

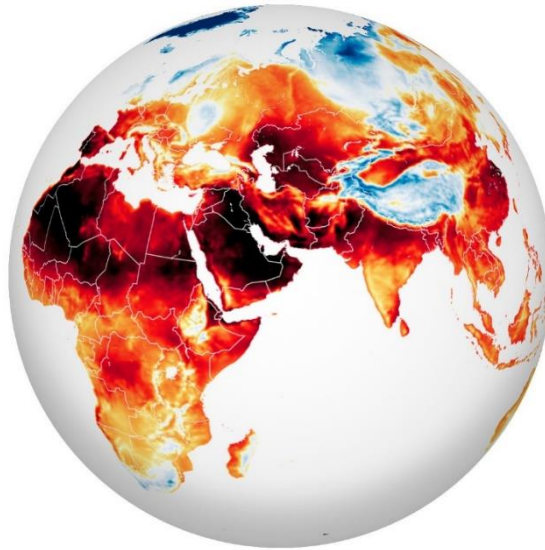


ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ  
Εθνικόν και Καποδιστριακόν  
Πανεπιστήμιον Αθηνών  
—ΙΔΡΥΘΕΝ ΤΟ 1837—

ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΦΥΣΙΚΗΣ  
ΤΟΜΕΑΣ ΦΥΣΙΚΗΣ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ – ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΑΣ

Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία  
Π.Μ.Σ. Φυσική Εφαρμογών

**Αξιοποίηση της επιφανειακής θερμοκρασίας εδάφους ως  
προγνωστικού στοιχείου για την εμφάνιση επεισοδίων  
καύσωνα και ξηρασίας**



**Καρίνου Φωτεινή**

**ΑΜ: 7110122200404**

**Τριμελής Επιτροπή εξέτασης:**

Καθηγητής Καρτάλης Κωνσταντίνος (Επιβλέπων)

Καθηγήτρια Φλόκα Έλενα

Δρ. Αγαθαγγελίδης Ηλίας

**ΑΘΗΝΑ 2024**



## Πρόλογος

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στα πλαίσια του Μεταπτυχιακού Προγράμματος Σπουδών «Φυσική Εφαρμογών» του Τομέα Φυσικής Περιβάλλοντος και Μετεωρολογίας του Τμήματος Φυσικής του Εθνικού και Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών, και πραγματεύεται την αξιοποίηση της επιφανειακής θερμοκρασίας εδάφους ως προγνωστικού στοιχείου για την εμφάνιση επεισοδίων καύσωνα και ξηρασίας.

Επιβλέπων ήταν ο Καθηγητής Καρτάλης Κωνσταντίνος, τον οποίο και ευχαριστώ θερμά για την ουσιαστική καθοδήγηση και τις γνώσεις που μου προσέφερε, αλλά και τον τρόπο σκέψης που εμμέσως με βοήθησε να αποκτήσω τόσο μέσα από την συνεργασία μας, όσο και μέσα από τα μαθήματα του.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω την Καθηγήτρια Φλόκα Έλενα, αφενός για το γεγονός ότι με τις γνώσεις και την εμπειρία της συνέβαλε στην διεκπεραίωση αυτής της εργασίας, αφετέρου και για την υποστήριξή της στο σύνολο των σπουδών μου.

Πολλά ευχαριστώ στον Δρ. Ηλία Αγαθαγγελίδη, που η βοήθειά του ήταν καθοριστική. Υπήρξε πάντοτε διαθέσιμος για να συζητήσουμε οποιαδήποτε ιδέα, σκέψη ή προβληματισμό, και η συνεργασία αυτή μου έδωσε πολύτιμα εφόδια για το μέλλον.

Δεν θα γινόταν να μην ευχαριστήσω την οικογένειά μου, η οποία με στηρίζει καθημερινά σε κάθε μου προσπάθεια να γίνω καλύτερη, και στάθηκε δίπλα μου καθ' όλη την περίοδο των σπουδών μου. Ευχαριστώ πολύ τους φίλους, τους συγγενείς και όσους ακόμα με στήριξαν. Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω όλη την ομάδα του Εργαστηρίου Τηλεπισκόπησης για την συνεργασία, καθώς και για το άψογο κλίμα το οποίο αντιμετώπισα.

Περιεχόμενα	
Περίληψη .....	5
Abstract .....	7
<b>Κεφάλαιο 1<sup>ο</sup>: Θεωρητικό Υπόβαθρο .....</b>	<b>8</b>
1.1 Κλιματική Αλλαγή .....	8
1.2 Καύσωνες .....	12
1.3 Επιφανειακό Ενεργειακό Ισοζύγιο .....	18
1.4 Κλιματική Αλλαγή .....	22
1.4.1 LST και Θερμοκρασία Αέρα .....	23
1.4.2 LST και Επιφανειακό Ενεργειακό Ισοζύγιο .....	24
1.4.3 LST και Κλιματική Αλλαγή .....	27
<b>Κεφάλαιο 2<sup>ο</sup>: Δεδομένα και Μεθοδολογία .....</b>	<b>31</b>
2.1 Δεδομένα .....	31
2.1.1 Δεδομένα MODIS LST .....	31
2.1.2 Βοηθητικά Σύνολα Δεδομένων .....	32
2.2 Μεθοδολογία .....	37
2.2.1 Υπολογισμός Δεικτών Ανωμαλιών Μέγιστης Επιφανειακής Θερμοκρασίας ( $LST_{max}$ ) .....	37
2.2.2 Μελέτη Καυσώνων και Ροών Ενέργειας σε Επιλεγμένα Σημεία ..	39
<b>Κεφάλαιο 3<sup>ο</sup>: Αποτελέσματα .....</b>	<b>43</b>
3.1 Υπολογισμός Δεικτών Ανωμαλιών Μέγιστης Επιφανειακής Θερμοκρασίας ( $LST_{max}$ ) .....	43
3.2 Μελέτη Καυσώνων και Ροών Ενέργειας σε Επιλεγμένα Σημεία .....	55
<b>Κεφάλαιο 4<sup>ο</sup>: Συμπεράσματα και Προτάσεις για Μελλοντική Έρευνα.....</b>	<b>65</b>
<b>Παράρτημα I.....</b>	<b>68</b>
<b>Βιβλιογραφία.....</b>	<b>81</b>

## Περίληψη

Τα τελευταία έτη έχει παρατηρηθεί στην Ευρώπη ότι τα επεισόδια καύσωνα τείνουν να είναι συχνότερα, να διαρκούν περισσότερο και να είναι εντονότερα. Συχνά οι καύσωνες συνοδεύονται και από φαινόμενα ξηρασίας, γεγονός που ενισχύει τις επιπτώσεις τους. Οι δορυφορικές παρατηρήσεις της επιφανειακής θερμοκρασίας του εδάφους (Land Surface Temperature, LST) επιτρέπουν τη δυνατότητα παρακολούθησης εκτενών περιοχών και μπορούν να συνεισφέρουν σημαντικά στην παρακολούθηση επεισοδίων καύσωνα/ξηρασίας, καθώς το LST διαμορφώνει άμεσα το επιφανειακό ενεργειακό ισοζύγιο που με τη σειρά του επηρεάζει τα επεισόδια καύσωνα/ξηρασίας.

Με βάση τα παραπάνω, στην παρούσα διπλωματική εργασία επιχειρείται αρχικά μέσω δορυφορικών παρατηρήσεων Aqua/MODIS (χωρική ανάλυση 1 Km x 1 Km) ο υπολογισμός και η διαχρονική εξέλιξη του ετήσιου μέγιστου LST και η σύνδεσή του με τα ισχυρότερα επεισόδια καύσωνα/ξηρασίας στην Ευρώπη (για τα έτη 2003 – 2023).

Τα ευρήματα της παρούσας μελέτης δείχνουν ότι το LST αποτυπώνει αποτελεσματικά τα λεπτομερή χωρικά μοτίβα που συνδέονται με τους καύσωνες και τις ξηρασίες στην Ευρώπη, αποδεικνύοντας ότι οι δορυφορικές παρατηρήσεις στο θερμικό υπέρυθρο είναι πολύτιμες για τη διερεύνηση της δυναμικής των επιφανειακών διεργασιών, ειδικότερα δε, υπό την συνθήκη της υπερθέρμανσης του πλανήτη.

Στη συνέχεια πραγματοποιείται μια πιο εστιασμένη μελέτη σε επιλεγμένες περιοχές της Ευρώπης, με σκοπό την ποσοτική αξιολόγηση του δυναμικού των θερμών ανωμαλιών του LST να λειτουργήσουν ως δείκτες των ημερών κατά τις οποίες διαμορφώνονται συνθήκες καύσωνα. Η παραπάνω ανάλυση γίνεται για τα σημεία όπου βρίσκονται εγκατεστημένοι οι μικρομετεωρολογικοί πύργοι του Ευρωπαϊκού δικτύου Integrated Carbon Observation System (ICOS). Η αξιοποίηση των παρατηρούμενων ροών θερμότητας του παραπάνω δικτύου επιτρέπει την καλύτερη κατανόηση της σύνδεσης μεταξύ της θερμοκρασίας εδάφους, της θερμοκρασίας αέρα, και του επιφανειακού ενεργειακού ισοζυγίου σε περιόδους καύσωνα/ξηρασίας, ανά διαφορετική κάλυψη γης. Τέλος, η σύνδεση εδάφους-επιφανείας μέσω της εδαφικής υγρασίας μπορεί να λειτουργήσει ως γενεσιουργός αιτία, μηχανισμός ενίσχυσης ή αποτέλεσμα ενός καύσωνα.

**Λέξεις κλειδιά:** Καύσωνες, ξηρασίες, κλιματική αλλαγή, τηλεπισκόπηση, επιφανειακή θερμοκρασία εδάφους

## **Abstract**

In recent years, in Europe, heatwaves tend to be more frequent, longer and more intense. Often heat waves are accompanied by drought events, a fact that further enhances their negative impacts. Satellite observations allow the monitoring of large areas; to this end by providing measurements of Land Surface Temperature (LST), can support an important assistance to the monitoring of heatwave/drought episodes, as LST directly shapes the surface energy balance.

Based on the above, the thesis first attempts, with the use of Aqua/MODIS satellite observations (at 1 Km spatial resolution), to estimate the annual maximum LST and its trend throughout the years, and correlate it to the strongest heatwave/drought episodes in Europe (for the years 2003 - 2023).

Findings reveal that LST effectively captures detailed spatial patterns linked to heatwaves and droughts in Europe, demonstrating that satellite-based observations are valuable for the investigation of land surface dynamics under global warming.

A more focused study is carried out next for selected regions of Europe to quantitatively assess the potential of warm LST anomalies to act as indicators of heatwave days. The above analysis is performed for the locations where the micro-meteorological towers of the European Integrated Carbon Observation System (ICOS) network are installed. Utilizing the observed heat fluxes of the above network allows a better understanding of the link between surface temperature, air temperature, and surface energy balance during heatwave/drought periods, for different land cover types. It is found that the land-surface coupling through soil moisture feedbacks may act as a driver, amplification mechanism or result of a heatwave.

**Key words:** Heatwaves, droughts, climate change, remote sensing, land surface temperature

## Κεφάλαιο 1<sup>ο</sup>

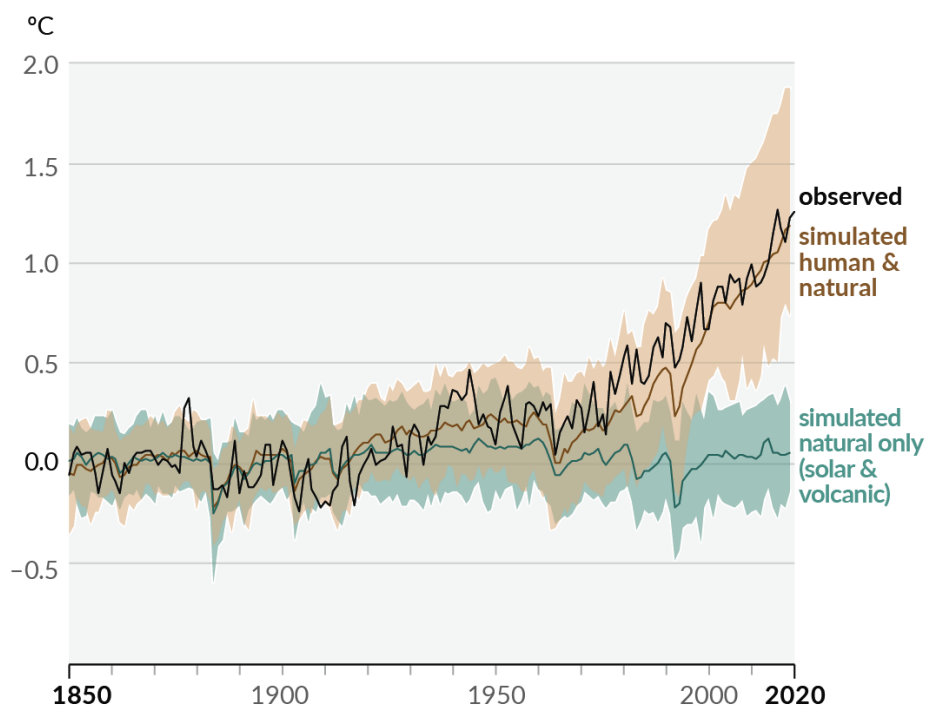
### Θεωρητικό Υπόβαθρο

#### 1.1 Κλιματική αλλαγή

Οι αλλαγές που παρατηρούνται στο κλίμα της Γης, κυρίως από τα μέσα του 20<sup>ου</sup> αιώνα και μετά, οφείλονται κατά κύριο λόγο στις ανθρώπινες δραστηριότητες και ιδίως στην καύση ορυκτών καυσίμων, με αποτέλεσμα την αύξηση των συγκεντρώσεων αερίων θερμοκηπίων και κατ' επέκταση την αύξηση της μέσης επιφανειακής θερμοκρασίας εδάφους του πλανήτη (Cartalis et al., 2001). Πέραν ωστόσο των ανθρωπίνων διεργασιών, δεν πρέπει να αγνοούνται και οι φυσικές διεργασίες οι οποίες επίσης μπορούν να συμβάλλουν στην αλλαγή του κλίματος, αν και σε σημαντικά μικρότερο βαθμό ως προς την ένταση της αλλαγής ή τη διάρκεια της. Παραδείγματα φυσικών διεργασιών που ενισχύουν την κλιματική αλλαγή είναι φαινόμενα όπως το El Niño/La Niña Southern Oscillation (ENSO), που αποτελεί ένα σχεδόν περιοδικό φαινόμενο σύζευξης ωκεανού-ατμόσφαιρας (Varotsos et al., 2018), η ηφαιστειακή δραστηριότητα, ο ενδεκαετής ηλιακός κύκλος, ακόμα και οι διακυμάνσεις στην τροχιά της Γης (Friis-Christensen and Lassen, 1991).

Ωστόσο, όπως φαίνεται στην Εικόνα 1 η επίδραση των φυσικών εξωτερικών παραγόντων από μόνη της δεν μπορεί να δικαιολογήσει την αύξηση της θερμοκρασίας που παρατηρείται. Επομένως, είναι εμφανές ότι το κλίμα μπορεί να παρουσιάζει μεταβολές όπου η θερμοκρασία, οι βροχοπτώσεις, ο άνεμος και άλλες κλιματικές παράμετροι εμφανίζουν διακυμάνσεις για δεκαετίες ή περισσότερο εξαιτίας φυσικών διεργασιών. Ωστόσο, ο πλανήτης σήμερα βιώνει πρωτοφανή ταχεία υπερθέρμανση που δεν οφείλεται σε φυσικά αίτια αλλά στις ανθρώπινες δραστηριότητες, κυρίως λόγω της καύσης ορυκτών καυσίμων που παράγουν αέρια του θερμοκηπίου. Συγκεκριμένα, η μέση θερμοκρασία της Γης έχει αυξηθεί περίπου 1.3 βαθμούς Κελσίου από τα μέσα του 19ου αιώνα. Το μεγαλύτερο μέρος της θέρμανσης σημειώθηκε τα τελευταία 40 χρόνια, με τα επτά πιο πρόσφατα χρόνια να είναι τα θερμότερα στην ιστορία.





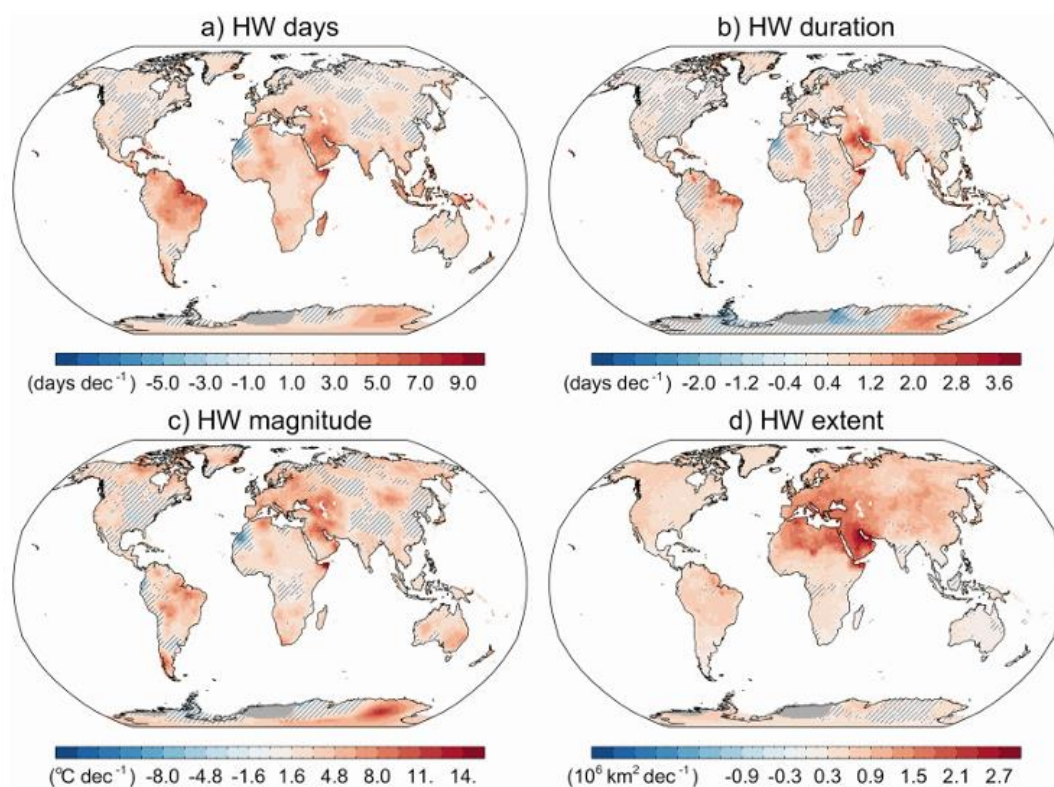
**Εικόνα 1:** Μεταβολή της θερμοκρασίας της Γης από το 1850 έως το 2020. Μαύρη γραμμή: καταγεγραμμένες τιμές, πράσινη γραμμή: επίδραση φυσικών παραγόντων (αλλαγές στην τροχιά της Γης, ηλιακή δραστηριότητα, ηφαίστεια), καφέ γραμμή: επίδραση φυσικών και ανθρωπογενών παραγόντων (Πηγή: IPCC).

Όσον αφορά την περιοχή της Ευρώπης, η οποία αποτελεί την υπό εξέταση περιοχή της παρούσας εργασίας, η αύξηση των μέσων θερμοκρασιών καθώς και οι αλλαγές στην συχνότητα των βροχοπτώσεων, υποδεικνύουν πως η κλιματική αλλαγή είναι ιδιαίτερα έντονη. Η κλιματική αλλαγή επηρεάζει τις πόλεις και τα οικοσυστήματα, ενώ παράλληλα, οι αλλαγές στη συχνότητα και στην ένταση ακραίων φαινομένων, όπως καύσωνες (Εικόνα 2), πυρκαγιές, ξηρασίες, πλημμύρες και βροχοπτώσεις, έχουν σημαντικές επιπτώσεις τόσο στην υγεία, όσο και στην κοινωνία (Cartalis, 2016).

Οι ακραία υψηλές θερμοκρασίες (θερμές ημέρες, τροπικές νύχτες και κύματα καύσωνα) έχουν γίνει πιο συχνές (Vautard et al., 2013), ενώ οι ακραία χαμηλές θερμοκρασίες (κύματα ψύχους, ημέρες παγετού) έχουν κατά αντίστροφο τρόπο, γίνει λιγότερο συχνές στην Ευρώπη (EEA, 2012).

Τα κλιματικά μοντέλα υποδεικνύουν σημαντική συμφωνία στην υπερθέρμανση, με την ισχυρότερη θέρμανση να σημειώνεται στη Νότια Ευρώπη κατά τους θερινούς μήνες (Hertig and Jacobeit, 2008; Vautard et al., 2014). Η πιθανή αύξηση της συχνότητας και της έντασης των κυμάτων καύσωνα, ιδιαίτερα στη νότια Ευρώπη, προβλέπεται να αυξήσει τους θανάτους

που αποδίδονται στις υψηλές θερμοκρασίες, εκτός εάν ληφθούν μέτρα προσαρμογής (Baccini et al., 2011; Guo et al., 2018). Χωρίς προσαρμογή, προβλέπονται μεταξύ 60,000 και 165,000 επιπλέον θάνατοι που σχετίζονται με θερμές συνθήκες ετησίως στην Ευρωπαϊκή Ένωση έως τη δεκαετία του 2080, ανάλογα με τα διάφορα σενάρια συγκεντρώσεων θερμοκηπιακών αερίων (Ciscar et al., 2011).

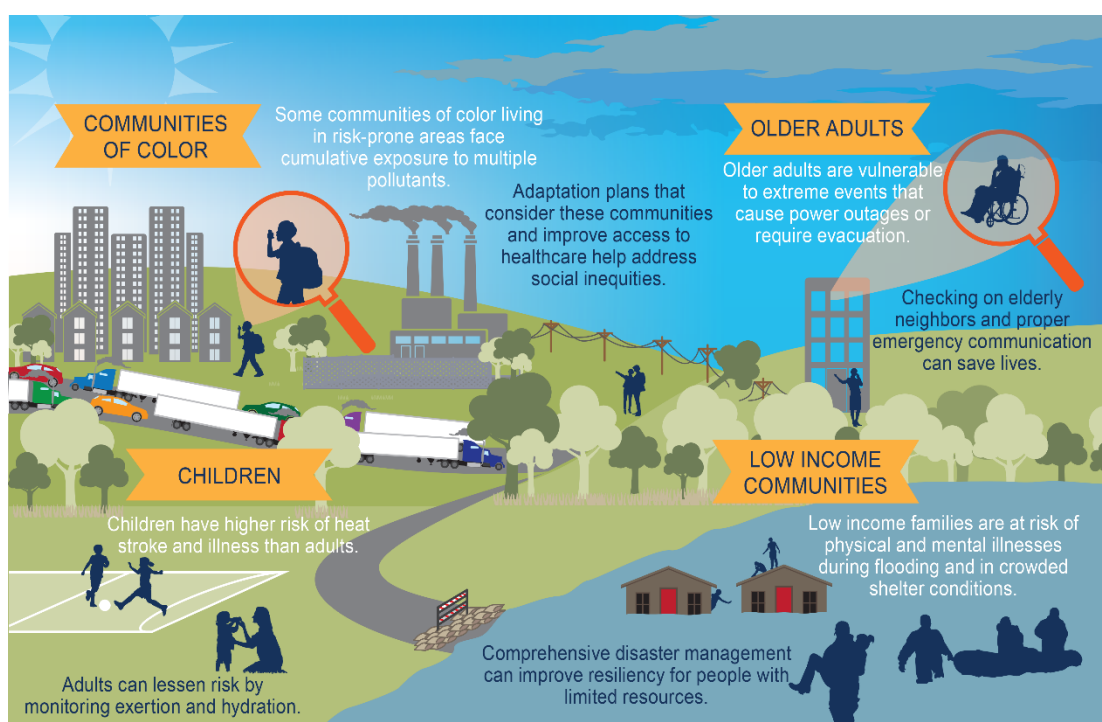


**Εικόνα 2:** Διαχρονικές τάσεις (1950–2021) των χαρακτηριστικών των κυμάτων καύσωνα για τους θερινούς μήνες: (a) τάση ετήσιας συχνότητας ημερών καύσωνα (σε days dec<sup>-1</sup>), (b) τάση μέγιστης διάρκειας κύματος καύσωνα ανά έτος (σε days dec<sup>-1</sup>), (c) τάση έντασης κύματος καύσωνα (σε °C dec<sup>-1</sup>), (d) τάση ετήσιας μέγιστης έκτασης υπό καύσωνα (σε 10<sup>6</sup> km<sup>2</sup> dec<sup>-1</sup>) (Barriopedro et al., 2023).

Οι επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής στην ανθρώπινη υγεία είναι μείζονος σημασίας, αφού είναι πιθανό να σχετίζονται με εξάπλωση ασθενειών που μεταδίδονται με φορείς, με τραυματισμούς και θανάτους λόγω ακραίων καιρικών συνθηκών όπως πλημμύρες, καταιγίδες και κυκλώνες και με θερμική εξάντληση ή θερμοπληξία λόγω έκθεσης στη ζέση. Ακόμη, σημαντικός είναι ο κίνδυνος της ενίσχυσης της εξάπλωσης λοιμώξεων που μεταδίδονται στο νερό λόγω των πλημμυρών. Σπουδαία επίπτωση είναι και η υπερθέρμανση των παράκτιων υδάτων καθώς και η μείωση των αποδόσεων των τοπικών καλλιεργειών που οδηγεί σε υποσιτισμό (Calzadilla et al., 2013; Jacob et al.,

2018; Majra and Gur, 2009; McMichael et al., 2006; Paavola, 2017). Σημαντική εν τούτοις είναι και η επίδραση των υψηλότερων θερμοκρασιών και της θερμικής καταπόνησης στην ψυχική υγεία των ατόμων (Padhy et al., 2015).

Στην Εικόνα 3 απεικονίζονται παραδείγματα πληθυσμών με υψηλότερο κίνδυνο έκθεσης σε δυσμενείς απειλές για την υγεία που σχετίζονται με το κλίμα, τα οποία παρουσιάζονται μαζί με μέτρα προσαρμογής που μπορούν να βοηθήσουν στην αντιμετώπιση δυσανάλογων επιπτώσεων. Όταν εξετάζεται το πλήρες φάσμα των απειλών από την κλιματική αλλαγή καθώς και άλλες περιβαλλοντικές εκθέσεις, αυτές οι ομάδες είναι από τις πιο εκτεθειμένες, πιο ευαίσθητες και διαθέτουν τους λιγότερους ατομικούς και κρατικούς πόρους για να προετοιμαστούν και να ανταποκριθούν σε απειλές για την υγεία.



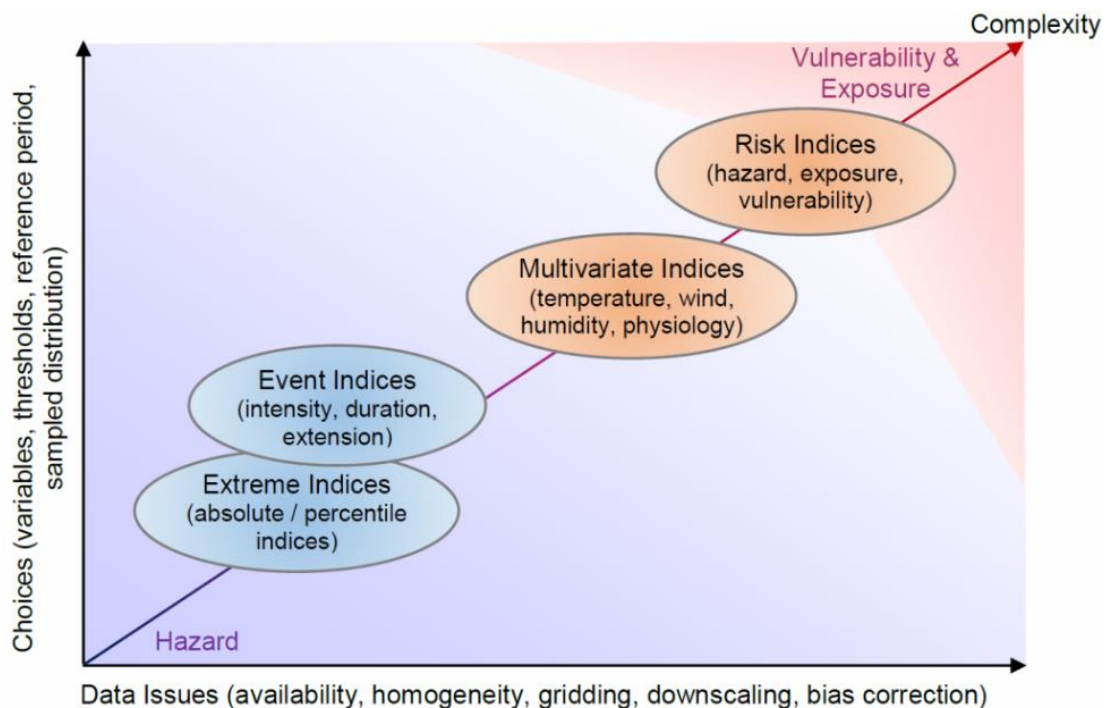
**Εικόνα 3:** Παραδείγματα πληθυσμών με υψηλότερο κίνδυνο έκθεσης σε δυσμενείς απειλές για την υγεία που σχετίζονται με το κλίμα και μέτρα προσαρμογής. Το λευκό κείμενο υποδεικνύει τους κινδύνους που αντιμετωπίζουν αυτές οι κοινότητες, ενώ το μπλε κείμενο υποδεικνύει ενέργειες που μπορούν να γίνουν για τη μείωση αυτών των κινδύνων (NOA, 2024).

Συμπερασματικά, ακόμη και υπό την επίδραση υπερθέρμανσης του κλίματος που περιορίζεται στους 2°C σε σύγκριση με την προβιομηχανική εποχή, το κλίμα της Ευρώπης προβλέπεται να αλλάξει σημαντικά από τις σημερινές συνθήκες τις επόμενες δεκαετίες (Cartalis, 2016), με την συχνότητα των ακραίων θερμοκρασιών να αυξάνεται αισθητά (Luber and McGeehin, 2008).

## 1.2 Καύσωνες

Σε ένα μέλλον που χαρακτηρίζεται από αύξηση της θερμοκρασίας λόγω της κλιματικής αλλαγής, οι καύσωνες αναμένεται όχι μόνο να εμφανίζονται πιο συχνά, αλλά εκτιμάται – με υψηλό βαθμό εμπιστοσύνης (high confidence) – ότι θα έχουν μεγαλύτερη διάρκεια και ένταση (Dosio et al., 2018; IPCC, 2023, n.d.).

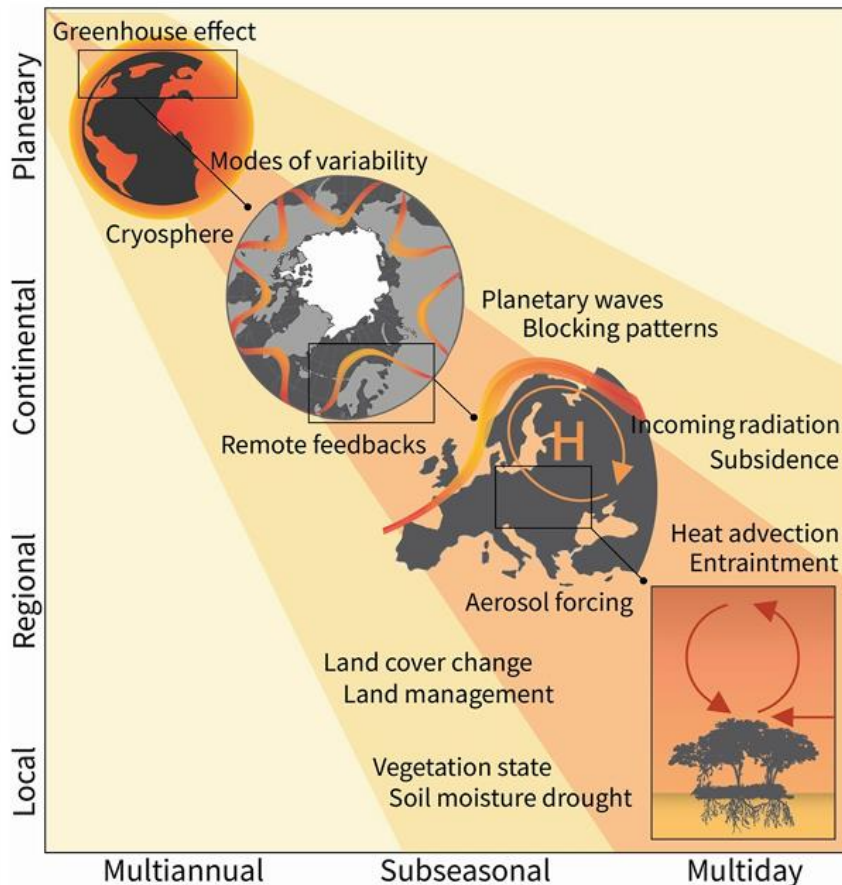
Οι καύσωνες είναι περίοδοι με θερμοκρασίες σημαντικά υψηλότερες από τις μέσες τιμές που καταγράφονται σε ένα δεδομένο μέρος. Αυτό μπορεί να συμβεί οποιαδήποτε στιγμή του χρόνου, αλλά σε περιοχές με έντονη εποχικότητα, ο όρος χρησιμοποιείται συνήθως σε εκείνες που εμφανίζονται τους θερινούς μήνες. Δεν υπάρχει καθολικός ορισμός του καύσωνα (Εικόνα 4), αλλά η ελάχιστη ένταση (θερμοκρασίες πάνω από ένα ορισμένο όριο) και η διάρκεια (συνήθως τρεις συνεχόμενες ημέρες ή περισσότερες) είναι κοινά κριτήρια σε όλους τους ορισμούς. Ανάλογα με τον σκοπό, μπορούν να ληφθούν υπόψη πρόσθετες συνθήκες ή μεταβλητές για την αξιολόγηση των χαρακτηριστικών τους (π.χ. το εύρος) ή των σχετικών επιπτώσεων (π.χ. θερμική καταπόνηση) (Barriopedro et al., 2023).



Εικόνα 4: Σχηματική αναπαράσταση διαφορετικών ορισμών του καύσωνα. Με μπλε χρώμα απεικονίζονται οι δείκτες με βάση τη θερμοκρασία, ενώ με πορτοκαλί οι δείκτες που προσανατολίζονται στις επιπτώσεις του φαινομένου. Η κατανομή τους στο επίπεδο έχει γίνει σύμφωνα με το επίπεδο πολυπλοκότητας (διαγώνιος) (Barriopedro et al., 2023).

Τις τελευταίες δεκαετίες η Ευρώπη έχει βιώσει πολλούς, μεγάλης έντασης και διάρκειας καύσωνες (Russo et al., 2015), με σημαντικά με θετικές τάσεις από άλλες περιοχές μεσαίου γεωγραφικού πλάτους (Rousi et al., 2022). Τα ακραία αυτά φαινόμενα, είναι συνυφασμένα με αξιοσημείωτες επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία, την οικονομία, την κοινωνία και τα οικοσυστήματα (Amengual et al., 2014; García-León et al., 2021).

Αν και οι καύσωνες εκδηλώνονται ως τοπικά ενδοεποχιακά φαινόμενα, προκύπτουν από μετεωρολογικές διαδικασίες μεγάλης και μέσης κλίμακας που αλληλεπιδρούν με πολύπλοκους τρόπους και σε ένα ευρύ φάσμα χρονικών κλιμάκων (Εικόνα 5). Παράγοντες που επηρεάζουν την εκδήλωση καυσώνων είναι η ατμοσφαιρική κυκλοφορία, αλλά και βραδέως μεταβαλλόμενες κλιματικές συνιστώσες όπως η επιφάνεια της Γης και ο πάγος του άνω ωκεανού ή της θάλασσας (Coumou et al., 2018; Domeisen et al., 2023; Hoskins and Woollings, 2015; Miralles et al., 2019; Sillmann et al., 2017). Επιπλέον, οι μακροπρόθεσμες τάσεις στη συχνότητα, τη διάρκεια και την ένταση των καυσώνων, οφείλονται κατά βάση στην παγκόσμια (συγκεντρώσεις θερμοκηπιακών αερίων) και τοπική (χρήση/κάλυψη γης, αερολύματα) ανθρωπογενή επίδραση (Seneviratne et al., 2021). Σημειώνεται, βέβαια, ότι οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ των διεργασιών εμποδίζουν τον πλήρη διαχωρισμό των γενεσιουργών αίτιων (drivers) των καυσώνων σε χωροχρονικές κλίμακες καθώς τα αίτια αφενός μεν μπορεί να αλληλεπιδρούν μεταξύ τους σε πολλαπλές κλίμακες, αφετέρου δε, οι διεργασίες μικρότερης κλίμακας εξαρτώνται από καταστάσεις μεγαλύτερης κλίμακας που μπορεί να τις επηρεάσουν (Barriopedro et al., 2023).



Εικόνα 5: Χωρικές και χρονικές κλίμακες των γενεσιουργών αίτιων χαρακτηριστικών επεισοδίων καύσιων. Διάγραμμα που προσδιορίζει τις σημαντικότερες διεργασίες που διαμορφώνουν τα κύματα καύσιων και τις σχετικές κλίμακες τους, από την πλανητική στην τοπική χωρική κλίμακα και από την πολυετή έως την ημερήσια χρονική κλίμακα (Barriopedro et al., 2023).

Οι συνηθέστερες αιτίες ενός επεισοδίου καύσιων στην Ευρώπη είναι τα επίμονα στάσιμα συστήματα υψηλών βαρομετρικών πιέσεων (αντικυκλωνική ροή) (Hatzaki et al., 2014), καθώς και τα γεγονότα Ωμέγα εμποδισμού που συχνά συνοδεύονται από κύματα Rossby και την κύρτωση αεροχειμάρρου (Barriopedro et al., 2023). Στη Νότια Ευρώπη, οι Ωμέγα εμποδισμοί κατά τη διάρκεια των κυμάτων καύσιων είναι σχετικά λιγότερο έντονοι (Zschenderlein et al., 2019). Αντίθετα ιδιαίτερα σημαντική είναι η επιρροή των επεισοδίων καύσιων από την μεταφορά θερμών αερίων μαζών από την Σαχάρα.

