



ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ, ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ

ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΚΛΙΜΑΤΟΛΟΓΙΑΣ

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ "ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΑ, ΚΛΙΜΑΤΟΛΟΓΙΑ
ΚΑΙ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ"



**ΣΥΝΟΠΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΕΝΟΣ ΕΠΕΙΣΟΔΙΟΥ ΚΑΥΣΩΝΑ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ ΚΑΙ
ΤΗΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΤΟΥ ΣΤΟ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΟ ΟΖΟΝ: ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΩΝ
ΠΡΟΓΝΩΣΕΩΝ ΤΟΥ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΟΥ ΟΖΟΝΤΟΣ ΑΠΟ ΤΟ ΠΑΓΚΟΣΜΙΟ ΚΑΙ
ΤΟ ΠΕΡΙΟΧΙΚΟ ΠΡΟΓΝΩΣΤΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΜΟΝΤΕΛΩΝ CAMS**

**ΒΑΣΙΛΙΚΗ ΒΟΥΡΔΑΝΟΥ
ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟΣ**

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ, 2024



ΒΑΣΙΛΙΚΗ ΒΟΥΡΔΑΝΟΥ
ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟΣ

**ΣΥΝΟΠΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΕΝΟΣ ΕΠΕΙΣΟΔΙΟΥ ΚΑΥΣΩΝΑ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ ΚΑΙ
ΤΗΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΤΟΥ ΣΤΟ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΟ ΟΖΟΝ: ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΩΝ
ΠΡΟΓΝΩΣΕΩΝ ΤΟΥ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΟΥ ΟΖΟΝΤΟΣ ΑΠΟ ΤΟ ΠΑΓΚΟΣΜΙΟ ΚΑΙ
ΤΟ ΠΕΡΙΟΧΙΚΟ ΠΡΟΓΝΩΣΤΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΜΟΝΤΕΛΩΝ CAMS**

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ ΕΙΔΙΚΕΥΣΗΣ

που υποβλήθηκε στο Τμήμα Γεωλογίας της Σχολής Θετικών Επιστημών του
Αριστοτέλειου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης στα πλαίσια του Προγράμματος
Μεταπτυχιακών Σπουδών “Μετεωρολογία, Κλιματολογία και Ατμοσφαιρικό
Περιβάλλον”

Η ανάπτυξη της Μεταπτυχιακής Εργασίας έγινε ενώπιον της Τριμελούς Εξεταστικής
Επιτροπής, στις 27 Μαΐου 2024. Την εξεταστική επιτροπή αποτέλεσαν οι:

Πρόδρομος Ζάνης, Καθηγητής Α.Π.Θ., Επιβλέπων

Θεόδωρος Μαυρομμάτης, Καθηγητής Α.Π.Θ., Μέλος Τριμελούς Εξεταστικής
Επιτροπής

Ελένη Κατράγκου, Αναπληρώτρια Καθηγήτρια Α.Π.Θ., Μέλος Τριμελούς Εξεταστικής
Επιτροπής



© Βασιλική Βουρδάνου, Μαθηματικός, 2024

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος.

ΣΥΝΟΠΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΕΝΟΣ ΕΠΕΙΣΟΔΙΟΥ ΚΑΥΣΩΝΑ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ ΚΑΙ ΤΗΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΤΟΥ ΣΤΟ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΟ ΟΖΟΝ: ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΩΝ ΠΡΟΓΝΩΣΕΩΝ ΤΟΥ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΟΥ ΟΖΟΝΤΟΣ ΑΠΟ ΤΟ ΠΑΓΚΟΣΜΙΟ ΚΑΙ ΤΟ ΠΕΡΙΟΧΙΚΟ ΠΡΟΓΝΩΣΤΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΜΟΝΤΕΛΩΝ CAMS– *Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία*

© Vasiliki Vourdanou, Mathematician, 2024

All rights reserved.

SYNOPTIC STUDY OF A HEATWAVE EVENT IN GREECE AND ITS IMPACT ON SURFACE OZONE: EVALUATION OF SURFACE OZONE FORECASTS FROM THE CAMS GLOBAL AND REGIONAL FORECAST MODEL SYSTEMS– *Master Thesis*

Citation:

Βουρδάνου Β., 2024. – Συνοπτική μελέτη ενός επεισοδίου καύσωνα στην Ελλάδα και της επίδρασης του στο επιφανειακό όζον: Αξιολόγηση των προγνώσεων του επιφανειακού όζοντος από το παγκόσμιο και το περιοχικό προγνωστικό σύστημα μοντέλων CAMS. Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ.

