970–2017) διαμορφώνεται στο 1.1%/δεκαετία για $HD > 30$ (στατιστικά σημαντική) και στο 0.08%/δεκαετία για $HD > 40$ (μη στατιστικά σημαντική) (Πίνακας Γ7).

Τα αποτελέσματα βάσει του δείκτη UTCI αποκαλύπτουν ότι ο χρόνος έκθεσης ανά έτος υπό τουλάχιστον «ισχυρή θερμή επιβάρυνση» ($UTCI > 32\text{ }^{\circ}\text{C}$) δεν υπερβαίνει το 4% μέχρι τις αρχές της δεκαετίας του 1990 (Εικόνα Γ16γ), ενώ μια σταδιακή αύξηση παρατηρείται τα επόμενα έτη. Συγκεκριμένα, ο χρόνος έκθεσης υπό συνθήκες τουλάχιστον «ισχυρής θερμής επιβάρυνσης» διαμορφώνεται στο 4.0% το 1970, αυξανόμενος στο 5.8% το 2001 (σχετική αύξηση κατά 45%) και στο 5.9% το 2017 (σχετική αύξηση κατά 48%). Η ανάλυση τάσεων Mann-Kendall αποκαλύπτει μια στατιστικά σημαντική αυξητική τάση στο χρόνο έκθεσης υπό αυτές τις συνθήκες με ρυθμό 0.7%/δεκαετία την περίοδο 1970–2017 (Πίνακας Γ7).

Ομοίως, ο χρόνος έκθεσης βάσει του PET αποκαλύπτει στατιστικά σημαντική αύξηση τόσο υπό συνθήκες τουλάχιστον «ισχυρής θερμής επιβάρυνσης» ($PET > 34\text{ }^{\circ}\text{C}$) όσο και υπό συνθήκες «ακραίας θερμής επιβάρυνσης» ($PET > 40\text{ }^{\circ}\text{C}$), της τάξης του 0.5%/δεκαετία και 0.2%/δεκαετία (Πίνακας Γ7), αντίστοιχα, παρότι ο χρόνος έκθεσης παρουσιάζει μεγάλες διακυμάνσεις ανά έτος (Εικόνα Γ16δ).



Εικόνα Γ16: Χρόνος έκθεσης (%) του πληθυσμού υπό συνθήκες α) $HI > 32\text{ }^{\circ}\text{C}$, β) $HD > 40$ και $HD > 30$, γ) $UTCI > 32\text{ }^{\circ}\text{C}$ και δ) $PET > 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ και $PET > 34\text{ }^{\circ}\text{C}$ για όλα τα 3-ωρα του 24ώρου για την περίοδο 1970–2017 στη Θεσσαλονίκη. Οι έντονες καμπύλες υποδεικνύουν τον 5-ετή κινούμενο μέσο.

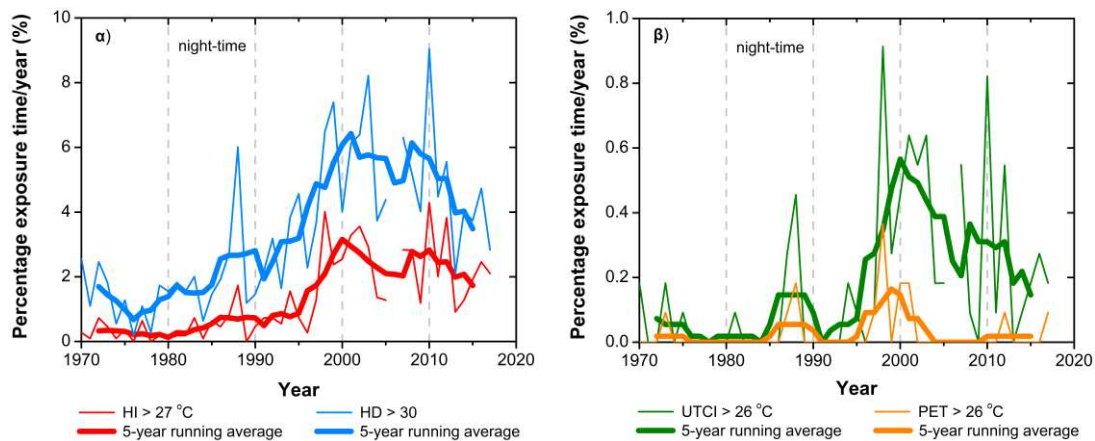
Η Εικόνα Γ17 παρουσιάζει το χρόνο έκθεσης υπό συνθήκες θερμής επιβάρυνσης κατά τη διάρκεια της νύχτας, μιας και οι επιπτώσεις των υψηλών θερμοκρασιών κατά τη διάρκεια του συγκεκριμένου διαστήματος της ημέρας έχουν αποδειχθεί ιδιαίτερα επιβαρυντικές για τον ανθρώπινο οργανισμό (Tan et al., 2010, Gabriel and Endlicher, 2011). Το συνολικό μοτίβο του χρόνου έκθεσης κατά τη διάρκεια της νύχτας είναι παρόμοιο με εκείνο που περιλαμβάνει όλα τα τρίωρα του 24ωρου για όλους τους δείκτες με εξαίρεση

τον PET. Έως τις αρχές της δεκαετίας του 1990, ο χρόνος έκθεσης τόσο για τους απλούς δείκτες όσο και για τον UTCI υπό τις εξεταζόμενες συνθήκες θερμής επιβάρυνσης διαμορφώνεται σε χαμηλότερα επίπεδα σε σύγκριση με το χρόνο έκθεσης των επόμενων δεκαετιών (Εικόνα Γ17). Συγκεκριμένα, ο χρόνος έκθεσης υπό συνθήκες τουλάχιστον «πολύ θερμό – προσοχή» ($HI > 27\text{ }^{\circ}\text{C}$), «μερική δυσφορία» ($HD > 30$) και «μέτρια θερμή επιβάρυνση» ($UTCI > 26\text{ }^{\circ}\text{C}$) έχει αυξηθεί κατά 0.6%/δεκαετία, 1.0%/δεκαετία και 0.07%/δεκαετία, αντίστοιχα, κατά τη διάρκεια της νύχτας την περίοδο 1970-2017 (Πίνακας Γ7). Η ανάλυση τάσεων Mann-Kendall αποκαλύπτει ότι η παρατηρούμενη αύξηση στο χρόνο έκθεσης υπό τις εξεταζόμενες συνθήκες θερμής επιβάρυνσης κατά τη διάρκεια της νύχτας είναι στατιστικά σημαντική μόνο για τους απλούς δείκτες HI και HD.

Πίνακας Γ7: Τάση του χρόνου έκθεσης (%) ανά έτος υπό συνθήκες θερμής επιβάρυνσης όπως αντικατοπτρίζονται από τις υπερβάσεις συγκεκριμένων κατωφλίων, τόσο για όλες τις ώρες της ημέρας όσο και για τη νύχτα κατά την περίοδο 1970–2017. Οι τιμές p-value της μεθόδου Mann-Kendall (η έντονη γραφή υποδηλώνει στατιστικά σημαντική τάση στο επίπεδο εμπιστοσύνης 95%) και το έτος όπου η τάση των χρονοσειρών γίνεται στατιστικά σημαντική παρουσιάζονται επίσης.

Όλες οι ώρες της ημέρας	Τάση του χρόνου έκθεσης ανά έτος (κλίση $\pm$ τυπικό σφάλμα)	p-value	Έτος
$HI > 32\text{ }^{\circ}\text{C}$	$+0.044 \pm 0.008$	6.33E-06	1998
$HD > 40$	$+0.008 \pm 0.003$	9.47E-02	-
$HD > 30$	$+0.114 \pm 0.022$	1.04E-05	1997
$UTCI > 32\text{ }^{\circ}\text{C}$	$+0.067 \pm 0.013$	6.84E-05	2000
$PET > 40\text{ }^{\circ}\text{C}$	$+0.024 \pm 0.007$	5.26E-03	2006
$PET > 34\text{ }^{\circ}\text{C}$	$+0.048 \pm 0.016$	9.45E-03	2000
Νυχτερινές ώρες			
$HI > 27\text{ }^{\circ}\text{C}$	$+0.061 \pm 0.009$	2.31E-07	1998
$HD > 30$	$+0.101 \pm 0.018$	1.02E-06	1995
$UTCI > 26\text{ }^{\circ}\text{C}$	$+0.007 \pm 0.002$	3.94E-01	-
$PET > 26\text{ }^{\circ}\text{C}$	$+0.0006 \pm 0.0008$	-	-

Τα χαμηλά επίπεδα τιμών που προκύπτουν βάσει του PET (Εικόνα Γ17β) πιθανόν να σχετίζονται με τη χαμηλή ευαισθησία του δείκτη στην υγρασία του αέρα και στην αδυναμία του να ποσοτικοποιήσει την επίδραση της υγρασίας (που εμφανίζει υψηλότερες τιμές κατά τη διάρκεια της νύχτας) (Chen and Matzarakis, 2018, Provençal et al., 2016). Το συγκεκριμένο εύρημα παρατηρήθηκε και στα αποτελέσματα της Αθήνας.