Επιπροσθέτως, παράγοντες όπως η βλάστηση και η περιεκτικότητα σε υγρασία του εδάφους, μπορούν να υποκινήσουν και να επιδεινώσουν τα κύματα καύσιων μέσω πολύπλοκων ανατροφοδοτήσεων με την ατμόσφαιρα (Barriopedro et al., 2023). Η μειωμένη υγρασία του εδάφους έχει αποδειχθεί,

τόσο από παρατηρησιακά δεδομένα όσο και από προσομοιώσεις μοντέλων διαφορετικής πολυπλοκότητας, ότι αυξάνει τη μεταβλητότητα της θερμοκρασίας το καλοκαίρι και ενισχύει την ένταση και πιθανώς τη διάρκεια των καυσώνων (Fischer et al., 2007a; Hirschi et al., 2014; Lorenz et al., 2010; Miralles et al., 2014; Mueller and Seneviratne, 2014; Suarez-Gutierrez et al., 2020).

Τα κύματα καύσωνα συχνά συνοδεύονται και από άλλους κινδύνους, όπως ξηρασίες, γεγονότα ατμοσφαιρικής ρύπανσης ή πυρκαγιές. Ωστόσο, πιο συχνά, η συνδυασμένη εμφάνισή τους έχει να κάνει με ανατροφοδοτήσεις ξηράς-ατμόσφαιρας που προκαλούν την επιδείνωση αυτών των κινδύνων μεταξύ τους. Για παράδειγμα, τα κύματα καύσωνα συμβάλλουν στην αποξήρανση του εδάφους και εντείνουν τη σοβαρότητα της ξηρασίας, η οποία με τη σειρά της είναι ένας πρόδρομος των κυμάτων καύσωνα αλλά και παράγοντας ενίσχυσης τους.

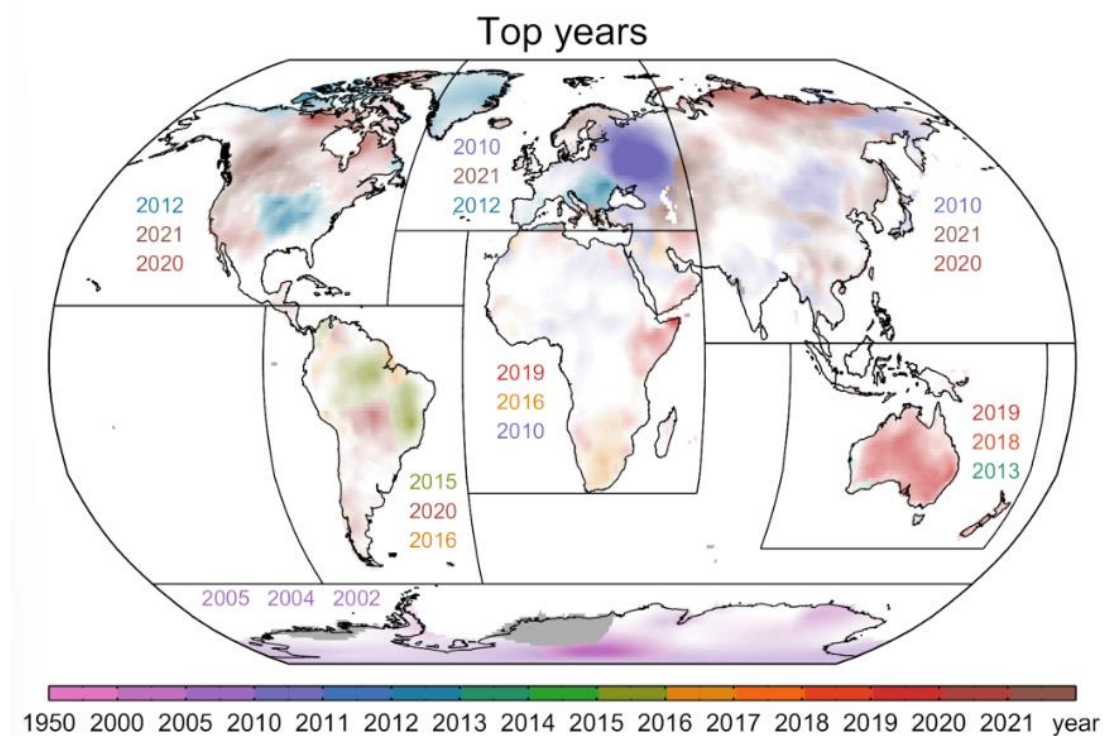
Τα επεισόδια καύσωνα συνδέονται επίσης συχνά με στασιμότητα του αέρα (δηλαδή παγιδευμένες μάζες αέρα σε μια δεδομένη περιοχή), η οποία εμποδίζει τη διασπορά και τη διάχυση των ρύπων στην κατώτερη ατμόσφαιρα, οδηγώντας σε σημαντική υποβάθμιση της ποιότητας του αέρα (π.χ. αυξημένες συγκεντρώσεις όζοντος και σωματιδίων κοντά στην επιφάνεια). Οι ακραίες θερμικές συνθήκες, σε συνδυασμό με τη χαμηλή υγρασία και τους δυνατούς ανέμους, αντιπροσωπεύουν ευνοϊκούς ατμοσφαιρικούς παράγοντες δασικών πυρκαγιών, οι οποίες αποτελούν σημαντικές απειλές σε περιοχές με ξηρή βλάστηση, όπως οι σαβάνες της Μεσογείου στην Ευρώπη, την Αυστραλία και την Αμερική (Barriopedro et al., 2023).

Η μελέτη των κυμάτων καύσωνα σε διαφορετικές χωρικές και χρονικές κλίμακες απαιτεί διαφορετική προσέγγιση ανά περίπτωση έχουν τα δικά τους ζητήματα και προκλήσεις (Εικόνα 4), αλλά όλες προσφέρουν συμπληρωματική αλληλοκατανόηση και πολλαπλά οφέλη στην πρόβλεψη των καυσώνων και την ανάπτυξη αποτελεσματικών συστημάτων έγκαιρης προειδοποίησης και στρατηγικών προσαρμογής. Παραδείγματος χάρη, σε αστικές περιοχές, όπου οι υψηλές θερμοκρασίες μεγεθύνονται από το φαινόμενο της αστικής θερμικής νησίδας, οι μελέτες πρέπει να λαμβάνουν υπόψη τοπικούς παράγοντες (π.χ. σχεδιασμός της πόλης, πράσινοι χώροι, πληθυσμός), για τον μετριασμό των επιπτώσεων των κυμάτων καύσωνα στην υγεία, την παραγωγικότητα της εργασίας, τη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας ή τις υποδομές (Paravantis et al., 2017).

Σε μεγαλύτερες χωροχρονικές κλίμακες, η κατανόηση των κυμάτων καύσωνα ωφελεί την ακρίβεια των προβλέψεων πέρα από τους καιρικούς

ορίζοντες, που απαιτούνται για την πρόβλεψη μεγάλων κυμάτων καύσωνα με καταστροφικές επιπτώσεις στα φυσικά οικοσυστήματα, τον κύκλο του άνθρακα και ορισμένους κοινωνικοοικονομικούς τομείς. Ακόμη, οι εκτιμήσεις του παγκόσμιου κλίματος επιτρέπουν στους ερευνητές να δημιουργήσουν ισχυρούς δεσμούς με την υπερθέρμανση του πλανήτη, να βελτιώσουν τις μελλοντικές προβλέψεις, να διερευνήσουν τα κατώτατα όρια στις προσαρμοστικές ικανότητες και να καθοδηγήσουν την ανάπτυξη κοινών στρατηγικών μετριασμού.

Όσον αφορά τις μελλοντικές εκτιμήσεις που αφορούν τους καύσωνες, τα κλιματικά μοντέλα επιτρέπουν στους ερευνητές να αξιολογήσουν τις μελλοντικές αλλαγές τόσο σε παγκόσμια, όσο και σε τοπική κλίμακα. Η εξελισσόμενη υπερθέρμανση του πλανήτη εκτιμάται ότι θα έχει ως αποτέλεσμα καύσωνες με μεγαλύτερη διάρκεια, ένταση και διάρκεια στις περισσότερες χερσαίες περιοχές. Οι μελλοντικοί καύσωνες αναμένεται να είναι ισχυρότεροι, ακόμα και από πρόσφατα επεισόδια καύσωνα κατά τα οποία σημειώθηκαν πρωτοφανείς υψηλές θερμοκρασίες που υπερέβησαν τα προηγούμενα ρεκόρ δεκαετιών (Εικόνα 6) (Barriopedro et al., 2023).



**Εικόνα 6:** Χάρτης των πιο έντονων κυμάτων καύσωνα της περιόδου 1950–2021 ανά ήπειρο, ταξινομημένους με βάση την έντασή τους. Τα χρώματα αντιστοιχούν στα έτη εμφάνισης, τα οποία επίσης αναφέρονται. Η γκρι σκίαση προσδιορίζει περιοχές όπου λείπουν δεδομένα (Barriopedro et al., 2023).



Ανεξάρτητα από το σενάριο των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου, η ένταση των ακραία υψηλών θερμοκρασιών τείνει να αυξάνεται γραμμικά με την υπερθέρμανση του πλανήτη, αν και με σημαντικές διακυμάνσεις μεταξύ των περιοχών και των χαρακτηριστικών των κυμάτων καύσωνα (Fischer et al., 2021). Οι προβλεπόμενες αυξήσεις της θερμοκρασίας συχνά ποικίλλουν ανάλογα με τη σπανιότητα του γεγονότος. Για παράδειγμα, μια θερμή ημέρα με συχνότητα εμφάνισης μία φορά κάθε 20 έτη στο σημερινό κλίμα θα ήταν περίπου 2.5 φορές πιο πιθανή σε έναν κόσμο όπου η μέση θερμοκρασία έχει αυξηθεί κατά 2°C (Molina et al., 2020).

Τα τελευταία έτη σημειώθηκε σημαντική πρόοδος στην κατανόηση των μηχανισμών δημιουργίας των καυσώνων, τις δυνατότητες παρατήρησης τους, και την ανάπτυξη στατιστικών μοντέλων και μοντέλων που βασίζονται στις φυσικές διεργασίες. Αυτό συνέβαλε σε πιο ακριβείς μετεωρολογικές προβλέψεις και βελτιωμένες δυνατότητες πρόβλεψης των κυμάτων καύσωνα σε υπο-εποχιακές (subseasonal) κλίμακες (άνω των δύο εβδομάδων). Μετά το κύμα καύσωνα του 2003, πολλές ευρωπαϊκές χώρες εγκαινίασαν επιτυχημένα συστήματα προειδοποίησης για τη θερμική καταπόνηση, προκειμένου να μετριάσουν τις επιπτώσεις που σχετίζονται με τη ζέστη στον πληθυσμό.

Οι υπο-εποχιακές προβλέψεις έχουν τη δυνατότητα να παρέχουν αξιόπιστες προληπτικές πληροφορίες για την ανάπτυξη συστημάτων έγκαιρης προειδοποίησης σε πολλούς κοινωνικοοικονομικούς τομείς που σχετίζονται με τη γεωργία, την ενέργεια και το νερό (π.χ. διαχείριση κινδύνου δασικών πυρκαγιών, ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας ή υδάτινους πόρους) (Barriopedro et al., 2023). Σε μεγαλύτερες χρονικές κλίμακες, η τρέχουσα γνώση σχετικά με τις μελλοντικές αλλαγές στα κύματα καύσωνα είναι χρήσιμη για να καθοδηγήσει τη λήψη αποφάσεων σε στρατηγικές μετριασμού και προσαρμογής (π.χ. σχεδιασμός πιο πράσινων πόλεων για τη μείωση του φαινομένου της αστικής θερμικής νησίδας) (Agathangelidis et al., 2023).

### **1.3 Επιφανειακό Ενεργειακό Ισοζύγιο**

Μια επιφάνεια υπό κλιματικούς όρους αντιπροσωπεύει μια διεπαφή που χωρίζει ό,τι βρίσκεται εκατέρωθεν. Εξ ορισμού, δεν μπορεί να αποθηκεύσει ενέργεια, αλλά είναι ένα επίπεδο στο οποίο ανταλλάσσεται ενέργεια και το άθροισμα αυτών των ανταλλαγών πρέπει να είναι μηδέν. Εάν αντί για επιφάνεια θεωρηθεί όγκος η αθροιστική ανταλλαγή σε όλες τις οριοθετημένες επιφάνειες δεν χρειάζεται να είναι μηδέν: μια θετική τιμή υποδηλώνει αύξηση του ενεργειακού περιεχομένου (σύγκλιση) λόγω της συσσώρευσης και αποθήκευσης ενέργειας και αντίστροφα (απόκλιση) (Stewart and Mills, 2021).

Το επιφανειακό ενεργειακό ισοζύγιο είναι βασική παράμετρος οποιασδήποτε θεωρητικής περιγραφής του κλιματικού συστήματος της Γης. Μπορεί να εκτιμηθεί τοπικά στην κλίμακα του οικοσυστήματος εάν οι τυρβώδεις ροές θερμότητας, η ροή θερμότητας του εδάφους και η καθαρή ακτινοβολία μετρούνται ανεξάρτητα η μία από την άλλη (Mauder et al., 2020).

Βάσει των παραπάνω, η εξίσωση του επιφανειακού ενεργειακού ισοζυγίου του εδάφους μπορεί να γραφεί ως:

$$Q^* = Q_H + Q_E + Q_G$$

όπου  $Q^*$  η «καθαρή» (net) ροή ακτινοβολίας,  $Q_H$  η τυρβώδης ροή αισθητής θερμότητας,  $Q_E$  η τυρβώδης ροή λανθάνουσας θερμότητας και  $Q_G$  η ροή θερμότητας του υποστρώματος του εδάφους στην επιφάνεια. Όλοι οι παραπάνω όροι του ενεργειακού ισοζυγίου κατά κανόνα δίνονται σε μονάδες μέτρησης  $Wm^{-2}$ .

Πρέπει να σημειωθεί ότι ως «καθαρή» ροή ακτινοβολίας (ισοζύγιο ακτινοβολίας) ορίζεται η διαφορά της εισερχόμενης ( $\downarrow$ ) και εξερχόμενης ( $\uparrow$ ) ακτινοβολίας σε μία επιφάνεια. Συνεπώς, ισχύει ότι:

$$Q^* = K\downarrow - K\uparrow + L\downarrow - L\uparrow$$

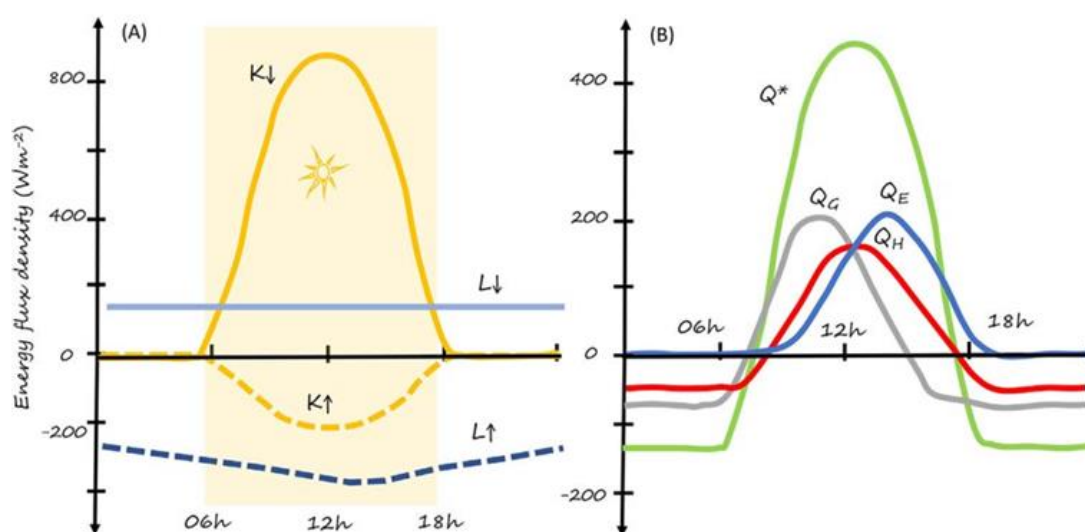
όπου  $K$  και  $L$  οι μικρού και μεγάλου μήκους κύματος ακτινοβολίες αντίστοιχα.

Η Εικόνα 7 παρουσιάζει την τυπική ημερήσια διακύμανση των ροών ακτινοβολίας (Εικόνα 7A) και θερμότητας (Εικόνα 7B) σε μία επιφάνεια που καλύπτεται από γρασίδι (grass) υπό αίθριο ουρανό και ασθενείς ανέμους. Τη νύχτα, το έδαφος ψύχεται από ακτινοβολία ( $Q^* < 0$ ) και αυτή η απώλεια αντισταθμίζεται με τη μεταφορά ενέργειας από το υπόστρωμα ( $Q_G < 0$ ) και από τον υπερκείμενο αέρα προς την επιφάνεια ( $Q_H + Q_E < 0$ ). Ομοίως, κατά τη διάρκεια της ημέρας το έδαφος θερμαίνεται από ακτινοβολία και η ενέργεια μεταφέρεται στην ατμόσφαιρα και το υπόστρωμα, θερμαίνοντας το υπόστρωμα

και τον αέρα κοντά στην επιφάνεια και αυξάνοντας την περιεκτικότητά του σε υδρατμούς λόγω εξάτμισης.

Μετά την ανατολή, το  $Q^*$  αυξάνεται και γίνεται θετικό. Αρχικά, αυτή η ενέργεια διοχετεύεται στο υπόστρωμα ( $Q_G$ ), ενώ η απόκριση των τυρβωδών ανταλλαγών ( $Q_H$  και  $Q_E$ ) καθυστερεί. Το  $Q_G$  φτάνει στο μέγιστο πριν από το μεσημέρι και μειώνεται το απόγευμα, ενώ καθίσταται αρνητικό πριν από τη δύση του ηλίου. Συγκριτικά, τα  $Q_H$  και  $Q_E$  κορυφώνονται μετά το μεσημέρι προτού αρχίσουν να φθίνουν έως ότου γίνουν μηδενικά ή αρνητικά μετά τη δύση του ηλίου.

Σημειώνεται ότι στην Εικόνα 7,  $Q_E > Q_H$  για μεγάλο μέρος της ημέρας, υποδεικνύοντας ότι για μια επιφάνεια όπου το νερό είναι άμεσα διαθέσιμο, το  $Q^*$  διοχετεύεται κατά προτίμηση στην εξάτμιση του νερού μέσω των φυτών (εξατμισοδιαπνοή). Ένα χρήσιμο μέτρο των σχετικών ρόλων αυτών των δύο ροών είναι ο λόγος Bowen ( $\beta$ ), που είναι απλώς ο λόγος  $Q_H/Q_E$ : αν  $\beta < 1$  κυριαρχεί η εξάτμιση, ενώ αν  $\beta > 1$  κυριαρχεί η θέρμανση (Stewart and Mills, 2021).

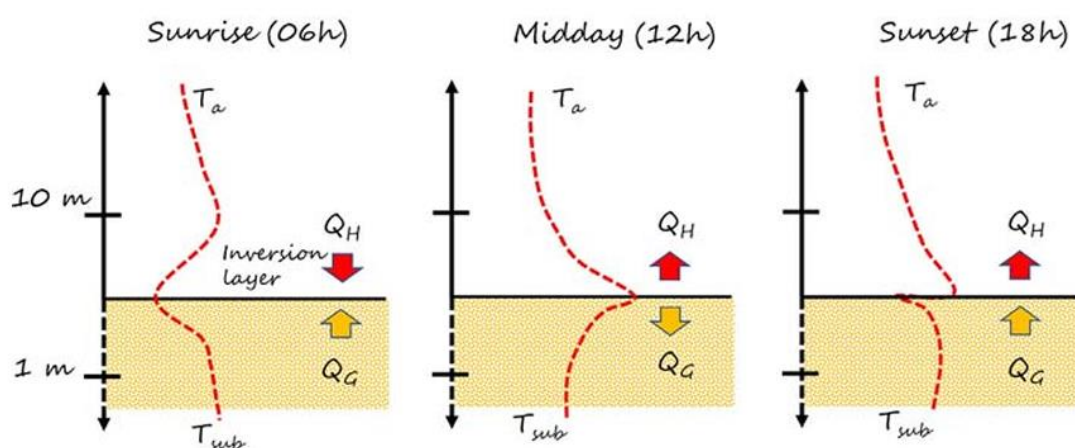


Εικόνα 7: Μια γενική απεικόνιση του (A) επιφανειακού ισοζυγίου ακτινοβολίας και (B) επιφανειακού ενεργειακού ισοζυγίου κατά τη διάρκεια μιας ηλιόλουστης ημέρας για μια επιφάνεια γρασιδιού (Stewart and Mills, 2021).

Οι ροές ενέργειας προκαλούν αλλαγές τόσο στη θερμοκρασία του υποστρώματος ( $T_{sub}$ ) όσο και στον υπερκείμενο αέρα ( $T_a$ ) (Εικόνα 8). Κατά τη διάρκεια του πρωινού, η σύγκλιση του  $Q_G$ , σε μια σειρά στρωμάτων σε αυξανόμενο βάθος, προκαλεί την αλλαγή του προφίλ καθώς ένα «κύμα» θέρμανσης εκτείνεται προς τα κάτω. Αργά το απόγευμα το έδαφος αρχίζει να

ψύχεται. Το  $Q_G$  κατευθύνεται στη φάση αυτή προς την επιφάνεια του εδάφους. Το έδαφος ψύχεται κατά τη διάρκεια της νύχτας λόγω της απώλειας μεγάλου μήκους κύματος ακτινοβολίας και η θερμότητα απομακρύνεται από το υπόστρωμα ( $Q_G < 0$ ), δημιουργώντας ανεστραμμένα προφίλ θερμοκρασίας. Σε σύγκριση με το υγρό έδαφος, η «δεξαμενή» θερμότητας στο ξηρό έδαφος είναι μικρή και εξαντλείται γρήγορα, και όπως η επιφάνεια του εδάφους θερμάνθηκε γρήγορα κατά τη διάρκεια της ημέρας, ομοίως ψύχεται γρήγορα τη νύχτα.

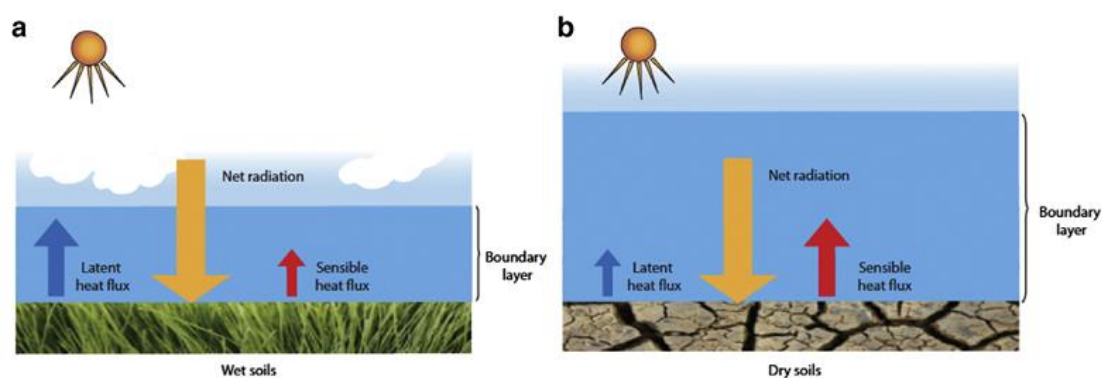
Η θερμική διαστρωμάτωση της ατμόσφαιρας συνδέεται με την ελεύθερη μεταφορά (free convection). Κατά τη διάρκεια της νύχτας, η ψύξη του σχεδόν επιφανειακού στρώματος αέρα προκαλεί αναστροφή θερμοκρασίας ( $\Delta T_a < 0$ ) η οποία εμποδίζει τη μεταφορά. Μετά την ανατολή του ηλίου, η θέρμανση της επιφάνειας θερμαίνει τελικά αυτό το στρώμα επαρκώς για να δημιουργήσει μεταφορά. Στη συνέχεια, η ανάμιξη επεκτείνει την επίδραση της θερμαινόμενης επιφάνειας προς τα πάνω, καθώς ο θερμότερος αέρας πιο κοντά στο έδαφος μετατοπίζεται και ο ψυχρότερος αέρας κινείται προς τα κάτω. Το μέγεθος του  $\Delta T_a$  καθορίζει την ένταση της ανάμιξης. Όταν το  $\Delta T_a$  υπερβεί τους  $0,01 \text{ }^\circ\text{C m}^{-1}$ , η ατμόσφαιρα είναι ασταθής και η κάθετη ανάμιξη συμβαίνει εύκολα. Μετά τη δύση του ηλίου, το έδαφος αρχίζει να ψύχεται, το  $Q_H$  αντιστρέφεται και ο αέρας κοντά στην επιφάνεια ψύχεται (Stewart and Mills, 2021).



**Εικόνα 8:** Η θερμική απόκριση της ατμόσφαιρας κοντά στην επιφάνεια του εδάφους και του υποστρώματος στις ανταλλαγές ενέργειας που απεικονίζονται στην Εικόνα 4 κατά την ανατολή, το μεσημέρι και τη δύση του ηλίου (Stewart and Mills, 2021).

Η υγρασία του εδάφους μπορεί να επηρεάσει σημαντικά τις ροές αισθητής και λανθάνουσας θερμότητας (Εικόνα 9), και κατ' επέκταση την ένταση ενός κύματος καύσιμα. Παρόλο που η εμφάνιση καλοκαιρινών καυσώνων αποδίδεται κυρίως στην ύπαρξη αντικυκλώνων εμποδισμού, όπως έχει ήδη

αναφερθεί, η παρατεταμένη ανοιξιότικη ξηρασία μπορεί να παίξει καταλυτικό ρόλο, ιδίως στην Κεντρική Ευρώπη (Martins et al., 2023). Επιπλέον, οι επικρατούσες συνοπτικές συνθήκες κατά τη διάρκεια ενός καύσωνα έχουν ως αποτέλεσμα μειωμένη νεφοκάλυψη και υψηλό έλλειμμα τάσης ατμών (ξηρή ατμόσφαιρα), ενισχύοντας την εξάτμιση από το έδαφος και τη διαπνοή των φυτών. Αυτή η σύζευξη εδάφους-ατμόσφαιρας είναι πιθανό να οδηγήσει τελικά σε πολύ μικρή επιφανειακή υγρασία και σημαντικά ενισχυμένη αισθητή ροή θερμότητας, ενισχύοντας και επεκτείνοντας πιθανώς ένα κύμα καύσωνα μέσω μιας ανατροφοδότησης (Benson and Dirmeyer, 2021; Miralles et al., 2019).



**Εικόνα 9:** Αλλαγές στην κατανομή των ροών αισθητής και λανθάνουσας θερμότητας σε υγρά (a) και ξηρά (b) εδάφη. Μικρότερο καθ' ύψος οριακό στρώμα, μειωμένη αισθητή ροή θερμότητας και ενισχυμένη ροή λανθάνουσας θερμότητας εμφανίζεται όταν τα εδάφη είναι υγρά, ωστόσο αυτό αντιστρέφεται υπό ξηρές συνθήκες. Αυτό εξηγεί σε ένα απλό πλαίσιο τη σύζευξη ξηρασίας και καύσωνα (Perkins, 2015).

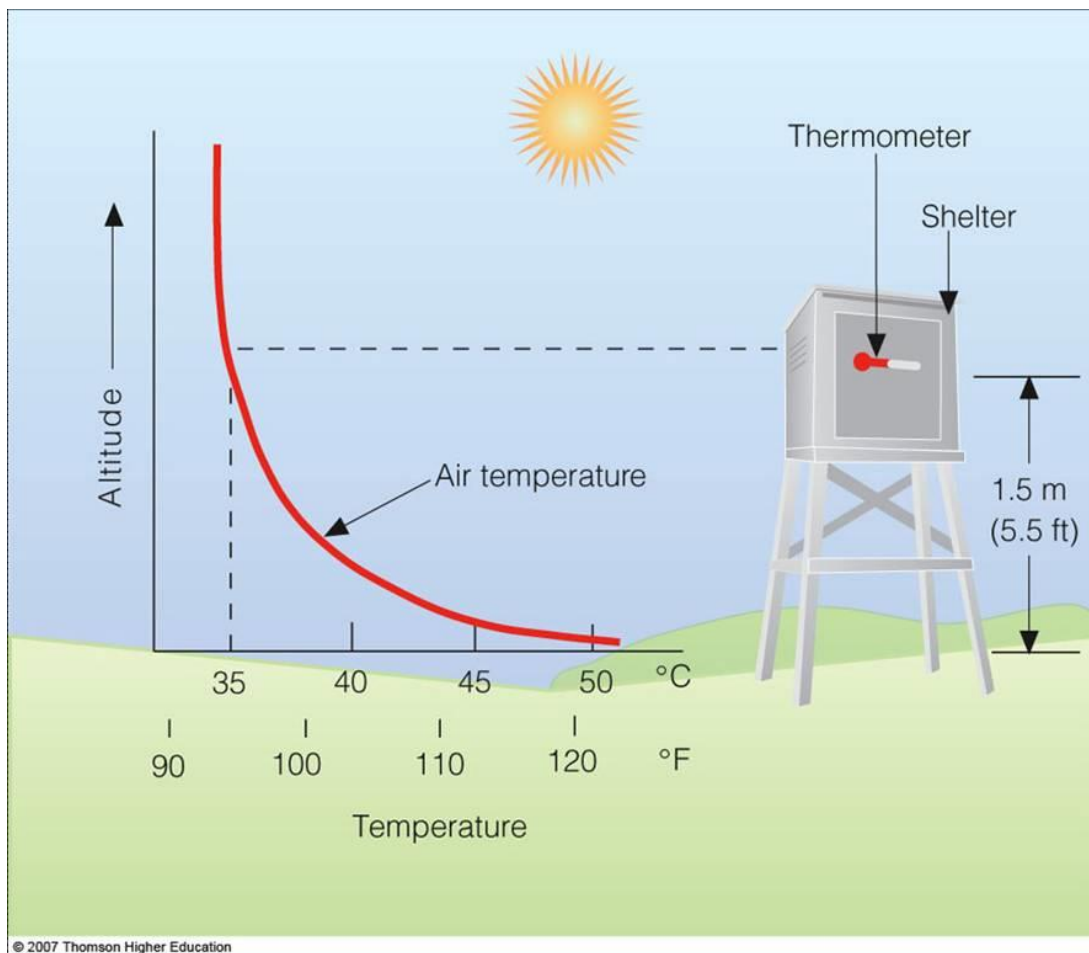
#### **1.4 Επιφανειακή Θερμοκρασία Εδάφους**

Η Επιφανειακή Θερμοκρασία Εδάφους (Land Surface Temperature – LST) αποτελεί βασική παράμετρο στη σύζευξη εδάφους-ατμόσφαιρας, διαμορφώνοντας άμεσα το επιφανειακό ισοζύγιο ενέργειας και νερού και ενεργώντας ως κινητήρια δύναμη πίσω από την ανταλλαγή μεγάλου μήκους κύματος ακτινοβολίας και τυρβωδών ροών (Li et al., 2013).

Το LST είναι μία από τις πιο σημαντικές μεταβλητές του κλιματικού συστήματος, καθώς ελέγχει τον καταμερισμό της ενέργειας σε λανθάνουσα και αισθητή ροή θερμότητας, αφού οι ροές αυτές επηρεάζονται από την υγρασία του εδάφους, η οποία συνδέεται άμεσα με το LST. Ταυτόχρονα αποτελεί έναν ισχυρό δείκτη των τάσεων της επιφανειακής θέρμανσης λόγω της κλιματικής αλλαγής (Schneider and Hook, 2010). Επιπλέον, χρησιμοποιείται για την εκτίμηση σημαντικών κλιματικών μεταβλητών, όπως η θερμοκρασία του αέρα και οι υδρατμοί της ατμόσφαιρας (Seemann et al., 2008; Susskind and Blaisdell, 2008; Yao et al., 2011). Η χρησιμότητα των δεδομένων LST έχει επίσης αποδειχθεί σε μια ευρεία ποικιλία ερευνητικών μελετών της επιστήμης της Γης, όπως για παράδειγμα, στην παρακολούθηση των επιπτώσεων της υπερθέρμανσης του πλανήτη στις λίμνες και στο λιώσιμο της κρυόσφαιρας (Hall et al., 2012; Schneider and Hook, 2010), στην ποσοτικοποίηση της επίδρασης της αστικής θερμικής νησίδας (Agathangelidis et al., 2016; Dousset and Gourmelon, 2003) και στην καλύτερη κατανόηση των χαρακτηριστικών των καυσώνων (Agathangelidis et al., 2022). Στον αγροτικό τομέα, χρονοσειρές δεδομένων LST συνήθως χρησιμοποιούνται για την δημιουργία δεικτών προκειμένου να χαρτογραφηθούν οι θερμικές απαιτήσεις διαφόρων καλλιεργειών, παραδείγματος χάρη αμπελοκαλλιεργειών (Zorer et al., 2012). Ακόμη, τα δεδομένα LST δίνουν τη δυνατότητα πρόβλεψης αφενός της ωρίμανσης των καλλιεργειών (Hall and Jones, 2010; Jones et al., 2010) και αφετέρου των προσβολών από έντομα (Pasotti et al., 2006). Όσον αφορά την δημόσια υγεία, το LST βρίσκει επίσης εκεί εφαρμογή, αφού μπορεί να φανεί χρήσιμο στην πρόβλεψη των ευνοϊκότερων περιοχών για την εκδήλωση ασθενειών που μεταδίδονται από φορείς, όπως αυτές που σχετίζονται με τις εξάρσεις των Ασιατικών κουνουπιών τίγρης στην Ευρώπη (Neteler et al., 2011).

### 1.4.1 LST και Θερμοκρασία Αέρα

Το LST δεν πρέπει να συγχέεται με τη θερμοκρασία του αέρα κοντά στην επιφάνεια, η οποία συνήθως μετράται σε μετεωρολογικούς κλωβούς (Εικόνα 10) και περιλαμβάνεται στις καθημερινές αναφορές καιρού. Παραδοσιακά, η μέτρηση της θερμοκρασίας γίνεται με ένα in-situ θερμόμετρο σε έναν μετεωρολογικό κλωβό στα 1.5 – 2 m ύψος, και με καλή θερμική επαφή με τον αέρα. Αυτή είναι η θερμοκρασία του αέρα κοντά στην επιφάνεια ή ακριβέστερα η θερμοκρασία του αέρα στο ύψος του μετεωρολογικού κλωβού. Αυτή η σχεδόν επιφανειακή θερμοκρασία του αέρα συσχετίζεται με το LST, αλλά μπορεί να διαφέρει σημαντικά ανάλογα με την κάλυψη της γης ή τις ατμοσφαιρικές συνθήκες (Jin and Dickinson, 2010).



Εικόνα 10: Μετεωρολογικός κλωβός που χρησιμοποιείται για την μέτρηση της θερμοκρασίας του αέρα κοντά στην επιφάνεια (Ackerman, 2007).

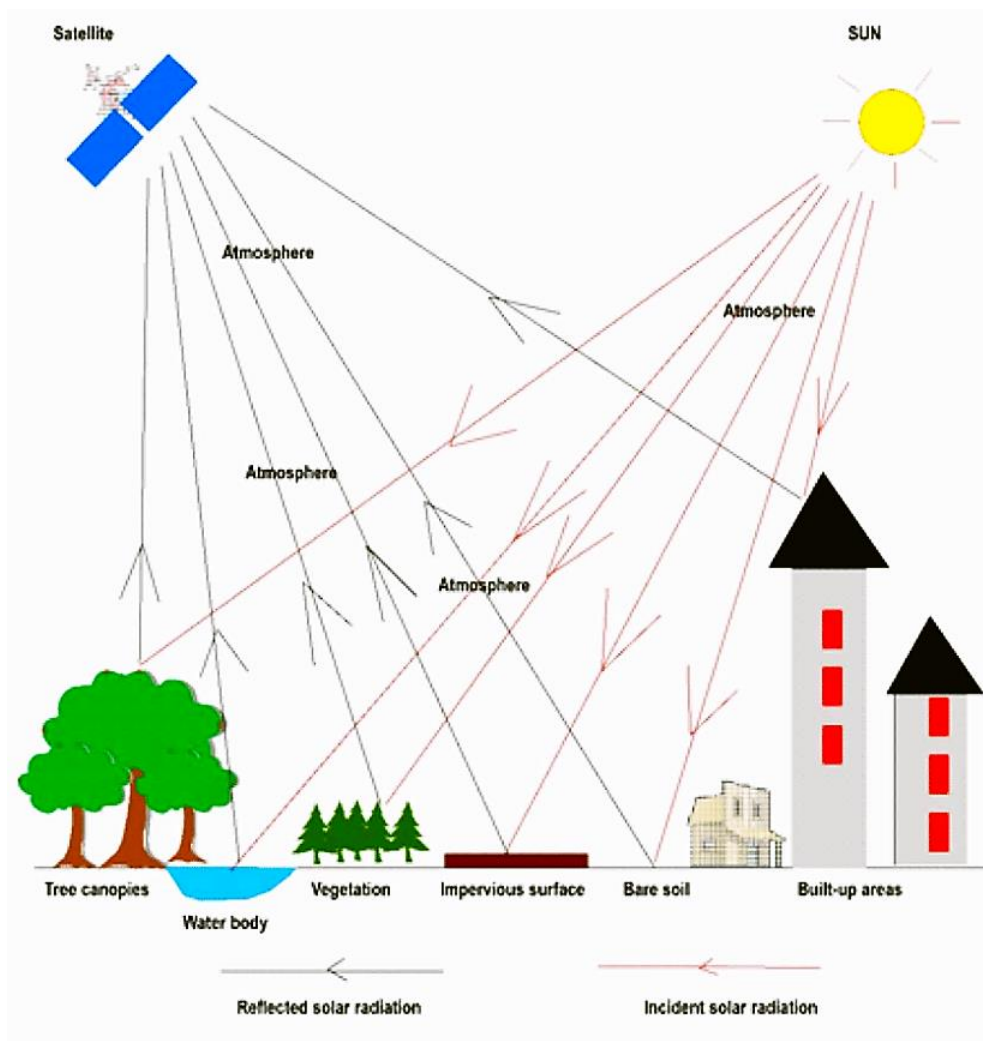
Αντίθετα με την θερμοκρασία αέρα κοντά στην επιφάνεια, το LST είναι ένα άμεσο μέτρο του πόσο ένας παρατηρητής θα αισθανόταν θερμή ή ψυχρή την επιφάνεια της Γης εάν ερχόταν σε επαφή με αυτή (Hulley et al., 2019). Η

θεωρητική βάση για την τηλεπισκόπηση του LST βασίζεται στο γεγονός ότι η συνολική ακτινοβολία που εκπέμπεται από την επιφάνεια της γης αυξάνεται, σύμφωνα με το νόμο του Planck, με την αύξηση της θερμοκρασίας. Οι αισθητήρες των δορυφόρων καταγράφουν τόσο την ακτινοβολία που φθάνει από την ατμόσφαιρα, όσο και αυτή που φθάνει από την επιφάνεια της Γης (Jin and Dickinson, 2010). Το LST ανακτάται συνήθως με εκτίμηση της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας της επιφάνειας που λαμβάνεται, με ατμοσφαιρική διόρθωση της ακτινοβολίας του αισθητήρα (at-sensor), και στη συνέχεια αντιστρέφοντας τη συνάρτηση Planck, ενώ λαμβάνεται υπόψη η διακύμανση της τιμής του συντελεστή εκπομπής ανά επιφάνεια.