Vourdanou V., 2024. – Synoptic study of a heatwave event in Greece and its impact on surface ozone: Evaluation of surface ozone forecasts from the CAMS global and regional forecast model systems. Master Thesis, School of Geology, Aristotle University of Thessaloniki.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς το συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν το συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευτεί ότι εκφράζουν τις επίσημες θέσεις του Α.Π.Θ.



ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία έχει τίτλο “Συνοπτική μελέτη ενός επεισοδίου καύσωνα στην Ελλάδα και της επίδρασης του στο επιφανειακό όζον: Αξιολόγηση των προγνώσεων του επιφανειακού όζοντος από το παγκόσμιο και το περιοχικό προγνωστικό σύστημα μοντέλων CAMS.” και εκπονήθηκε στα πλαίσια των μεταπτυχιακών μου σπουδών στον Τομέα Μετεωρολογίας και Κλιματολογίας του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης.

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον κ. Πρόδρομο Ζάνη, καθηγητή του ΑΠΘ και επιβλέποντα της εργασίας μου, καθόσον καθ’ όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της εργασίας μου με καθοδηγούσε και με βοηθούσε να εξελίξω τις γνώσεις μου. Θα ήθελα επιπλέον να τον ευχαριστήσω για την καθοδήγηση και ενημέρωση γενικότερα όσον αφορά το επάγγελμα του Μετεωρολόγου και την έκθυμη συμπαράσταση του κατά τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας μέσω του εξαιρετικού του χαρακτήρα.

Παράλληλα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Θεόδωρο Μαυρομμάτη, καθηγητή του ΑΠΘ και την κ. Ελένη Κατράγκου αναπληρώτρια καθηγήτρια ΑΠΘ, που ως παράλληλα μέλη της τριμελούς επιτροπής με βοήθησαν μέσω των επιστημονικών τους γνώσεων και της πολυετούς εμπειρίας τους να βελτιστοποιήσω την παρούσα διπλωματική.

Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Δημήτρη Ακριτίδη, μεταδιδακτορικό ερευνητή του Τμήματος Μετεωρολογίας Κλιματολογίας ΑΠΘ, για την αμέριστη βοήθεια του, τις χρήσιμες υποδείξεις του και το συνεχές του ενδιαφέρον σε όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της παρούσας εργασίας.

Όλοι οι καθηγητές μου στο Μεταπτυχιακό αποτέλεσαν έμπνευση για εμένα και τους ευχαριστώ θερμά για όλες τις γνώσεις που μου παρείχαν τα χρόνια των σπουδών μου στο Τμήμα. Παράλληλα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Σταύρο Σολωμό, Αναπληρωτή Ερευνητή στο Ερευνητικό Κέντρο Φυσικής και Κλιματολογίας της Ατμόσφαιρας της Ακαδημίας Αθηνών, για την μετάδοση της αγάπης του για την Μετεωρολογία κατά τη διάρκεια των σπουδών μου στο Μαθηματικό του ΕΚΠΑ.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου η οποία με βοηθάει όλα αυτά τα χρόνια με ποικίλους τρόπους και ιδιαίτερα την αδελφή μου που μοιράστηκε την προσπάθεια μου για την εισαγωγή μου στο Μεταπτυχιακό. Επίσης, ένα θερμό ευχαριστώ στο Δημήτρη και σε όλους τους φίλους μου, που ο κάθε ένας με στήριξε με τον δικό του τρόπο.

Ωστόσο αυτήν την εργασία θα ήθελα να την αφιερώσω στον ξάδελφο μου Θανάση που φέτος πάει πρώτη γυμνασίου καθώς και στους μαθητές μου, με σκοπό αυτή η εργασία να αποτελέσει έμπνευση για αυτούς και για τους επαγγελματικούς τους στόχους.

Περίληψη

Στην παρούσα εργασία πραγματοποιείται αρχικά συνοπτική ανάλυση ενός έντονου επεισοδίου καύσωνα, που επηρέασε την περιοχή της Ελλάδας στις 28 Ιουλίου του 2021 και είχε διάρκεια 9 ημέρες. Αυτή η μελέτη δείχνει ότι οι ακραίες θερμοκρασίες που καταγράφηκαν στην Ελλάδα οφείλονται στην οριζόντια μεταφορά θερμών αέριων μαζών στην ισοβαρική επιφάνεια των 850 hPa από την Αφρική. Οι επιφανειακές θερμοκρασίες εντάθηκαν μέσω της αδιαβατικής θέρμανσης λόγω καθοδικών κινήσεων, η οποία προέκυψε εξαιτίας της θέσης του υποτροπικού αεροχειμάρρου και της εμφάνισης ενός κέντρου υψηλών υψών στα ανώτερα στρώματα. Σύμφωνα με την ανάλυση που γίνεται, αυτός ο καύσωνας παρουσιάζει τα τυπικά χαρακτηριστικά που εμφανίζουν τέτοια φαινόμενα στην περιοχή της Ανατολικής Μεσογείου.