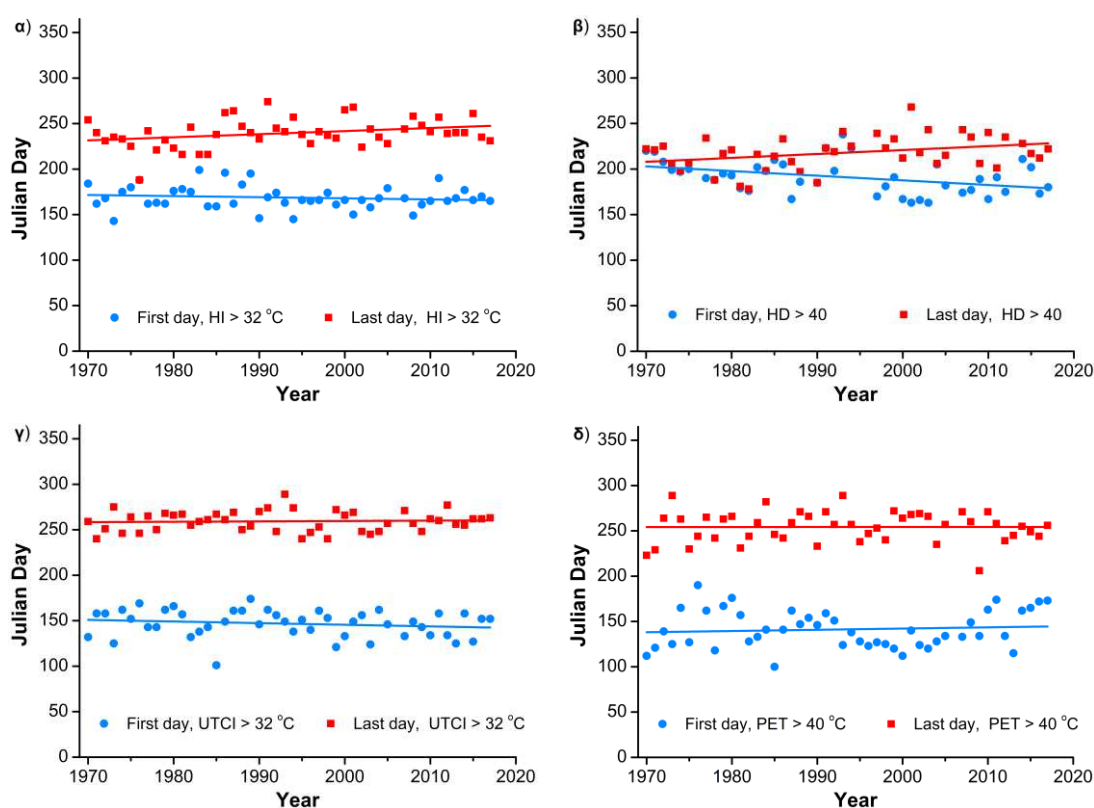
Εικόνα Γ17: Χρόνος έκθεσης (%) του πληθυσμού υπό συνθήκες α) $HI > 27^{\circ}\text{C}$ και $HD > 30$ και β) $UTCI > 26^{\circ}\text{C}$ και $PET > 26^{\circ}\text{C}$ για όλα τα 3-ωρα των νυχτερινών ωρών για την περίοδο 1970–2017 στη Θεσσαλονίκη. Οι έντονες καμπύλες υποδεικνύουν τον 5-ετή κινούμενο μέσο.

Γ4.3: Διακυμάνσεις και τάσεις της περιόδου εμφάνισης συνθηκών θερμής επιβάρυνσης στη Θεσσαλονίκη

Στην Εικόνα Γ18 παρουσιάζεται η πρώτη ημέρα και η τελευταία ημέρα εντός του ημερολογιακού έτους όπου παρατηρούνται υπερβάσεις συγκεκριμένων κατωφλίων των ανώτερων κατηγοριών των υπό εξέταση δεικτών κατά την περίοδο 1970–2017. Μια οπτική επιθεώρηση των αποτελεσμάτων βάσει των δεικτών HI και HD αποκαλύπτει ότι οι χρονοσειρές της πρώτης και της τελευταίας ημέρας υπό συνθήκες τουλάχιστον «πολύ ζεστό – εξαιρετική προσοχή» ($HI > 32^{\circ}\text{C}$) και με «μεγάλη δυσφορία – αποφυγή άσκησης» ($HD > 40$) αποκλίνουν με την πάροδο των ετών, ως αποτέλεσμα των αντίστοιχων αρνητικών και θετικών γραμμικών τάσεων (Εικόνα Γ18α, β). Το αποτέλεσμα αυτό συνεπάγεται αφενός ότι η ημερομηνία της πρώτης εμφάνισης συνθηκών «πολύ ζεστό – εξαιρετική προσοχή» μετατοπίζεται νωρίτερα μέσα στο έτος κατά 1.2 ημέρες/δεκαετία και αφετέρου ότι η ημερομηνία της τελευταίας εμφάνισης συνθηκών «πολύ ζεστό – εξαιρετική προσοχή» μετατοπίζεται αργότερα κατά 3.3 ημέρες/δεκαετία (Πίνακας Γ8). Παρόλα αυτά η μέθοδος Mann-Kendall αποκαλύπτει ότι οι παρατηρούμενες μετατοπίσεις στο δείκτη HI τόσο ως προς την πρώτη ημέρα όσο και ως προς την τελευταία ημέρα εμφάνισης δεν είναι στατιστικά σημαντικές (Πίνακας Γ8). Οι αντίστοιχες μετατοπίσεις για το δείκτη HD είναι πιο έντονες και οι κλίσεις των γραμμών τάσης είναι πιο απότομες από εκείνες του HI. Συνεπώς, η πρώτη εμφάνιση της «μεγάλης δυσφορίας – αποφυγή άσκησης» μετατοπίζεται νωρίτερα κατά 5.1 ημέρες/δεκαετία, ενώ η τελευταία εμφάνιση μετατοπίζεται αργότερα κατά 4.3 ημέρες/δεκαετία με την πάροδο των ετών. Στα αποτελέσματα του HD δεν εφαρμόστηκε η

μέθοδος Mann-Kendall εξαιτίας της ύπαρξης αρκετών κενών στις χρονοσειρές λόγω μη υπέρβασης του υπό εξέταση κατωφλίου.

Τα αντίστοιχα αποτελέσματα βάσει του UTCI αποκαλύπτουν ότι οι μετατοπίσεις νωρίτερα μέσα στο έτος της πρώτης εμφάνισης με «ισχυρή θερμή επιβάρυνση» ($UTCI > 32$ °C) είναι μεγαλύτερες από τις μετατοπίσεις αργότερα της τελευταίας εμφάνισης (Εικόνα Γ18γ). Συγκεκριμένα, το πρώτο επεισόδιο με «ισχυρή θερμή επιβάρυνση» μετατοπίζεται νωρίτερα κατά 1.8 ημέρες/δεκαετία, ενώ το τελευταίο επεισόδιο μετατοπίζεται αργότερα κατά 0.4 ημέρες/δεκαετία (Πίνακας Γ8). Η παρατηρούμενη πτωτική τάση της χρονοσειράς της πρώτης ημέρας εμφάνισης και η παρατηρούμενη αυξητική τάση της χρονοσειράς της τελευταίας ημέρας εμφάνισης με «ισχυρή θερμή επιβάρυνση» ($UTCI > 32$ °C) δεν είναι στατιστικά σημαντικές βάσει της μεθόδου Mann-Kendall (Πίνακας Γ8).



Εικόνα Γ18: Ημερομηνίες (Julian Day) της πρώτης και τελευταίας εμφάνισης όπου α) $HI > 32$ °C, β) $HD > 40$, γ) $UTCI > 32$ °C και δ) $PET > 40$ °C μέσα σε ένα ημερολογιακό έτος για την περίοδο 1970–2017 στη Θεσσαλονίκη. Η ημερομηνία εκφρασμένη ως Julian Day είναι μια ημέρα του έτους που κυμαίνεται μεταξύ του 1 (1η Ιανουάριου) και του 365 (ή 366 εάν είναι δίσεκτο) (31η Δεκεμβρίου). Οι γραμμές τάσης απεικονίζονται επίσης.