#### **1.4.2 LST και Επιφανειακό Ενεργειακό Ισοζύγιο**

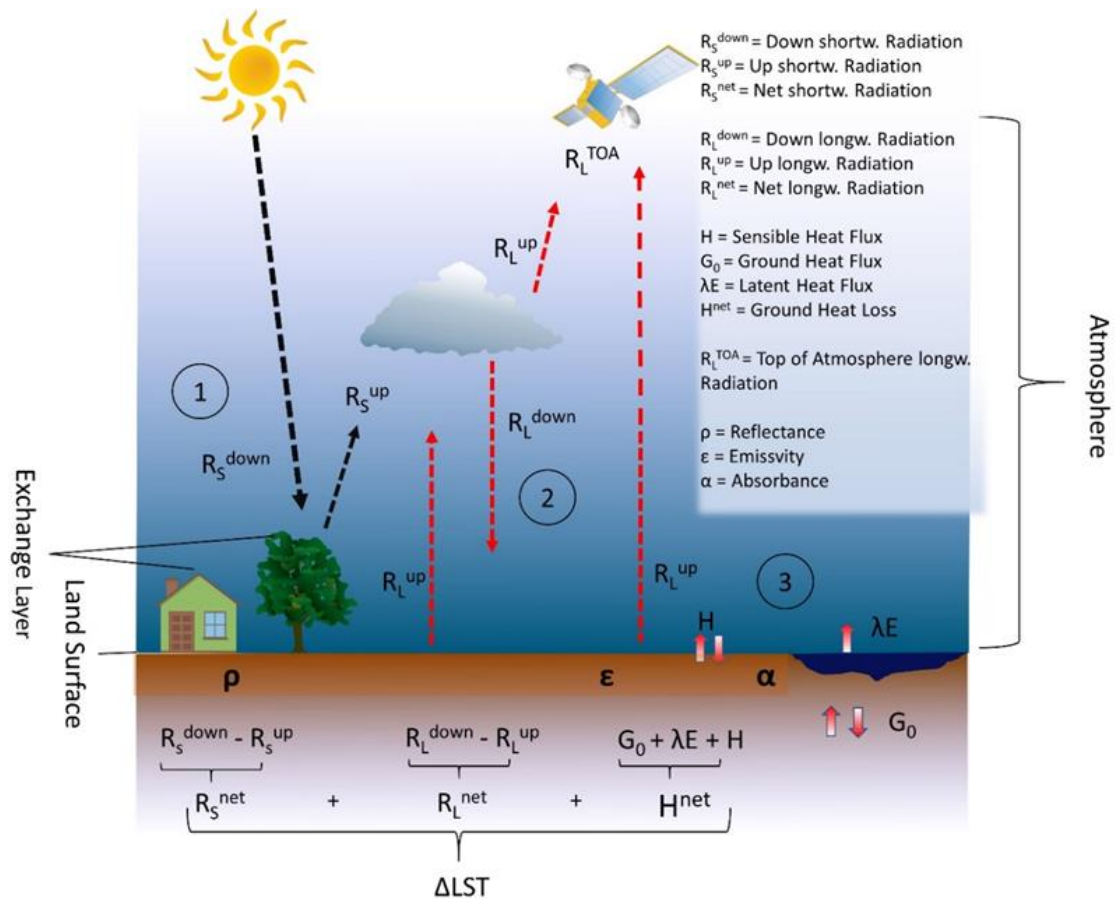
Όπως απεικονίζεται και στην Εικόνα 11 (Nkwunonwo, 2020), για επιφάνειες γυμνού εδάφους, το LST είναι η θερμοκρασία των λίγων πρώτων μικρομέτρων της επιφάνειας του εδάφους, ενώ για επιφάνειες με πυκνή βλάστηση είναι η θερμοκρασία των φύλλων του άνω μέρους της βλάστησης (κόμη). Για επιφάνειες με αραιή βλάστηση, είναι η θερμοκρασία του συνόλου της κόμης, των κατώτερων μερών της βλάστησης (άκρα, κλαδιά κλπ.), και της επιφάνειας του εδάφους (Hulley et al., 2019).





Εικόνα 11: Σχηματική αναπαράσταση της ακτινοβολίας που καταγράφεται από τον αισθητήρα του δορυφόρου, προκειμένου να υπολογιστεί το LST. Ανάλογα με τον διαφορετικό τύπο κάλυψης του εδάφους, το LST υπολογίζεται από την εκπεμπόμενη ακτινοβολία της εκάστοτε επιφάνειας (Nkwunonwo, 2020).

Το LST αποτελεί θεμελιώδη συνιστώσα του επιφανειακού ενεργειακού ισοζυγίου, όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 12. Όσον αφορά το LST, το επιφανειακό ενεργειακό ισοζύγιο μπορεί να χωριστεί σε τρία υποσυστήματα: το ισοζύγιο ακτινοβολίας της μικρού μήκους κύματος ακτινοβολίας (1), το ισοζύγιο ακτινοβολίας της μεγάλου μήκους κύματος ακτινοβολίας (2) και την απώλεια θερμότητας του εδάφους (3). Ακολουθώντας αυτό το μοντέλο, οι αλλαγές στο LST καθορίζονται από το άθροισμα της καθαρής μικρού μήκους κύματος ακτινοβολίας ( $R_s^{net}$ ), της καθαρής μεγάλου μήκους κύματος ακτινοβολίας ( $R_L^{net}$ ) και της καθαρής απώλειας θερμότητας εδάφους ( $H^{net}$ ).



Εικόνα 12: Σχηματική επισκόπηση που απεικονίζει τα υποσυστήματα που αποτελούν το LST: το ισοζύγιο ακτινοβολίας της μικρού μήκους κύματος ακτινοβολίας (1), το ισοζύγιο ακτινοβολίας της μεγάλης μήκους κύματος ακτινοβολίας (2) και την απώλεια θερμότητας του εδάφους (3) (Reiners et al., 2023).

Στη συνέχεια περιγράφονται συνοπτικά αυτά τα τρία υποσυστήματα:

- (1) Η εισερχόμενη μικρού μήκους κύματος ακτινοβολία ( $R_s^{down}$ ) είναι το τμήμα της ηλιακής ακτινοβολίας που δεν απορροφάται ούτε ανακλάται από την ατμόσφαιρα: αυτή που φτάνει στη γήινη επιφάνεια. Ένα μέρος αυτής της ακτινοβολίας ανακλάται ( $R_s^{up}$ ), ενώ το υπόλοιπο μέρος του  $R_s^{net}$  απορροφάται από την επιφάνεια της γης. Η αναλογία μεταξύ των  $R_s^{down}$ ,  $R_s^{up}$  και  $R_s^{net}$  καθορίζεται από την ανακλαστικότητα ( $\rho$ ) της επιφάνειας της γης και ονομάζεται λευκαύγεια.
- (2) Η απορρόφηση του  $R_s^{net}$  θερμαίνει την επιφάνεια της γης και την εξαναγκάζει σε εκπομπή μεγάλου μήκους κύματος ακτινοβολίας ( $R_L^{up}$ ) στο θερμικό υπέρυθρο (thermal infrared, TIR) τμήμα του φάσματος. Ωστόσο, η ποσότητα της εκπεμπόμενης μεγάλης μήκους κύματος ακτινοβολίας στην ίδια θερμοκρασία μπορεί να ποικίλλει για

διαφορετικές επιφάνειες Γης και καθορίζεται από το θερμικό συντελεστή εκπομπής ( $\epsilon$ ) της επιφάνειας του εδάφους, ουσιαστικά την αναλογία της μεγάλου μήκους κύματος ακτινοβολίας που εκπέμπεται από την αντίστοιχη επιφάνεια σε σχέση με την ποσότητα της μεγάλου μήκους κύματος ακτινοβολίας που εκπέμπει ένα μέλαν σώμα στην ίδια θερμοκρασία. Το  $R_L^{TOA}$  είναι η εξασθενημένη από την ατμόσφαιρα μεγάλου μήκους κύματος υπέρυθη ακτινοβολία, η οποία μετράται από τον δορυφορικό αισθητήρα στην κορυφή της ατμόσφαιρας. Για να συμπληρωθεί το ισοζύγιο ακτινοβολίας, πρέπει επίσης να ληφθεί υπόψη η εισερχόμενη μεγάλου μήκους κύματος ακτινοβολία από τα σύννεφα και την ατμόσφαιρα. Η διαφορά μεταξύ των  $R_L^{down}$  και  $R_L^{up}$  σχηματίζει την καθαρή μεγάλου μήκους κύματος ακτινοβολία ( $R_L^{net}$ ).

- (3) Εκτός από την έμμεση μεταφορά ενέργειας μέσω ακτινοβολίας, όπως έχει ήδη σχολιαστεί εκτενώς στην Ενότητα 1.3, η επιφάνεια της γης ανταλλάσσει επίσης απευθείας θερμότητα με την υπερκείμενη ατμόσφαιρα (αισθητή ροή θερμότητας), με βαθύτερα στρώματα εδάφους (ροή θερμότητας υποστρώματος εδάφους) καθώς και ενέργεια με την ατμόσφαιρα κατά τη διαδικασία της εξάτμισης (λανθάνουσα ροή θερμότητας). Στην Εικόνα 10 συμβολίζονται με  $H$ ,  $G_0$  και  $E$  αντίστοιχα, και το άθροισμά τους αποτελεί το  $H^{net}$ , που εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την απορροφητικότητα ( $\alpha$ ) της επιφάνειας.

Το επιφανειακό ενεργειακό ισοζύγιο απεικονίζει τους κύριους οδηγούς της δυναμικής του LST, που είναι η εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία, οι φασματικές και θερμικές ιδιότητες της επιφάνειας της γης ( $\rho$ ,  $\epsilon$  και  $\alpha$ ), η εισερχόμενη ατμοσφαιρική ακτινοβολία και οι ροές θερμότητας του εδάφους (Reiners et al., 2023).

### **1.4.3 LST και Κλιματική Αλλαγή**

Το LST είναι μία από τις πιο σημαντικές μεταβλητές του κλιματικού συστήματος, η οποία αποτελεί έναν ισχυρό δείκτη των τάσεων της επιφανειακής θέρμανσης λόγω της κλιματικής αλλαγής (Schneider and Hook, 2010). Οι μακροπρόθεσμες τάσεις του LST μπορούν να παρέχουν πολύτιμες πληροφορίες σχετικά με την κλιματική αλλαγή του πλανήτη.

Η διαφορά μεταξύ του στιγμιαίου LST και της θερμοκρασίας του αέρα μπορεί σε κάποιες περιπτώσεις να είναι υψηλή, ωστόσο υπάρχει ισχυρή συμφωνία στις μακροπρόθεσμες τάσεις μεταξύ αυτών των δύο μεταβλητών

(Good et al., 2022; Gutman, 1999). Συγκριτικά, η τυπική θερμοκρασία αέρα του μετεωρολογικού σταθμού μετράται 1.5 m πάνω από το επίπεδο του εδάφους, όπως έχει ήδη αναλυθεί στην Ενότητα 1.4.2, με αισθητήρες προστατευμένους από την ακτινοβολία και αεριζόμενους επαρκώς (Pielke et al. 2007). Επειδή ο αέρας είναι κακός αγωγός θερμότητας, καθώς οι θερμοκρασίες του καλοκαιριού ανεβαίνουν και περισσότερη θερμική ενέργεια συγκεντρώνεται στην επιφάνεια της Γης, το LST αυξάνεται πιο γρήγορα από την αντίστοιχη θερμοκρασία του αέρα (Mildrexler et al., 2011). Το LST συνδέεται στενότερα με τα βιοφυσικά χαρακτηριστικά της επιφάνειας του εδάφους, όπως ο τύπος κάλυψης γης, η πυκνότητα βλάστησης και οι ροές νερού και ενέργειας μιας συγκεκριμένης περιοχής, παρά η θερμοκρασία του αέρα (Oyler et al., 2016). Επιπλέον, οι μετεωρολογικοί σταθμοί έχουν μια άνιση παγκόσμια κατανομή, συμπεριλαμβανομένων λίγων σταθμών σε απομακρυσμένες περιοχές της επιφάνειας της γης, και δεν μπορούν να δώσουν λεπτομερή χωρικά μοτίβα (Daly et al., 2008; Kogan, 1997; Li et al., 2015; Mu et al., 2013) σε αντίθεση με την παγκόσμια καταγραφή του LST μέσω των δορυφορικών αποστολών.

Τα παραπάνω, καθώς και το γεγονός ότι δεδομένα τηλεπισκόπησης στο θερμικό υπέρυθρο υπάρχουν εδώ και δεκαετίες, καθιστούν το LST πολύτιμο εργαλείο για τη μέτρηση της υπερθέρμανσης του πλανήτη, και επιτρέπουν στο LST να αναδείξει τις δυναμικές διαδικασίες της επιφάνειας της Γης με τρόπο που οι θερμοκρασίες του αέρα δεν μπορούν, προσφέροντας ένα νέο και μοναδικό μέτρο των αλλαγών που συντελούνται στα διάφορα οικοσυστήματα (Mildrexler et al., 2018).

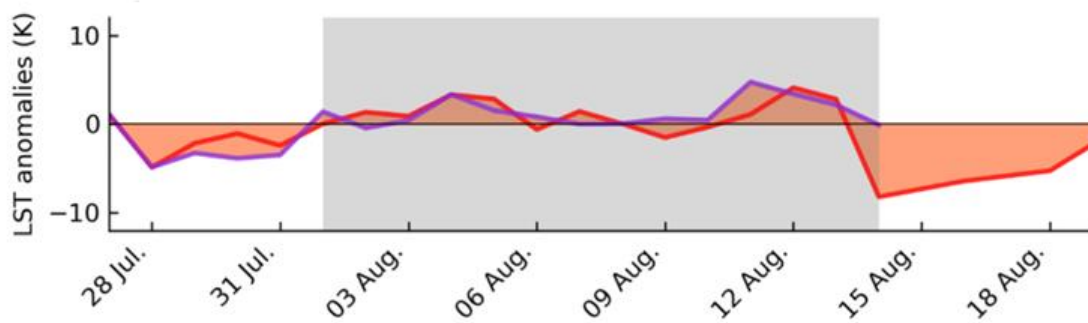
Οι Sobrino et al. (2020) ανέλυσαν την παγκόσμια θερμοκρασία επιφάνειας μεταξύ 2003 και 2016, καταλήγοντας στο συμπέρασμα ότι υπάρχει μια θετική παγκόσμια τάση LST 0.03 K/έτος, η οποία είναι υπερδιπλάσια από την παγκόσμια τάση της επιφανειακής θερμοκρασίας της θάλασσας (0.013 K/έτος). Οι τάσεις LST κατά τη διάρκεια της νύχτας είναι χαμηλότερες αλλά πιο σταθερές από τις τάσεις της ημέρας (Abera et al., 2020; NourEldeen et al., 2020; Pepin et al., 2016; Zhao et al., 2019; Zhou and Wang, 2016). Επιπλέον, εμφανίζουν μεγαλύτερη συσχέτιση με τη θερμοκρασία του αέρα επειδή το LST και η θερμοκρασία του αέρα αποκλίνουν σε υψηλότερες θερμοκρασίες (Mildrexler et al., 2011). Επομένως, η υπερθέρμανση του πλανήτη είναι πιο έντονη στις νυχτερινές τάσεις LST παρά κατά τη διάρκεια της ημέρας (Abera et al., 2020).

Εκτός από την υπερθέρμανση του πλανήτη, αντανακλώνται στη χρονοσειρά του LST και οι διαχρονικές κλιματικές μεταβλητότητες, όπως η

ταλάντωση El-Nino-Southern Oscillation (ENSO), η ταλάντωση του Βορείου Ατλαντικού (NAO) ή η Δεκαετής Ταλάντωση του Ειρηνικού (PDO) (Abbas et al., 2021).

Τις τελευταίες δεκαετίες, η αύξηση της συχνότητας και της συνολικής έκτασης της Γης που επηρεάζεται από γεγονότα που σχετίζονται ή οφείλονται σε ακραία υψηλές θερμοκρασίες, όπως ξηρασίες σε συνδυασμό με κύματα καύσωνα, έχει συνδεθεί με την υπερθέρμανση του πλανήτη και την κλιματική αλλαγή (Perkins et al., 2012; Seneviratne et al., 2014). Παραδείγματα αποτελούν ο ευρωπαϊκός καύσωνας το 2003 (Fischer et al., 2007a), ο ρωσικός καύσωνας το 2010 (Dole et al., 2011) και ο καύσωνας στη Βόρεια Ευρώπη το 2018 (Υίου et al., 2020). Οι εξαιρετικά ζεστές ακραίες τιμές του καλοκαιριού που κάποτε κάλυπταν το 1% της χερσαίας έκτασης της Γης τώρα καλύπτουν περίπου το 10% της χερσαίας έκτασης (Hansen et al., 2012). Τέτοια ακραία κλιματικά γεγονότα ενισχύουν το έλλειμμα υγρασίας και τη θερμική καταπόνηση και οδηγούν σε αύξηση της θνησιμότητας των δέντρων και των πυρκαγιών (Allen et al., 2015; Mildrexler et al., 2016; Mitchell et al., 2014; Teskey et al., 2015). Επιπροσθέτως, έχουν σοβαρές επιπτώσεις σε ένα ευρύ φάσμα κοινωνικών και περιβαλλοντικών τομέων. Συνδέονται με αυξημένα ποσοστά θνησιμότητας, άγχος στους πληθυσμούς και τα οικοσυστήματα των ζώων και με μεγαλύτερη πιθανότητα αστοχιών ενεργειακών υποδομών (Agathangelidis et al., 2022). Η συχνότητα και η σοβαρότητα των ακραίων ξηρασιών και των κυμάτων καύσωνα προβλέπεται να αυξηθούν στο μέλλον (Cook et al., 2014; Fischer and Schär, 2010; IPCC 2013, n.d.; Jentsch et al., 2007; Mitchell et al., 2014; Moritz et al., 2012).

Παρά το γεγονός ότι δεν υπάρχει σαφής ορισμός των κυμάτων καύσωνα, οι περισσότερες μελέτες θεωρούν τα κύματα καύσωνα ως έναν διαδοχικό αριθμό ημερών όπου οι θερμοκρασίες είναι υψηλότερες από τον κλιματολογικό μέσο όρο αυτής της περιόδου. Ως εκ τούτου, οι μετρήσεις των κυμάτων καύσωνα βασίζονται κυρίως σε θετικές ανωμαλίες LST (Εικόνα 13) ή θερμοκρασίας αέρα στη θερμή περίοδο (Agathangelidis et al., 2022).



Εικόνα 13: Ανωμαλίες LST κατά τη διάρκεια του καύσωνα το 2003 στην Κεντρική Ευρώπη. Η σκιασμένη περιοχή αντιπροσωπεύει τις ημέρες του επεισοδίου καύσωνα (Agathangelidis et al., 2022).

Στην παρούσα εργασία αξιοποιείται η υψηλή ανάλυση και η χωρικά συνεχής παγκόσμια κάλυψη που προσφέρουν τα δεδομένα LST, προκειμένου να εξεταστούν ανωμαλίες  $LST_{max}$  και να συσχετιστούν με επαληθευμένα κύματα καύσωνα και ξηρασίας από το 2003 έως το 2023. Αντίστοιχη μελέτη έχει γίνει και από τους Mildrexler et al. (2018), ωστόσο, για μικρότερο χρονικό εύρος (2003-2014), με τη χρήση του συνόλου δεδομένων MODIS/Aqua Land Surface Temperature 8-Day (προϊόν MYD11A2), που παρέχει μέση θερμοκρασία και εκπομπή επιφάνειας εδάφους 8 ημερών ανά εικονοστοιχείο (αντί δηλαδή των ημερήσιων τιμών που αξιοποιούνται στην παρούσα εργασία) και χωρίς να λάβουν υπόψιν την επίδραση των πιθανών πυρκαγιών στην εκάστοτε τιμή  $LST_{max}$ .

Στο δεύτερο μέρος της εργασίας, γίνεται υπολογισμός των καυσώνων τόσο με βάση ημερήσια δεδομένα LST όσο και με βάση τη θερμοκρασία αέρα για επιλεγμένα σημεία στην Ευρώπη. Ως επεισόδιο καύσωνα κατά την περίπτωση χρησιμοποίησης της θερμοκρασίας αέρα θεωρήθηκε ότι έχουμε όταν η μέγιστη θερμοκρασία αέρα ( $T_{max}$ ) είναι μεγαλύτερη για τρεις συνεχόμενες ημέρες από το 90<sup>ο</sup> εκατοστημόριο της τιμής της για την περίοδο αναφοράς. Η παραπάνω ανάλυση γίνεται για τα σημεία όπου βρίσκονται εγκατεστημένοι οι μικρομετεωρολογικοί πύργοι του Ευρωπαϊκού δικτύου Integrated Carbon Observation System (ICOS). Η αξιοποίηση των παρατηρούμενων ροών θερμότητας του παραπάνω δικτύου επιτρέπει την καλύτερη κατανόηση της σύνδεσης μεταξύ της θερμοκρασίας εδάφους, της θερμοκρασίας αέρα, και του επιφανειακού ενεργειακού ισοζυγίου σε περιόδους καύσωνα/ξηρασίας, ανά διαφορετική κάλυψη γης.

## **Κεφάλαιο 2°**

### **Δεδομένα και Μεθοδολογία**

#### **2.1 Δεδομένα**

##### **2.1.1 Δεδομένα MODIS LST**

Η επιφανειακή θερμοκρασία του εδάφους είναι θεμελιώδους σημασίας, καθώς συνδέεται άμεσα με τις ροές ενέργειας και τη θερμοκρασία του αέρα, διαμορφώνει το επιφανειακό ενεργειακό ισοζύγιο και αναδεικνύει τις χωρικές διακυμάνσεις του θερμικού περιβάλλοντος. Οι παρατηρήσεις του LST παρουσιάζουν επιπρόσθετα σημαντικά πλεονεκτήματα, σε ότι αφορά τη χωρική ανάλυση και τη δυνατότητα κάλυψης εκτεταμένων περιοχών (Jin and Dickinson, 2010). Με βάση τα παραπάνω οι δορυφορικές παρατηρήσεις LST μπορούν να συνεισφέρουν σημαντικά στην παρακολούθηση και τη μελέτη των επεισοδίων καύσωνα. Στην παρούσα μελέτη εξετάζεται κατά πόσο οι ακραίες τιμές του LST για την περιοχή της Ευρώπης συμπίπτουν με τις ημερομηνίες καυσώνων όπως υπολογίζονται από δεδομένα μετεωρολογικών σταθμών.

Για τον σκοπό αυτό, έγινε χρήση του συνόλου ημερήσιων δορυφορικών δεδομένων MODIS Aqua Land Surface Temperature/Emissivity Version 6.1 (προϊόν MYD11A1), με χωρική ανάλυση 1 Km, για τα έτη 2003-2023. Σε αυτό το προϊόν η ανάκτηση των δεδομένων LST πραγματοποιείται μέσω ενός γενικευμένου αλγορίθμου διαχωρισμού παραθύρων (split-window, GSW) στα φάσματα των 11 και 12 μικρομέτρων. Η επίδραση της εξασθένισης της ακτινοβολίας διαμέσου της ατμόσφαιρας αντιμετωπίζεται λαμβάνοντας υπόψη παράγοντες όπως η ζενίθια γωνία θέασης του αισθητήρα και η κατακόρυφη κατανομή των υδρατμών στην ατμόσφαιρα, ενώ ο συντελεστής επιφανειακής εκπομπής θεωρείται γνωστός  $a$   $r$   $i$   $o$   $r$   $i$  από μία ταξινόμηση κάλυψης γης (Snyder et al., 1998). Εικονοστοιχεία με (α) νέφη ή σκιές νεφών, (β) εκτιμώμενες τιμές σφάλματος εκπομπής που υπερβαίνουν το 0.04 και (γ) εκτιμώμενα σφάλματα ανάκτησης LST μεγαλύτερα από 2 K φιλτράρονται χρησιμοποιώντας το quality assurance κανάλι του MODIS.

Για την εξάλειψη από την ανάλυση αυτή εξαιρετικά υψηλών τιμών LST που προκύπτουν από ενεργές πυρκαγιές, χρησιμοποιήθηκε το προϊόν MYD14A1 Version 6.1 Thermal Anomalies/Fire. Το προϊόν αυτό ανιχνεύει πιθανά περιστατικά πυρκαγιάς χρησιμοποιώντας τις ακτινοβολίες 4 και 11 μικρομέτρων.

Ο δορυφόρος Aqua, που επιλέχθηκε έναντι του Terra, χρησιμοποιήθηκε λόγω της ώρας διέλευσής του (11 – 13 UTC), επιτρέποντας την ανάκτηση περίπου της ημερήσιας μέγιστης τιμής LST.

Επιπλέον, για την εξέταση παρατεταμένων κυμάτων καύσωνα, χρησιμοποιήθηκαν σύνθετα 8 ημερών LST και Thermal Anomalies/Fire (προϊόντα MYD11A2 και MYD14A2.061, αντίστοιχα), ακολουθώντας την ίδια διαδικασία με τα ημερήσια σύνολα δεδομένων.

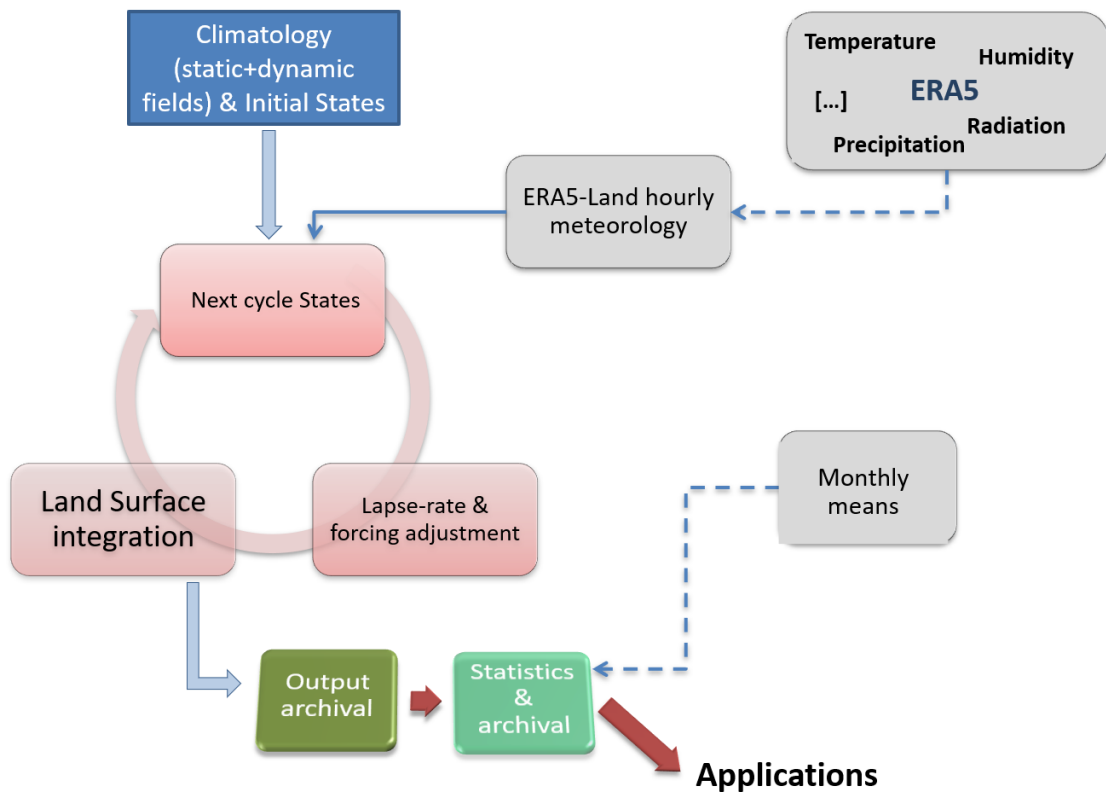
Πέραν των συνόλων δορυφορικών δεδομένων που λήφθηκαν από μετρήσεις του δορυφόρου Aqua, χρησιμοποιήθηκαν αντίστοιχα σύνολα δεδομένων επιφανειακής θερμοκρασίας που έχουν προκύψει από μετρήσεις του δορυφόρου Terra. Πιο συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκε το σύνολο ημερήσιων δεδομένων MODIS Terra Land Surface Temperature/Emissivity (προϊόν MOD11A1.061), με χωρική ανάλυση 1 Km, για όλα τα διαθέσιμα έτη (2000-2023). Ο δορυφόρος Terra λαμβάνει παρατηρήσεις στην περιοχή της Ευρώπης στις 09 – 11 UTC.

### **2.1.2 Βοηθητικά Σύνολα Δεδομένων**

Εκτός από τις παρατηρήσεις που βασίζονται στην τηλεπισκόπηση από το MODIS, η ανάλυση ενσωματώνει τα ακόλουθα βοηθητικά σύνολα δεδομένων:

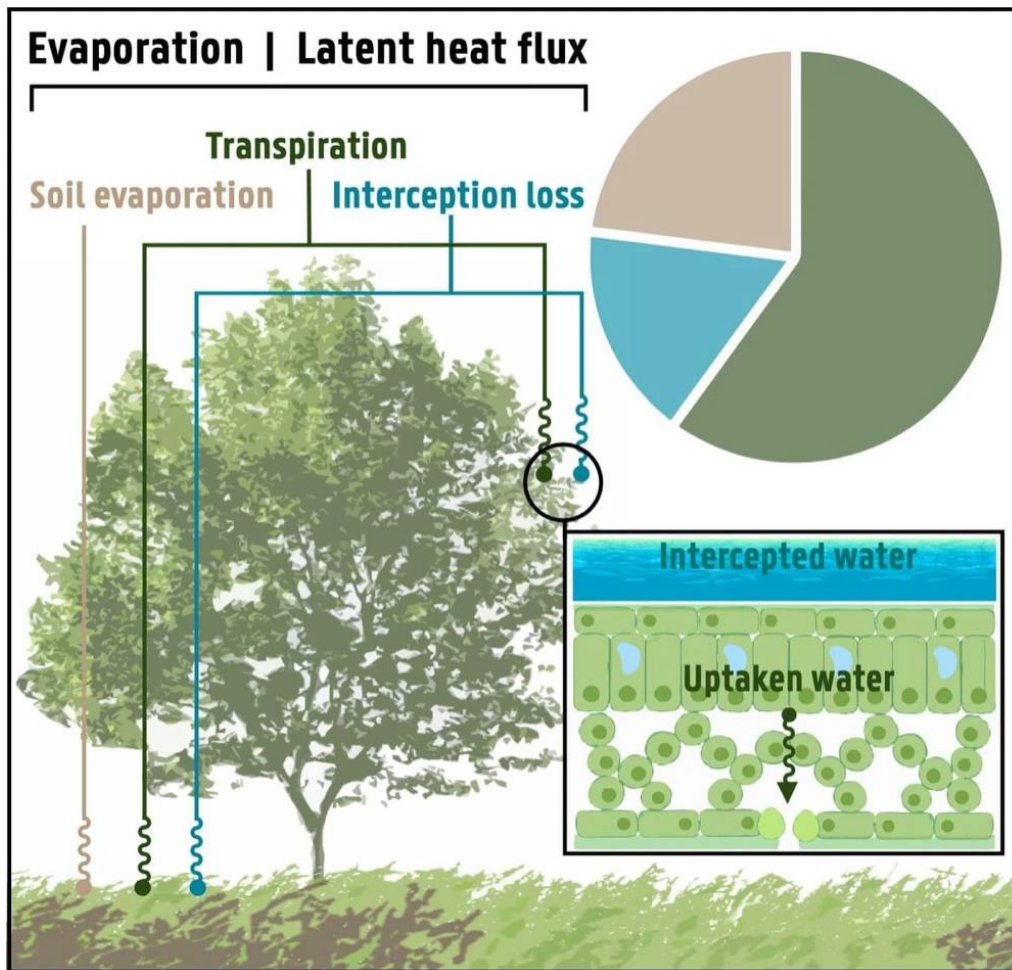
1. Η ημερήσια μέγιστη θερμοκρασία αέρα 2 m από το προϊόν ERA5-Land Reanalysis υψηλής ανάλυσης (9 Km χωρικής ανάλυσης), που παράγεται με ατμοσφαιρικές δυναμικές διεργασίες από το ERA5 και χρησιμοποιώντας το μοντέλο της επιφάνειας του Ευρωπαϊκού Κέντρου Μεσοπρόθεσμων Προγνώσεων Καιρού (ECMWF), όπως περιγράφεται σχηματικά στην Εικόνα 14 (Muñoz-Sabater et al., 2021).





Εικόνα 14: Σχηματική αναπαράσταση του αλγορίθμου που χρησιμοποιείται στην παραγωγή του ERA5-Land. Το μοντέλο της επιφάνειας του εδάφους ενσωματώνεται σε κύκλους 24 ωρών χρησιμοποιώντας μετεωρολογικά πεδία από το ERA5 (Muñoz-Sabater et al., 2021).

2. Το παγκόσμιο σύνολο δεδομένων Standardized Precipitation Evaporation Index (SPEI) (χωρική ανάλυση 5 km, μηνιαία χρονική κλίμακα), που παράγεται χρησιμοποιώντας ως είσοδο το Multi-Source Weighted-Ensemble Precipitation (MSWEP) και το Bristol Potential Evapotranspiration (hPET) που χρησιμοποιεί την εξίσωση FAO Penman-Monteith. Ο δείκτης SPEI χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση των συνθηκών ξηρασίας. Λαμβάνει υπόψιν την κατακρήμνιση (βροχόπτωση) και την δυνητική εξατμισοδιαπνοή (συνδυασμένη διαδικασία εξάτμισης νερού από το έδαφος και διαπνοής από τα φυτά). Υπολογίζεται συγκρίνοντας την παρατηρούμενη βροχόπτωση και την εξατμισοδιαπνοή, με τον μακροπρόθεσμο μέσο όρο για τρέχουσα τοποθεσία. Θετικές τιμές του δείκτη υποδηλώνουν πλεόνασμα νερού, ενώ αρνητικές υποδηλώνουν έλλειμα (Gebrechorkos et al., 2023).

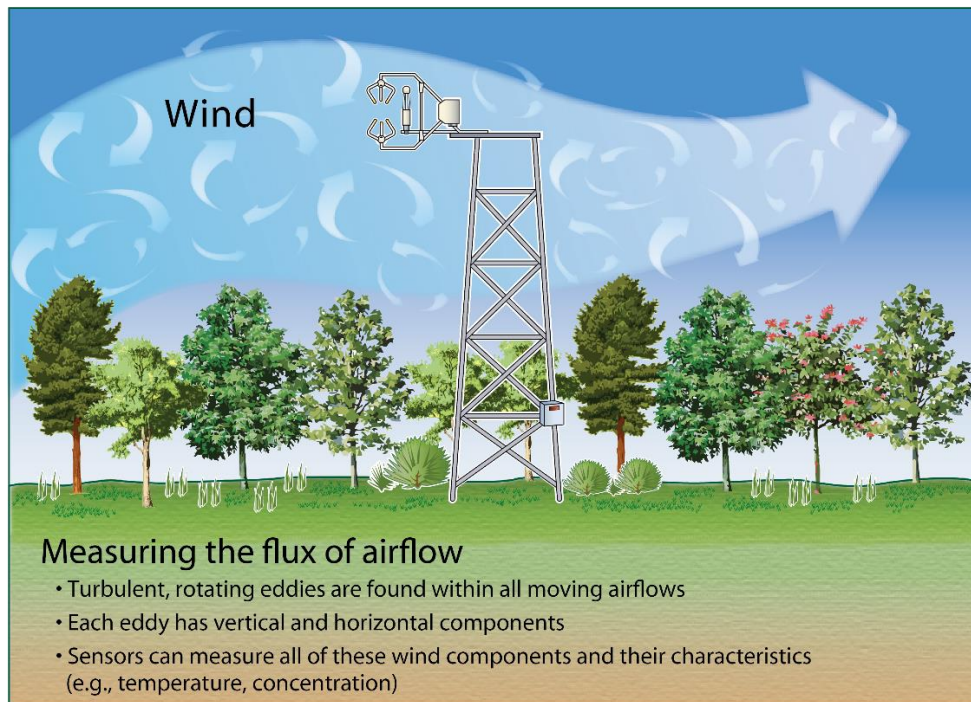


Εικόνα 15: Κύρια συστατικά της εξάτμισης της γης. Το διάγραμμα πίτας υποδεικνύει την κατά προσέγγιση συνεισφορά καθενός από αυτά τα τρία συστατικά σε παγκόσμιο επίπεδο, με βάση τα δεδομένα από τους Wei et al. (2017). Η κάτω εικόνα δείχνει μια διατομή ενός υγρού φύλλου, με την εξάτμιση να συμβαίνει μέσα στο φύλλο (διαπνοή) και στην επιφάνειά του (εξάτμιση από την επιφάνεια των φυλλωμάτων) (Miralles et al., 2020).

3. Δεδομένα επιφανειακής υγρασίας από το Global Land Evaporation Amsterdam Model (GLEAM). Το GLEAM είναι ένα σύνολο αλγορίθμων που υπολογίζουν ξεχωριστά τα διαφορετικά συστατικά της εξάτμισης γης (εξατμισοδιαπνοή): διαπνοή και εξάτμιση από το έδαφος, εξάτμιση από την επιφάνεια των φυλλωμάτων (interception loss), εξάτμιση και εξαχνωση από υδάτινες επιφάνειες (Εικόνα 15). Επιπλέον, το GLEAM παρέχει δεδομένα για την υγρασία στην επιφάνεια και στη ριζική ζώνη του εδάφους, την δυνητική εξάτμιση και τις συνθήκες εξάτμισης. Η λογική της μεθόδου είναι να μεγιστοποιήσει την ανάκτηση πληροφοριών για την εξάτμιση που περιέχονται στις τρέχουσες δορυφορικές παρατηρήσεις κλιματικών και περιβαλλοντικών μεταβλητών. Για τους υπολογισμούς χρησιμοποιείται η εξίσωση Priestley και Taylor, που υπολογίζει την

πιθανή εξάτμιση με βάση τις παρατηρήσεις της καθαρής ακτινοβολίας επιφάνειας και της θερμοκρασίας του αέρα κοντά στην επιφάνεια (Miralles et al., 2012, 2011). Το σύνολο δεδομένων που χρησιμοποιήθηκε εδώ είναι το GLEAM v3.7b: ένα παγκόσμιο σύνολο δεδομένων, με χωρική ανάλυση 25 Km και ημερήσια χρονική ανάλυση, που καλύπτει την 20ετή περίοδο από το 2003 (1η Ιανουαρίου) έως το 2022 (31 Δεκεμβρίου). Το σύνολο δεδομένων βασίζεται σε δορυφορικά δεδομένα (Martens et al., 2017).