Στη συνέχεια, μελετάται ποια ήταν η επίδραση του καύσωνα αυτού στα επίπεδα ρύπανσης και συγκεκριμένα στο επιφανειακό όζον στην περιοχή μελέτης αλλά και στην ευρύτερη περιοχή. Η διερεύνηση γίνεται μέσω των παγκόσμιων δεδομένων επανάλυσης CAMS (Copernicus Atmosphere Monitoring Service) και των επίγειων παρατηρήσεων. Σύμφωνα με τις παρατηρήσεις αποδεικνύεται ότι υπάρχουν σημαντικές επιδράσεις, όπως στην περιοχή του Θησείου που καταγράφονται συγκεντρώσεις όζοντος οι οποίες φτάνουν τα 104 ppb λόγω των NO_x. Σύμφωνα με τα δεδομένα του CAMS global reanalysis φαίνεται ο καύσωνας να επέδρασε σημαντικά στα επίπεδα όζοντος, αλλά οι τιμές είναι αξιοσημείωτα αυξημένες που χρήζουν περαιτέρω διερεύνησης.

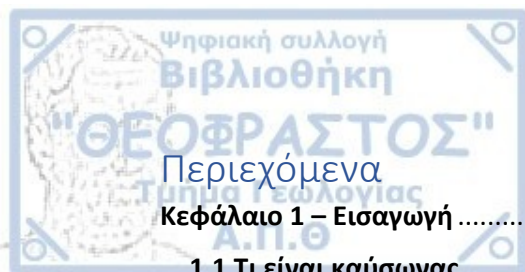
Τέλος, γίνεται αξιολόγηση των προγνωστικών δεδομένων του επιφανειακού όζοντος από το περιοχικό και από το παγκόσμιο προγνωστικό σύστημα μοντέλων CAMS, ώστε να δειχθεί το επίπεδο προγνωσιμότητας και η απόκλιση τους από την παρατήρηση και τα πεδία reanalysis. Τα δεδομένα που χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση των προγνώσεων είναι εκείνα του παγκόσμιου μοντέλου επανάλυσης CAMS καθώς και επίγειες παρατηρήσεις από τέσσερις σταθμούς της Ελλάδας. Ωστόσο, φαίνεται τα δεδομένα CAMS global reanalysis (με χωρική διακριτοποίηση 0.75° x 0.75°) να είναι χρήσιμα χωρικά αλλά να υπάρχει περιορισμός για χρήση σε τοπικό επίπεδο. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι το περιοχικό προγνωστικό μοντέλο CAMS κάνει πολύ καλές προγνώσεις, συμπεριλαμβανομένου του σταθμού της Φινοκαλίας που -ως μία εξαίρεση- το παγκόσμιο προγνωστικό μοντέλο CAMS προβλέπει καλύτερα, με μικρή απόκλιση, το επιφανειακό O₃. Γενικότερα, σύμφωνα με τα δεδομένα από όλους τους σταθμούς, την περίοδο που επιδρά η θερμή εισβολή τα σφάλματα γίνονται αισθητά μεγαλύτερα, ιδιαίτερα όσον αφορά το παγκόσμιο μοντέλο πρόγνωσης CAMS.

ABSTRACT

The present study investigates at first a synoptic analysis of a severe heatwave that affected the region of Greece on the 28th of July 2021 and lasted for 9 days. This study shows the extreme temperatures recorded in Greece as a result of heat advection of warm air at 850 hPa from Africa. Due to the location of the subtropical jet stream and the emergence of a high-altitude center in the upper levels, surface temperatures intensified through adiabatic heating from downward motion. According to the analysis, this heatwave has the typical characteristics that show such phenomena in the Eastern Mediterranean region.

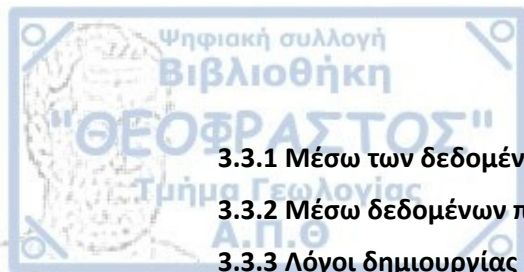
Following this, it is being studied, what the effect of this heatwave was regarding pollution levels and specifically on the surface ozone in Greece and the surrounding countries. The investigation is done through CAMS (Copernicus Atmosphere Monitoring Service) global reanalysis data and ground observations. According to these observations, there seems to be significant effects as is in the area of Thissio where ozone concentrations are recorded to reach 104 ppb due to NO_x . Also, the CAMS reanalysis data show an effect on ozone levels although the ozone values there notably elevated and they need further investigation.