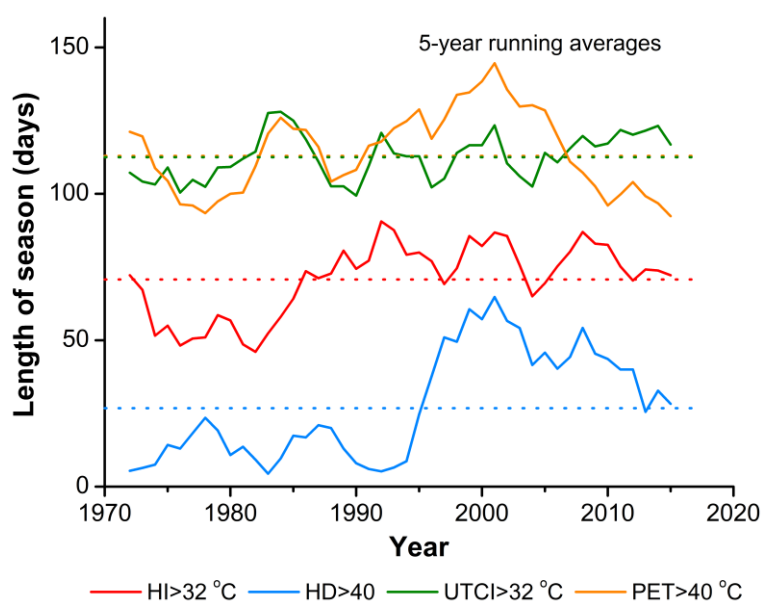
Αντιθέτως, τα αποτελέσματα βάσει του PET δεν αποκαλύπτουν ένα σαφές μοτίβο για την πρώτη και για την τελευταία ημέρα εμφάνισης συνθηκών με «ακραία θερμή επιβάρυνση» ($PET > 40\text{ }^{\circ}\text{C}$) (Εικόνα Γ18δ). Συγκεκριμένα, οι χρονοσειρές της πρώτης και της τελευταίας ημέρας εμφάνισης όπου παρατηρείται υπέρβαση του υπό εξέταση κατωφλίου εμφανίζουν ελαφρώς αυξητική τάση την περίοδο 1970–2017, ενώ οι παρατηρούμενες τάσεις δεν είναι στατιστικά σημαντικές (Πίνακας Γ8). Η ελαφρώς αυξητική τάση της χρονοσειράς αναφορικά με την πρώτη ημέρα εμφάνισης συνθηκών με «ακραία θερμή επιβάρυνση» ($PET > 40\text{ }^{\circ}\text{C}$) είναι αντίθετη συγκριτικά με τις αντίστοιχες αρνητικές τάσεις των άλλων δεικτών. Το συγκεκριμένο αποτέλεσμα πιθανόν σχετίζεται με την ισχυρή ευαισθησία του δείκτη στην παράμετρο της μέσης ακτινοβόλου θερμοκρασίας, με αποτέλεσμα να εμφανίζει μεγάλες διακυμάνσεις και να εντοπίζει συχνότερα συνθήκες που οδηγούν σε θερμή επιβάρυνση (Blazejczyk et al., 2012, Provençal et al., 2016).

Πίνακας Γ8: Τάση της πρώτης και της τελευταίας ημέρας εμφάνισης καθώς και της διάρκειας της περιόδου για συγκεκριμένες υπερβάσεις κατωφλίων της θερμής επιβάρυνσης κατά την περίοδο 1970–2017. Οι τιμές p-value της μεθόδου Mann-Kendall (η έντονη γραφή υποδηλώνει στατιστικά σημαντική τάση στο επίπεδο εμπιστοσύνης 95%) και το έτος όπου η τάση των χρονοσειρών γίνεται στατιστικά σημαντική παρουσιάζονται επίσης. Το σύμβολο * υποδηλώνει ότι η μέθοδος Mann-Kendall δεν εφαρμόστηκε επειδή υπήρχαν αρκετά κενά στη χρονοσειρά λόγω μη υπέρβασης των υπό εξέταση κατωφλίων.

	Τάση της πρώτης/τελευταίας ημέρας εμφάνισης (κλίση $\pm$ τυπικό σφάλμα)	p-value (πρώτης/τελευταίας)	Έτος (πρώτης/τελευταίας)
HI > 32 °C	−0.123 ($\pm$ 0.134) / +0.339 ($\pm$ 0.162)	3.74E-01/1.40E-01	−/−
HD > 40	−0.511 ($\pm$ 0.189) / +0.430 ($\pm$ 0.194)	*/*	*/*
UTCI > 32 °C	−0.179 ($\pm$ 0.155) / +0.041 ($\pm$ 0.117)	7.26E-02/7.49E-01	−/−
PET > 40 °C	+0.135 ($\pm$ 0.219) / +0.004 ($\pm$ 0.182)	5.94E-01/9.43E-01	−/−
	Τάση της διάρκειας της περιόδου (κλίση $\pm$ τυπικό σφάλμα)	p-value	Έτος
HI > 32 °C	+0.461 $\pm$ 0.227	1.71E-01	—
HD > 40	+0.940 $\pm$ 0.257	*/*	*
UTCI > 32 °C	+0.221 $\pm$ 0.218	3.03E-01	—
PET > 40 °C	−0.132 $\pm$ 0.263	6.70E-01	—

Η παρατηρούμενη μετατόπιση νωρίτερα της πρώτης εμφάνισης μέσα στο έτος καθώς και η μετατόπιση αργότερα της τελευταίας εμφάνισης μέσα στο έτος συνθηκών θερμής

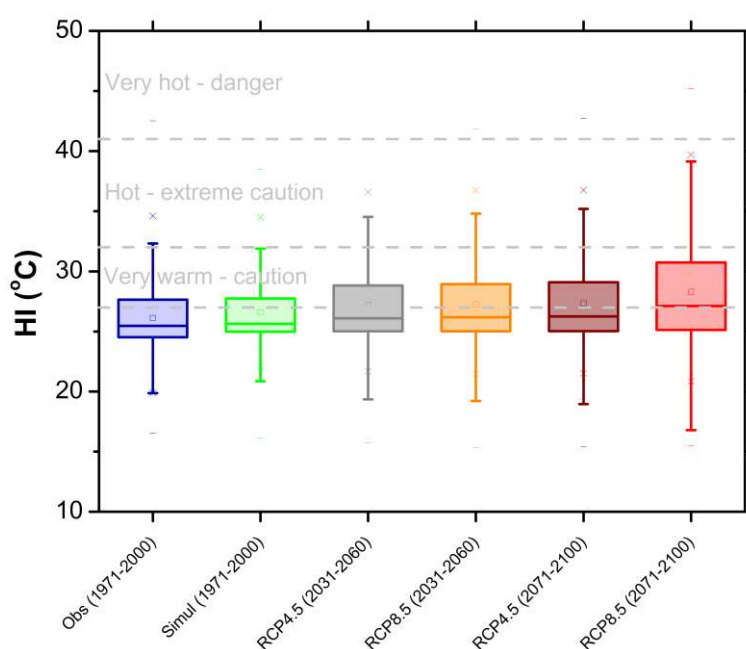
επιβάρυνσης βάσει των δεικτών HI, HD και UTCI, οδηγεί σε μια προοδευτική επέκταση της «εποχής θερμής επιβάρυνσης» (heat stress season) με την πάροδο των ετών την περίοδο 1970–2017. Η Εικόνα Γ19 παρουσιάζει τη διάρκεια της «εποχής θερμής επιβάρυνσης» (heat stress season) για τους υπό εξέταση δείκτες για την περίοδο μελέτης. Τα αποτελέσματα υποδεικνύουν επιμήκυνση της εποχής υπό συνθήκες με «πολύ ζεστό – εξαιρετική προσοχή» ($HI > 32\text{ }^{\circ}\text{C}$), με «μεγάλη δυσφορία – αποφυγή άσκησης» ($HD > 40$) και με «ισχυρή θερμή επιβάρυνση» ($UTCI > 32\text{ }^{\circ}\text{C}$) με ρυθμό 4.6 ημέρες/δεκαετία, 9.4 ημέρες/δεκαετία και 2.2 ημέρες/δεκαετία, αντίστοιχα (Πίνακας Γ8). Όμως η παρατηρούμενη επιμήκυνση με βάση τους δείκτες HI και UTCI δεν είναι ακόμη στατιστικά σημαντική, ενώ στην περίπτωση του HD δεν εφαρμόστηκε η μέθοδος Mann-Kendall εξαιτίας της ύπαρξης αρκετών κενών στις χρονοσειρές της πρώτης και της τελευταίας ημέρας εμφάνισης, λόγω μη υπέρβασης του υπό εξέταση κατωφλίου, με αποτέλεσμα την αδυναμία υπολογισμού της «εποχής θερμής επιβάρυνσης» στα αντίστοιχα έτη. Η χρονοσειρά της εποχής με «ακραία θερμή επιβάρυνση» ($PET > 40\text{ }^{\circ}\text{C}$) παρουσιάζει έντονες διακυμάνσεις ανά περιόδους (Εικόνα Γ19), ενώ συνολικά για την περίοδο μελέτης (1970–2017) η χρονοσειρά εμφανίζει πτωτική τάση, μη στατιστικά σημαντική (Πίνακας Γ8).



Εικόνα Γ19: 5-ετης κινούμενος μέσος της περιόδου υπέρβασης των ορίων θερμής επιβάρυνσης των δεικτών HI, HD, UTCI και PET για την περίοδο 1970–2017 στη Θεσσαλονίκη. Η διάρκεια της «εποχής» αναφέρεται στον αριθμό ημερών μεταξύ της πρώτης και της τελευταίας εμφάνισης όπου παρατηρούνται οι εν λόγω υπερβάσεις σε ένα ημερολογιακό έτος. Οι διακεκομμένες γραμμές υποδεικνύουν τους αντίστοιχους μέσους όρους σε κάθε κατώφλι κατά την περίοδο 1970–2017.