4. Τυποποιημένα δεδομένα ροών ενέργειας από το δίκτυο σταθμών μικρομετεωρολογικών παρατηρήσεων Integrated Carbon Observation System (ICOS). Τα δεδομένα αφορούν 71 σταθμούς στην περιοχή της Ευρώπης, και καλύπτουν την περίοδο 1989-2020 (ο κάθε σταθμός καλύπτει επιμέρους χρονικές περιόδους). Οι μετρήσεις οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα έρευνα αφορούν την αισθητή και την λανθάνουσα θερμότητα, το ισοζύγιο ακτινοβολίας καθώς και τη ροή θερμότητας του υποστρώματος του εδάφους στην επιφάνεια. Οι μετρήσεις λαμβάνουν χώρα σε μικρομετεωρολογικούς πύργους (flux towers) και κατόπιν υπολογίζονται οι ροές ενέργειας με τη μέθοδο της τυρβώδους συνδιακύμανσης (eddy covariance). Η μέθοδος eddy covariance είναι μια μικρομετεωρολογική μέθοδος που είναι σήμερα δημοφιλής για την άμεση παρατήρηση των ανταλλαγών αερίων, ενέργειας και ορμής μεταξύ των οικοσυστημάτων και της ατμόσφαιρας, και βασίζεται στην ανίχνευση διακυμάνσεων γύρω από μία μέση τιμή. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 16, τα όργανα που είναι τοποθετημένα σε πύργους μετρούν την ταχύτητα και διεύθυνση του ανέμου. Τυρβώδεις και περιστρεφόμενοι στρόβιλοι βρίσκονται σε όλες τις κινούμενες ροές αέρα. Κάθε στρόβιλος έχει κάθετα και οριζόντια στοιχεία. Οι αισθητήρες μετρούν όλα αυτά τα στοιχεία του ανέμου, συν τα σχετικά χαρακτηριστικά, όπως θερμοκρασία, υγρασία κ.λπ. (Liang and Wang, 2020).



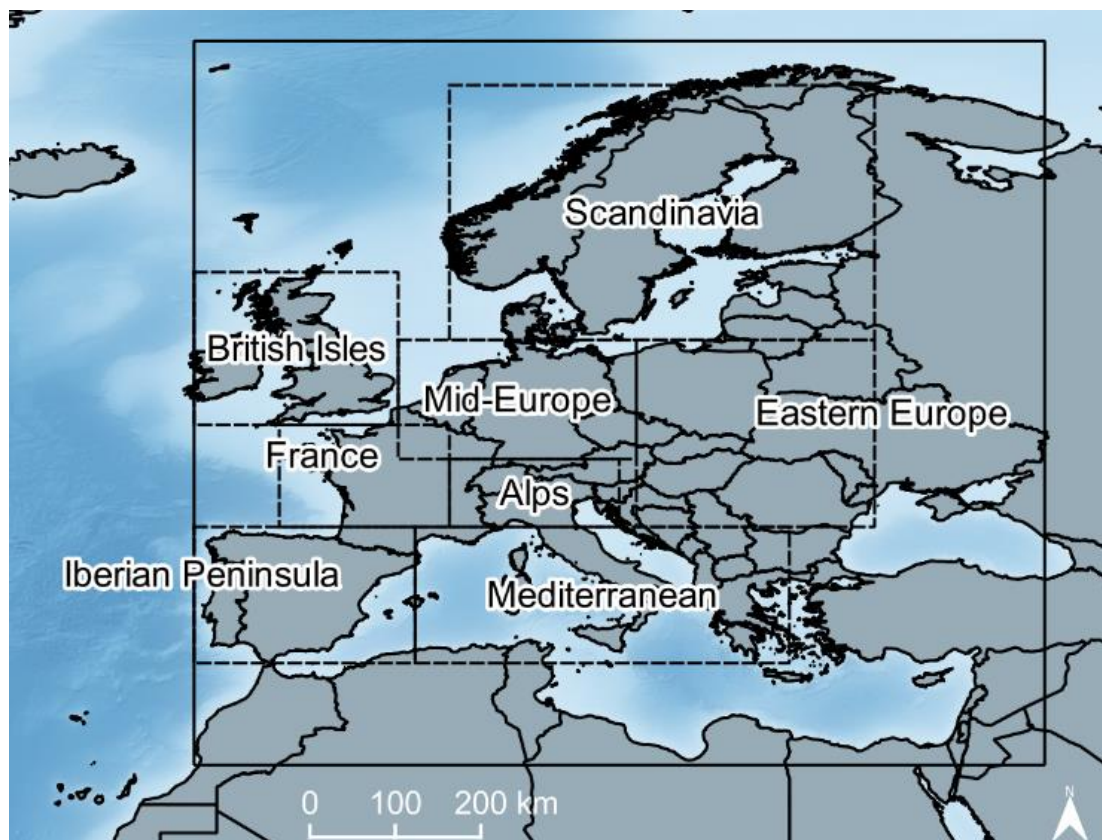
ESD14-039

Εικόνα 16: Σχηματική απεικόνιση μικρομετεωρολογικού πύργου (flux tower). Τα όργανα που είναι τοποθετημένα σε πύργους μετρούν την ταχύτητα και διεύθυνση του ανέμου. Τυρβώδεις και περιστρεφόμενοι στρόβιλοι βρίσκονται σε όλες τις κινούμενες ροές αέρα. Κάθε στρόβιλος έχει κάθετα και οριζόντια στοιχεία. Οι αισθητήρες μετρούν όλα αυτά τα στοιχεία του ανέμου, συν άλλες μετεωρολογικές μεταβλητές, όπως θερμοκρασία, υγρασία κ.λπ. (Πηγή: [ameriflux.lbl.gov](http://ameriflux.lbl.gov)).

## 2.2 Μεθοδολογία

### 2.2.1 Υπολογισμός Δεικτών Ανωμαλιών Μέγιστης Επιφανειακής Θερμοκρασίας (LST<sub>max</sub>)

Στο πρώτο μέρος της εργασίας, αναλύεται μία περίοδος 21 ετών (2003-2023) καθημερινών παρατηρήσεων Aqua/MODIS για την Ευρώπη (Εικόνα 17), αξιολογώντας τη δυνατότητα ανίχνευσης του «αποτυπώματος» και της έντασης των κυμάτων καύσωνα μεγάλης κλίμακας μέσω των ανωμαλιών LST.



Εικόνα 17: Περιοχή μελέτης και περιοχές PRUDENCE.

Τα βιοφυσικά δεδομένα, όπως το LST, ερμηνεύονται εύκολα ως μια σχετική ανωμαλία, δηλαδή μια απόκλιση από μία βασική κατάσταση (Janetos et al., 2012). Η ανωμαλία LST<sub>max</sub> (LST<sub>max</sub>Anomaly<sub>annual</sub>) υπολογίστηκε σε ετήσια βάση ανά εικονοστοιχείο, συγκρίνοντας την εκάστοτε μέγιστη παρατήρηση κάθε έτους (LST<sub>max</sub><sub>current\_year</sub>) με τον μέσο όρο των LST<sub>max</sub> (LST<sub>max</sub><sub>mean</sub>) της περιόδου αναφοράς σύμφωνα με την παρακάτω σχέση (Mildrexler et al., 2018):

$$\text{LSTmaxAnomaly}_{\text{annual}} = \text{LSTmax}_{\text{current\_year}} - \text{LSTmax}_{\text{mean}} . (1)$$

Οι ανωμαλίες  $LST_{max}$  υπολογίστηκαν σε σχέση με τις μέσες τιμές της περιόδου 2003-2023, με την τιμή 0 να υποδεικνύει την φυσιολογική τιμή  $LST$  για κάθε σημείο. Στη συνέχεια υπολογίστηκε η κανονικοποιημένη ανωμαλία ( $LST_{max}StandardAnomaly_{annual}$ ) που αφορά τα εικονοστοιχεία, η οποία δίνει την ανωμαλία  $LST_{max}$  σε σχέση με τη διακύμανση κάθε εικονοστοιχείου (Grumm and Hart, 2001):

$$LST_{max}StandardAnomaly_{annual} = LST_{max}Anomaly_{annual}/std , (2)$$

όπου με «std» συμβολίζεται ο συντελεστής απόκλισης.

Κατόπιν, η ίδια διαδικασία εφαρμόστηκε και σε μηνιαία βάση (για τους θερινούς μήνες). Ακόμη, τόσο οι ετήσιες, όσο και οι μηνιαίες ανωμαλίες υπολογίστηκαν χρησιμοποιώντας επίσης τις σύνθετες τιμές 8 ημερών από το Aqua/MODIS. Σε μηνιαία βάση, με τα παραπάνω ημερήσια και οκταήμερα δεδομένα, υπολογίστηκε και η μέση επιφανειακή θερμοκρασία κάθε θερινού μήνα.

Στη συνέχεια, τα αποτελέσματα της μεθόδου συγκρίθηκαν με δεδομένα για την αξιολόγηση συνθηκών ξηρασίας, που λαμβάνονται προϋπολογισμένα, από τους δείκτες SPEI και GLEAM, καθώς και με δεδομένα Reanalysis μέγιστης θερμοκρασίας αέρα ( $T_{max}$ ).

Επιπροσθέτως, υπολογίστηκαν στατιστικά και τάσεις (trends) ανά γεωγραφικές ζώνες της Ευρώπης. Οι γεωγραφικές αυτές ζώνες βασίστηκαν στις περιοχές του περιφερειακού πειράματος Prediction of Regional scenarios and Uncertainties for Defining European Climate change risk and Effects (PRUDENCE), οι οποίες απεικονίζονται σχηματικά στις Εικόνες 17 και 19, ενώ τα γεωγραφικά τους όρια δίνονται στην Εικόνα 18.

Area		West	East	South	North
IP	Iberian Peninsula	-10	3	36	44
FR	France	-5	5	44	50
ME	Mid-Europe	2	16	48	55
AL	Alps	5	15	44	48
MD	Mediterranean	3	25	36	44
EA	Eastern Europe	16	30	44	55

Εικόνα 18: Γεωγραφικά όρια των περιοχών PRUDENCE (Artale et al., 2009).

## **2.2.2 Μελέτη Καυσώνων και Ροών Ενέργειας σε Επιλεγμένα Σημεία**

Στο δεύτερο μέρος πραγματοποιήθηκε μια πιο εστιασμένη ανάλυση για επιλεγμένα σημεία στην Ευρώπη (σημεία με μικρομετεωρολογικούς πύργους). Χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα ημερήσιας μέγιστης θερμοκρασίας αέρα 2 m από το προϊόν ERA5-Land Reanalysis υψηλής ανάλυσης (9 Km χωρικής ανάλυσης) για την εύρεση επεισοδίων καύσωνα. Σκοπός της ανάλυσης αποτέλεσε η σύγκριση των επεισοδίων καύσωνα αυτών, με επεισόδια καύσωνα που προκύπτουν από δορυφορικά δεδομένα LST των δορυφόρων Aqua και Terra, ανά σημείο, σε τοποθεσίες όπου ήταν διαθέσιμες οι ροές ενέργειας, δηλαδή στις τοποθεσίες των 71 μικρομετεωρολογικών πύργων (Εικόνα 19) στην περιοχή της Ευρώπης του δικτύου σταθμών ατμοσφαιρικής μέτρησης ICOS.



**Εικόνα 19:** Οι τοποθεσίες των 71 μικρομετεωρολογικών πύργων του δικτύου ICOS, από τους οποίους λαμβάνονται τυποποιημένα δεδομένα ροών ενέργειας. Τα πλαίσια διαχωρίζουν τις περιοχές PRUDENCE.

Ο ορισμός του καύσωνα CTX90pct (Perkins and Alexander, 2013) χρησιμοποιήθηκε για την ανίχνευση επεισοδίων καύσωνα στην περιοχή της Ευρώπης από το 2002 έως το 2023. Ο ορισμός ενός επεισοδίου καύσωνα παραμένει ένα ανοιχτό επιστημονικό θέμα με ποικίλες προσεγγίσεις διεθνώς. Αρκετοί ορισμοί έχουν προταθεί στο παρελθόν, διαφοροποιούμενοι ως προς τη χρησιμοποιούμενη μεταβλητή, την ελάχιστη αναγκαία διάρκεια του γεγονότος και το ύψος της οριακής τιμής (τιμή κατώφλιου) που πρέπει να ξεπερνά η μεταβλητή. Για την τελευταία δύναται να χρησιμοποιηθεί μία απόλυτη τιμή ή μία τιμή που να προκύπτει από κάποια στατιστική παράμετρο (συνήθως επιλέγεται ένα ορισμένο εκατοστημόριο). Στην εκτενή μελέτη των Perkins and Alexander (2013) προτάθηκε ως ένας από τους βέλτιστους κλιματικούς δείκτες για τον εντοπισμό καύσωνα ο δείκτης CTX90pct. Σύμφωνα με τον δείκτη CTX90pct, ένα κύμα καύσωνα ανιχνεύεται όταν 3 ή περισσότερες συνεχόμενες ημέρες είναι πάνω από το κλιματολογικό 90<sup>ο</sup> εκατοστημόριο του  $T_{max}$ . Τα κατώφλια του 90<sup>ου</sup> εκατοστημρίου ορίζονται ανεξάρτητα για κάθε ημερολογιακή ημέρα με βάση ένα κινούμενο παράθυρο 15 ημερών (με κέντρο σε μια συγκεκριμένη ημέρα) ημερήσιων τιμών  $T_{max}$  (CTX90pct) κατά τη βασική περίοδο 1991-2020 (Perkins-Kirkpatrick and Lewis, 2020). Κάθε επεισόδιο καύσωνα περιγράφεται από την ημερομηνία έναρξης, τη διάρκεια και τον μέσο ημερήσιο  $T_{max}$ . Επιπλέον, υπολογίστηκαν οι ακόλουθες ετήσιες μετρήσεις καύσωνα:

- (i) ο ετήσιος αριθμός επεισοδίων καύσωνα (HWN),
- (ii) το άθροισμα των ημερών καύσωνα ανά έτος (HWF) και
- (iii) η διάρκεια (σε ημέρες) του μεγαλύτερου καύσωνα ανά έτος (HWD).

Το κανονικοποιημένο μέγεθος καύσωνα υπολογίστηκε ως η ανωμαλία του μέσου  $T_{max}$  ενός δεδομένου καύσωνα σε σχέση με τον αντίστοιχο μέσο όρο του καλοκαιριού  $T_{max}$  (Perkins and Alexander, 2013). Μόνο τα συμβάντα καύσωνα κατά τη θερινή περίοδο (Ιούνιος-Αύγουστος) συμπεριλήφθηκαν στην ανάλυση.

Για τα δορυφορικά δεδομένα LST, τόσο από τον Aqua όσο και από τον Terra, υπολογίστηκαν οι καύσωνες, ως ημέρες με θετική ανωμαλία, με βάση διάφορους συνδυασμούς εκατοστημορίων (80<sup>ο</sup>, 85<sup>ο</sup>, 90<sup>ο</sup>, 95<sup>ο</sup>) και ελάχιστης διάρκειας (1, 2, 3 ημέρες), κατά την περίοδο αναφοράς την 2003 - 2023 ακολουθώντας αντίστοιχη μεθοδολογία με αυτή των Agathangelidis et al. (2022).

Οι τιμές του MODIS LST επηρεάζονται από την ημερήσια διακύμανση της ώρας διέλευσης του δορυφόρου σε μια δεδομένη περιοχή μελέτης, που η



οποία μεταβάλλει επίσης με τη γωνία θέασης του αισθητήρα. Για να ληφθούν υπόψη αυτές οι καθημερινές διακυμάνσεις, οι ημερήσιες παρατηρήσεις LST για κάθε σημείο μελέτης αρχικά ομαδοποιήθηκαν ανά τέταρτο της ώρας (χρησιμοποιώντας την καταγεγραμμένη ώρα διέλευσης κάθε δορυφορικής λήψης) που αντιμετωπίστηκαν ανεξάρτητα σε όλα τα επόμενα βήματα. Στη συνέχεια, οι ημερήσιες ανωμαλίες του LST υπολογίστηκαν αφαιρώντας το ντιστό εκατοστημόριο με βάση κινούμενο παράθυρο (moving window) 15 ημερών. Μελετήθηκε ένα εύρος διαφορετικών εκατοστημορίων (δηλαδή διαφορετικοί δείκτες LST), τα οποία κυμάνθηκαν από το 80° έως το 95° εκατοστημόριο.

Η σύμβαση που ακολουθήθηκε στα ονόματα των δεικτών LST, είναι όμοια με την σύμβαση που χρησιμοποίησαν οι Agathangelidis et al. (2022): «MxD\_Pxx\_Dx» όπου το MxD αναφέρεται στον δορυφόρο (MOD: Terra; MYD: Aqua; MXD: συνδυασμός και των δύο), το Pxx στο χρησιμοποιούμενο εκατοστημόριο, και το Dx στην ελάχιστη διάρκεια που πρέπει να έχει ένα επεισόδιο.

Η χρήση ενός ορίου βασισμένου στο εκατοστημόριο αντί ενός ορίου βασισμένου στην τυπική απόκλιση έχει το πλεονέκτημα ότι δεν απαιτείται καμία υπόθεση σχετικά με την υποκείμενη κατανομή των ανωμαλιών (Hobday et al., 2016). Εξετάστηκε, όπως προαναφέρθηκε, τόσο η περίπτωση ανωμαλιών LST μιας ημέρας όσο και η απαίτηση για έναν ελάχιστο αριθμό διαδοχικών ημερών υπέρβασης του ορίου. Δεδομένων των συχνών κενών δεδομένων στις χρονοσειρές LST (π.χ. λόγω νεφών ή τιμών εικονοστοιχείων χαμηλής ποιότητας), αξιολογήθηκε επίσης μια κοινή προσέγγιση Terra και Aqua.

Κατόπιν, υπολογίστηκε το ποσοστό συσχέτισης μεταξύ των ανωμαλιών LST και των επεισοδίων καύσωνα. Συγκεκριμένα, υπολογίστηκε το ποσοστό συμφωνίας μεταξύ των δύο συνόλων δεδομένων ( $T_{max}$  και LST), το οποίο ορίστηκε ως το ποσοστό των κυμάτων καύσωνα (τόσο ως διακριτά συμβάντα όσο και ως μεμονωμένες ημέρες) που προσδιορίστηκαν επίσης ως ανωμαλίες LST.

Στο τελευταίο στάδιο της ανάλυσης, συσχετίστηκαν τα επεισόδια καύσωνα με τον εκάστοτε τύπο κάλυψης γης. Δεδομένου ότι η εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία σε ημέρες καύσωνα είναι μεγαλύτερη από τις τυπικές συνθήκες, καθώς και ότι οι ημέρες αυτές συνοδεύονται από συνθήκες ξηρασίας, τα φυτά έχουν «αναπτύξει» διάφορους τρόπους για να προστατευθούν (Teuling et al., 2010). Διαθέτοντας τα δεδομένα ροών ενέργειας από τους μικρομετεωρολογικούς πύργους, εξετάστηκε η διαφοροποίηση στην αισθητή

και την λανθάνουσα θερμότητα κατά τη διάρκεια ενός καύσωνα ανά διαφορετική κάλυψη γης. Οι διαφορετικοί τύποι κάλυψης γης, καθώς και ο αριθμός των μικρομετεωρολογικών πύργων που βρίσκονται σε περιοχές με αντίστοιχους τύπους βλάστησης, παρατίθενται στον Πίνακα 1.

Πίνακας 1: Οι διαφορετικοί τύποι κάλυψης γης, καθώς και ο αριθμός των μικρομετεωρολογικών πύργων που βρίσκονται σε περιοχές με αντίστοιχους τύπους βλάστησης.

<b>Τύποι κάλυψης γης</b>	<b>Αριθμός μικρομετεωρολογικών πύργων</b>
Καλλιεργήσιμη γη (CRO)	33
Κλειστή θαμνώδης έκταση (CSH)	3
Φυλλοβόλα πλατύφυλλα δάση (DBF)	26
Αειθαλή πλατύφυλλα δάση (EBF)	2
Αειθαλή κωνοφόρα δάση (ENF)	62
Γρασίδι (GRA)	27
Δάση ανάμικτου τύπου (MF)	15
Ανοικτή θαμνώδης έκταση (OSH)	9
Σαβάνα (SAV)	9
Υδροβιότοποι (WET)	16
Σαβάνα με ξυλώδη φυτά (WSA)	3

Για κάθε θερινό μήνα (Ιούνιο, Ιούλιο, Αύγουστο) υπολογίστηκαν οι μέσες ροές θερμότητας. Οι ανωμαλίες των ροών αισθητής και λανθάνουσας θερμότητας προέκυψαν από την διαφορά των ροών θερμότητας που υπολογίστηκαν κάθε ημέρα καύσωνα του εκάστοτε μήνα, μείον την μέση ροή θερμότητας του εκάστοτε μήνα.

## Κεφάλαιο 3<sup>ο</sup>

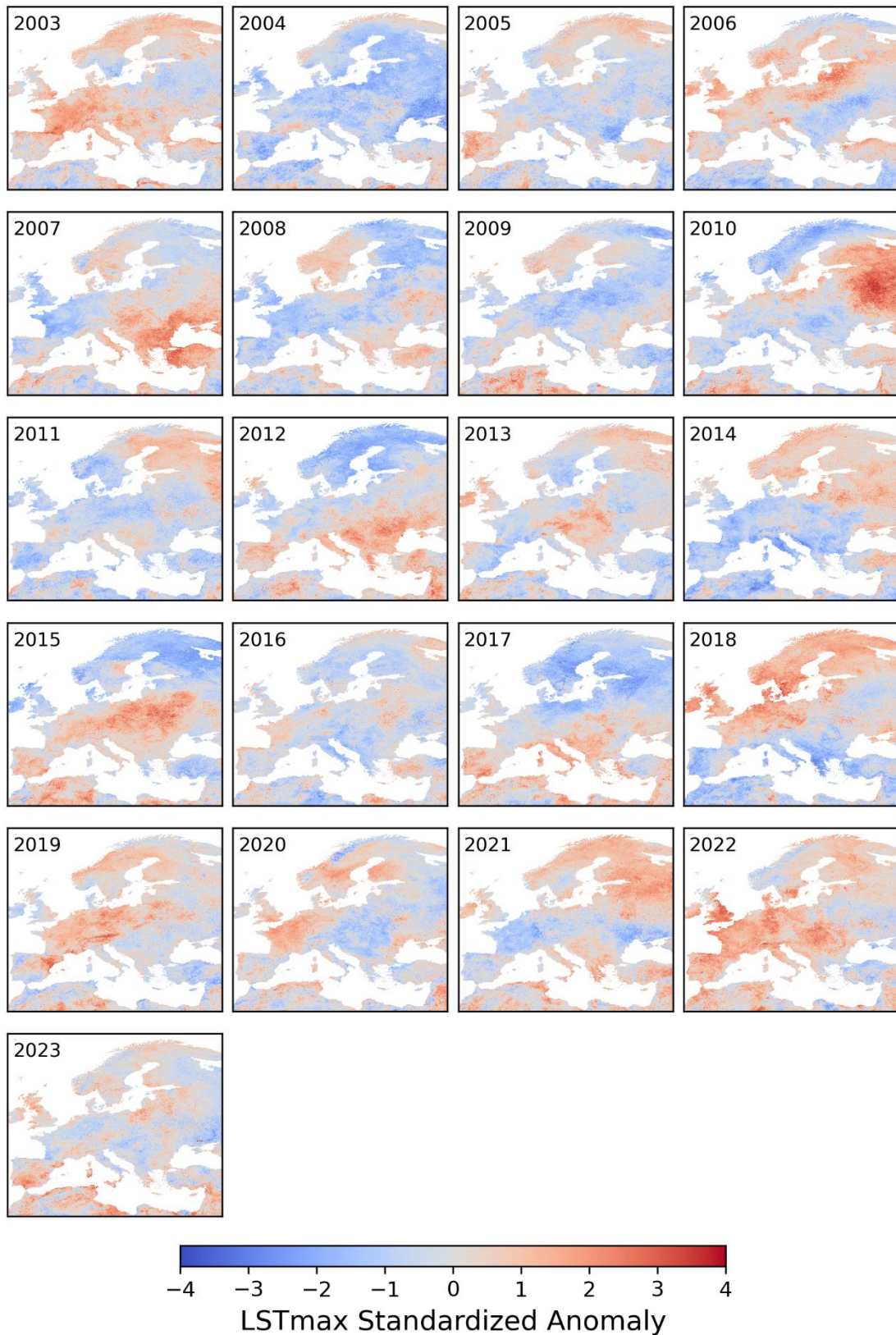
### Αποτελέσματα

#### 3.1 Υπολογισμός Δεικτών Ανωμαλιών Μέγιστης Επιφανειακής Θερμοκρασίας ( $LST_{max}$ )

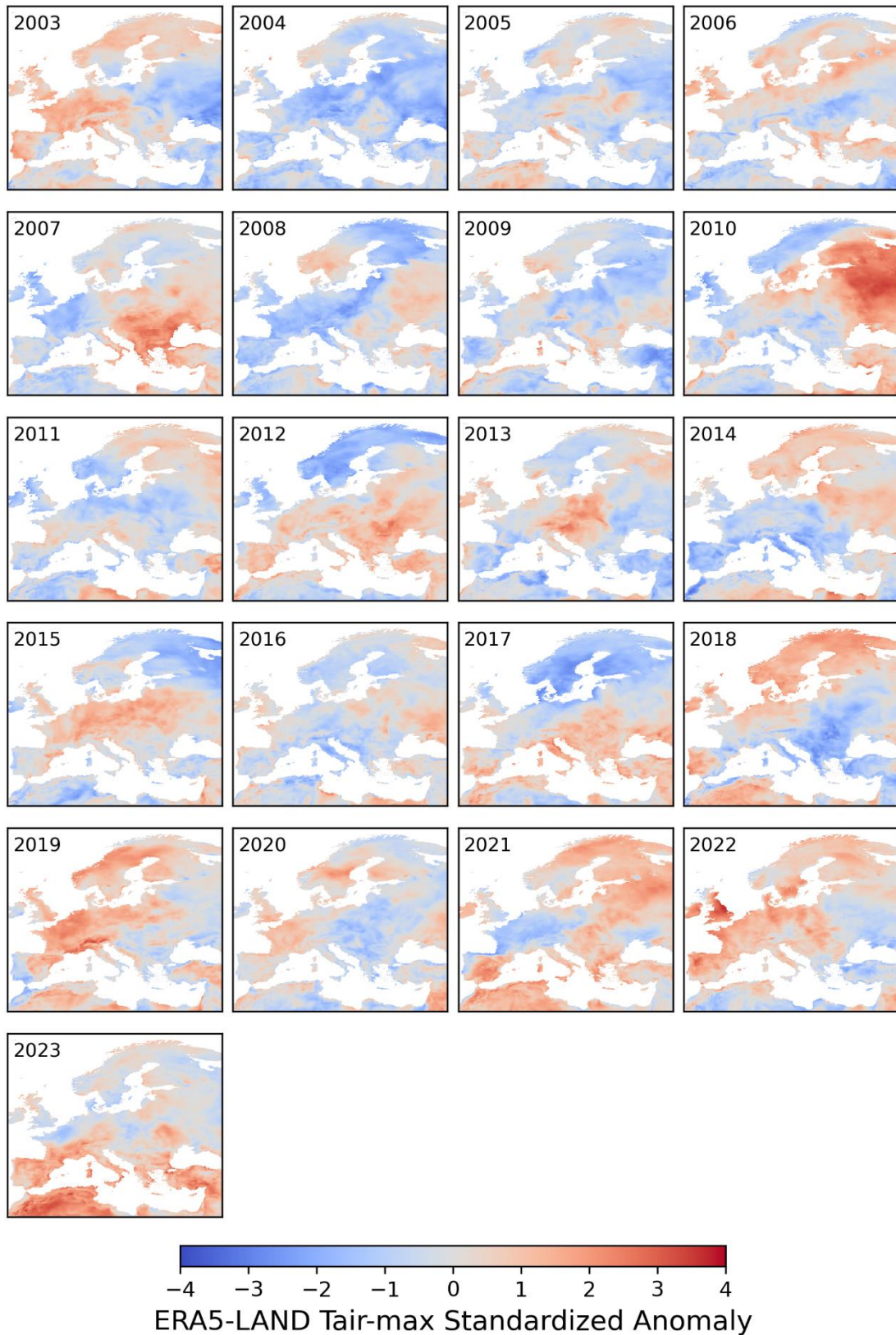
Καθ' όλη τη διάρκεια της περιόδου μελέτης, είναι εμφανής μια ισχυρή ομοιότητα μεταξύ των κανονικοποιημένων ανωμαλιών  $LST_{max}$  της καλοκαιρινής περιόδου και των μεγάλων γεγονότων καύσωνα στην Ευρώπη (Εικόνα 19). Αυτό περιλαμβάνει ακραία γεγονότα που σημείωσαν ρεκόρ, όπως ο καύσωνας του 2003 στη Γαλλία (Fischer et al., 2007b), ο ρωσικός καύσωνας του 2010 (Dole et al., 2011) και το συμβάν ξηρασίας και καύσωνα στην Ευρώπη το 2022 (Tripathy and Mishra, 2023).

Σημειώνεται ότι τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στην Εικόνα 20 προέκυψαν από την επεξεργασία των ημερήσιων δορυφορικών δεδομένων MODIS Aqua Land Surface Temperature/Emissivity Version 6.1 (προϊόν MYD11A1). Το σύνολο των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από την μεθοδολογία που περιγράφεται στην Ενότητα 2.2.1 παρατίθενται στο Παράρτημα Ι.

Το καλοκαίρι του 2022, ειδικότερα, ξεχωρίζει ως ένα ιδιαίτερα θερμό καλοκαίρι, με το 75.1% της Ευρώπης να αντιμετωπίζει θετικές ανωμαλίες στη θερμοκρασία της επιφάνειας του εδάφους ( $LST_{max}$ ). Επιπλέον, η μέση τιμή ανωμαλίας κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου ήταν η υψηλότερη μεταξύ όλων των ετών, φτάνοντας το 0.61, υποδηλώνοντας τις εξαιρετικά αυξημένες θερμοκρασίες που παρατηρούνται σε ολόκληρη την περιοχή. Αυτό συμφωνεί με τις ανωμαλίες από το ERA5-Land (Εικόνα 21) και τα αναφερόμενα ευρήματα χρησιμοποιώντας δορυφορικές παρατηρήσεις από γεωστάσιμο μετεωρολογικό δορυφόρο (Martins et al., 2023). Οι υποπεριοχές της Γαλλίας και της Μέσης Ευρώπης ήταν οι περιοχές που επλήγησαν περισσότερο το 2022, με το 88.5% και το 72.3% της συνολικής χερσαίας έκτασης, αντίστοιχα, να παρουσιάζουν ανωμαλίες που ξεπερνούν την τιμή 1 της τυπικής απόκλισης. Αξίζει να σημειωθεί ότι και στις δύο περιπτώσεις, ανωμαλίες που ξεπερνούσαν την τιμή 2 της τυπικής απόκλισης της μέγιστης θερινής θερμοκρασίας παρατηρήθηκαν σε ποσοστό άνω του 17% της συνολικής έκτασης.



Εικόνα 20: Κανονικοποιημένες ανωμαλίες  $LST_{max}$  στην Ευρώπη κατά την περίοδο 2003-2023.

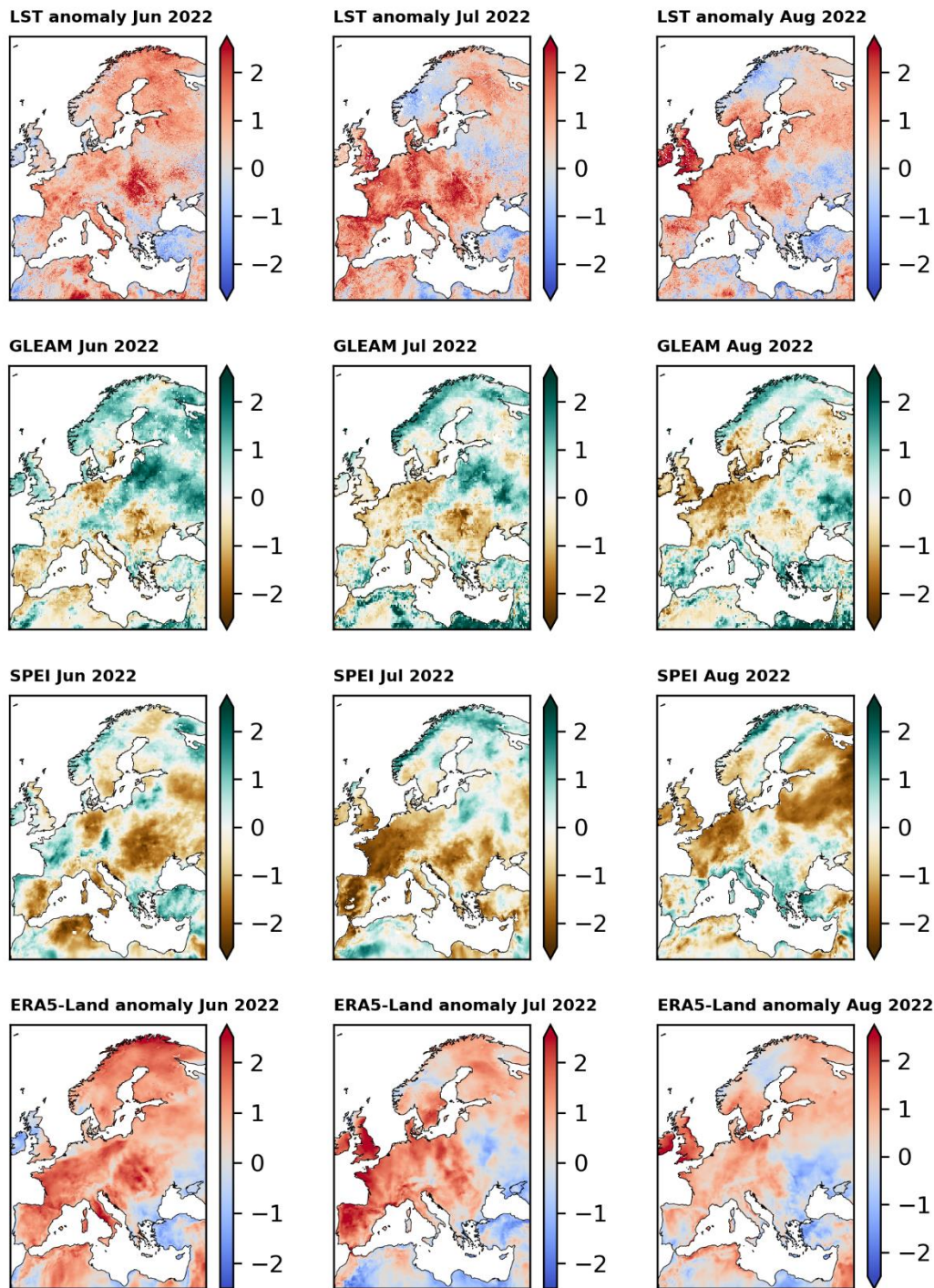


Εικόνα 21: Κανονικοποιημένες ανωμαλίες μέγιστης θερμοκρασίας αέρα στην Ευρώπη κατά την περίοδο 2003-2023.

Πέρα από την ανάλυση των δορυφορικών δεδομένων που χαρακτηρίζουν το εξαιρετικά θερμό καλοκαίρι του 2022 στην Ευρώπη, αξίζει να αναλυθούν και οι συνοπτικές συνθήκες που συντέλεσαν σε αυτό. Σύμφωνα με τους Martins et al. (2023) υπήρχε μια εκτεταμένη περιοχή θετικής ανωμαλίας γεωδυναμικού ύψους 500 hPa στην Σκανδιναβική Χερσόνησο και στην Κεντρική Ευρώπη, κατά τη διάρκεια της άνοιξης. Αυτό το μοτίβο Ωμέγα εμποδισμού, που χαρακτηρίζεται από ισχυρή θέρμανση λόγω των έντονων καθοδικών κινήσεων των αερίων μαζών και της σχετικά χαμηλότερης υγρασίας, λειτούργησε αρνητικά στο σχηματισμό νεφών και, κατά συνέπεια, προκάλεσε μεγάλες περιοχές αρνητικών ανωμαλιών βροχόπτωσης. Επιπλέον, αυτό το μοτίβο συνδέθηκε με ένα μη αναμενόμενο καθεστώς ανατολικού/βορειοανατολικού ανέμου, φέρνοντας ξηρότερο ηπειρωτικό αέρα στην Κεντρική Ευρώπη. Τα παροδικά βαρομετρικά χαμηλά από τον Βόρειο Ατλαντικό εκτρέπονται μακριά από αυτές τις περιοχές λόγω του αντικυκλωνικού εμποδισμού. Ως εκ τούτου, πάνω από τις κανονικές τιμές θερμοκρασίας και κάτω από την κανονική βροχόπτωση παρατηρήθηκαν στη Βόρεια και Κεντρική Ευρώπη, με περιοχές στη Νοτιοανατολική Γαλλία να παρουσιάζουν μερικές από τις θερμότερες και ξηρότερες ανωμαλίες σε ολόκληρη την περίοδο αναφοράς.

Η συνοπτική διαμόρφωση τους θερινούς μήνες δείχνει ότι το μοτίβο ατμοσφαιρικού αποκλεισμού στην κεντρική Ευρώπη παρέμεινε και μάλιστα επιδεινώθηκε κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού, με το κέντρο της ανωμαλίας να βρίσκεται περισσότερο προς την Κεντρική Ευρώπη. Για άλλη μια φορά, χαρακτηρίζεται από εξαιρετικά υψηλές θετικές ανωμαλίες γεωδυναμικού ύψους και σχετίζεται με εμφανή ανώμαλο ανατολικό άνεμο προς χώρες της Κεντρικής/Δυτικής Ευρώπης, όπως η Γαλλία, η Γερμανία και η Ιταλία. Οι επίμονες θερμές και ξηρές ηπειρωτικές αέριες μάζες από την Ανατολική Ευρώπη συνέβαλαν στις εξαιρετικά υψηλές ανωμαλίες θερμοκρασίας στη Γαλλία, την Ιταλία και τμήματα της Ισπανίας και της Γερμανίας. Έλλειψη βροχόπτωσης παρατηρήθηκε επίσης στην Ιβηρική Χερσόνησο, τη Γερμανία και τις Βρετανικές Νήσους.

Αυτή η διαμόρφωση των υψηλότερων από τις κανονικές θερμοκρασίες την άνοιξη και το καλοκαίρι και η συνολική έλλειψη βροχοπτώσεων, ειδικά την άνοιξη, οδηγούν στην εντατικοποίηση της εκτεταμένης ξηρασίας που ξεκίνησε στις αρχές της άνοιξης και διήρκεσε όλο το καλοκαίρι, όπως υποδεικνύεται από τον SPEI, που είναι σταθερά χαμηλότερος από -2 (Εικόνα 22).

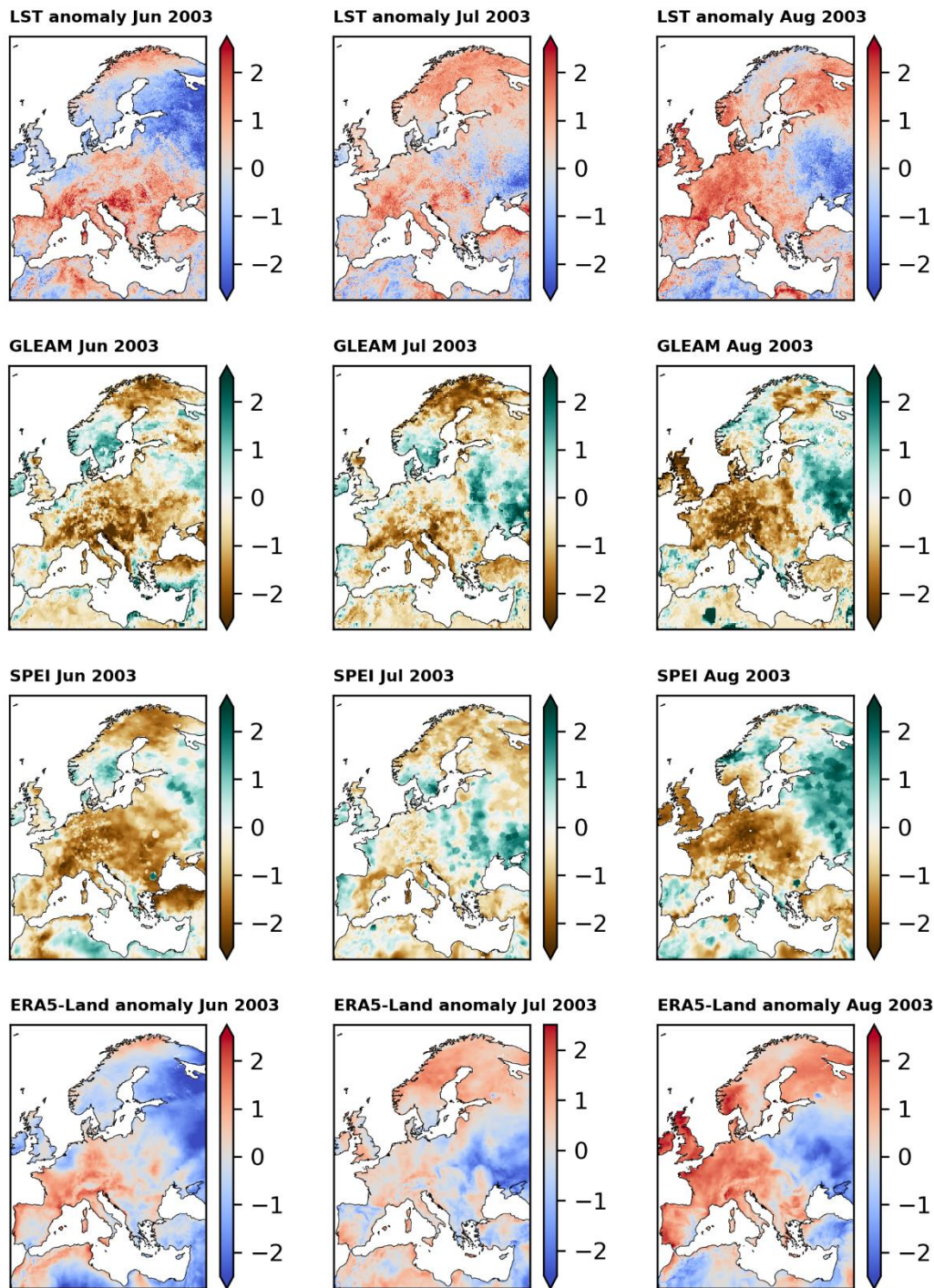


**Εικόνα 22:** Μηνιαίες: α) κανονικοποιημένες ανωμαλίες μέγιστης επιφανειακής θερμοκρασίας, β) τιμές GLEAM, γ) τιμές SPEI, δ) κανονικοποιημένες ανωμαλίες για τη μέγιστη θερμοκρασία ERA5-Land των θερινών μηνών του 2022.

Ένας από τους σπουδαιότερους καύσωνες που έπληξαν την περιοχή της Ευρώπης, ήταν επίσης και ο καύσωνας από τα τέλη Ιουλίου έως και τον Αύγουστο του 2003. Τον Αύγουστο του 2003 κυρίως, αλλά και κατά τη διάρκεια

των τριών καλοκαιρινών μηνών σημειώνονται μεγάλες τιμές θετικής ανωμαλίας LST. Μεγάλες τιμές λαμβάνει και ο δείκτης ξηρασίας GLEAM στην κεντρική Ευρώπη τόσο τον Ιούνιο, όσο και τον Αύγουστο. Τον Ιούλιο οι τιμές του δείκτη ξηρασίας παρουσιάζονται μειωμένες. Τα παραπάνω αποτελέσματα συμφωνούν και με τα αντίστοιχα που προκύπτουν από τον δείκτη SPEI, σύμφωνα με τον οποίο τον Ιούνιο και τον Αύγουστο υπήρχε έλλειμα νερού σε σχέση με το μέσο όρο της περιοχής (αρνητικές τιμές δείκτη SPEI). Δεδομένου ότι το βασικό κύμα καύσωνα ήταν τέλος Ιουλίου έως και τον Αύγουστο, η ξηρασία που παρουσιάστηκε τον Ιούνιο πιθανόν αποτελεί αίτιο, αφού εξασθενεί ο δροσιστικός μηχανισμός της εξάτμισης εξαιτίας της μειωμένης υγρασίας του εδάφους, ενώ η ξηρασία του Αυγούστου είναι αποτέλεσμα του μεγάλου καύσωνα (Εικόνα 23).

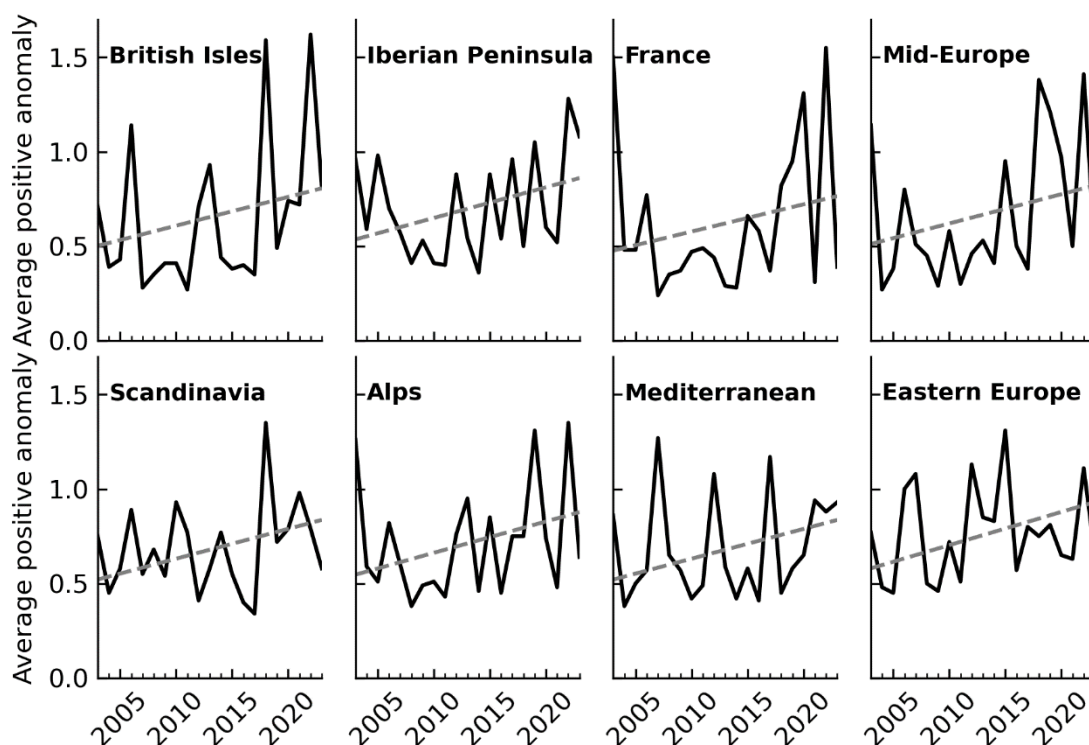




**Εικόνα 23:** Μηνιαίες: α) κανονικοποιημένες ανωμαλίες μέγιστης επιφανειακής θερμοκρασίας, β) τιμές GLEAM, γ) τιμές SPEI, δ) κανονικοποιημένες ανωμαλίες για τη μέγιστη θερμοκρασία ERA5-Land των θερινών μηνών του 2003.

Στην υποπεριοχή PRUDENCE της Μεσογείου, οι πιο έντονες ανωμαλίες LST εμφανίστηκαν το 2007, με τη μέση θετική ανωμαλία, σύμφωνα με την Εικόνα 24, να φτάνει σε υψηλές τιμές για όλους τους καλοκαιρινούς μήνες (1.1,

1.4 και 0.8 για τον Ιούνιο, τον Ιούλιο και τον Αύγουστο αντίστοιχα). Αυτό έρχεται σε συμφωνία με τα εκτεταμένα και επαναλαμβανόμενα φαινόμενα καύσινα κατά το 2007 στην περιοχή.

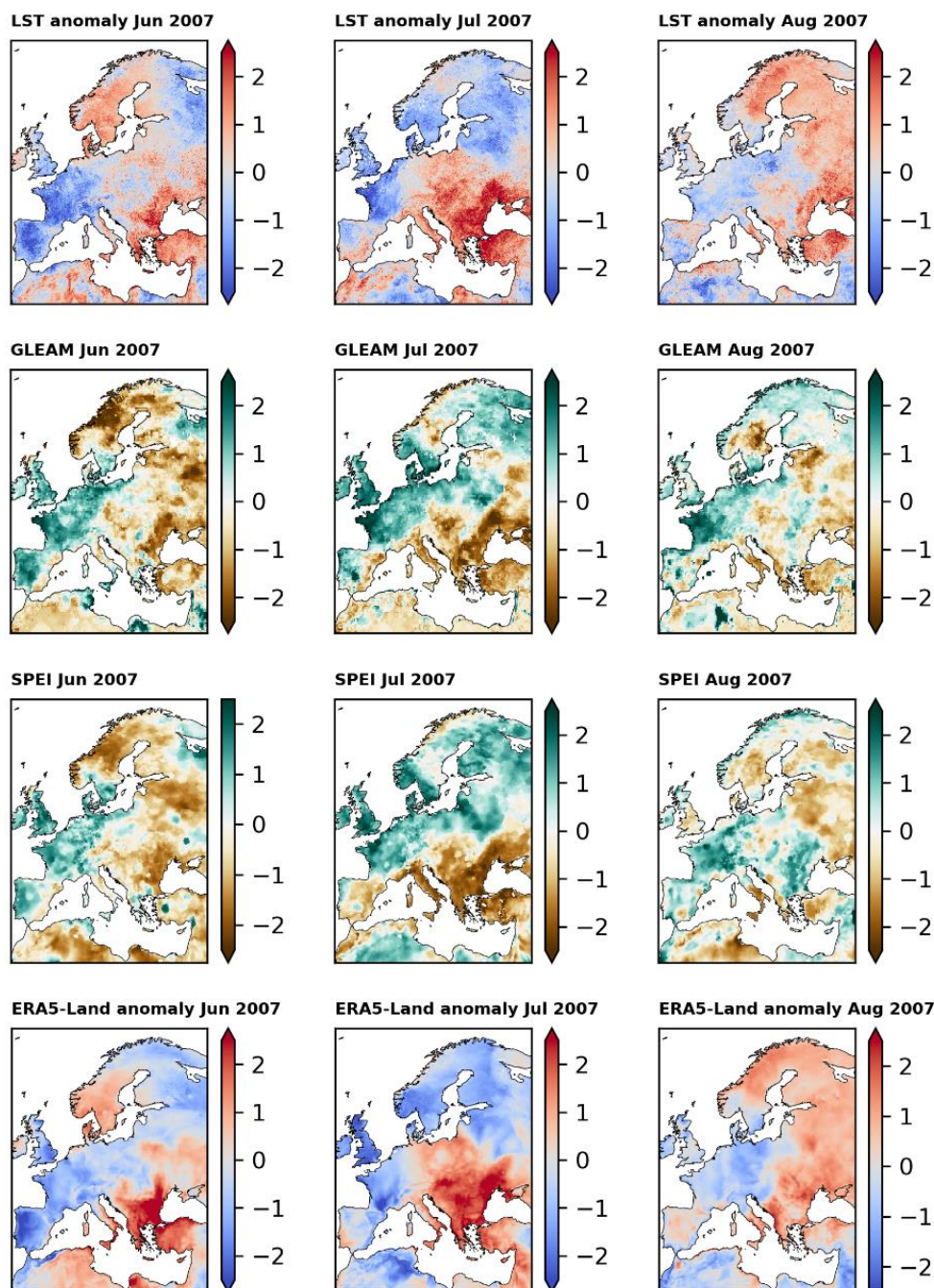


Εικόνα 24: Χρονοσειρές των μέσων θετικών ανωμαλιών  $LST_{max}$ . Οι διακεκομμένες γραμμές αντιπροσωπεύουν τις τάσεις.

Πιο συγκεκριμένα, όσον αφορά την Ελλάδα, σημειώθηκαν τρία κύματα καύσινα, ένα κάθε καλοκαιρινό μήνα. Και τους τρεις καλοκαιρινούς μήνες παρατηρήθηκαν θετικές τιμές  $LST_{max}$ -Anomaly, σε συνδυασμό με πολύ αρνητικές τιμές των δεικτών SPEI και GLEAM (Εικόνα 25), ιδίως τον Ιούλιο, που υποδηλώνουν συνθήκες έντονης ξηρασίας, τόσο στην Ελλάδα, όσο και στην ευρύτερη περιοχή των Βαλκανίων.

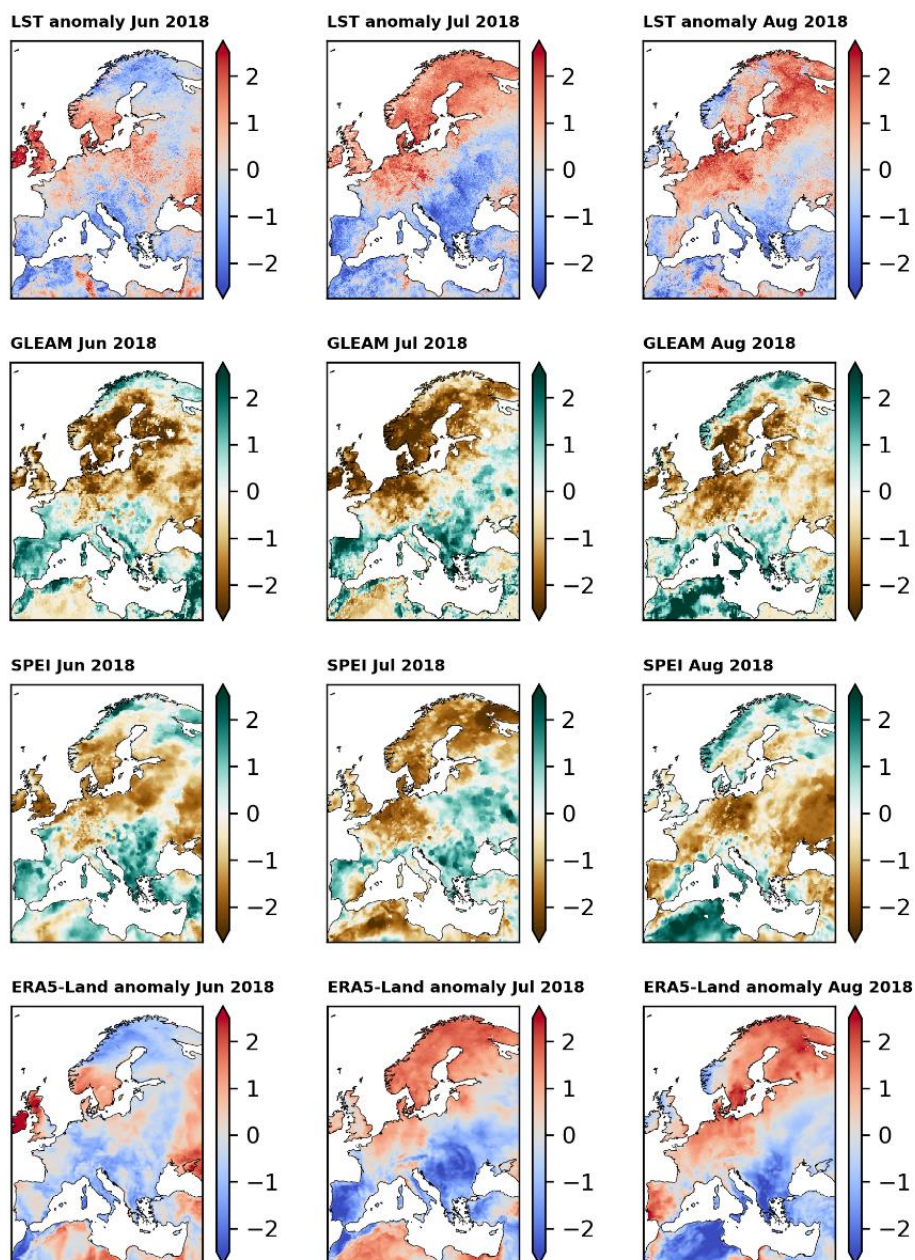
Η θερμική ανωμαλία ήταν ιδιαίτερα έντονη και παρατεταμένη για την Ελλάδα, και σημειώθηκε στη βιβλιογραφία ως η πιο σοβαρή και θανατηφόρα για την περιοχή (Founda and Giannakopoulos, 2009). Δεν είναι τυχαίο ότι η περίοδος δασικών πυρκαγιών του 2007 στην Ελλάδα ήταν από τις χειρότερες της πρόσφατης ιστορίας καθώς σημείωσε νέα ρεκόρ σε ζημιές και απώλειες ζώων. Πάνω από 270,000 εκτάρια βλάστησης κάηκαν και περισσότερα από 110 χωριά επλήγησαν άμεσα από τα πύρινα μέτωπα. Περισσότερα από 3000 σπίτια καταστράφηκαν ολικά ή μερικώς. Το σημαντικότερο είναι ότι συνολικά 78 άτομα, έχασαν τη ζωή τους. Την καταστροφικότερη ημέρα της περιόδου για την

περιοχή, την Παρασκευή 24 Αυγούστου, ο πολύ υψηλός κίνδυνος πυρκαγιάς είχε προβλεφθεί από τη Γενική Γραμματεία Πολιτικής Προστασίας στην Πελοπόννησο, καθώς η μετεωρολογική πρόβλεψη ήταν για πολύ ισχυρούς ανέμους, ενώ συνδύαζε την υψηλή θερμοκρασία με συνθήκες χαμηλής σχετικής υγρασίας (Athanasίου and Xanthopoulos, 2010).



**Εικόνα 25:** Μηνιαίες: α) κανονικοποιημένες ανωμαλίες μέγιστης επιφανειακής θερμοκρασίας, β) τιμές GLEAM, γ) τιμές SPEI, δ) κανονικοποιημένες ανωμαλίες για τη μέγιστη θερμοκρασία ERA5-Land των θερινών μηνών του 2007.

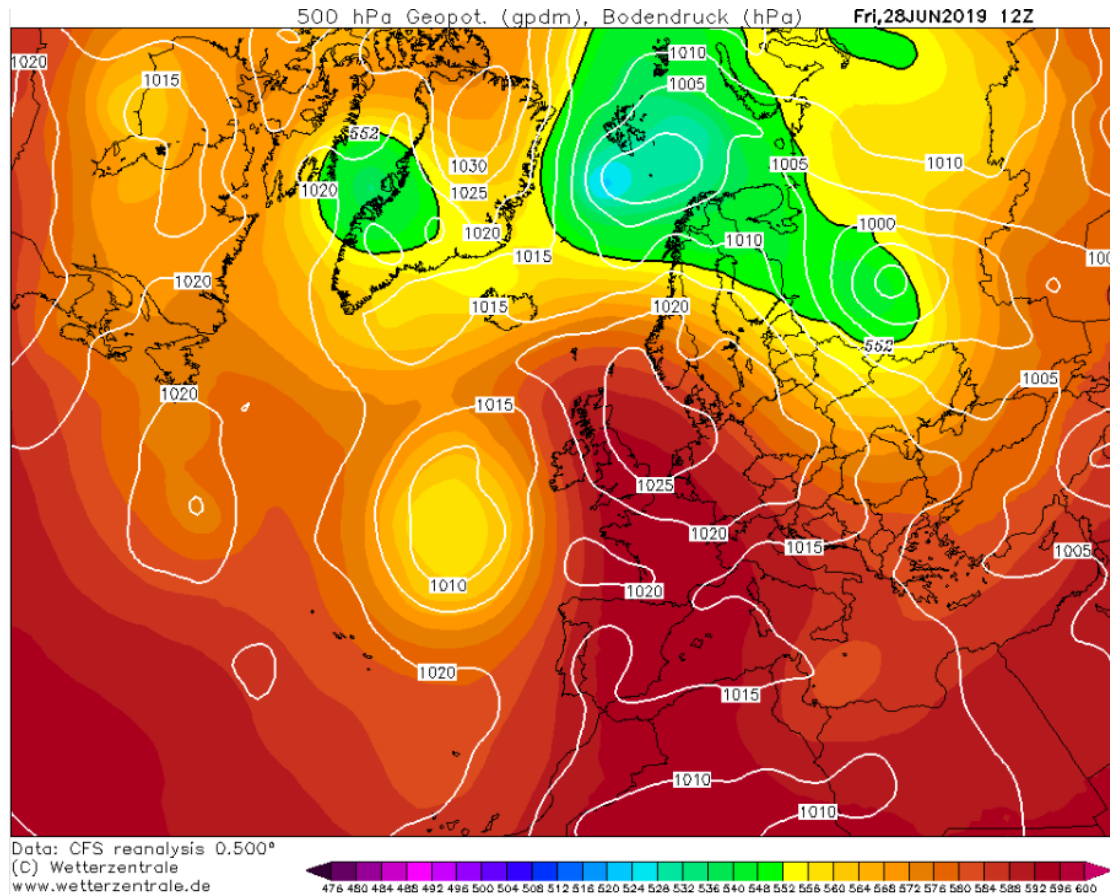
Η Εικόνα 25 υπογραμμίζει ότι περιοχές με ισχυρή σύζευξη ξηράς-ατμόσφαιρας μπορούν να γίνουν θερμά σημεία ακόμη και σε σχετικά ψυχρά και υγρά κλίματα (Dirmeyer et al., 2021; Orth, 2021). Κατά τον καύσωνα που σημειώθηκε το καλοκαίρι του 2018 στη Μεγάλη Βρετανία και τη Βόρεια Ευρώπη, έλαβαν χώρα ιδιαίτερα υψηλές θερμοκρασίες που έφτασαν στο αποκορύφωμά τους τον Ιούλιο. Οι συνθήκες έντονης ξηρασίας την άνοιξη, όπως φαίνεται από τις χαμηλές τιμές του SPEI στην Εικόνα 26, μείωσαν την ψύξη με εξάτμιση και ενίσχυσαν τις θερμοκρασίες του καύσωνα. Αυτή η διαδικασία ενισχύεται μέσω ενός βρόχου θετικής ανάδρασης: η μείωση της εξατμισοδιαπνοής συμβάλλει σε υψηλότερες θερμοκρασίες, οι οποίες, με τη σειρά τους, αυξάνουν την ανάγκη εξάτμισης, μειώνοντας περαιτέρω την υγρασία του εδάφους.



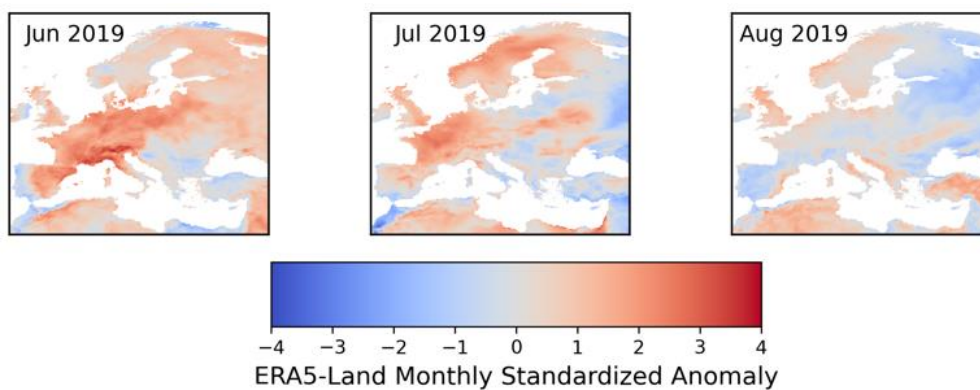
**Εικόνα 26:** Μηνιαίες: α) κανονικοποιημένες ανωμαλίες μέγιστης επιφανειακής θερμοκρασίας, β) τιμές GLEAM, γ) τιμές SPEI, δ) κανονικοποιημένες ανωμαλίες για τη μέγιστη θερμοκρασία ERA5-Land των θερινών μηνών του 2018.

Στις 28 Ιουνίου 2019, καταγράφηκε θερμοκρασία 45.9°C σε μετεωρολογικό σταθμό στη Γαλλία, υπερβαίνοντας σχεδόν κατά 2°C το προηγούμενο ρεκόρ θερμοκρασίας της χώρας, που σημειώθηκε κατά τον καύσωνα του 2003. Ο καύσωνας κορυφώθηκε στην Κεντρική και Βόρεια Ευρώπη, τροφοδοτούμενος από ένα πολύ επίμονο κύμα Rossby πλανητικής κλίμακας, το οποίο μετατράπηκε σε έναν Ω-εμποδισμό (Εικόνα 27). Το γεγονός

αυτό οδήγησε στη μεταφορά θερμού αέρα από τη βόρεια Αφρική στην Ευρώπη (Mitchell et al., 2019), το οποίο επιβεβαιώνεται και από την αρκετά μεγάλη τιμή της μηνιαίας ανωμαλίας της μέγιστης θερμοκρασίας αέρα κατά τον Ιούνιο στην Κεντρική Ευρώπη (Εικόνα 28).



Εικόνα 27: Χάρτης γεωδυναμικού ύψους στην ισοβαρική επιφάνεια των 500 hPa την 28<sup>η</sup> Ιουνίου 2019 - 12:00 UTC (Πηγή: [www.wetterzentrale.de](http://www.wetterzentrale.de)).

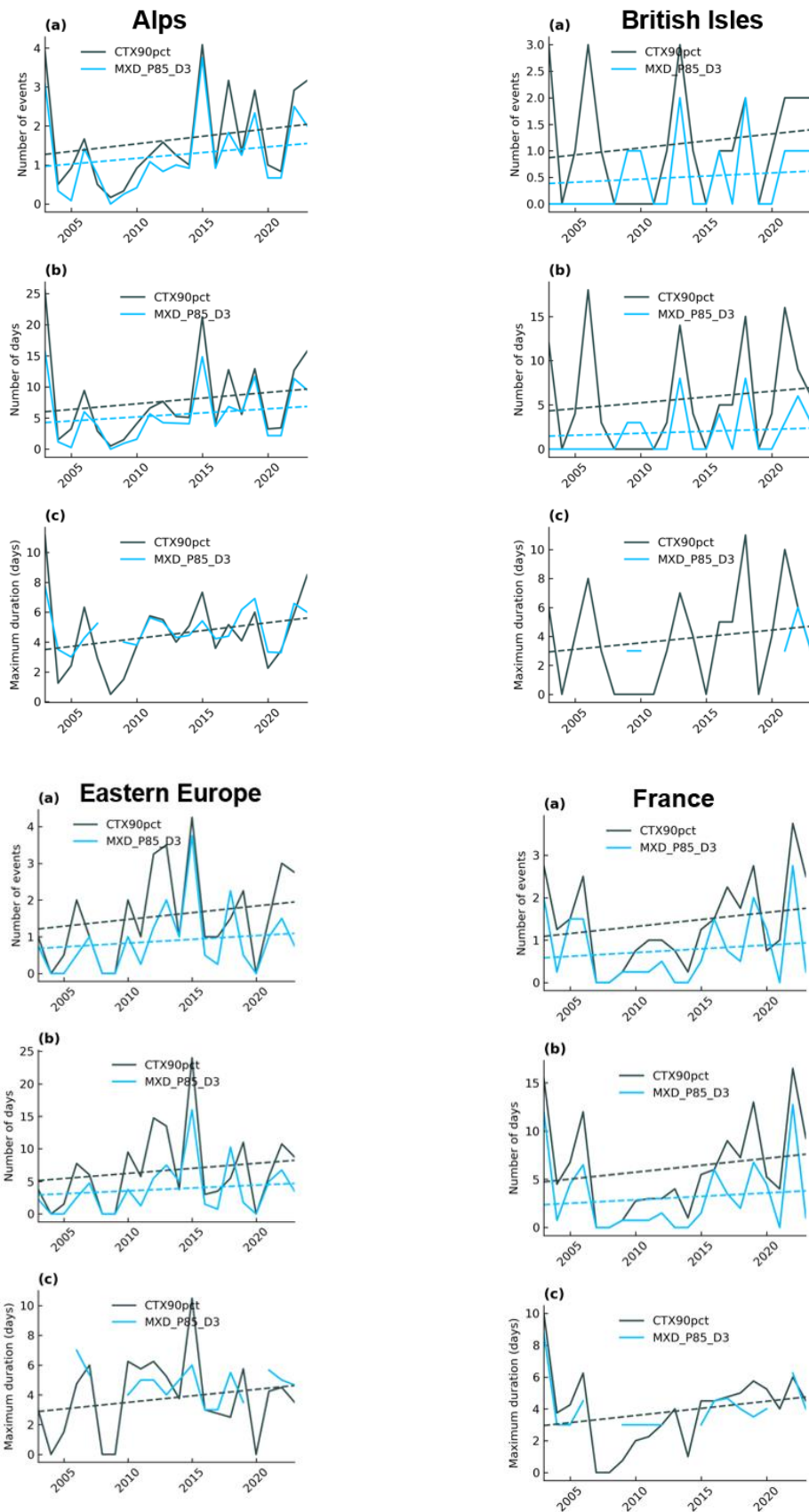


Εικόνα 28: Η μηνιαία κανονικοποιημένη ανωμαλία για τη μέγιστη θερμοκρασία ERA5-Land κατά τους θερινούς μήνες του 2019.

### **3.2 Μελέτη Καυσώνων και Ροών Ενέργειας σε Επιλεγμένα Σημεία**

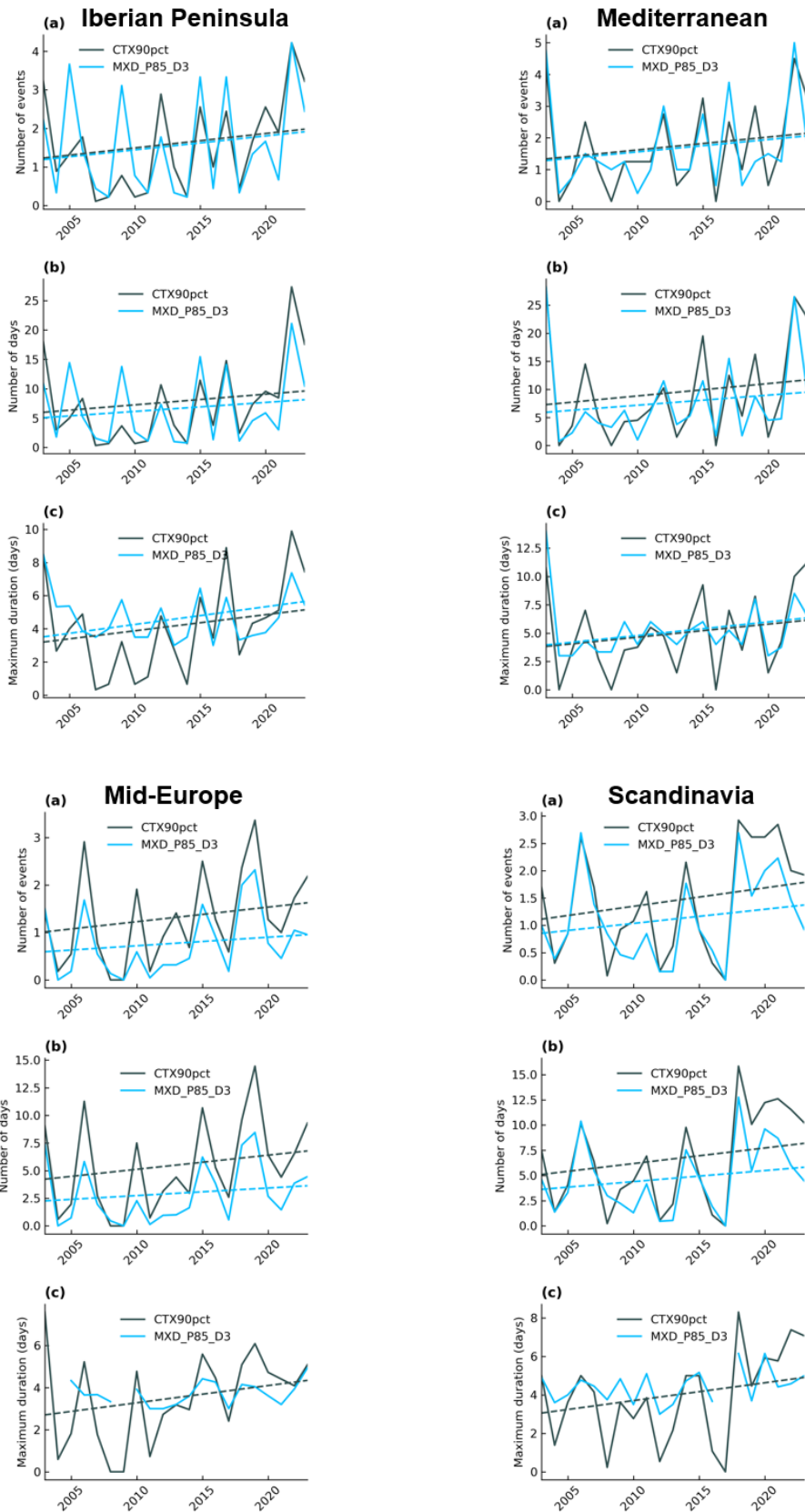
Στη συνέχεια χρησιμοποιώντας ημερήσια δεδομένα LST, τόσο από τον Aqua όσο και από τον Terra, υπολογίστηκαν οι καύσωνες, ως ημέρες με θετική ανωμαλία, με βάση διάφορους συνδυασμούς εκατοστημορίων (80°, 85°, 90°, 95°) και ελάχιστης διάρκειας (1, 2, 3 ημέρες). Για να αξιολογηθεί αξιόπιστα ποιοι από τους ορισμούς των δεικτών LST οι οποίοι χρησιμοποιήθηκαν εμφανίζουν μεγαλύτερη ταύτιση με τα επεισόδια καύσωνα, αυτοί αρχικά συγκρίθηκαν βάσει των συνολικών συστηματικών διαφορών τους με τους καύσωνες σε ότι αφορά την κλιματολογία της περιοχής. Δείκτες LST που χρησιμοποιούν τη συνδυαστική προσέγγιση των δορυφόρων Terra και Aqua (πιο συγκεκριμένα οι δείκτες MXD\_P85\_D3, MXD\_P90\_D3, και MXD\_P95\_D3) βρέθηκε να αναπαράγουν με μικρά σφάλματα και με σημαντική συνέπεια την κλιματολογία των θερμών ημερών της περιοχής.

Ο βαθμός στον οποίο τα παρατηρούμενα γεγονότα συμπίπτουν ως προς την κλιματολογία φαίνεται στις Εικόνες 29 και 30, στις οποίες παρουσιάζονται ανά έτος συγκεντρωτικά στατιστικά για τους καύσωνες όπως εκτιμώνται μέσω της θερμοκρασίας αέρα (ERA5-Land) και τους δείκτες LST (MXD\_P85\_D3) για κάθε περιοχή PRUDENCE. Είναι φανερό ότι ο δείκτης LST ακολουθεί σε σημαντικό βαθμό τη γενική κλιματολογία της περιοχής, επιδεικνύοντας επίσης ικανοποιητική ταύτιση στις διακυμάνσεις ανά έτος. Επιπρόσθετα η μέση διάρκεια των καυσώνων δείχνει συμφωνία μεταξύ LST και  $T_{air}$ . Τόσο για τους καύσωνες όσο και για τις θερμές ημέρες μέσω του LST παρατηρήθηκαν στατιστικά σημαντικές ( $p < 0.05$ ) αυξανόμενες τάσεις, καταδεικνύοντας ότι τα ακραία θερμοκρασιακά γεγονότα γίνονται όλο και συχνότερα στην περιοχή της Ευρώπης τα τελευταία έτη.



**Εικόνα 29:** Χρονοσειρές των HWN (a), HWF (b) και HWD (c) για τους θερινούς καύσωνες (CTX90pct) και τις θερμές ημέρες LST (MXD\_P85\_D3) στις περιοχές PRUDENCE (2002 – 2023). Οι διακεκομμένες γραμμές αντιστοιχούν στις τάσεις.