Γ4.4: Εκτίμηση των επιπέδων θερμής επιβάρυνσης στο μέλλον για τη Θεσσαλονίκη

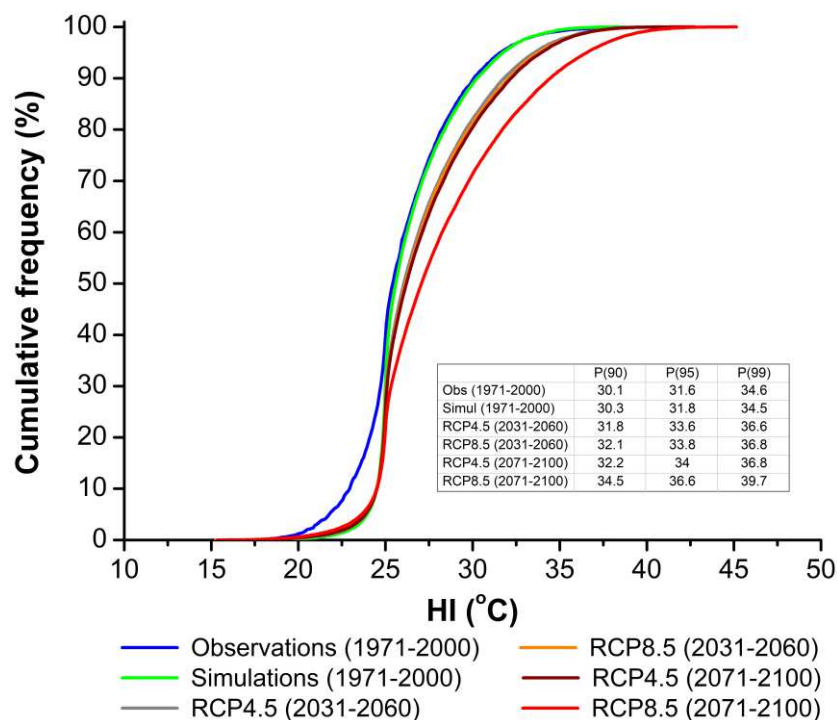
Η Εικόνα Γ20 παρουσιάζει με τη μορφή θηκογράμματος τα επίπεδα τιμών του δείκτη HI την περίοδο αναφοράς (1971–2000) με βάση τα δεδομένα επίγειων παρατηρήσεων και προσομοιώσεων καθώς και προβολή του HI στο εγγύς (2031–2060) και στο απώτερο μέλλον (2071–2100) υπό τα μελλοντικά σενάρια εκπομπών RCP4.5 και RCP8.5 στη Θεσσαλονίκη. Μια οπτική επιθεώρηση των αποτελεσμάτων αποκαλύπτει αύξηση των τιμών του δείκτη στο μέλλον ανάλογα με το σενάριο και την περίοδο, με αποτέλεσμα μεγαλύτερος αριθμός περιπτώσεων να κατατάσσεται στις ανώτερες κατηγορίες της κλίμακας του δείκτη. Η μέση τιμή του HI την περίοδο αναφοράς (1971–2000) με βάση τόσο τις παρατηρήσεις όσο και τις προσομοιώσεις δεν υπερβαίνει το κατώφλι των 27 °C («πολύ θερμό – προσοχή»), ενώ στο μέλλον αναμένεται υπέρβαση του συγκεκριμένου κατωφλίου τόσο για το σενάριο εκπομπών RCP4.5 όσο και για το RCP8.5. Συγκεκριμένα, η μέση τιμή στο μέλλον σε σχέση με την αντίστοιχη τιμή της περιόδου αναφοράς βάσει των παρατηρήσεων αναμένεται να αυξηθεί κατά 4.1% την περίοδο 2031–2060 υπό το σενάριο RCP4.5, κατά 4.4% την περίοδο 2031–2060 υπό το σενάριο RCP8.5, κατά 4.7% την περίοδο 2071–2100 υπό το σενάριο RCP4.5 και κατά 8.3% την περίοδο 2071–2100 υπό το σενάριο RCP8.5.



Εικόνα Γ20: Θηκογράμμα του HI (Heat Index) για την περίοδο αναφοράς (1971–2000) με βάση τα δεδομένα επίγειων παρατηρήσεων και προσομοιώσεων καθώς και προβολή του HI στο εγγύς (2031–2060) και απώτερο (2071–2100) μέλλον βάσει προσομοιώσεων υπό τα μελλοντικά σενάρια εκπομπών RCP4.5 και RCP8.5 στη Θεσσαλονίκη.

Η αύξηση στα επίπεδα τιμών του δείκτη HI στο μέλλον παρατηρείται σε όλο το εύρος των καμπυλών κατανομής, αλλά μεγιστοποιείται στα ανώτερα επίπεδα των εκατοστημορίων (percentiles) (Εικόνα Γ21). Όπως είναι αναμενόμενο η καμπύλη κατανομής για το απώτερο μέλλον (2071–2100) υπό το σενάριο εκπομπών RCP8.5 παρουσιάζει τη μεγαλύτερη μετατόπιση προς υψηλότερες τιμές του δείκτη συγκριτικά με την περίοδο αναφοράς (1971–2000). Ενδεικτικά αναφέρεται ότι στο 90ο εκατοστημόριο (P90) παρατηρούνται υψηλότερες τιμές του δείκτη HI κατά τουλάχιστον 1.7 °C στο εγγύς μέλλον (2031–2060) και κατά τουλάχιστον 2.1 °C στο απώτερο μέλλον (2071–2100) ανεξάρτητα από το ακολουθούμενο σενάριο συγκριτικά με την περίοδο αναφοράς (1971–2000) βάσει των παρατηρήσεων. Σύμφωνα με τα κατώφλια του δείκτη HI, το 90ο εκατοστημόριο τις περιόδους 1971–2000 αντιστοιχεί στην κατηγορία «πολύ θερμό – προσοχή», ενώ στις μελλοντικές περιόδους 2031–2060 υπό το κλιματικό σενάριο RCP8.5 και 2071–2100 υπό τα κλιματικά σενάρια RCP4.5 και RCP8.5 αντιστοιχεί στην κατηγορία «πολύ ζεστό – εξαιρετική προσοχή», γεγονός που υποδεικνύει αύξηση του θερμικού κινδύνου στο μέλλον για τον πληθυσμό της Θεσσαλονίκης κατά μια βαθμίδα στην κλίμακα του δείκτη στο συγκεκριμένο εκατοστημόριο. Το γεγονός ότι οι καμπύλες κατανομής του δείκτη μετατοπίζονται προς υψηλότερες τιμές στο μέλλον ακόμη και στα χαμηλά εκατοστημόρια (< P30), υποδεικνύει ότι οι θερμικές συνθήκες στο μέλλον κατά τη διάρκεια της νύχτας θα διαφοροποιηθούν από τη σημερινή κατάσταση. Παρότι η παρατηρούμενη αύξηση των τιμών του HI στα χαμηλά εκατοστημόρια δεν υπερβαίνει το κατώφλι των 27 °C («πολύ θερμό – προσοχή»), ο ανθρώπινος οργανισμός πιθανόν να υφίσταται πίεση στην προσπάθεια του να ηρεμήσει και να επανέλθει από το θερμικό στρες της ημέρας σε ένα περιβάλλον πιο επιβαρυντικό από ότι είναι σήμερα.

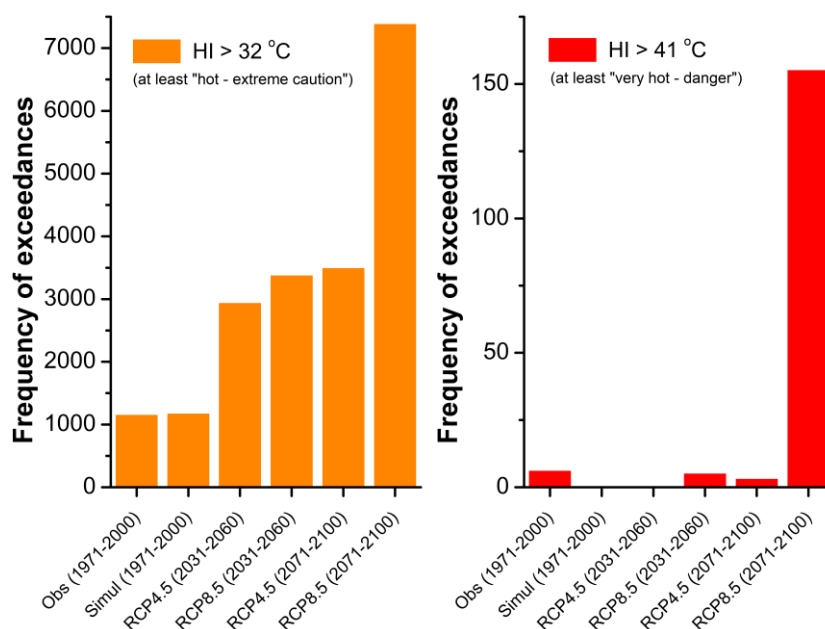
Η Εικόνα Γ21 αποκαλύπτει επίσης ότι η συχνότητα των περιπτώσεων με HI > 32 °C, η οποία υποδεικνύει τουλάχιστον «πολύ ζεστό – εξαιρετική προσοχή», προσδιορίζεται στο 4.0% την περίοδο 1971–2000 και αυξάνεται στο 9.1% την περίοδο 2031–2060 υπό το σενάριο RCP4.5, στο 10.1% την περίοδο 2031–2060 υπό το σενάριο RCP8.5, στο 10.5% την περίοδο 2071–2100 υπό το σενάριο RCP4.5 και στο 18.5% την περίοδο 2071–2100 υπό το σενάριο RCP8.5, οδηγώντας σε μια σχετική αύξηση των συγκεκριμένων συνθηκών (HI > 32 °C) κατά 127.5%, 152.5%, 162.5% και 362.5%, αντίστοιχα, στο μέλλον.