**Εικόνα 30:** Χρονοσειρές των HWN (a), HWF (b) και HWD (c) για τους θερινούς καύσωνες (CTX90pct) και τις θερμές ημέρες LST (MXD\_P85\_D3) στις περιοχές PRUDENCE (2002 – 2023). Οι διακεκομμένες γραμμές αντιστοιχούν στις τάσεις.

Στον Πίνακα 2 παρουσιάζονται τα ποσοστά συμφωνίας μεταξύ των καυσώνων και των θερμών ημερών LST. Η συμφωνία για τα επεισόδια αντιστοιχεί στο ποσοστό των επεισοδίων καύσωνα τα οποία συμπίπτουν με τα επεισόδια θερμών ημερών LST για κάθε σταθμό (παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για τον δείκτη LST με την ίδια ελάχιστη διάρκεια όπως οι καύσωνες). Αντίστοιχα η συμφωνία για τις ημέρες δίνει το ποσοστό των ημερών καύσωνα οι οποίες αντιστοιχούν επίσης σε θετική ανωμαλία του LST. Οι δείκτες με το μεγαλύτερο ποσοστό συμφωνίας μεταξύ LST, επεισοδίων και ημερών καύσωνα, σημειώνονται με μπλε στον Πίνακα 2.

Πίνακας 2: Ποσοστά συμφωνίας μεταξύ επεισοδίων καύσωνα και θερμών ημερών LST.

Δείκτες LST	Επεισόδια (%)	Ημέρες (%)
MOD_P80_D1	-	41.6
MOD_P80_D2	-	55.9
MOD_P80_D3	73.7	68.4
MOD_P85_D1	-	46.1
MOD_P85_D2	-	61.4
MOD_P85_D3	78.5	73.9
MOD_P90_D1	-	51
MOD_P90_D2	-	67.9
<b>MOD_P90_D3</b>	<b>84.1</b>	<b>80.2</b>
MOD_P95_D1	-	55
MOD_P95_D2	-	75
<b>MOD_P95_D3</b>	<b>91</b>	<b>88.3</b>
MYD_P80_D1	-	41.1
MYD_P80_D2	-	56.3
MYD_P80_D3	75.2	68.3
MYD_P85_D1	-	45.3
MYD_P85_D2	-	61.1
MYD_P85_D3	79	73.2
MYD_P90_D1	-	50
MYD_P90_D2	-	67.4
<b>MYD_P90_D3</b>	<b>86.1</b>	<b>81.9</b>
MYD_P95_D1	-	53.6
MYD_P95_D2	-	73
<b>MYD_P95_D3</b>	<b>86.6</b>	<b>84.1</b>
MXD_P80_D1	-	37.2
MXD_P80_D2	-	50.1
MXD_P80_D3	67.3	61.5
MXD_P85_D1	-	41.4
MXD_P85_D2	-	55.9
MXD_P85_D3	73.1	67.7
MXD_P90_D1	-	46.3

MXD_P90_D2	-	63.2
<b>MXD_P90_D3</b>	<b>80.8</b>	<b>75.8</b>
MXD_P95_D1	-	50.5
MXD_P95_D2	-	70
<b>MXD_P95_D3</b>	<b>87.4</b>	<b>83.9</b>

Από τον παραπάνω πίνακα προκύπτει ότι το 91% των επεισοδίων καύσωνα συνέβη παράλληλα με ένα θερμό γεγονός σύμφωνα με τον δείκτη MOD\_P95\_D3. Το αντίστοιχο ποσοστό για τον δείκτη MXD\_P95\_D3 είναι περίπου 88%. Παρατηρήθηκε, επιπροσθέτως, ότι περίπου το 84% των ημερών καύσωνα αντιστοιχήθηκε με θερμή ημέρα LST σύμφωνα με τον δείκτη MXD\_P95\_D3.

Όσον αφορά τον συσχετισμό των επεισοδίων καύσωνα με τον τύπο κάλυψης γης, υπενθυμίζεται ότι έγινε χρήση δεδομένων ροών θερμότητας σε τοποθεσίες μικρομετεωρολογικών πύργων του δικτύου ICOS στην Ευρώπη. Οι διαφορετικοί τύποι κάλυψης γης έχουν ήδη αναφερθεί στην Ενότητα 2.2.2. Στον Πίνακα 3 που ακολουθεί παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα που αφορούν τον διαμοιρασμό της θερμότητας σε αισθητή και λανθάνουσα κατά τη διάρκεια επεισοδίων καύσωνα, ανάλογα με τον εκάστοτε τύπο βλάστησης.

Πίνακας 3: Ανωμαλίες αισθητής και λανθάνουσας ροής θερμότητας, για κάθε τύπο κάλυψης γης σε περίοδο καύσωνα, σε σύγκριση με τη μέση κατάσταση για τον ίδιο μήνα.

Τύποι κάλυψης γης	Αισθητή θερμότητα (W/m <sup>2</sup> )	Λανθάνουσα θερμότητα (W/m <sup>2</sup> )
Καλλιεργήσιμη γη (CRO)	12.43	30.19
Φυλλοβόλα πλατύφυλλα δάση (DBF)	24.10	38.41
Αειθαλή κωνοφόρα δάση (ENF)	70.26	11.12
Γρασίδι (GRA)	6.42	71.95
Δάση ανάμικτου τύπου (MF)	61.73	24.82
Υδροβιότοποι (WET)	1.25	69.64

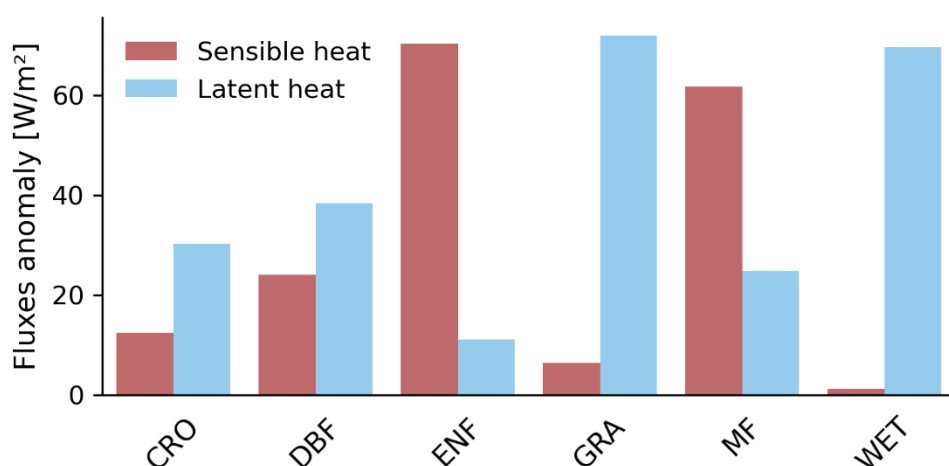
Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τα δεδομένα των σταθμών με τύπους κάλυψης γης CSH, EBF, OSH, SAV και WSA, δεν έχουν συμπεριληφθεί στον παραπάνω πίνακα, διότι κρίνονται ως αναξιόπιστα λόγω του μικρού αριθμού σταθμών και δεδομένων, όπως αυτό προκύπτει από τον Πίνακα 1 (Ενότητα 2.2.2).

Στους σταθμούς που βρίσκονται σε περιοχές καλλιεργήσιμων εκτάσεων, η τιμή της λανθάνουσας θερμότητας ήταν ελαφρώς μεγαλύτερη από αυτή της αισθητής. Αν και σύμφωνα με τους Teuling et al. (2010) κανείς θα ανέμενε μία μεγαλύτερη διαφορά μεταξύ των δύο αυτών ροών ενέργειας, πρέπει να ληφθεί υπόψη η μεγάλη επίδραση του ανθρώπου στις εκτάσεις αυτές με διαδικασίες όπως το πότισμα, όπου αλλάζουν τα αποθέματα υγρασίας του εδάφους και με αποτέλεσμα την άμεση επίδραση στις ροές θερμότητας. Ελαφρώς μεγαλύτερη λανθάνουσα θερμότητα σημειώθηκε και στα φυλλοβόλα πλατύφυλλα δάση.

Σύμφωνα με τον Πίνακα 3, τα αειθαλή κωνοφόρα δάση, όπως και τα δάση ανάμικτου τύπου, κατά τη διάρκεια ενός καύσωνα διοχετεύουν το μεγαλύτερο μέρος της θερμότητας τους σε αισθητή, κι ένα πολύ μικρότερο μέρος σε λανθάνουσα θερμότητα. Αυτό έρχεται σε συμφωνία με τα ευρήματα των Teuling et al. (2010).

Αντιθέτως, το γρασίδι διοχετεύσε το μεγαλύτερο μέρος της θερμότητας του σε λανθάνουσα κατά τις ημέρες καύσωνα. Αντιπαράδειγμα ωστόσο αποτελεί ο σταθμός της Τουλούζης, ο μοναδικός δηλαδή σταθμός εντός του αστικού ιστού, του δικτύου ICOS, που έχει συμπεριληφθεί στην παρούσα μελέτη. Παρ' ότι ο σταθμός της Τουλούζης βρίσκεται σε περιοχή με γρασίδι, οι ανωμαλίες της αισθητής θερμότητας είναι σημαντικά μεγαλύτερες από ότι αυτές της λανθάνουσας θερμότητας κατά τις θερμές ημέρες.

Πολύ μεγαλύτερη λανθάνουσα θερμότητα σε σχέση με την αισθητή σε περιόδους καύσωνα είχαν και οι υδροβιότοποι, γεγονός που οφείλεται στην πολύ έντονη εξάτμιση, εξαιτίας της μεγάλης κάλυψης τους από νερό. Συνολικά τα παραπάνω αποτελέσματα, για κάθε τύπο κάλυψης γης, παρουσιάζονται στην Εικόνα 31.



Εικόνα 31: Ανωμαλίες αισθητής και λανθάνουσας ροής θερμότητας για τους διαφορετικούς τύπους κάλυψης γης.

Η καλοκαιρινή ξηρασία του 2018 εισήγαγε συνθήκες περιορισμένης υγρασίας εδάφους στη Μεγάλη Βρετανία και σε μεγάλα τμήματα της Βόρειας και Κεντρικής Ευρώπης (Dirmeier et al., 2021). Με τον τρόπο αυτό, η περιοχή αυτή έγινε εστία αλληλεπιδράσεων εδάφους-ατμόσφαιρας, και εκτός από τον κυρίαρχο αντίκτυπο των μετεωρολογικών συνθηκών στα εδάφη και τη βλάστηση, η διαθεσιμότητα εδαφικής υγρασίας επηρέασε τη λειτουργία της βλάστησης και, συνεπώς, την εξατμισοδιαπνοή και τα (κοντά στην επιφάνεια) ατμοσφαιρικά ισοζύγια υγρασίας και ενέργειας (Orth, 2021).

Τα παραπάνω επιβεβαιώνονται και από τα αποτελέσματα που προέκυψαν για τις ανωμαλίες της αισθητής και της λανθάνουσας ροής θερμότητας στον σταθμό CH-Fru (Früebüel) στην Ελβετία, από το τέλος Ιουλίου έως τις αρχές Αυγούστου του 2018, κατά τη διάρκεια ενός πολυήμερου κύματος καύσωνα (Πίνακας 4). Σημειώνεται ότι ο σταθμός έχει τοποθετηθεί σε περιοχή με κάλυψη γης από γρασίδι.

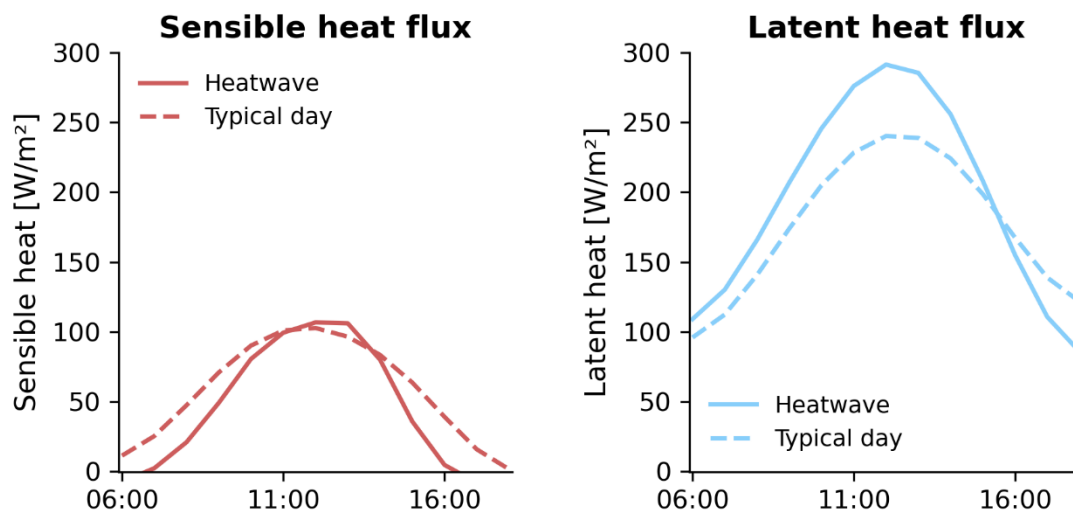
Πίνακας 4: Ανωμαλίες αισθητής και λανθάνουσας ροής θερμότητας σε σύγκριση με τη μέση κατάσταση για τον ίδιο μήνα, κατά τη διάρκεια επεισοδίου καύσωνα στον σταθμό CH-Fru.

Ημερομηνία	Αισθητή θερμότητα (W/m <sup>2</sup> )	Λανθάνουσα θερμότητα (W/m <sup>2</sup> )
30/7/2018	13	95.1
31/7/2018	-4	51.2
1/8/2018	-6.1	11.9
3/8/2018	63.6	50.8
4/8/2018	94.4	-68.6

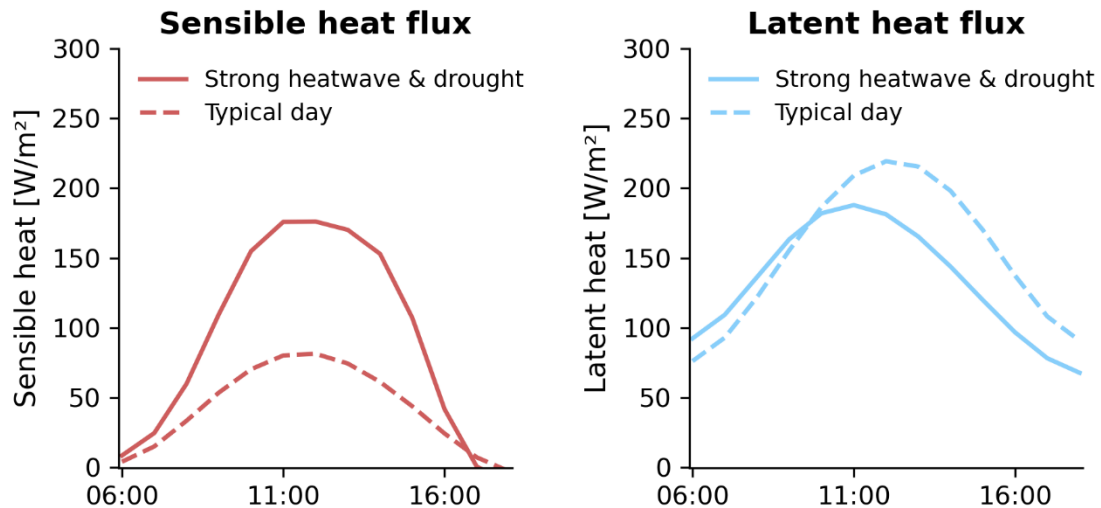
5/8/2018	119.9	-43.2
6/8/2018	81.2	-17.7
7/8/2018	81.7	-34.9

Αρχικά, όσο το έδαφος είχε ακόμα μεγαλύτερα αποθέματα νερού, η ανωμαλία της λανθάνουσας ροής θερμότητας ήταν αρκετά μεγαλύτερη συγκριτικά με την αντίστοιχη της αισθητής, λόγω της ενισχυμένης εξατμισοδιαπνοής. Από την τέταρτη ημέρα (3/8/2018) ωστόσο του κύματος καύσωνα, παρατηρείται μία σταδιακή αντιστροφή της κατάστασης αυτής, λόγω της σχεδόν εξάντλησης των αποθεμάτων υγρασίας του εδάφους, η οποία ενισχύθηκε μέχρι το τέλος του καυσωνικού αυτού κύματος. Πολύ υψηλές τιμές LST, επίσης, σημειώθηκαν τις ημέρες αυτές στους περισσότερους σταθμούς της Ευρώπης, και ιδίως στον σταθμό DE-Gri (Grillenburg) στην περιοχή της Γερμανίας.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει το πώς διαφοροποιήθηκε η συμπεριφορά του γρασιδιού, ως προς τον διαμοιρασμό των ρών θερμότητας, σε συνθήκες καυσώνων μειωμένης (Εικόνα 32) και ισχυρής εντάσεως (Εικόνα 33) στον σταθμό CH-Fru. Το γρασίδι έχει την τάση να διοχετεύει το μεγαλύτερο μέρος της θερμότητας του σε λανθάνουσα κατά τις ημέρες καύσωνα. Ωστόσο, σε συνθήκες ισχυρού καύσωνα, τα αποθέματα υγρασίας του εδάφους σταδιακά μειώνονται, εξαιτίας της έντονης εξατμισοδιαπνοής, με αποτέλεσμα η αισθητή ροή θερμότητας να αυξάνεται. Αντίστοιχη συμπεριφορά παρατηρήθηκε και στους υπόλοιπους σταθμούς με παρόμοια βλάστηση.

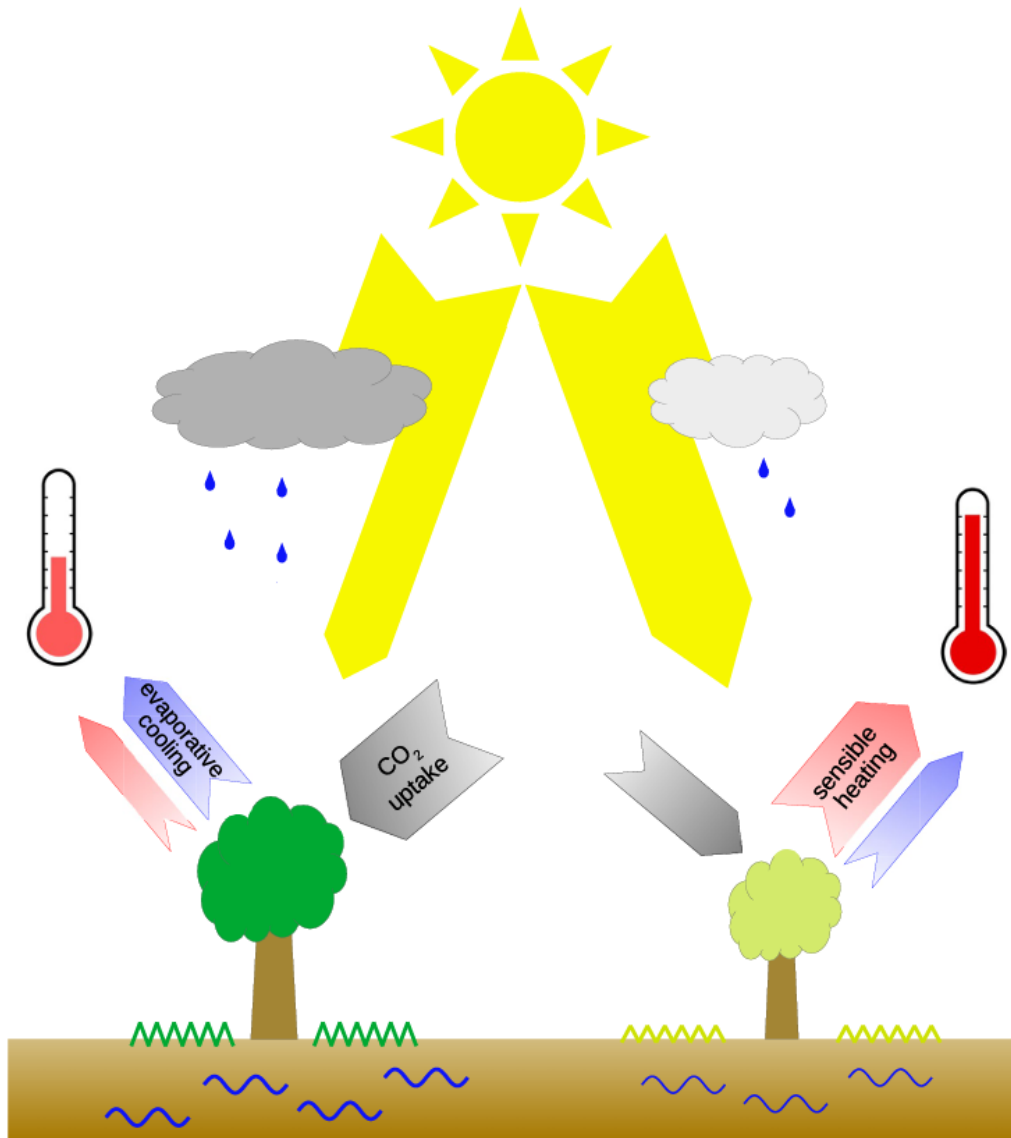


Εικόνα 32: Αισθητή και λανθάνουσα ροή θερμότητας κατά την 21<sup>η</sup> Ιουλίου 2019 (ημέρα καύσωνα μικρής εντάσεως), όπως αυτές καταγράφηκαν στον σταθμό του δικτύου ICOS CH-Fru. Με διακεκομμένες γραμμές απεικονίζονται οι αντίστοιχες ροές μία τυπική ημέρα.



Εικόνα 33: Αισθητή και λανθάνουσα ροή θερμότητας κατά την 4<sup>η</sup> Αυγούστου 2018 (ημέρα ισχυρού καύσωνα), όπως αυτές καταγράφηκαν στον σταθμό του δικτύου ICOS CH-Fru. Με διακεκομμένες γραμμές απεικονίζονται οι αντίστοιχες ροές μία τυπική ημέρα.

Συμπερασματικά θα μπορούσε κανείς να πει ότι τα εδάφη και η βλάστηση απορροφούν το ατμοσφαιρικό CO<sub>2</sub> (Heimann and Reichstein, 2008), η υγρασία τους μπορεί να μετριάσει τις πυρκαγιές (Forkel et al., 2019; O et al., 2020) και η ψύξη τους από την εξάτμιση μπορεί να μετριάσει τις υψηλές θερμοκρασίες (Seneviratne et al., 2012). Ομως, οι λειτουργίες αυτές εξαρτώνται από τις μετεωρολογικές συνθήκες. Η υψηλή ακτινοβολία και οι χαμηλές βροχοπτώσεις μπορούν να μειώσουν σημαντικά τα αποθέματα υγρασίας στα οικοσυστήματα και κατά συνέπεια να περιορίσουν τις λειτουργίες τους αυτές. Η έλλειψη νερού στο υπέδαφος περιορίζει την εξατμισοδιαπνοή, και κατόπιν την λανθάνουσα ροή θερμότητας του εδάφους (Εικόνα 34) (Orth, 2021).



Εικόνα 34: Η βλάστηση μεταφράζει τις μετεωρολογικές δυνάμεις όπως η ακτινοβολία και η βροχόπτωση σε λειτουργίες οικοσυστήματος όπως, για παράδειγμα, η ρύθμιση της θερμοκρασίας και η πρόσληψη CO<sub>2</sub> από την ατμόσφαιρα. Η ψύξη με εξάτμιση και η πρόσληψη CO<sub>2</sub> είναι συχνά ισχυρότερες σε υγρές συνθήκες (αριστερά), ενώ σε ξηρές συνθήκες η αυξημένη αισθητή θερμότητα προάγει τις υψηλές θερμοκρασίες (δεξιά) (Orth, 2021).



## Κεφάλαιο 4<sup>ο</sup>

### Συμπεράσματα και Προτάσεις για Μελλοντική Έρευνα

Η αυξανόμενη διαθεσιμότητα μακροχρόνιων παρατηρήσεων δορυφορικής τηλεπισκόπησης εισάγει νέες προοπτικές για την παρακολούθηση των ακραίων κλιματικών συνθηκών, όπως οι καύσωνες και οι ξηρασίες. Παρά τα σαφή πλεονεκτήματα που παρέχει η χρήση δορυφορικών δεδομένων LST (εκτενής κάλυψη, υψηλή χωρική ανάλυση, συνεχείς παρατηρήσεις), η μελέτη επεισοδίων καύσωνα μέσω αυτών είναι σχετικά περιορισμένη στη βιβλιογραφία. Οι προηγούμενες έρευνες είχαν εστιάσει μόνο στους πιο έντονους καύσωνες ή σε συγκεκριμένης τοποθεσίες, όπως σημεία μετεωρολογικών σταθμών. Στην παρούσα εργασία αναπτύχθηκε μία πρωτότυπη μεθοδολογική προσέγγιση μελέτης των καυσώνων στην περιοχή της Ευρώπης, χρησιμοποιώντας πλήθος ημερήσιων δορυφορικών δεδομένων από τον αισθητήρα MODIS για μακρά περίοδο παρατηρήσεων. Επιπλέον για την καλύτερη κατανόηση των διεργασιών της επιφανείας χρησιμοποιήθηκαν επιπρόσθετα δεδομένα reanalysis, δείκτες ξηρασίας και παρατηρήσεις ροών ενέργειας από μικρομετεωρολογικούς πύργους.

Τα ευρήματα της παρούσας μελέτης δείχνουν ότι το LST καταγράφει αποτελεσματικά λεπτομερή χωρικά μοτίβα που συνδέονται με τους καύσωνες και τις ξηρασίες στην Ευρώπη, αποδεικνύοντας ότι οι δορυφορικές παρατηρήσεις είναι πολύτιμες για τη διερεύνηση της δυναμικής της επιφάνειας της γης, υπό την συνθήκη της υπερθέρμανσης του πλανήτη. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό σε περιοχές με περιορισμένη κάλυψη μετεωρολογικών σταθμών, αφού μπορεί να βοηθήσει στην ανάπτυξη αποτελεσματικών στρατηγικών μετριασμού των επιπτώσεων φαινομένων που σχετίζονται με την κλιματική αλλαγή. Τα αποτελέσματα της μελέτης κατέδειξαν ότι τα επεισόδια καύσωνα τείνουν να γίνουν εντονότερα από το παρελθόν. Συγκεκριμένα βρέθηκε ότι μια στατιστικά σημαντική τάση των θερμών ανωμαλιών του μέγιστου ετήσιου LST για το σύνολο της περιοχής της Ευρώπης. Επιπρόσθετα οι υψηλές επιφανειακές θερμοκρασίες επηρεάζουν όλο και μεγαλύτερες περιοχές. Για παράδειγμα το 75% της Ευρώπης αντιμετώπιζε σημαντικά υψηλές θερμοκρασίες κατά τον καύσωνα του 2022.

Η ένταση ενός επεισοδίου καύσωνα ενδέχεται να επηρεαστεί, πέρα από τις συνοπτικές συνθήκες, και από τις συνθήκες υγρασίας του εδάφους. Παρατηρήθηκε ότι η ξηρασία άλλοτε προηγείται του καύσωνα και λειτουργεί ως

μηχανισμός ενίσχυσής του, αφού η μειωμένη υγρασία του εδάφους, έχει ως αποτέλεσμα τη μειωμένη εξάτμιση, και συνεπώς την εξασθένηση του δροσιστικού αυτού μηχανισμού. Χαρακτηριστικό παράδειγμα για τον παραπάνω μηχανισμό αποτέλεσε ο ισχυρός καύσωνας που έπληξε την Ευρώπη το 2003 όπως διαπιστώθηκε από τη χρήση του δείκτη ξηρασίας SPEI. Συχνά ωστόσο τα επεισόδια καύσωνα αποτελούν την αιτία εμφάνισης ξηρασίας, αφού η εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία σε ημέρες καύσωνα είναι μεγαλύτερη από τις τυπικές συνθήκες, με αποτέλεσμα να αυξάνεται η θερμοκρασία του εδάφους και του υπερκείμενου αέρα (καύσωνας Νοτιοανατολικής Ευρώπης του 2007).

Σημαντικό ρόλο στην εξέλιξη ενός φαινομένου καύσωνα ή και ξηρασίας παίζει η κατανομή της διαθέσιμης ενέργειας του εδάφους σε αισθητή και λανθάνουσα ροή θερμότητας. Με τη χρήση παρατηρήσεων ροών λανθάνουσας και αισθητής θερμότητας από μικρομετεωρολογικούς πύργους αποδείχθηκε ότι καταλυτικό παράγοντα σε αυτή τη διαδικασία αποτελεί ο εκάστοτε τύπος κάλυψης γης. Συγκεκριμένα, η κατανομή της αισθητής και της λανθάνουσας θερμότητας αποκλίνει ισχυρά μεταξύ των δασών και των εκτάσεων γρασιδιού. Παρατηρήθηκε, ότι οι εκτάσεις γρασιδιού μπορούν να ανταπεξέλθουν καλύτερα σε μικρής ή μέτριας έντασης καύσωνες, συγκριτικά με τα δάση, λόγω της έντονης εξάτμισης που λειτουργεί ως δροσιστικός μηχανισμός, όμως καταπονούνται σε μεγάλης έντασης καύσωνες, αφού με αυτό τον τρόπο εξαντλούν τα διαθέσιμα αποθέματα υγρασίας τους. Αντιθέτως, τα δάση βρέθηκε ότι ακολουθούν μία πιο συντηρητική τακτική όσον αφορά την εξατμισοδιαπνοή, εξαιτίας της οποίας μπορεί μεν να θερμαίνονται ισχυρότερα, διατηρούν δε αποθέματα νερού, οπότε και ανταπεξέρχονται καλύτερα σε ακραία επεισόδια καύσωνα.

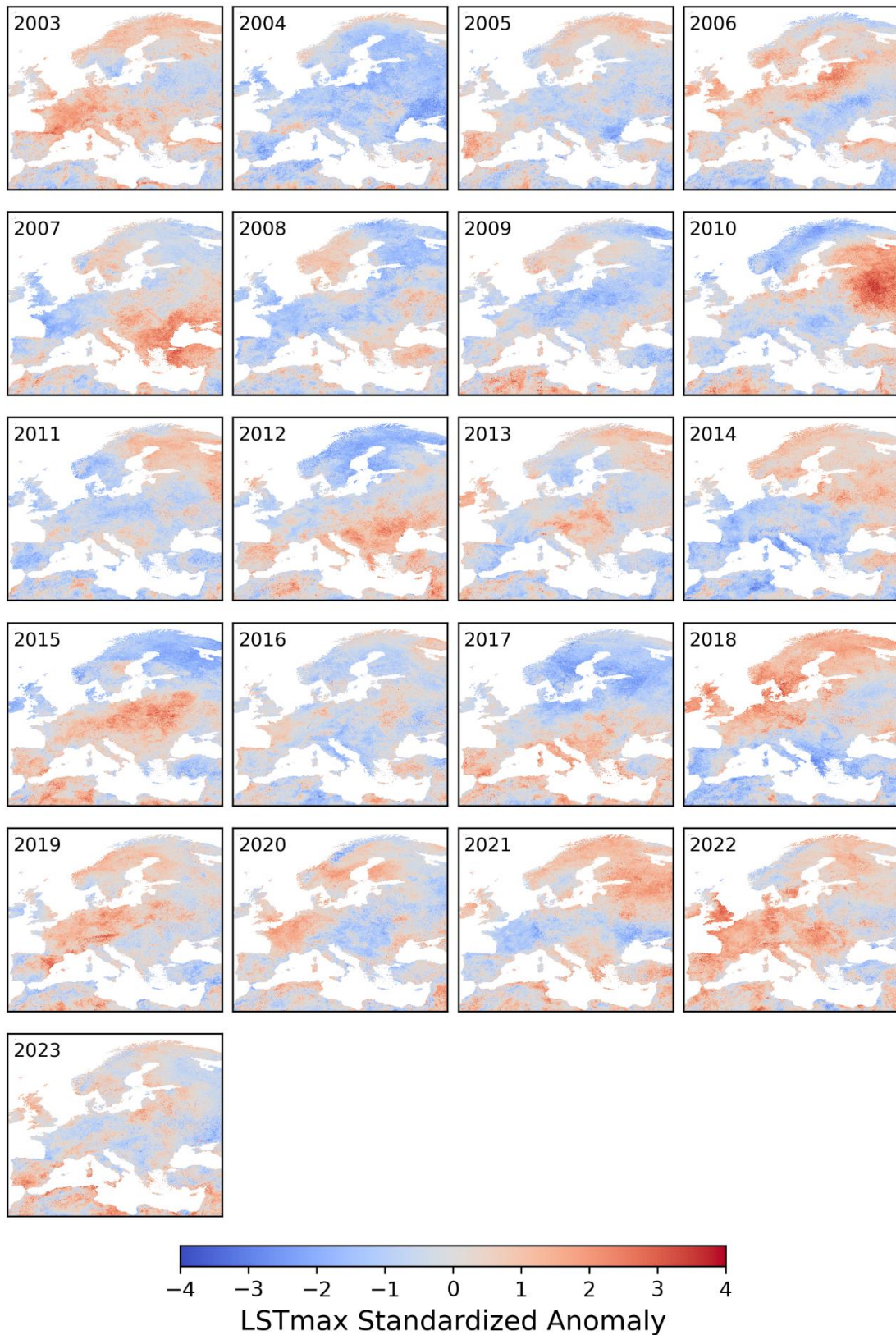
Οι παραπάνω παρατηρήσεις θα μπορούσαν να εφαρμοστούν και στον ενεργειακό σχεδιασμό των πόλεων, αφού τα πάρκα αποτελούν σημαντικό παράγοντα δροσισμού κάθε πόλης σε περιόδους καύσωνα, και μη. Σύμφωνα με τα όσα προαναφέρθηκαν, σε περιοχές που πλήττονται συχνά από ισχυρούς καύσωνες, μπορεί κανείς να υποθέσει ότι είναι προτιμότερη η επιλογή φύτευσης δέντρων, ενώ σε περιοχές που πλήττονται από συχνούς, μικρότερης έντασης καύσωνες είναι προτιμότερη η φύτευση γρασιδιού. Επομένως, πρέπει να μελετηθεί αρχικά η κλιματολογία της εκάστοτε περιοχής. Εν τούτοις, επειδή στην παρούσα μελέτη λήφθηκαν δεδομένα ροών ενέργειας μόνο από έναν αστικό σταθμό του δικτύου ICOS, η κατάλληλη επιλογή του τύπου βλάστησης σε κάθε πόλη χρήζει περαιτέρω ανάλυσης, η οποία θα μπορούσε να αποτελέσει μία πρόταση για μελλοντική έρευνα.

Αναγκαία σε αυτή την περίπτωση είναι η γεωγραφική επέκταση του συνόλου δεδομένων, αφού η πλειονότητα των μικρομετεωρολογικών πύργων που έχουν τοποθετηθεί σε αστικές τοποθεσίες, βρίσκονται στις ΗΠΑ. Μελλοντική πρόκληση αποτελεί η παρούσα ανάλυση να επαναληφθεί, σε παγκόσμιο επίπεδο. Αυτό θα δώσει και την δυνατότητα σύγκρισης αστικών και περιαστικών περιοχών και πώς η κάθε μία από αυτές ανταποκρίνεται σε συνθήκες καύσωνα, καθώς και τις διαφοροποιήσεις μεταξύ κλιματικών ζωνών. Επιπρόσθετα, περαιτέρω ανάλυση της συμπεριφοράς των διαφόρων ειδών βλάστησης σε περιόδους ξηρασίας και καυσώνων θα πρέπει να συνεκτιμήσει και τις μελλοντικές αυξητικές τάσεις των ακραίων φαινομένων καύσωνα και ξηρασίας, τόσο ως προς την ένταση όσο και ως προς τη διάρκεια, λόγω κλιματικής αλλαγής.

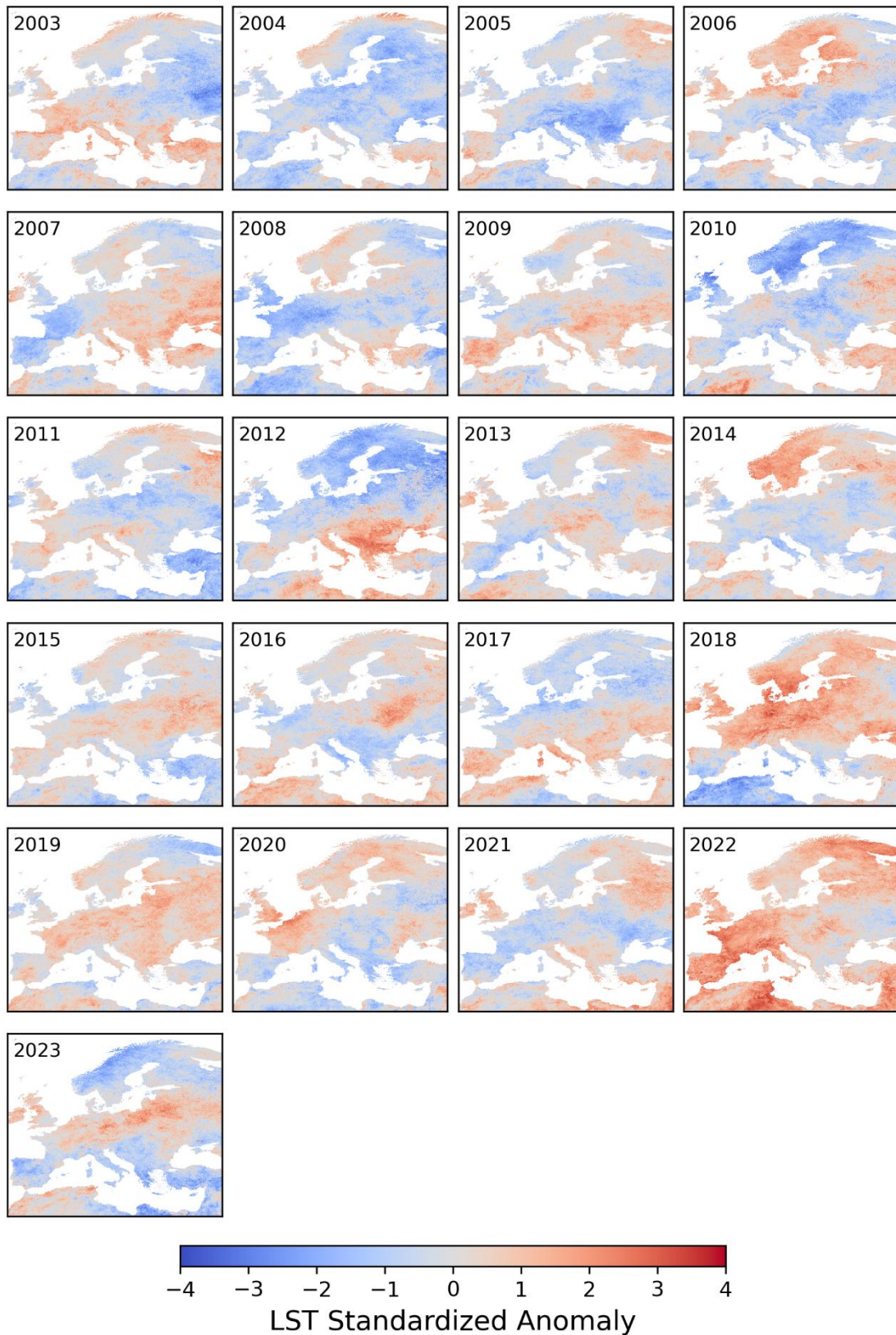
Στα θέματα που επιβάλλουν μια περαιτέρω διερεύνηση ανήκουν οι συνοπτικές συνθήκες, καθώς και η συσχέτισή τους με καύσωνες και ξηρασίες, αφού επρόκειτο για τη γενεσιουργό αιτία των φαινομένων αυτών. Ενδιαφέρον θα παρουσίαζε η σύνδεση μεταξύ μετεωρολογικών φαινομένων μέσης κλίμακας όπως ο Ωμέγα εμποδισμός με διεργασίες τοπική κλίμακας του εδάφους. Τέλος, δεδομένης της συσχέτισης της επιφανειακής θερμοκρασίας εδάφους με τη θερμοκρασία του αέρα, για μελλοντική έρευνα προτείνεται η χρήση δεδομένων παρατηρήσεων θερμοκρασίας αέρα, πέρα από reanalysis δεδομένα, καθώς και η χρήση δορυφορικών εικόνων νυχτερινών παρατηρήσεων.

## Παράρτημα Ι

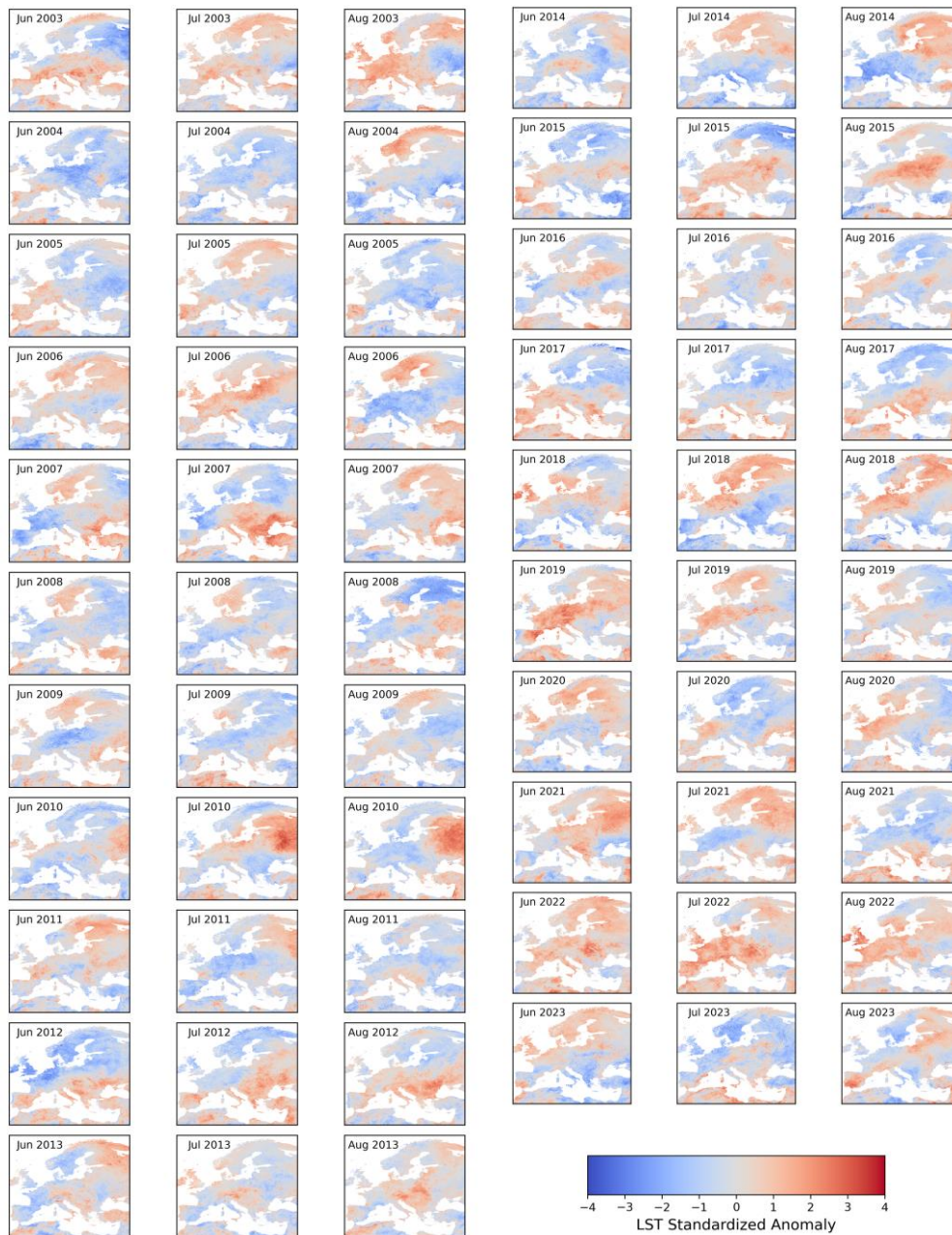
Στο Παράρτημα Ι παρουσιάζεται το σύνολο των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από την μεθοδολογία που περιγράφεται στην Ενότητα 2.2.1: «Υπολογισμός Δεικτών Ανωμαλιών Μέγιστης Επιφανειακής Θερμοκρασίας ( $LST_{max}$ )».



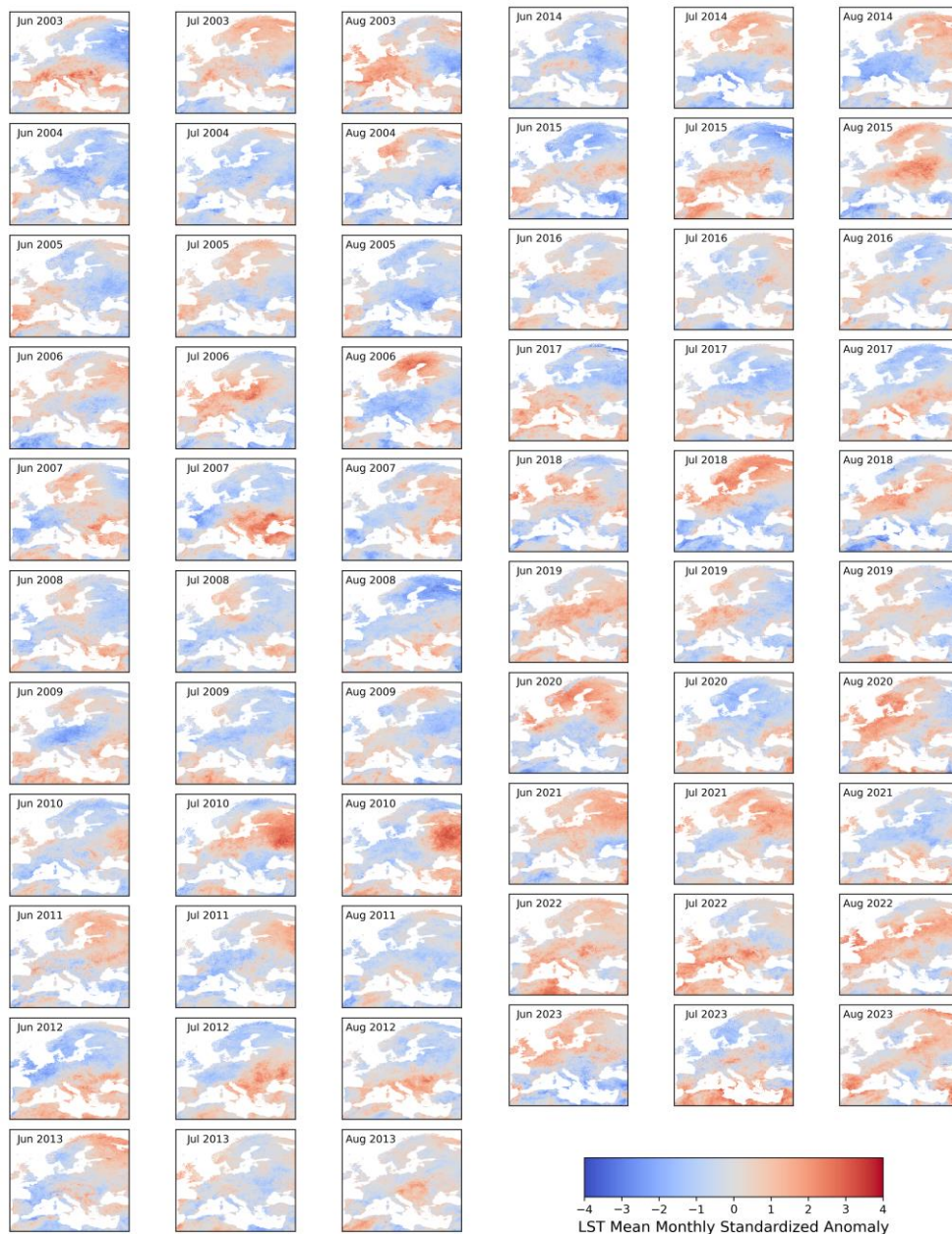
**Εικόνα I.1:** Κανονικοποιημένες ετήσιες ανωμαλίες μέγιστων τιμών  $LST_{max}$  στην Ευρώπη κατά την περίοδο 2003-2023 (προϊόν MYD11A1).



Εικόνα 1.2: Κανονικοποιημένες ετήσιες ανωμαλίες μέσω των τιμών  $LST_{max}$  στην Ευρώπη κατά την περίοδο 2003-2023 (προϊόν MYD11A1).

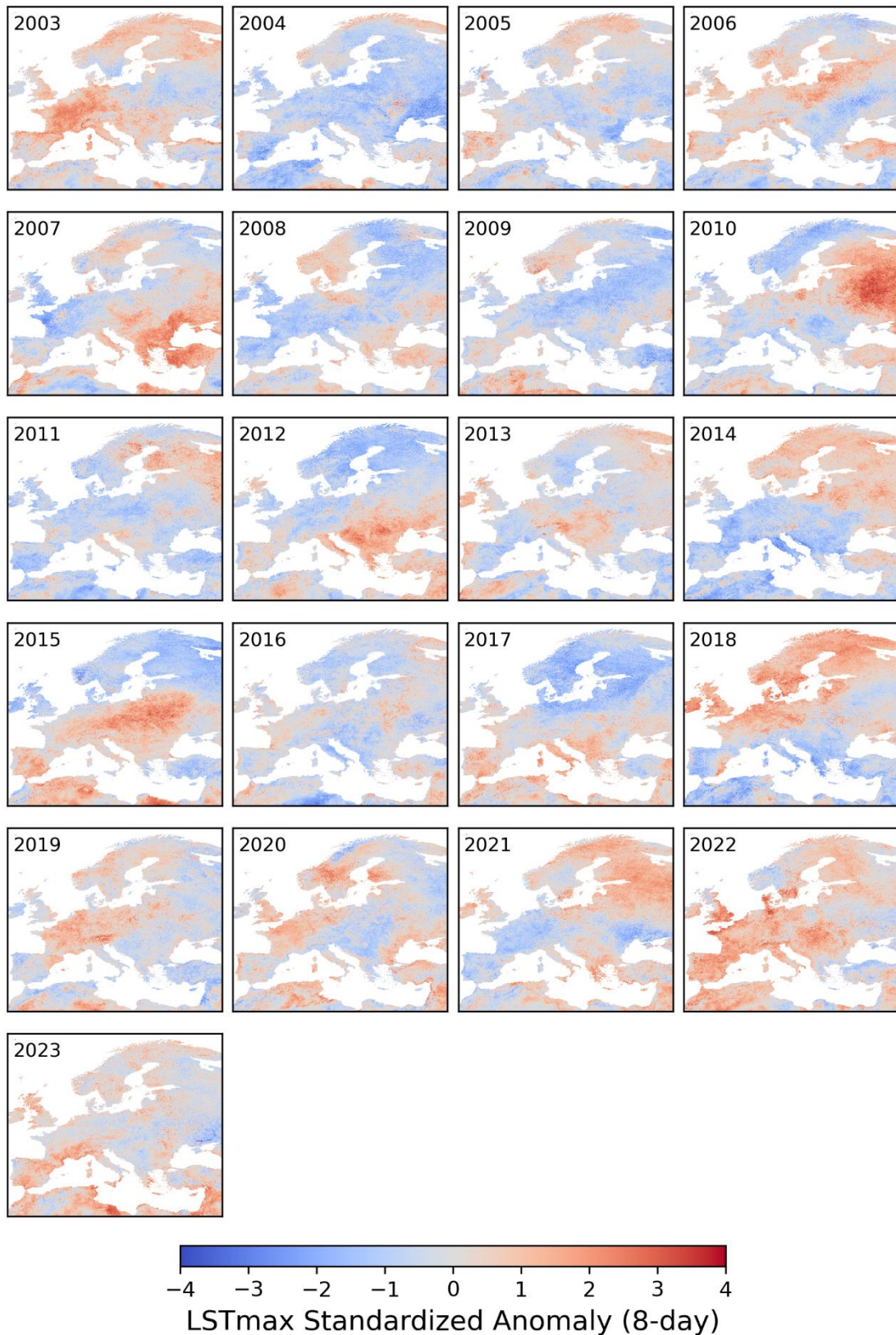


**Εικόνα 1.3:** Κανονικοποιημένες μηνιαίες ανωμαλίες μέγιστων τιμών LST<sub>max</sub> στην Ευρώπη κατά την περίοδο 2003-2023 (προϊόν MYD11A1).

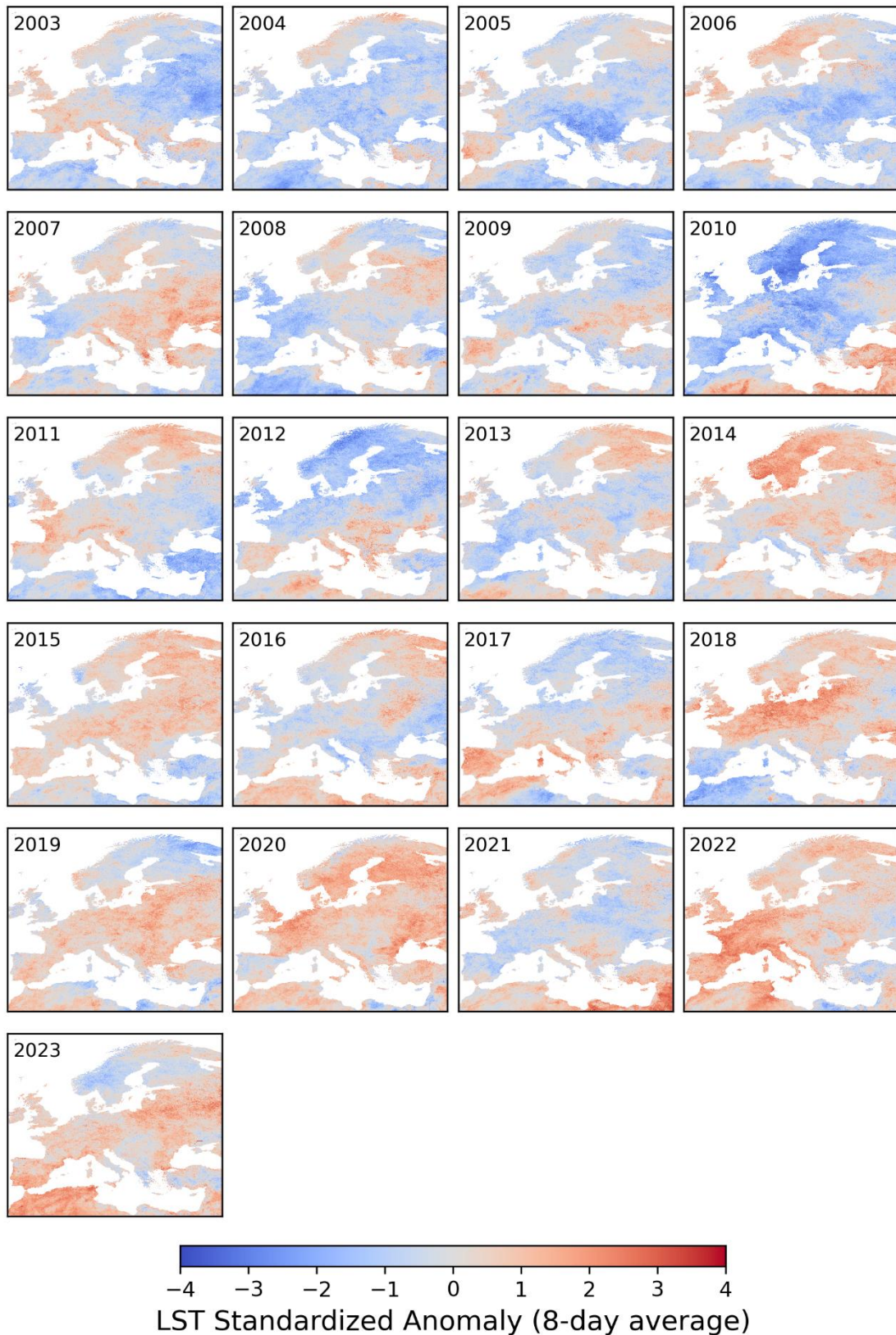


Εικόνα Ι.4: Κανονικοποιημένες μηνιαίες ανωμαλίες μέσω των τιμών  $LST_{max}$  στην Ευρώπη κατά την περίοδο 2003-2023 (προϊόν MYD11A1).

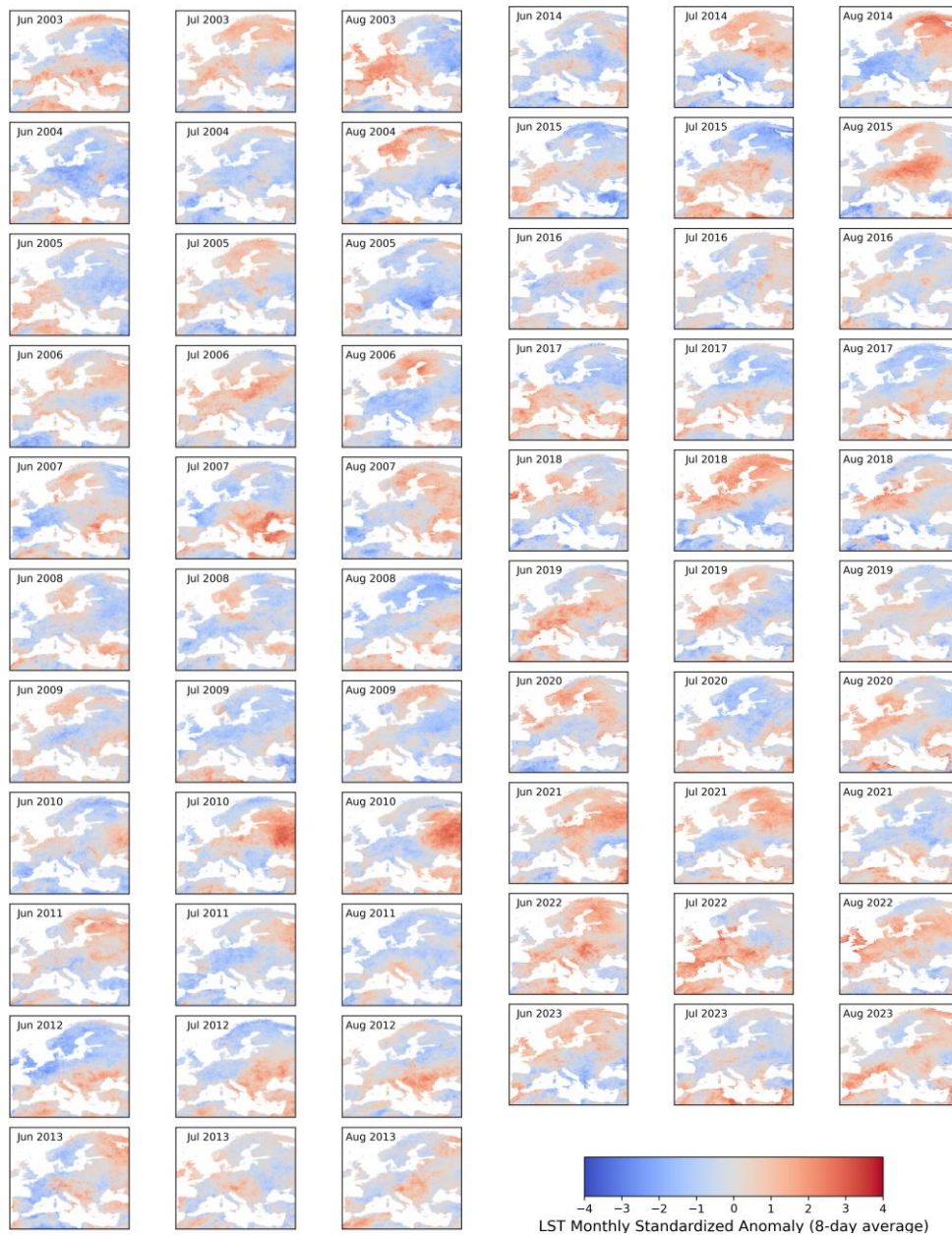




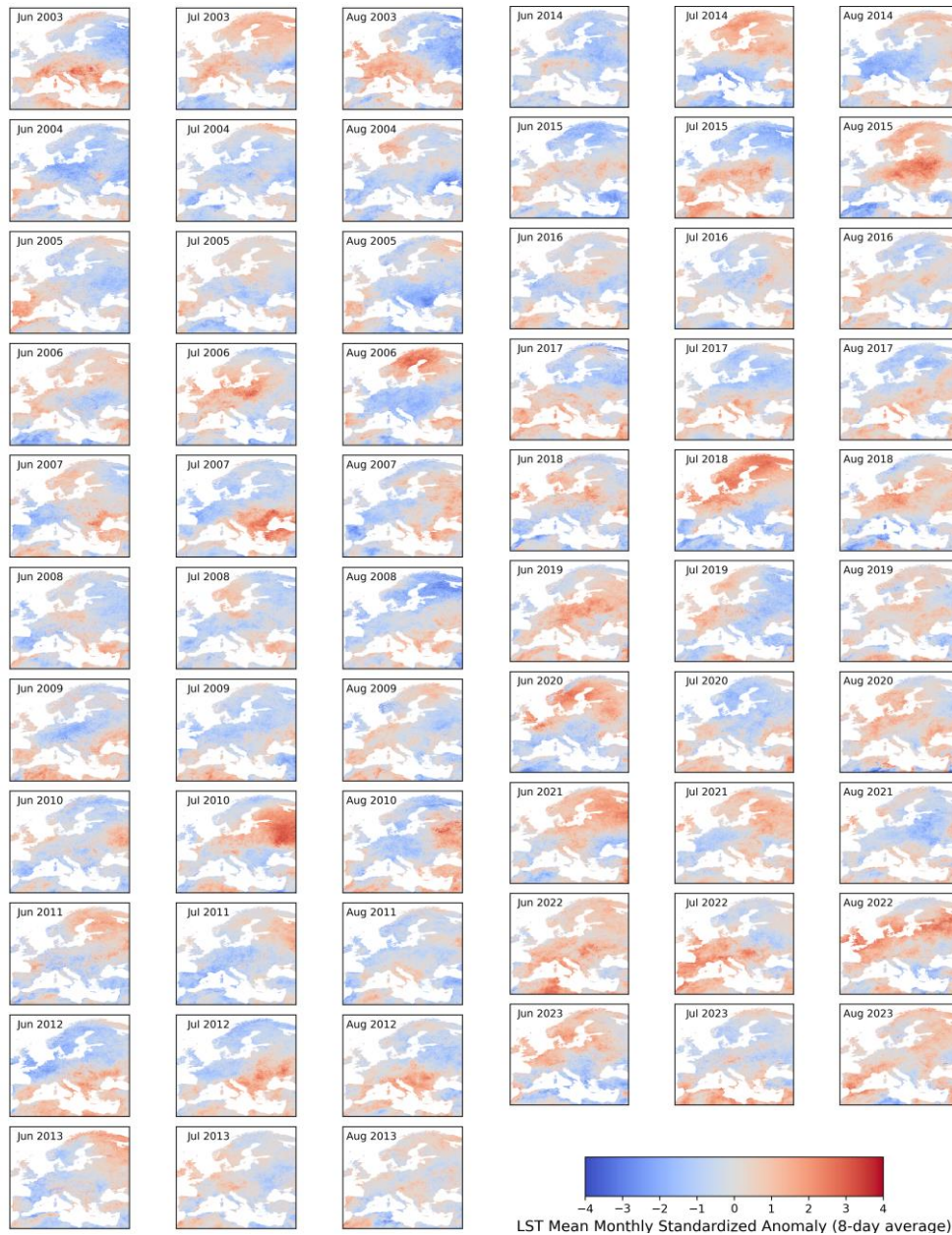
Εικόνα 1.5: Κανονικοποιημένες ετήσιες ανωμαλίες μέγιστων τιμών LST<sub>max</sub> στην Ευρώπη κατά την περίοδο 2003-2023 (προϊόν MYD11A2).



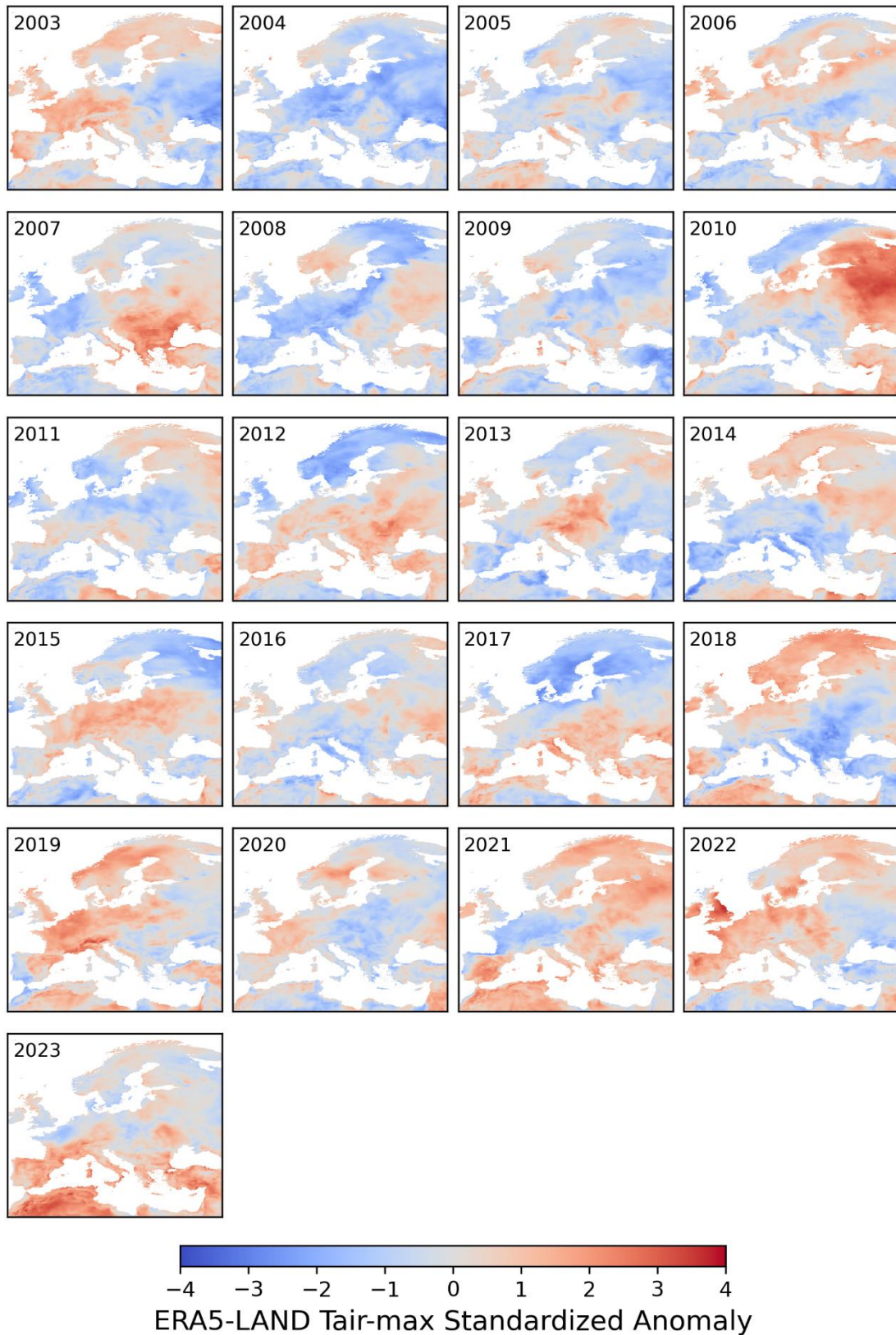
Εικόνα 1.6: Κανονικοποιημένες ετήσιες ανωμαλίες μέσω των τιμών  $LST_{max}$  στην Ευρώπη κατά την περίοδο 2003-2023 (προϊόν MYD11A2).



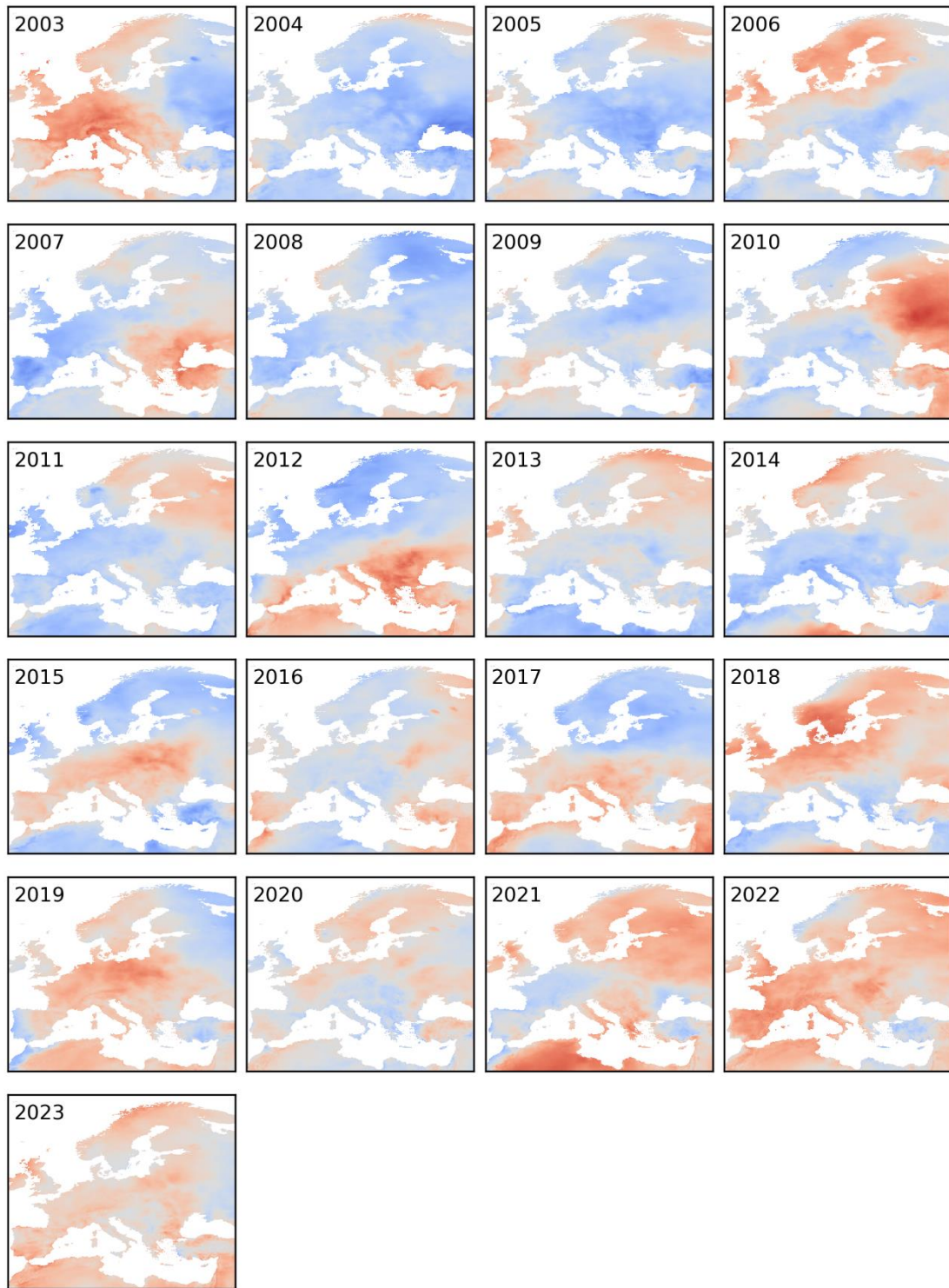
**Εικόνα 1.7:** Κανονικοποιημένες μηνιαίες ανωμαλίες μέγιστων τιμών LST<sub>max</sub> στην Ευρώπη κατά την περίοδο 2003-2023 (προϊόν MYD11A2).




**Εικόνα 1.2:** Κανονικοποιημένες μηνιαίες ανωμαλίες μέσω των τιμών  $LST_{max}$  στην Ευρώπη κατά την περίοδο 2003-2023 (προϊόν MYD11A2).

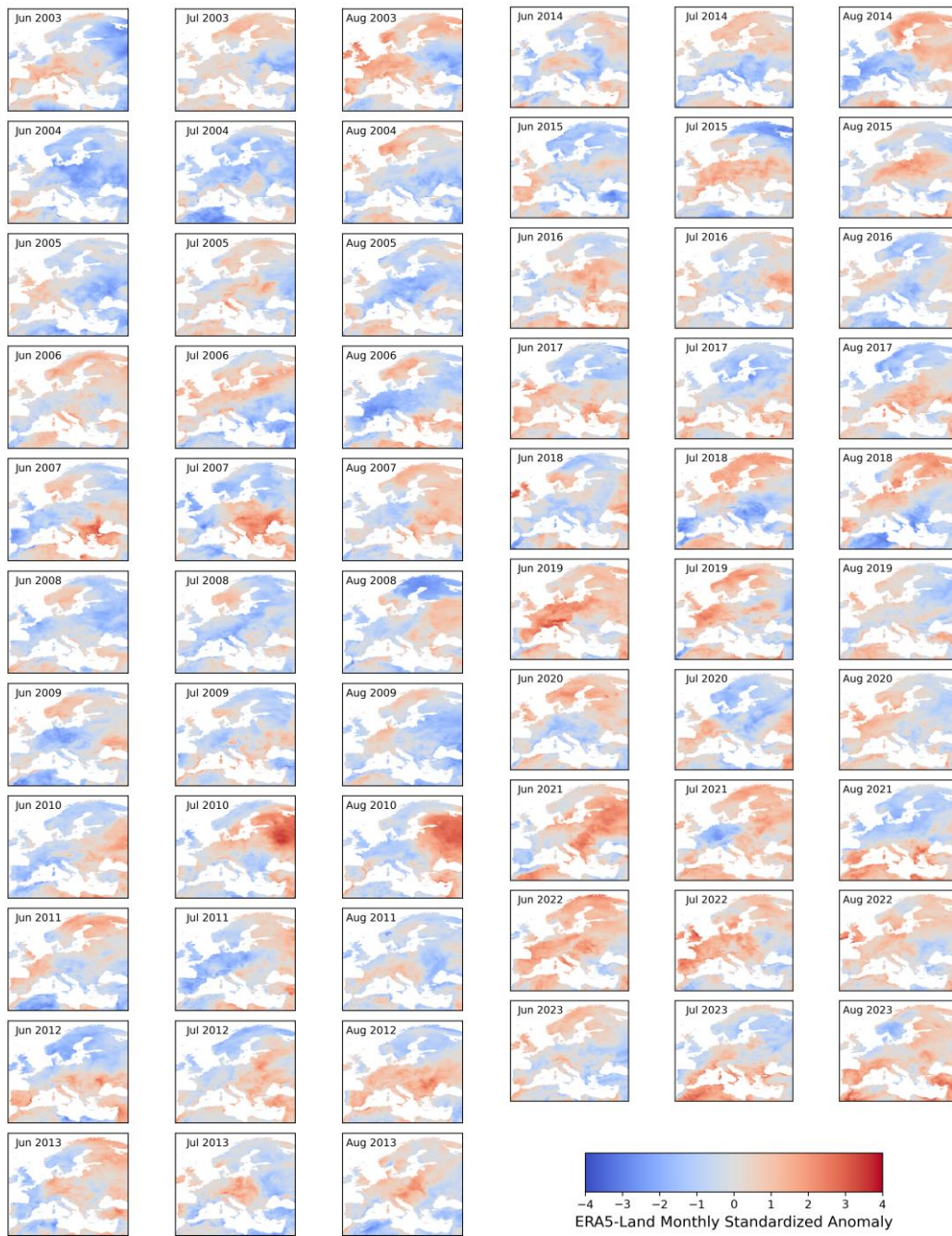


Εικόνα 1.9: Κανονικοποιημένες ετήσιες ανωμαλίες μέγιστης θερμοκρασίας αέρα στην Ευρώπη κατά την περίοδο 2003-2023 (προϊόν ERA5-Land).