Εικόνα Γ21: Αθροιστική συχνότητα κατανομής (CDF) του HI (Heat Index) για την περίοδο αναφοράς (1971–2000) με βάση τα δεδομένα επίγειων παρατηρήσεων και προσομοιώσεων καθώς και προβολή του HI στο εγγύς (2031–2060) και απώτερο (2071–2100) μέλλον βάσει προσομοιώσεων υπό τα μελλοντικά σενάρια εκπομπών RCP4.5 και RCP8.5 στη Θεσσαλονίκη.

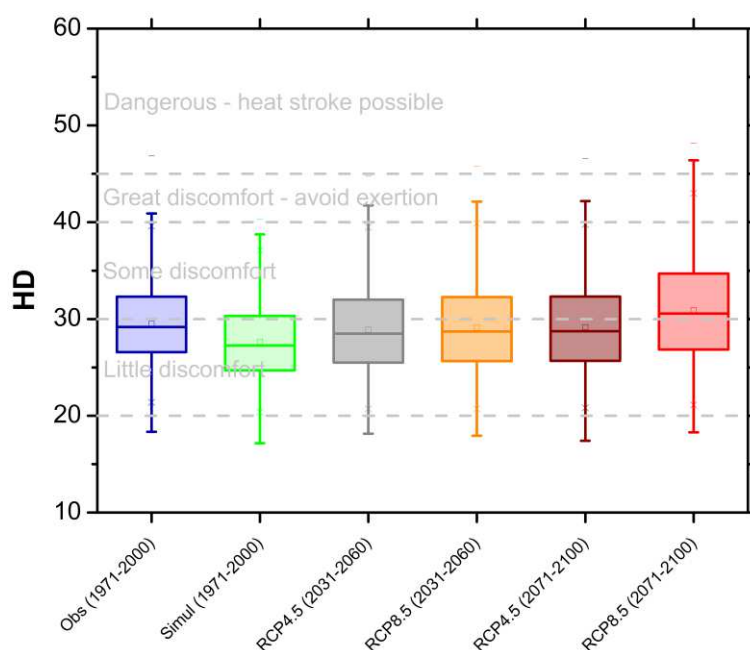
Η Εικόνα Γ22 παρουσιάζει τον απόλυτο αριθμό υπερβάσεων με βάση τις 3-ωρες τιμές της περιόδου αναφοράς (1971–2000) και των μελλοντικών περιόδων (2031–2060, 2071–2100) υπό τα σενάρια RCP4.5 και RCP8.5 για τα κατώφλια $HI > 32^{\circ}C$ (τουλάχιστον «πολύ ζεστό – εξαιρετική προσοχή») και $HI > 41^{\circ}C$ (τουλάχιστον «πάρα πολύ ζεστό – κίνδυνος»). Οι υπερβάσεις την περίοδο 1971–2000 βάσει των επίγειων παρατηρήσεων διαμορφώνονται στις 6 περιπτώσεις, όπου ο πληθυσμός της Αθήνας υπόκειται σε «πάρα πολύ ζεστό – κίνδυνος» ($HI > 41^{\circ}C$) και στις 1148 περιπτώσεις υπό συνθήκες με «πολύ ζεστό – εξαιρετική προσοχή» ($HI > 32^{\circ}C$). Στο μέλλον ο αντίστοιχος αριθμός υπερβάσεων αναμένεται να αυξηθεί σημαντικά. Συγκεκριμένα, για το κατώφλι των $32^{\circ}C$, οι υπερβάσεις αναμένεται να διαμορφωθούν στις 2933 περιπτώσεις την περίοδο 2031–2060 υπό το σενάριο RCP4.5, στις 3373 την περίοδο 2031–2060 υπό το σενάριο RCP8.5, στις 3490 την περίοδο 2071–2100 υπό το σενάριο RCP4.5 και στις 7380 περιπτώσεις την περίοδο 2071–2100 υπό το σενάριο RCP8.5. Οι παρατηρούμενες υπερβάσεις στο μέλλον οδηγούν σε σχετική αύξηση κατά 155.5% (2031–2060, RCP4.5), 193.8% (2031–2060, RCP8.5), 204.0% (2071–2100, RCP4.5) και 542.9% (2071–2100, RCP8.5) σε σχέση με τις υπερβάσεις της

περιόδου αναφοράς (1971–2000). Ο αριθμός υπερβάσεων του ανώτερου κατωφλίου (41 °C) στο εγγύς μέλλον (2031–2060) και υπό το σενάριο RCP4.5 είναι περιορισμένος, όμως στο απώτερο μέλλον (2071–2100) υπό το σενάριο RCP8.5 αναμένεται δραματική αύξηση (155 περιπτώσεις, σχετική αύξηση 2483.3%).



Εικόνα Γ22: Συχνότητα υπερβάσεων (απόλυτος αριθμός 3-ωρων) όταν $HI > 32\text{ }^{\circ}\text{C}$ (τουλάχιστον «πολύ ζεστό – εξαιρετική προσοχή») και $HI > 41\text{ }^{\circ}\text{C}$ (τουλάχιστον «πάρα πολύ ζεστό – κίνδυνος») για την περίοδο αναφοράς (1971–2000) με βάση τα δεδομένα επίγειων παρατηρήσεων και προσομοιώσεων καθώς και προβολή του HI στο εγγύς (2031–2060) και απώτερο (2071–2100) μέλλον βάσει προσομοιώσεων υπό τα μελλοντικά σενάρια εκπομπών RCP4.5 και RCP8.5 στη Θεσσαλονίκη.

Τα αποτελέσματα από την εφαρμογή του δείκτη HD (Εικόνες Γ23, Γ24) παρουσιάζουν ορισμένες διαφορές σε σύγκριση με τα αντίστοιχα αποτελέσματα του HI. Ο δείκτης HD δεν παρουσιάζει ιδιαίτερα υψηλές τιμές στο εγγύς μέλλον (2031–2060) και για τα δυο σενάρια, αλλά και στο απώτερο μέλλον (2071–2100) υπό το σενάριο RCP4.5 όταν η σύγκριση πραγματοποιείται με τα επίπεδα τιμών του δείκτη που προκύπτουν από τις επίγειες παρατηρήσεις της περιόδου αναφοράς (1971–2000). Παρόλα αυτά παρατηρείται σημαντική αύξηση της μέσης και της διαμέσου τιμής του HD στο απώτερο μέλλον (2071–2100) υπό το σενάριο RCP8.5, η οποία υποδεικνύει αύξηση του βαθμού δυσφορίας από «μικρή» την περίοδο 1971–2000 σε «μερική» την περίοδο 2071–2100.

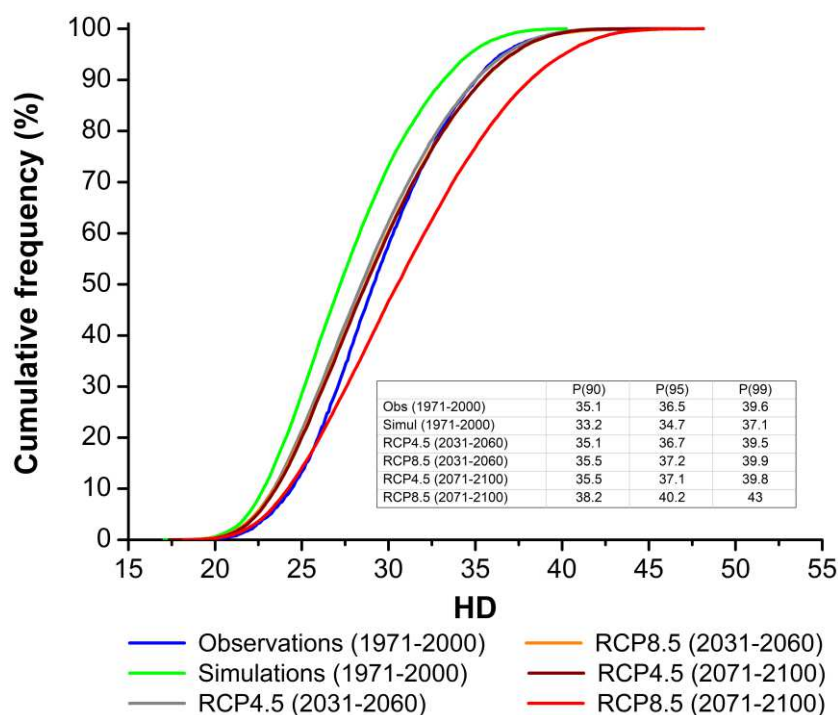


Εικόνα Γ23: Θηκόγραμμα του HD (Humidex) για την περίοδο αναφοράς (1971–2000) με βάση τα δεδομένα επίγειων παρατηρήσεων και προσομοιώσεων καθώς και προβολή του HD στο εγγύς (2031–2060) και απώτερο (2071–2100) μέλλον βάσει προσομοιώσεων υπό τα μελλοντικά σενάρια εκπομπών RCP4.5 και RCP8.5 στη Θεσσαλονίκη.