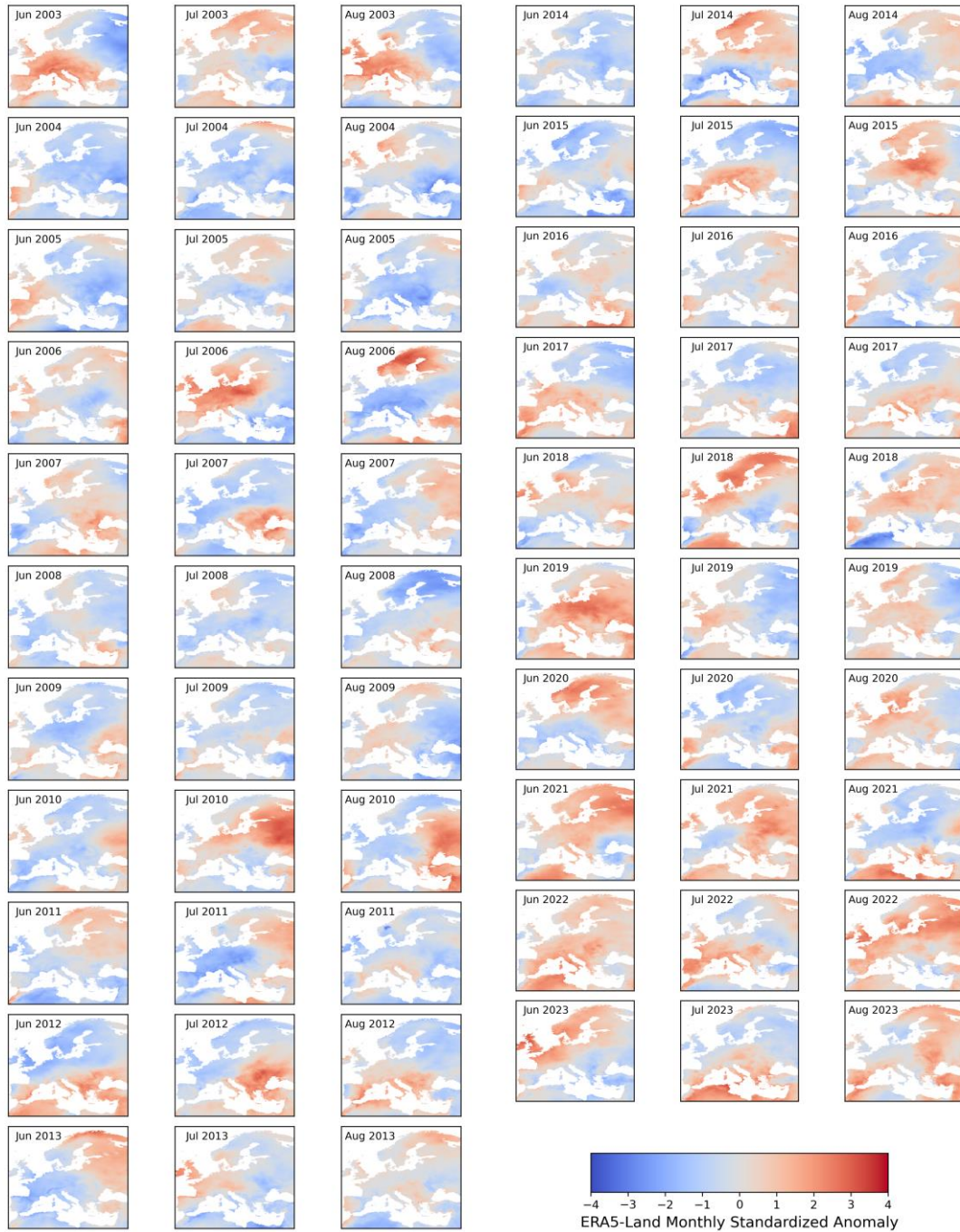



  
 ERA5-LAND Tair-mean Standardized Anomaly

Εικόνα 1.10: Κανονικοποιημένες ετήσιες ανωμαλίες μέσω των τιμών μέγιστης θερμοκρασίας αέρα στην Ευρώπη κατά την περίοδο 2003-2023 (προϊόν ERA5-Land).



**Εικόνα 1.11:** Κανονικοποιημένες μηνιαίες ανωμαλίες μέγιστης θερμοκρασίας αέρα στην Ευρώπη κατά την περίοδο 2003-2023 (προϊόν ERA5-Land).



**Εικόνα Ι.12:** Κανονικοποιημένες μηνιαίες ανωμαλίες μέσω των τιμών μέγιστης θερμοκρασίας αέρα στην Ευρώπη κατά την περίοδο 2003-2023 (προϊόν ERA5-Land).



## **Βιβλιογραφία**

- Abbas, A., He, Q., Jin, L., Li, J., Salam, A., Lu, B., Yasheng, Y., 2021. Spatio-Temporal Changes of Land Surface Temperature and the Influencing Factors in the Tarim Basin, Northwest China. *Remote Sens.* 13, 3792. <https://doi.org/10.3390/rs13193792>
- Abera, T.A., Heiskanen, J., Maeda, E.E., Pellikka, P.K.E., 2020. Land Surface Temperature Trend and Its Drivers in East Africa. *J. Geophys. Res. Atmospheres* 125, e2020JD033446. <https://doi.org/10.1029/2020JD033446>
- Ackerman, S.A., 2007. *Meteorology: understanding the atmosphere*, 2nd ed. Thomson Higher Education, Belmont, CA.
- Agathangelidis, I., Blougouras, G., Cartalis, C., Polydoros, A., Mavrakou, T., Tzanis, C.G., 2023. Surface thermal effects of parks in Mediterranean cities: an investigation under typical summer conditions, heatwaves and droughts, in: 2023 Joint Urban Remote Sensing Event (JURSE). Presented at the 2023 Joint Urban Remote Sensing Event (JURSE), pp. 1–4. <https://doi.org/10.1109/JURSE57346.2023.10144132>
- Agathangelidis, I., Cartalis, C., Polydoros, A., Mavrakou, T., Philippopoulos, K., 2022. Can Satellite-Based Thermal Anomalies Be Indicative of Heatwaves? An Investigation for MODIS Land Surface Temperatures in the Mediterranean Region. *Remote Sens.* 14, 3139. <https://doi.org/10.3390/rs14133139>
- Agathangelidis, I., Cartalis, C., Santamouris, M., 2016. Estimation of Air Temperatures for the Urban Agglomeration of Athens with the Use of Satellite Data. *Geoinformatics Geostat. Overv.* 4. <https://doi.org/10.4172/2327-4581.1000139>
- Allen, C.D., Breshears, D.D., McDowell, N.G., 2015. On underestimation of global vulnerability to tree mortality and forest die-off from hotter drought in the Anthropocene. *Ecosphere* 6, art129. <https://doi.org/10.1890/ES15-00203.1>
- Amengual, A., Homar, V., Romero, R., Brooks, H.E., Ramis, C., Gordaliza, M., Alonso, S., 2014. Projections of heat waves with high impact on human health in Europe. *Glob. Planet. Change* 119, 71–84. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2014.05.006>
- Artale, V., Calmanti, S., Carillo, A., Dell’Aquila, A., Pisacane, G., Ruti, P.M., Sannino, G., Struglia, M.V., Giorgi, F., Bi, X., 2009. Climate scenarios for the Mediterranean basin with a coupled regional system. 8560.
- Athanasiou, M., Xanthopoulos, G., 2010. Fire behaviour of the large fires of 2007 in Greece.
- Baccini, M., Kosatsky, T., Analitis, A., Anderson, H.R., D’Ovidio, M., Menne, B., Michelozzi, P., Biggeri, A., Group, the P.C., 2011. Impact of heat on mortality in 15 European cities: attributable deaths under different weather scenarios. *J. Epidemiol. Community Health* 65, 64–70. <https://doi.org/10.1136/jech.2008.085639>
- Barriopedro, D., García-Herrera, R., Ordóñez, C., Miralles, D.G., Salcedo-Sanz, S., 2023. Heat Waves: Physical Understanding and Scientific

- Challenges. *Rev. Geophys.* 61, e2022RG000780. <https://doi.org/10.1029/2022RG000780>
- Benson, D.O., Dirmeyer, P.A., 2021. Characterizing the Relationship between Temperature and Soil Moisture Extremes and Their Role in the Exacerbation of Heat Waves over the Contiguous United States. *J. Clim.* 34, 2175–2187. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-20-0440.1>
- Calzadilla, A., Rehdanz, K., Betts, R., Falloon, P., Wiltshire, A., Tol, R.S.J., 2013. Climate change impacts on global agriculture. *Clim. Change* 120, 357–374. <https://doi.org/10.1007/s10584-013-0822-4>
- Cartalis, C., 2016. Climatic Change in the Built Environment in Temperate Climates with Emphasis on the Mediterranean Area, in: Boemi, S.-N., Irulegi, O., Santamouris, M. (Eds.), *Energy Performance of Buildings: Energy Efficiency and Built Environment in Temperate Climates*. Springer International Publishing, Cham, pp. 19–36. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-20831-2\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-319-20831-2_2)
- Cartalis, C., Synodinou, A., Proedrou, M., Tsangrassoulis, A., Santamouris, M., 2001. Modifications in energy demand in urban areas as a result of climate changes: an assessment for the southeast Mediterranean region. *Energy Convers. Manag.* 42, 1647–1656. [https://doi.org/10.1016/S0196-8904\(00\)00156-4](https://doi.org/10.1016/S0196-8904(00)00156-4)
- Ciscar, J.-C., Iglesias, A., Feyen, L., Szabó, L., Van Regemorter, D., Amelung, B., Nicholls, R., Watkiss, P., Christensen, O.B., Dankers, R., Garrote, L., Goodess, C.M., Hunt, A., Moreno, A., Richards, J., Soria, A., 2011. Physical and economic consequences of climate change in Europe. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 108, 2678–2683. <https://doi.org/10.1073/pnas.1011612108>
- Cook, B.I., Smerdon, J.E., Seager, R., Coats, S., 2014. Global warming and 21st century drying. *Clim. Dyn.* 43, 2607–2627. <https://doi.org/10.1007/s00382-014-2075-y>
- Coumou, D., Di Capua, G., Vavrus, S., Wang, L., Wang, S., 2018. The influence of Arctic amplification on mid-latitude summer circulation. *Nat. Commun.* 9, 2959. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-05256-8>
- Daly, C., Halbleib, M., Smith, J.I., Gibson, W.P., Doggett, M.K., Taylor, G.H., Curtis, J., Pasteris, P.P., 2008. Physiographically sensitive mapping of climatological temperature and precipitation across the conterminous United States. *Int. J. Climatol.* 28, 2031–2064. <https://doi.org/10.1002/joc.1688>
- Dirmeyer, P.A., Balsamo, G., Blyth, E.M., Morrison, R., Cooper, H.M., 2021. Land-Atmosphere Interactions Exacerbated the Drought and Heatwave Over Northern Europe During Summer 2018. *AGU Adv.* 2, e2020AV000283. <https://doi.org/10.1029/2020AV000283>
- Dole, R., Hoerling, M., Perlwitz, J., Eischeid, J., Pegion, P., Zhang, T., Quan, X.-W., Xu, T., Murray, D., 2011. Was there a basis for anticipating the 2010 Russian heat wave? *Geophys. Res. Lett.* 38. <https://doi.org/10.1029/2010GL046582>
- Domeisen, D.I.V., Eltahir, E.A.B., Fischer, E.M., Knutti, R., Perkins-Kirkpatrick, S.E., Schär, C., Seneviratne, S.I., Weisheimer, A., Wernli, H., 2023. Prediction and projection of heatwaves. *Nat. Rev. Earth Environ.* 4, 36–50. <https://doi.org/10.1038/s43017-022-00371-z>

- Dosio, A., Mentaschi, L., Fischer, E.M., Wyser, K., 2018. Extreme heat waves under 1.5 °C and 2 °C global warming. *Environ. Res. Lett.* 13, 054006. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aab827>
- Dousset, B., Gourmelon, F., 2003. Satellite multi-sensor data analysis of urban surface temperatures and landcover. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens., Algorithms and Techniques for Multi-Source Data Fusion in Urban Areas* 58, 43–54. [https://doi.org/10.1016/S0924-2716\(03\)00016-9](https://doi.org/10.1016/S0924-2716(03)00016-9)
- EEA, 2012. Climate change, impacts and vulnerability in Europe 2012 — European Environment Agency [WWW Document]. URL <https://www.eea.europa.eu/publications/climate-impacts-and-vulnerability-2012> (accessed 2.13.24).
- Fischer, E.M., Schär, C., 2010. Consistent geographical patterns of changes in high-impact European heatwaves. *Nat. Geosci.* 3, 398–403. <https://doi.org/10.1038/ngeo866>
- Fischer, E.M., Seneviratne, S.I., Lüthi, D., Schär, C., 2007a. Contribution of land-atmosphere coupling to recent European summer heat waves. *Geophys. Res. Lett.* 34. <https://doi.org/10.1029/2006GL029068>
- Fischer, E.M., Seneviratne, S.I., Vidale, P.L., Lüthi, D., Schär, C., 2007b. Soil Moisture–Atmosphere Interactions during the 2003 European Summer Heat Wave. *J. Clim.* 20, 5081–5099. <https://doi.org/10.1175/JCLI4288.1>
- Fischer, E.M., Sippel, S., Knutti, R., 2021. Increasing probability of record-shattering climate extremes. *Nat. Clim. Change* 11, 689–695. <https://doi.org/10.1038/s41558-021-01092-9>
- Forkel, M., Andela, N., Harrison, S.P., Lasslop, G., van Marle, M., Chuvieco, E., Dorigo, W., Forrest, M., Hantson, S., Heil, A., Li, F., Melton, J., Sitch, S., Yue, C., Arneeth, A., 2019. Emergent relationships with respect to burned area in global satellite observations and fire-enabled vegetation models. *Biogeosciences* 16, 57–76. <https://doi.org/10.5194/bg-16-57-2019>
- Founda, D., Giannakopoulos, C., 2009. The exceptionally hot summer of 2007 in Athens, Greece — A typical summer in the future climate? *Glob. Planet. Change* 67, 227–236. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2009.03.013>
- Friis-Christensen, E., Lassen, K., 1991. Length of the Solar Cycle: An Indicator of Solar Activity Closely Associated with Climate. *Science* 254, 698–700. <https://doi.org/10.1126/science.254.5032.698>
- García-León, D., Casanueva, A., Standardi, G., Burgstall, A., Flouris, A.D., Nybo, L., 2021. Current and projected regional economic impacts of heatwaves in Europe. *Nat. Commun.* 12, 5807. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-26050-z>
- Gebrechorkos, S.H., Peng, J., Dyer, E., Miralles, D.G., Vicente-Serrano, S.M., Funk, C., Beck, H.E., Asfaw, D.T., Singer, M.B., Dadson, S.J., 2023. Global high-resolution drought indices for 1981–2022. *Earth Syst. Sci. Data* 15, 5449–5466. <https://doi.org/10.5194/essd-15-5449-2023>
- Good, E.J., Aldred, F.M., Ghent, D.J., Veal, K.L., Jimenez, C., 2022. An Analysis of the Stability and Trends in the LST\_cci Land Surface Temperature Datasets Over Europe. *Earth Space Sci.* 9, e2022EA002317. <https://doi.org/10.1029/2022EA002317>
- Grumm, R.H., Hart, R., 2001. Standardized Anomalies Applied to Significant Cold Season Weather Events: Preliminary Findings. *Weather Forecast.*

- 16, 736–754. [https://doi.org/10.1175/1520-0434\(2001\)016<0736:SAATSC>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0434(2001)016<0736:SAATSC>2.0.CO;2)
- Guo, Y., Gasparrini, A., Li, S., Sera, F., Vicedo-Cabrera, A.M., Coelho, M. de S.Z.S., Saldiva, P.H.N., Lavigne, E., Tawatsupa, B., Punnasiri, K., Overcenco, A., Correa, P.M., Ortega, N.V., Kan, H., Osorio, S., Jaakkola, J.J.K., Ryti, N.R.I., Goodman, P.G., Zeka, A., Michelozzi, P., Scortichini, M., Hashizume, M., Honda, Y., Seposo, X., Kim, H., Tobias, A., Íñiguez, C., Forsberg, B., Åström, D.O., Guo, Y.L., Chen, B.-Y., Zanobetti, A., Schwartz, J., Dang, T.N., Van, D.D., Bell, M.L., Armstrong, B., Ebi, K.L., Tong, S., 2018. Quantifying excess deaths related to heatwaves under climate change scenarios: A multicountry time series modelling study. *PLOS Med.* 15, e1002629. <https://doi.org/10.1371/journal.pmed.1002629>
- Gutman, G.G., 1999. On the monitoring of land surface temperatures with the NOAA/AVHRR: Removing the effect of satellite orbit drift. *Int. J. Remote Sens.* 20, 3407–3413. <https://doi.org/10.1080/014311699211435>
- Hall, A., Jones, G. v., 2010. Spatial analysis of climate in winegrape-growing regions in Australia. *Aust. J. Grape Wine Res.* 16, 389–404. <https://doi.org/10.1111/j.1755-0238.2010.00100.x>
- Hall, D.K., Comiso, J.C., Digirolamo, N.E., Shuman, C.A., Key, J.R., Koenig, L.S., 2012. A satellite-derived climate-quality data record of the clear-sky surface temperature of the greenland ice sheet. *J. Clim.* 25, 4785–4798. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-11-00365.1>
- Hansen, J., Sato, M., Ruedy, R., 2012. Perception of climate change. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 109, E2415–E2423. <https://doi.org/10.1073/pnas.1205276109>
- Hatzaki, M., Flocas, H.A., Simmonds, I., Kouroutzoglou, J., Keay, K., Rudeva, I., 2014. Seasonal Aspects of an Objective Climatology of Anticyclones Affecting the Mediterranean. *J. Clim.* 27, 9272–9289. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-14-00186.1>
- Heimann, M., Reichstein, M., 2008. Terrestrial ecosystem carbon dynamics and climate feedbacks. *Nature* 451, 289–292. <https://doi.org/10.1038/nature06591>
- Hertig, E., Jacobeit, J., 2008. Downscaling future climate change: Temperature scenarios for the Mediterranean area. *Glob. Planet. Change, Mediterranean climate: trends, variability and change* 63, 127–131. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2007.09.003>
- Hirschi, M., Mueller, B., Dorigo, W., Seneviratne, S.I., 2014. Using remotely sensed soil moisture for land–atmosphere coupling diagnostics: The role of surface vs. root-zone soil moisture variability. *Remote Sens. Environ.* 154, 246–252. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.08.030>
- Hobday, A.J., Alexander, L.V., Perkins, S.E., Smale, D.A., Straub, S.C., Oliver, E.C.J., Benthuisen, J.A., Burrows, M.T., Donat, M.G., Feng, M., Holbrook, N.J., Moore, P.J., Scannell, H.A., Sen Gupta, A., Wernberg, T., 2016. A hierarchical approach to defining marine heatwaves. *Prog. Oceanogr.* 141, 227–238. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2015.12.014>
- Hoskins, B., Woollings, T., 2015. Persistent Extratropical Regimes and Climate Extremes. *Curr. Clim. Change Rep.* 1, 115–124. <https://doi.org/10.1007/s40641-015-0020-8>

- Hulley, G.C., Ghent, D., Göttsche, F.M., Guillevic, P.C., Mildrexler, D.J., Coll, C., 2019. 3 - Land Surface Temperature, in: Hulley, G.C., Ghent, D. (Eds.), *Taking the Temperature of the Earth*. Elsevier, pp. 57–127. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814458-9.00003-4>
- IPCC 2013, n.d. IPCC, 2013: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp. URL <https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/> (accessed 2.22.24).
- IPCC, 2023, n.d. *AR6 Synthesis Report: Climate Change 2023 — IPCC*. URL <https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-cycle/> (accessed 3.10.24).
- 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. *Earths Future* 6, 264–285. <https://doi.org/10.1002/2017EF000710>
- Janetos, A.C., Chen, R.S., Arndt, D., Kenney, M.A., 2012. *National Climate Assessment Indicators: Background, Development, and Examples*. <https://doi.org/10.7916/D8RB7D2T>
- Jentsch, A., Kreyling, J., Beierkuhnlein, C., 2007. A new generation of climate-change experiments: events, not trends. *Front. Ecol. Environ.* 5, 365–374. [https://doi.org/10.1890/1540-9295\(2007\)5\[365:ANGOCE\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1540-9295(2007)5[365:ANGOCE]2.0.CO;2)
- Jin, M., Dickinson, R.E., 2010. Land surface skin temperature climatology: benefitting from the strengths of satellite observations. *Environ. Res. Lett.* 5, 044004. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/5/4/044004>
- Jones, G.V., Duff, A.A., Hall, A., Myers, J.W., 2010. Spatial Analysis of Climate in Winegrape Growing Regions in the Western United States. *Am. J. Enol. Vitic.* 61, 313–326. <https://doi.org/10.5344/ajev.2010.61.3.313>
- Kogan, F.N., 1997. Global Drought Watch from Space. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 78, 621–636. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1997\)078<0621:GDWFS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1997)078<0621:GDWFS>2.0.CO;2)
- Li, Y., Zhao, M., Motesharrei, S., Mu, Q., Kalnay, E., Li, S., 2015. Local cooling and warming effects of forests based on satellite observations. *Nat. Commun.* 6, 6603. <https://doi.org/10.1038/ncomms7603>
- Li, Z.-L., Tang, B.-H., Wu, H., Ren, H., Yan, G., Wan, Z., Trigo, I.F., Sobrino, J.A., 2013. Satellite-derived land surface temperature: Current status and perspectives. *Remote Sens. Environ.* 131, 14–37. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.12.008>
- Liang, S., Wang, J. (Eds.), 2020. Chapter 15 - Estimate of vegetation production of terrestrial ecosystem, in: *Advanced Remote Sensing (Second Edition)*. Academic Press, pp. 581–620. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815826-5.00015-5>
- Lorenz, R., Jaeger, E.B., Seneviratne, S.I., 2010. Persistence of heat waves and its link to soil moisture memory. *Geophys. Res. Lett.* 37. <https://doi.org/10.1029/2010GL042764>

- Luber, G., McGeehin, M., 2008. Climate Change and Extreme Heat Events. *Am. J. Prev. Med.*, Theme Issue: Climate Change and the Health of the Public 35, 429–435. <https://doi.org/10.1016/j.amepre.2008.08.021>
- Majra, J.P., Gur, A., 2009. Climate change and health: Why should India be concerned? *Indian J. Occup. Environ. Med.* 13, 11. <https://doi.org/10.4103/0019-5278.50717>
- Martens, B., Miralles, D.G., Lievens, H., van der Schalie, R., de Jeu, R.A.M., Fernández-Prieto, D., Beck, H.E., Dorigo, W.A., Verhoest, N.E.C., 2017. GLEAM v3: satellite-based land evaporation and root-zone soil moisture. *Geosci. Model Dev.* 10, 1903–1925. <https://doi.org/10.5194/gmd-10-1903-2017>
- Martins, J.P.A., Caetano, S., Pereira, C., Dutra, E., Cardoso, R.M., 2023. A Satellite View of the Exceptionally Warm Summer of 2022 Over Europe. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4401872>
- Mauder, M., Foken, T., Cuxart, J., 2020. Surface-Energy-Balance Closure over Land: A Review. *Bound.-Layer Meteorol.* 177, 395–426. <https://doi.org/10.1007/s10546-020-00529-6>
- McMichael, A.J., Woodruff, R.E., Hales, S., 2006. Climate change and human health: present and future risks. *The Lancet* 367, 859–869. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(06\)68079-3](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(06)68079-3)
- Mildrexler, D., Yang, Z., Cohen, W.B., Bell, D.M., 2016. A forest vulnerability index based on drought and high temperatures. *Remote Sens. Environ.* 173, 314–325. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.11.024>
- Mildrexler, D.J., Zhao, M., Cohen, W.B., Running, S.W., Song, X.P., Jones, M.O., 2018. Thermal Anomalies Detect Critical Global Land Surface Changes. *J. Appl. Meteorol. Climatol.* 57, 391–411. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-17-0093.1>
- Mildrexler, D.J., Zhao, M., Running, S.W., 2011. A global comparison between station air temperatures and MODIS land surface temperatures reveals the cooling role of forests. *J. Geophys. Res. Biogeosciences* 116. <https://doi.org/10.1029/2010JG001486>
- Miralles, D.G., Brutsaert, W., Dolman, A.J., Gash, J.H., 2020. On the Use of the Term “Evapotranspiration.” *Water Resour. Res.* 56, e2020WR028055. <https://doi.org/10.1029/2020WR028055>
- Miralles, D.G., Gentine, P., Seneviratne, S.I., Teuling, A.J., 2019. Land–atmospheric feedbacks during droughts and heatwaves: state of the science and current challenges. *Ann. N. Y. Acad. Sci.* 1436, 19–35. <https://doi.org/10.1111/nyas.13912>
- Miralles, D.G., Holmes, T.R.H., De Jeu, R. a. M., Gash, J.H., Meesters, A.G.C.A., Dolman, A.J., 2011. Global land-surface evaporation estimated from satellite-based observations. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 15, 453–469. <https://doi.org/10.5194/hess-15-453-2011>
- Miralles, D.G., Teuling, A.J., van Heerwaarden, C.C., Vilà-Guerau de Arellano, J., 2014. Mega-heatwave temperatures due to combined soil desiccation and atmospheric heat accumulation. *Nat. Geosci.* 7, 345–349. <https://doi.org/10.1038/ngeo2141>
- Miralles, D.G., van den Berg, M.J., Teuling, A.J., de Jeu, R. a. M., 2012. Soil moisture-temperature coupling: A multiscale observational analysis. *Geophys. Res. Lett.* 39. <https://doi.org/10.1029/2012GL053703>

- Mitchell, D., Kornhuber, K., Huntingford, C., Uhe, P., 2019. The day the 2003 European heatwave record was broken. *Lancet Planet. Health* 3, e290–e292. [https://doi.org/10.1016/S2542-5196\(19\)30106-8](https://doi.org/10.1016/S2542-5196(19)30106-8)
- Mitchell, P.J., O’Grady, A.P., Hayes, K.R., Pinkard, E.A., 2014. Exposure of trees to drought-induced die-off is defined by a common climatic threshold across different vegetation types. *Ecol. Evol.* 4, 1088–1101. <https://doi.org/10.1002/ece3.1008>
- Molina, M.O., Sánchez, E., Gutiérrez, C., 2020. Future heat waves over the Mediterranean from an Euro-CORDEX regional climate model ensemble. *Sci. Rep.* 10, 8801. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-65663-0>
- Moritz, M.A., Parisien, M.-A., Batllori, E., Krawchuk, M.A., Van Dorn, J., Ganz, D.J., Hayhoe, K., 2012. Climate change and disruptions to global fire activity. *Ecosphere* 3, art49. <https://doi.org/10.1890/ES11-00345.1>
- Mu, Q., Zhao, M., Kimball, J.S., McDowell, N.G., Running, S.W., 2013. A Remotely Sensed Global Terrestrial Drought Severity Index. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 94, 83–98. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00213.1>
- Mueller, B., Seneviratne, S.I., 2014. Systematic land climate and evapotranspiration biases in CMIP5 simulations. *Geophys. Res. Lett.* 41, 128–134. <https://doi.org/10.1002/2013GL058055>
- Muñoz-Sabater, J., Dutra, E., Agustí-Panareda, A., Albergel, C., Arduini, G., Balsamo, G., Boussetta, S., Choulga, M., Harrigan, S., Hersbach, H., Martens, B., Miralles, D.G., Piles, M., Rodríguez-Fernández, N.J., Zsoter, E., Buontempo, C., Thépaut, J.-N., 2021. ERA5-Land: a state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications. *Earth Syst. Sci. Data* 13, 4349–4383. <https://doi.org/10.5194/essd-13-4349-2021>
- Neteler, M., Roiz, D., Rocchini, D., Castellani, C., Rizzoli, A., 2011. Terra and Aqua satellites track tiger mosquito invasion: modelling the potential distribution of *Aedes albopictus* in north-eastern Italy. *Int. J. Health Geogr.* 10, 49. <https://doi.org/10.1186/1476-072X-10-49>
- Nkwunonwo, U.C., 2020. Geo-Spatial Technology for Land Resources Management in Nigeria, in: *Spatial Information Science for Natural Resource Management*. IGI Global, pp. 62–87. <https://doi.org/10.4018/978-1-7998-5027-4.ch004>
- NOA, 2024. Climate change impacts | National Oceanic and Atmospheric Administration [WWW Document]. URL <https://www.noaa.gov/education/resource-collections/climate/climate-change-impacts> (accessed 2.23.24).
- NourEldeen, N., Mao, K., Yuan, Z., Shen, X., Xu, T., Qin, Z., 2020. Analysis of the Spatiotemporal Change in Land Surface Temperature for a Long-Term Sequence in Africa (2003–2017). *Remote Sens.* 12, 488. <https://doi.org/10.3390/rs12030488>
- O, S., Hou, X., Orth, R., 2020. Observational evidence of wildfire-promoting soil moisture anomalies. *Sci. Rep.* 10, 11008. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-67530-4>
- Orth, R., 2021. When the Land Surface Shifts Gears. *AGU Adv.* 2, e2021AV000414. <https://doi.org/10.1029/2021AV000414>
- Oyler, J.W., Dobrowski, S.Z., Holden, Z.A., Running, S.W., 2016. Remotely Sensed Land Skin Temperature as a Spatial Predictor of Air Temperature

- across the Conterminous United States. *J. Appl. Meteorol. Climatol.* 55, 1441–1457. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-15-0276.1>
- Paavola, J., 2017. Health impacts of climate change and health and social inequalities in the UK. *Environ. Health* 16, 113. <https://doi.org/10.1186/s12940-017-0328-z>
- Padhy, S.K., Sarkar, S., Panigrahi, M., Paul, S., 2015. Mental health effects of climate change. *Indian J. Occup. Environ. Med.* 19, 3–7. <https://doi.org/10.4103/0019-5278.156997>
- Paravantis, J., Santamouris, M., Cartalis, C., Efthymiou, C., Kontoulis, N., 2017. Mortality Associated with High Ambient Temperatures, Heatwaves, and the Urban Heat Island in Athens, Greece. *Sustainability* 9, 606. <https://doi.org/10.3390/su9040606>
- Pasotti, L., Maroli, M., Giannetto, S., Brianti, E., 2006. Agrometeorology and models for the parasite cycle forecast. *Parassitologia* 48, 81–83.
- Pepin, N.C., Maeda, E.E., Williams, R., 2016. Use of remotely sensed land surface temperature as a proxy for air temperatures at high elevations: Findings from a 5000 m elevational transect across Kilimanjaro. *J. Geophys. Res. Atmospheres* 121, 9998–10,015. <https://doi.org/10.1002/2016JD025497>
- Perkins, S.E., 2015. A review on the scientific understanding of heatwaves—Their measurement, driving mechanisms, and changes at the global scale. *Atmospheric Res.* 164–165, 242–267. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2015.05.014>
- Perkins, S.E., Alexander, L.V., 2013. On the Measurement of Heat Waves. *J. Clim.* 26, 4500–4517. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00383.1>
- Perkins, S.E., Alexander, L.V., Nairn, J.R., 2012. Increasing frequency, intensity and duration of observed global heatwaves and warm spells. *Geophys. Res. Lett.* 39. <https://doi.org/10.1029/2012GL053361>
- Perkins-Kirkpatrick, S.E., Lewis, S.C., 2020. Increasing trends in regional heatwaves. *Nat. Commun.* 11, 3357. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-16970-7>
- Reiners, P., Sobrino, J., Kuenzer, C., 2023. Satellite-Derived Land Surface Temperature Dynamics in the Context of Global Change—A Review. *Remote Sens.* 15, 1857. <https://doi.org/10.3390/rs15071857>
- Rousi, E., Kornhuber, K., Beobide-Arsuaga, G., Luo, F., Coumou, D., 2022. Accelerated western European heatwave trends linked to more-persistent double jets over Eurasia. *Nat. Commun.* 13, 3851. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-31432-y>
- Russo, S., Sillmann, J., Fischer, E.M., 2015. Top ten European heatwaves since 1950 and their occurrence in the coming decades. *Environ. Res. Lett.* 10, 124003. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/10/12/124003>
- Schneider, P., Hook, S.J., 2010. Space observations of inland water bodies show rapid surface warming since 1985. *Geophys. Res. Lett.* 37. <https://doi.org/10.1029/2010GL045059>
- Seemann, S.W., Borbas, E.E., Knuteson, R.O., Stephenson, G.R., Huang, H.-L., 2008. Development of a Global Infrared Land Surface Emissivity Database for Application to Clear Sky Sounding Retrievals from Multispectral Satellite Radiance Measurements. *J. Appl. Meteorol. Climatol.* 47, 108–123. <https://doi.org/10.1175/2007JAMC1590.1>



- Seneviratne, S., Nicholls, N., Easterling, D., Goodess, C., Kanae, S., Kossin, J., Luo, Y., Marengo, J., McInnes, K., Rahimi, M., Reichstein, M., Sorteberg, A., Vera, C., Zhang, X., 2012. Changes in climate extremes and their impacts on the natural physical environment: An overview of the IPCC SREX report. p. 12566.
- Seneviratne, S.I., Donat, M.G., Mueller, B., Alexander, L.V., 2014. No pause in the increase of hot temperature extremes. *Nat. Clim. Change* 4, 161–163. <https://doi.org/10.1038/nclimate2145>
- Seneviratne, S.I., Zhang, X., Adnan, M., Badi, W., Dereczynski, C., Di Luca, A., Ghosh, S., Iskander, I., Kossin, J., Lewis, S., Otto, F., Pinto, I., Satoh, M., Vicente-Serrano, S.M., Wehner, M., Zhou, B., 2021. Weather and Climate Extreme Events in a Changing Climate (Chapter 11), in: Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pirani, A., Connors, S.L., Péan, C., Berger, S., Caud, N., Chen, Y., Goldfarb, L., Gomis, M.I., Huang, M., Leitzell, K., Lonnoy, E., Matthews, J.B.R., Maycock, T.K., Waterfield, T., Yelekçi, K., Yu, R., Zhu, B. (Eds.), . Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 1513–1766.
- Sillmann, J., Thorarinsdottir, T., Keenlyside, N., Schaller, N., Alexander, L.V., Hegerl, G., Seneviratne, S.I., Vautard, R., Zhang, X., Zwiers, F.W., 2017. Understanding, modeling and predicting weather and climate extremes: Challenges and opportunities. *Weather Clim. Extrem.* 18, 65–74. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2017.10.003>
- Snyder, W.C., Wan, Z., Zhang, Y., Feng, Y.-Z., 1998. Classification-based emissivity for land surface temperature measurement from space. *Int. J. Remote Sens.* 19, 2753–2774. <https://doi.org/10.1080/014311698214497>
- Sobrino, J.A., Julien, Y., García-Monteiro, S., 2020. Surface Temperature of the Planet Earth from Satellite Data. *Remote Sens.* 12, 218. <https://doi.org/10.3390/rs12020218>
- Stewart, I.D., Mills, G., 2021. *The Urban Heat Island*. Elsevier.
- Suarez-Gutierrez, L., Müller, W.A., Li, C., Marotzke, J., 2020. Dynamical and thermodynamical drivers of variability in European summer heat extremes. *Clim. Dyn.* 54, 4351–4366. <https://doi.org/10.1007/s00382-020-05233-2>
- Susskind, J., Blaisdell, J., 2008. Improved surface parameter retrievals using AIRS/AMSU data, in: *Algorithms and Technologies for Multispectral, Hyperspectral, and Ultraspectral Imagery XIV*. Presented at the Algorithms and Technologies for Multispectral, Hyperspectral, and Ultraspectral Imagery XIV, SPIE, pp. 240–251. <https://doi.org/10.1117/12.774759>
- Teskey, R., Wertin, T., Bauweraerts, I., Ameye, M., Mcguire, M.A., Steppe, K., 2015. Responses of tree species to heat waves and extreme heat events. *Plant Cell Environ.* 38, 1699–1712. <https://doi.org/10.1111/pce.12417>
- Teuling, A.J., Seneviratne, S.I., Stöckli, R., Reichstein, M., Moors, E., Ciais, P., Luysaert, S., van den Hurk, B., Ammann, C., Bernhofer, C., Dellwik, E., Gianelle, D., Gielen, B., Grünwald, T., Klumpp, K., Montagnani, L., Moureaux, C., Sottocornola, M., Wohlfahrt, G., 2010. Contrasting response of European forest and grassland energy exchange to heatwaves. *Nat. Geosci.* 3, 722–727. <https://doi.org/10.1038/ngeo950>

- Tripathy, K.P., Mishra, A.K., 2023. How Unusual Is the 2022 European Compound Drought and Heatwave Event? *Geophys. Res. Lett.* 50, e2023GL105453. <https://doi.org/10.1029/2023GL105453>
- Varotsos, C.A., Cracknell, A.P., Efstathiou, M.N., 2018. The global signature of the El Niño/La Niña Southern Oscillation. *Int. J. Remote Sens.* 39, 5965–5977. <https://doi.org/10.1080/01431161.2018.1465617>
- Vautard, R., Gobiet, A., Jacob, D., Belda, M., Colette, A., Déqué, M., Fernández, J., García-Díez, M., Goergen, K., Güttler, I., Halenka, T., Karacostas, T., Katragkou, E., Keuler, K., Kotlarski, S., Mayer, S., van Meijgaard, E., Nikulin, G., Patarčić, M., Scinocca, J., Sobolowski, S., Suklitsch, M., Teichmann, C., Warrach-Sagi, K., Wulfmeyer, V., Yiou, P., 2013. The simulation of European heat waves from an ensemble of regional climate models within the EURO-CORDEX project. *Clim. Dyn.* 41, 2555–2575. <https://doi.org/10.1007/s00382-013-1714-z>
- 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. *Environ. Res. Lett.* 9, 034006. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/9/3/034006>
- Wei, Z., Yoshimura, K., Wang, L., Miralles, D.G., Jasechko, S., Lee, X., 2017. Revisiting the contribution of transpiration to global terrestrial evapotranspiration. *Geophys. Res. Lett.* 44, 2792–2801. <https://doi.org/10.1002/2016GL072235>
- Yao, Z., Li, J., Li, J., Zhang, H., 2011. Surface emissivity impact on temperature and moisture soundings from hyperspectral infrared radiance measurements. *J. Appl. Meteorol. Climatol.* 50, 1225–1235. <https://doi.org/10.1175/2010JAMC2587.1>
- Yiou, P., Cattiaux, J., Faranda, D., Kadygrov, N., Jézéquel, A., Naveau, P., Ribes, A., Robin, Y., Thao, S., van Oldenborgh, G.J., Vrac, M., 2020. Analyses of the Northern European Summer Heatwave of 2018. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 101, S35–S40.
- Zhao, W., He, J., Wu, Y., Xiong, D., Wen, F., Li, A., 2019. An Analysis of Land Surface Temperature Trends in the Central Himalayan Region Based on MODIS Products. *Remote Sens.* 11, 900. <https://doi.org/10.3390/rs11080900>
- Zhou, C., Wang, K., 2016. Land surface temperature over global deserts: Means, variability, and trends. *J. Geophys. Res. Atmospheres* 121, 14,344–14,357. <https://doi.org/10.1002/2016JD025410>
- Zorer, R., Rocchini, D., Metz, M., Delucchi, L., Zotte, F., Meggio, F., Neteler, M., 2012. Daily MODIS Land Surface Temperature Data for the Analysis of the Heat Requirements of Grapevine Varieties. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 51, 2128–2135. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2012.2226465>
- Zschenderlein, P., Fink, A.H., Pfahl, S., Wernli, H., 2019. Processes determining heat waves across different European climates. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 145, 2973–2989. <https://doi.org/10.1002/qj.3599>