Η κατανομή του HD για το απώτερο μέλλον (2071–2100) υπό το σενάριο RCP8.5 μετατοπίζεται σημαντικά προς υψηλότερες τιμές σε σχέση με την κατανομή της περιόδου 1971–2000, ενώ η μετατόπιση παρατηρείται σε μεγάλο εύρος των εκατοστημορίων (Εικόνα Γ24). Αντιθέτως, η παρατηρούμενη μετατόπιση των καμπυλών κατανομής για το εγγύς μέλλον (2031–2060) αλλά και για το απώτερο μέλλον (2071–2100) υπό το σενάριο RCP4.5 είναι μικρή. Η συχνότητα των περιπτώσεων με $HD > 30$, η οποία υποδεικνύει τουλάχιστον «μερική δυσφορία», διαμορφώνεται στο 53% την περίοδο 2071–2100 υπό το σενάριο RCP8.5, ενώ η αντίστοιχη συχνότητα την περίοδο 1971–2000 (από παρατηρήσεις) είναι σαφώς μικρότερη και διαμορφώνεται στο 41.8%, αποκαλύπτοντας μια διαφορά της τάξης του 11.2% και μια σχετική αύξηση των συγκεκριμένων συνθηκών κατά 26.8% στο μέλλον. Επιπλέον, η συχνότητα των περιπτώσεων με $HD > 40$, η οποία υποδεικνύει τουλάχιστον «μεγάλη δυσφορία – αποφυγή άσκησης», προσδιορίζεται στο 0.7% την περίοδο 1971–2000 (από παρατηρήσεις) και αυξάνεται στο 5.2% την περίοδο 2071–2100 υπό το σενάριο RCP8.5, οδηγώντας σε μια σχετική αύξηση των συγκεκριμένων συνθηκών κατά 642.9% στο απώτερο μέλλον (2071–2100).

Το 95ο και 99ο εκατοστημόριο του δείκτη HD την περίοδο 1971–2000 αντιστοιχεί στην κατηγορία «μερική δυσφορία», ενώ στη μελλοντική περίοδο 2071–2100 υπό το σενάριο

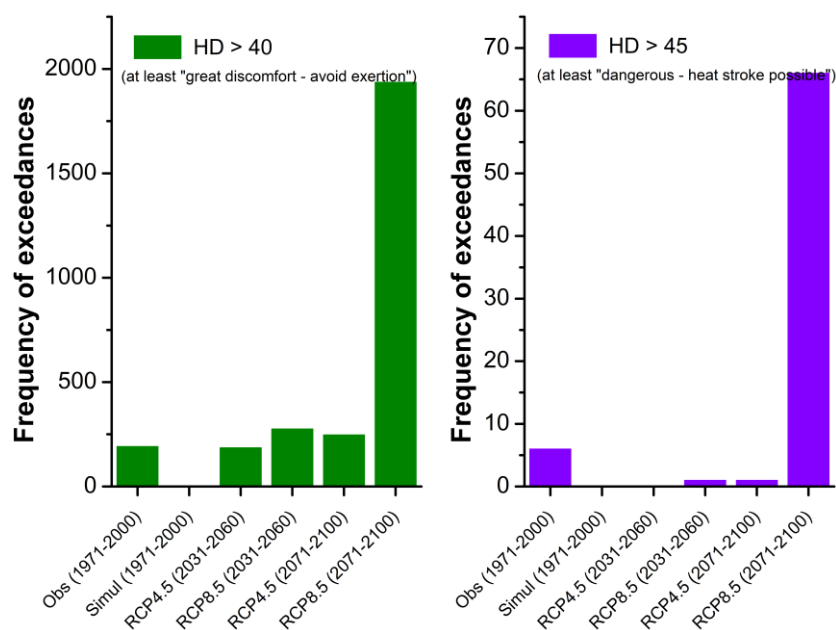
RCP8.5 αντιστοιχεί στην κατηγορία «μεγάλη δυσφορία – αποφυγή άσκησης», γεγονός που υποδεικνύει αύξηση του θερμικού κινδύνου στο μέλλον για τον πληθυσμό της Θεσσαλονίκης κατά μια βαθμίδα στην κλίμακα του δείκτη στα ανώτερα εκατοστημόρια (Εικόνα Γ24).



Εικόνα Γ24: Αθροιστική συχνότητα κατανομής (CDF) του HD (Humidex) για την περίοδο αναφοράς (1971–2000) με βάση τα δεδομένα επίγειων παρατηρήσεων και προσομοιώσεων καθώς και προβολή του HD στο εγγύς (2031–2060) και απώτερο (2071–2100) μέλλον βάσει προσομοιώσεων υπό τα μελλοντικά σενάρια εκπομπών RCP4.5 και RCP8.5 στη Θεσσαλονίκη.

Η Εικόνα Γ25 παρουσιάζει τον απόλυτο αριθμό υπερβάσεων με βάση τις 3-ωρες τιμές της περιόδου αναφοράς (1971–2000) και των μελλοντικών περιόδων (2031–2060, 2071–2100) υπό τα σενάρια RCP4.5 και RCP8.5 για τα κατώφλια HD > 40 (τουλάχιστον «μεγάλη δυσφορία – αποφυγή άσκησης») και HD > 45 (τουλάχιστον «κίνδυνος – πιθανή θερμοληξία»). Ο αριθμός των υπερβάσεων για HD > 40 στο εγγύς μέλλον (2031–2060) υπό το σενάριο RCP4.5 διαμορφώνεται σε αντίστοιχα επίπεδα με την περίοδο αναφοράς (1971–2000) βάσει των παρατηρήσεων. Αντιθέτως, για το ίδιο κατώφλι, οι υπερβάσεις αναμένεται να διαμορφωθούν στις 276 περιπτώσεις την περίοδο 2031–2060 υπό το σενάριο RCP8.5, στις 248 την περίοδο 2071–2100 υπό το σενάριο RCP4.5 και στις 1937 περιπτώσεις την περίοδο 2071–2100 υπό το σενάριο RCP8.5 σε σχέση με τον αριθμό υπερβάσεων (192

περιπτώσεις) της περιόδου αναφοράς (1971–2000). Οι παρατηρούμενες υπερβάσεις οδηγούν σε σχετική αύξηση κατά 43.8% (2031–2060, RCP8.5), 29.2% (2071–2100, RCP4.5) και 908.9% (2071–2100, RCP8.5) στο μέλλον σε σχέση με τις υπερβάσεις της περιόδου αναφοράς (1971–2000). Ο αριθμός υπερβάσεων του ανώτερου κατωφλίου (HD > 45) τόσο στο εγγύς μέλλον (2031–2060) όσο και υπό το σενάριο RCP4.5 είναι περιορισμένος, όμως στο απώτερο μέλλον (2071–2100) υπό το σενάριο RCP8.5 αναμένεται τουλάχιστον δεκαπλασιασμός των υπερβάσεων (66 περιπτώσεις, σχετική αύξηση 1000%) σε σχέση με τις υπερβάσεις (6 περιπτώσεις) της περιόδου αναφοράς (1971–2000).



Εικόνα Γ25: Συχνότητα υπερβάσεων (απόλυτος αριθμός 3-ωρων) όταν HD > 40 (τουλάχιστον «μεγάλη δυσφορία – αποφυγή άσκησης») και HD > 45 (τουλάχιστον «κίνδυνος – πιθανή θερμοπληξία») για την περίοδο αναφοράς (1971–2000) με βάση τα δεδομένα επίγειων παρατηρήσεων και προσομοιώσεων καθώς και προβολή του HD στο εγγύς (2031–2060) και απώτερο (2071–2100) μέλλον βάσει προσομοιώσεων υπό τα μελλοντικά σενάρια εκπομπών RCP4.5 και RCP8.5 στη Θεσσαλονίκη.

Γ4.5: Συζήτηση και συμπεράσματα για τη Θεσσαλονίκη

Τα αποτελέσματα για την περιοχή της Θεσσαλονίκης αποκαλύπτουν μια σταδιακή αύξηση των επιπέδων θερμής επιβάρυνσης τα τελευταία 48 χρόνια (1970–2017), όπως ακριβώς παρατηρήθηκε και για την περίπτωση της Αθήνας. Η κατανομή των επιπέδων θερμικής επιβάρυνσης εκτιμήθηκε με την εφαρμογή δύο προηγμένων θερμικών (ή βιοκλιματικών) δεικτών (UTCI, PET) και δύο απλών δεικτών (HI, HD), ως προς τη θεώρηση τους. Η μετατόπιση της κατανομής των δεικτών προς υψηλότερες τιμές τις τελευταίες

δεκαετίες παρατηρείται σε όλο το εύρος τιμών της κατανομής και δεν περιορίζεται μόνο στο άνω άκρο της.

Την περίοδο 1970–2017, ο χρόνος έκθεσης του πληθυσμού υπό συνθήκες τουλάχιστον «πολύ ζεστό – εξαιρετική προσοχή» (HI), «μερική δυσφορία» (HD), «ισχυρή θερμή επιβάρυνση» (UTCI) και «ακραία θερμή επιβάρυνση» (PET) παρουσιάζει στατιστικά σημαντική αυξητική τάση με ρυθμό 0.4 %/δεκαετία, 1.1 %/δεκαετία, 0.7 %/δεκαετία και 0.2 %/δεκαετία, αντίστοιχα. Κατά τη διάρκεια των νυχτερινών ωρών, ωστόσο, μόνο οι απλοί δείκτες υποδεικνύουν στατιστικά σημαντική αυξητική τάση στο χρόνο έκθεσης υπό συνθήκες θερμής επιβάρυνσης. Επιπλέον, τα ιδιαίτερα χαμηλά επίπεδα τιμών που προκύπτουν βάσει του PET πιθανόν αντανakλούν τόσο τη χαμηλή ευαισθησία του δείκτη στην υγρασία του αέρα όσο και την αδυναμία του να ποσοτικοποιήσει την επίδραση της υγρασίας (Chen and Matzarakis, 2018, Provençal et al., 2016), η οποία κατά τη διάρκεια της νύχτας εμφανίζει συνήθως υψηλότερες τιμές. Το συγκεκριμένο αποτέλεσμα παρατηρήθηκε και στην ανάλυση για την Αθήνα.

Παρότι οι τρεις από τους τέσσερις δείκτες αποκαλύπτουν αφενός ότι η πρώτη εμφάνιση συνθηκών θερμής επιβάρυνσης μετατοπίζεται ελαφρώς νωρίτερα μέσα στο έτος και αφετέρου ότι η τελευταία εμφάνιση συνθηκών θερμής επιβάρυνσης μετατοπίζεται ελαφρώς αργότερα μέσα στο έτος την περίοδο 1970–2017, οι παρατηρούμενες μετατοπίσεις δεν καθιστούν στατιστικά σημαντικές τις αντίστοιχες χρονοσειρές. Συνεπώς, η διαμορφούμενη επιμήκυνση της «εποχής θερμής επιβάρυνσης» (heat stress season) για τη Θεσσαλονίκη δεν είναι στατιστικά σημαντική. Παρόλα αυτά ο ρυθμός επιμήκυνσης της εποχής υπό συνθήκες με «πολύ ζεστό – εξαιρετική προσοχή» ($HI > 32\text{ }^{\circ}\text{C}$), με «μεγάλη δυσφορία – αποφυγή άσκησης» ($HD > 40$) και με «ισχυρή θερμή επιβάρυνση» ($UTCI > 32\text{ }^{\circ}\text{C}$) διαμορφώνεται σε 4.6 ημέρες/δεκαετία, 9.4 ημέρες/δεκαετία και 2.2 ημέρες/δεκαετία, αντίστοιχα. Οι παρατηρούμενες διαφορές στην επιμήκυνση της «εποχής θερμής επιβάρυνσης» (heat stress season) μεταξύ των δεικτών πιθανότατα σχετίζονται τόσο με τη διαφορετική θεώρηση του κάθε δείκτη όσο και με τις διαφορετικές ατμοσφαιρικές μεταβλητές που υπεισέρχονται στους υπολογισμούς του κάθε δείκτη (Provençal et al., 2016).

Τέλος, η ανάλυση επικεντρώθηκε στα επίπεδα δυσφορίας τα οποία αναμένεται να διαμορφωθούν στο εγγύς (2031–2060) και απώτερο (2071–2100) μέλλον υπό τα σενάρια εκπομπών RCP4.5 και RCP8.5 στη Θεσσαλονίκη. Η εκτίμηση της επιβάρυνσης στο μέλλον για τον πληθυσμό της Θεσσαλονίκης στηρίχθηκε αποκλειστικά στους απλούς δείκτες HI και HD. Η συγκεκριμένη επιλογή ελήφθη ώστε να αποφευχθούν πιθανές στρεβλώσεις από την

εφαρμογή των λογικών δεικτών (UTCI, PET) λόγω της μεγάλης αβεβαιότητας που υπεισέρχεται στην εκτίμηση των παραμέτρων της ταχύτητας του ανέμου και της ακτινοβολίας στο μέλλον, ιδιαίτερα όταν το χρονικό βήμα είναι μικρό (3-ωριαίο), μεταβλητών οι οποίες χρησιμοποιούνται ως δεδομένα εισόδου στα μοντέλα για τον υπολογισμό του UTCI και του PET.

Τα αποτελέσματα βάσει του HI αποκαλύπτουν αύξηση των τιμών του δείκτη στο μέλλον ανάλογα με το σενάριο και την περίοδο, με αποτέλεσμα μεγαλύτερος αριθμός περιπτώσεων να κατατάσσεται στις ανώτερες κατηγορίες της κλίμακας του δείκτη. Στα ανώτερα εκατοστημόρια της κατανομής παρατηρούνται υψηλότερες τιμές του δείκτη HI κατά τουλάχιστον 1.7 °C στο εγγύς μέλλον (2031–2060) και κατά τουλάχιστον 2.1 °C στο απώτερο μέλλον (2071–2100) ανεξάρτητα από το ακολουθούμενο σενάριο συγκριτικά με την περίοδο αναφοράς (1971–2000). Οι υπερβάσεις του κατωφλίου «πολύ ζεστό – εξαιρετική προσοχή» ($HI > 32$ °C) στο μέλλον αναμένεται να οδηγήσουν σε σχετική αύξηση των συγκεκριμένων συνθηκών κατά 155.5% (2031–2060, RCP4.5), 193.8% (2031–2060, RCP8.5), 204.0% (2071–2100, RCP4.5) και 542.9% (2071–2100, RCP8.5) σε σχέση με τις αντίστοιχες υπερβάσεις της περιόδου αναφοράς (1971–2000).

Τα αποτελέσματα από την εφαρμογή του δείκτη HD στο μέλλον παρουσιάζουν ορισμένες διαφορές σε σύγκριση με τα αντίστοιχα αποτελέσματα του HI. Ο δείκτης HD δεν παρουσιάζει ιδιαίτερα υψηλές τιμές στο εγγύς μέλλον (2031–2060) και για τα δυο σενάρια, αλλά και στο απώτερο μέλλον (2071–2100) υπό το σενάριο RCP4.5 όταν η σύγκριση πραγματοποιείται με τα επίπεδα τιμών του δείκτη που προκύπτουν από τις επίγειες παρατηρήσεις της περιόδου αναφοράς (1971–2000). Παρόλα αυτά στο απώτερο μέλλον (2071–2100) υπό το σενάριο RCP8.5 οι θερμικές συνθήκες στη Θεσσαλονίκη αναμένεται να επιδεινωθούν σημαντικά, οδηγώντας σε μια σχετική αύξηση των συνθηκών με τουλάχιστον «μεγάλη δυσφορία – αποφυγή άσκησης» κατά 642.9% σε σύγκριση με την περίοδο αναφοράς (1971–2000).

Γ5: Συμπεράσματα

Στο παρόν κεφάλαιο της έκθεσης επιδιώχθηκε η διερεύνηση και αποτύπωση του θερμικού κινδύνου για τους πληθυσμούς της Αθήνας και της Θεσσαλονίκης, μελετώντας αφενός τις διαχρονικές μεταβολές για μια μακρά χρονική περίοδο και αφετέρου τις αντίστοιχες προβολές στο μελλοντικό κλίμα. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης που προηγήθηκε υπογραμμίζουν τον αυξανόμενο θερμικό κίνδυνο τόσο στο παρόν όσο και στο μελλοντικό κλίμα στα πλαίσια της παγκόσμιας και περιφερειακής αύξησης της

θερμοκρασίας. Τα συγκεκριμένα ευρήματα μπορούν να λειτουργήσουν ως επιστημονικό εργαλείο για τους υπεύθυνους λήψης αποφάσεων, παρέχοντας επαρκείς πληροφορίες για την έγκαιρη προετοιμασία των κατάλληλων δράσεων για τη διαχείριση και τον μετριασμό των επιπτώσεων του θερμικού κινδύνου στον πληθυσμό. Παράλληλα, η ανιχνευθείσα αύξηση της έκθεσης υπό θερμή επιβάρυνση υπογραμμίζει την επιτακτική ανάγκη για την ανάπτυξη τεχνικών μετριασμού ώστε να εξισορροπηθεί το θερμικό ισοζύγιο στις πόλεις και παράλληλα να βελτιωθούν οι συνθήκες θερμικής άνεσης ιδιαίτερα στο αστικό περιβάλλον.

Βιβλιογραφία

Alfano, F.R.D.A., Palella, B.I. & Riccio, G. 2011, "Thermal environment assessment reliability using temperature—humidity indices", *Ind. Health*, vol. 49, pp. 95-106.

Bartzokas, A., Lolis, C.J., Kassomenos, P.A. & McGregor, G.R. 2013, "Climatic characteristics of summer human thermal discomfort in Athens and its connection to atmospheric circulation", *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, vol. 13, pp. 3271-3279.

Blazejczyk, K., Epstein, Y., Jendritzky, G., Staiger, H. & Tinz, B. 2012, "Comparison of UTCI to selected thermal indices", *Int. J. Biometeorol.*, vol. 56, pp. 515-535.

Bröde, P., Fiala, D., Błażejczyk, K., Holmér, I., Jendritzky, G., Kampmann, B., Tinz, B. & Havenith, G. 2012, "Deriving the operational procedure for the Universal Thermal Climate Index (UTCI)", *Int. J. Biometeorol.*, vol. 56, pp. 481-494.

Cannon, A.J. 2018, "Multivariate quantile mapping bias correction: an N-dimensional probability density function transform for climate model simulations of multiple variables", *Climate Dynamics*, vol. 50, pp. 31-49.

Chen, Y.C. & Matzarakis, A. 2018, "Modified physiologically equivalent temperature—Basics and applications for western European climate", *Theor. Appl. Climatol.*, vol. 132, pp. 1275-1289.

Cohen, P., Potchter, O. & Matzarakis, A. 2013, "Human thermal perception of Coastal Mediterranean outdoor urban environments", *Appl. Geography*, vol. 37, pp. 1-10.

De Freitas, C.R. & Grigorieva, E.A. 2015, "A comprehensive catalogue and classification of human thermal climate indices", *Int. J. Biometeorol.*, vol. 59, pp. 109-120.

De Freitas, C.R. & Grigorieva, E.A. 2017, "A comparison and appraisal of a comprehensive range of human thermal climate indices", *Int. J. Biometeorol.*, vol. 61, pp. 487-512.

EEA 2017, "Climate change, impacts and vulnerability in Europe 2016: An indicator-based report", EEA Report No 1/2017, European Environment Agency, Copenhagen.

Environment Canada, 2018, "Spring and summer weather hazards", <https://www.canada.ca/en/environment-climate-change/services/seasonal-weather-hazards/spring-summer.html#humidex>. Accessed 9 April 2018.

Fiala, D., Havenith, G., Bröde, P., Kampmann, B. & Jendritzky, G. 2012, "UTCI-Fiala multi-node model of human heat transfer and temperature regulation", *Int. J. Biometeorol.*, vol. 56, pp. 429-441.

Founda, D. 2011, "Evolution of the air temperature in Athens and evidence of climatic change: a review", *Advances Build. Energy Res.*, vol. 5, pp. 7-41.

Founda, D. & Giannakopoulos, C. 2009, "The exceptionally hot summer of 2007 in Athens, Greece—a typical summer in the future climate?", *Glob. Planet. Change*, vol. 67 pp. 227-236.

Founda, D. & Santamouris, M. 2017, "Synergies between urban heat island and heat waves in Athens (Greece), during an extremely hot summer (2012)", *Scientific Rep.*, vol. 7, no. 10973.

Founda, D., Kambezidis, H.D., Petrakis, M., Zanis, P. & Zerefos, C. 2009, "A correction of the recent air-temperature record at the historical meteorological station of the National Observatory of Athens (NOA) due to instrument change", *Theor. Appl. Climatol.*, vol. 97, pp. 385-389.

Gabriel, K.M.A. & Endlicher, W.R. 2011, "Urban and rural mortality rates during heat waves in Berlin and Brandenburg, Germany", *Environ. Pollut.*, vol. 159, pp. 2044-2050.

Havenith, G., Fiala, D., Błażejczyk, K., Richards, M., Bröde, P., Holmér, I., Rintamaki, H., Benshabat, Y. & Jendritzky, G. 2012, "The UTCI-clothing model", *Int. J. Biometeorol.*, vol. 56, pp. 461-470.

Höppe, P. 1999, "The physiological equivalent temperature—a universal index for the biometeorological assessment of the thermal environment", *Int. J. Biometeorol.*, vol. 43, pp. 71-75.

HSA, 2011, "Population and Housing Census of 2011", Hellenic Statistical Authority. <http://www.statistics.gr/en/2011-census-pop-hous>. Accessed 11 September 2019.

IPCC, 2014, "Climate Change 2014: Synthesis Report", Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, Pachauri RK, Meyer LA (eds.)]. IPCC, Geneva.

Jendritzky, G., deDear, R. & Havenith, G. 2012, "UTCI-why another thermal index?" *Int. J. Biometeorol.*, vol. 56, pp. 421-428.

Katavoutas, G., & Founda, D. 2019, "Response of urban heat stress to heat waves in Athens (1960–2017)", *Atmosphere*, vol. 10, no. 483.

Katavoutas, G., Georgiou, G.K. & Asimakopoulos, D.N. 2015, "Studying the urban thermal environment under a human-biometeorological point of view: the case of a large coastal metropolitan city, Athens", *Atmos. Res.*, vol. 152, pp. 82-92.

Kazadzis, S., Founda, D., Psiloglou, B.E., Kambezidis, H., Mihalopoulos, N., Sanchez-Lorenzo, A., Meleti, C., Raptis, P.I., Pierros, F. & Nabat, P. 2018, "Long-term series and trends in surface solar radiation in Athens, Greece", *Atmos. Chem. Phys.*, vol. 18, pp. 2395-2411.

Knutson, T.R. & Ploshay, J.J. 2016, "Detection of anthropogenic influence on a summertime heat stress index", *Clim. Change*, vol. 138, pp. 25-39.

Masterson, J., Richardson, F.A. 1979, "Humidex, a method of quantifying human discomfort due to excessive heat and humidity", Environment Canada, Downsview, Ontario.

Matzarakis, A., Rutz, F. & Mayer, H. 2007, "Modelling radiation fluxes in simple and complex environments—application of the RayMan model", *Int. J. Biometeorol.*, vol. 51, pp. 323-334.

Matzarakis, A., Rutz, F. & Mayer, H. 2010, "Modelling radiation fluxes in simple and complex environments: basics of the RayMan model", *Int. J. Biometeorol.*, vol. 54, pp. 131-139.

NOAA, 2018a, "Summer weather safety and survival: The Heat Index", <https://www.weather.gov/oun/safety-summer-heatindex>. Accessed 3 April 2018.

NOAA, 2018b, National Centers for Environmental information, Climate at a Glance: Global Time Series. <https://www.ncdc.noaa.gov/cag/>. Accessed 7 November 2018.

Peel, M.C., Finlayson, B.L. & McMahon, T.A. 2007, "Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification", *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, vol. 11, pp. 1633-1644.

Popke, D., Stevens, B. & Voigt, A. 2013, "Climate and climate change in a radiative-convective equilibrium version of ECHAM6", *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, vol. 5, pp. 1-14.

Provençal, S., Bergeron, O., Leduc, R. & Barrette, N. 2016, "Thermal comfort in Quebec City, Canada: sensitivity analysis of the UTCI and other popular thermal comfort indices in a mid-latitude continental city", *Int. J. Biometeorol.*, vol. 60, pp. 591-603.

Rothfusz, L.P. 1990 "The heat index equation", NWS Southern Region Technical Attachment, SR/SSD 90-23, Fort Worth, Texas.

Santamouris, M. 2015, "Regulating the damaged thermostat of the cities-Status, impacts and mitigation challenges", *Energy Build.*, vol. 91, pp. 43-56.

Steadman, R.G. 1979 "The assessment of sultriness. Part I: A temperature-humidity index based on human physiology and clothing science", J. Appl. Meteorol., vol. 18, pp. 861-873.

Strandberg, G., Barring, A., Hansson, U., Jansson, C., Jones, C. & Kjellström, E. 2014, "CORDEX scenarios for Europe from the Rossby Centre regional climate model RCA4", Reports Meteorology and Climatology, No 116, SMHI, Norrköping, Sverige.

Tan, J., Zheng, Y., Tang, X., Guo, C., Li, L., Song, G., Zhen, X., Yuan, D., Kalkstein, A.J., Li, F. & Chen, H. 2010, "The urban heat island and its impact on heat waves and human health in Shanghai", Int. J. Biometeorol., vol. 54, pp. 75-84.

Theoharatos, G., Pantavou, K., Mavrakis, A., Spanou, A., Katavoutas, G., Efstathiou, P., Mpekas, P. & Asimakopoulos, D. 2010, "Heat waves observed in 2007 in Athens, Greece: synoptic conditions, bioclimatological assessment, air quality levels and health effects", Environ. Res., vol. 110, pp. 152-161.

VDI, 1998, "VDI 3787, Part I: environmental meteorology, methods for the human biometeorological evaluation of climate and air quality for the urban and regional planning at regional level", Part I: Climate. Beuth, Berlin.