Finally, the forecast data of the surface ozone, of the regional and global CAMS forecasting model systems, are evaluated to show their level of predictability and their deviations from observations and reanalysis data. The data used to evaluate the CAMS forecast systems are those of the CAMS global reanalysis dataset as well as ground observations from four stations in Greece. However, it appears that CAMS global reanalysis data ($0.75^\circ \times 0.75^\circ$) are useful spatially but show limitations at local-scale use. The results show that, the regional CAMS forecast model system forecasts very well all stations including Finokalia, in which -as an exception- the global CAMS forecast model system forecasts the surface ozone better. Generally, according to the data from all stations, during the warm invasion, the errors become noticeably larger especially for the CAMS global forecast model system.



Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1 – Εισαγωγή	8
1.1 Τι είναι καύσωνας	8
1.2 Τρόποι αύξησης της θερμοκρασίας	11
1.3 Αίτια δημιουργίας των καυσώνων	12
1.4 Άλλοι παράγοντες που μπορεί να επηρεάσουν έναν καύσωνα	14
1.5 Επιπτώσεις καύσωνα	15
1.6 Αντιμετώπιση καύσωνα	20
1.7 Όζον	22
1.8 Προέλευση τροποσφαιρικού Όζοντος - Όροι που καθορίζουν το ισοζύγιο του όζοντος στην τροπόσφαιρα	26
1.9 Μετεωρολογικές συνθήκες από τις οποίες επηρεάζεται το τροποσφαιρικό όζον ...	31
1.10 Επιπτώσεις του Όζοντος	33
1.11 Δράσεις μείωσης του όζοντος	36
1.12 Τα θετικά του όζοντος	38
1.13 Σκοπός της εργασίας	39
Κεφάλαιο 2 – Δεδομένα και Μεθοδολογία	40
2.1 Copernicus: δεδομένα επανάλυσης και πρόγνωσης	40
2.2 Περιγραφή και διαμόρφωση μοντέλων	41
2.2.1 ERA5	41
2.2.2 CAMS reanalysis	41
2.2.3 CAMS forecast	42
2.3 Δεδομένα και Μεθοδολογία	44
2.3.1 ERA5 δεδομένα και μεθοδολογία	44
2.3.2 CAMS δεδομένα επανάλυσης και μεθοδολογία	45
2.3.3 Παρατηρήσεις (observations) και μεθοδολογία	46
2.3.4 Δεδομένα του παγκόσμιου και περιοχικού προγνωστικού συστήματος μοντέλων CAMS	47
2.3.5 Μεθοδολογία αξιολόγησης μοντέλων πρόγνωσης CAMS για το επιφανειακό O ₃	48
Κεφάλαιο 3 – Αποτελέσματα	52
3.1 Συνοπτική Ανάλυση του καύσωνα	52
3.2 Ανάλυση του επιφανειακού όζοντος	78
3.2.1 Μέσω δεδομένων από το CAMS reanalysis	78
3.2.2 Μέσω παρατηρήσεων από επίγειους σταθμούς	81
3.3 Αξιολόγηση των παγκόσμιων και περιοχικών δεδομένων πρόγνωσης O ₃ του συστήματος μοντέλων CAMS	89



3.3.1 Μέσω των δεδομένων GLR CAMS (GLF και RF vs GLR)	89
3.3.2 Μέσω δεδομένων παρατήρησης (GLF και RF vs observations)	95
3.3.3 Λόγοι δημιουργίας σφαλμάτων στα προγνωστικά μοντέλα	105
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 – Συμπεράσματα	108
Συμπληρωματικό υλικό.....	111
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	115

Κεφάλαιο 1 – Εισαγωγή

1.1 Τι είναι καύσωνας

Θερμό κύμα (heat wave), θερμή εισβολή (warm invasion) και θερμή μεταφορά (warm advection) είναι μερικοί από τους όρους, που αναφέρονται στο φαινόμενο του καύσωνα, από τους ερευνητές στην ελληνική και ξένη βιβλιογραφία (Balafoutis & Makrogiannis, 2001).

Έχουν διατυπωθεί πολλοί ορισμοί για να περιγράψουν το φαινόμενο αυτό, αλλά αυτοί δεν καλύπτουν όλες τις περιπτώσεις. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα ο ορισμός να προσδιορίζεται κάθε φορά ανάλογα με το στόχο της έρευνας. Γενικότερα ο ορισμός του καύσωνα είναι ένας συνδυασμός

- της έντασης (ένα κατώφλι της θερμοκρασίας) και
- της χρονικής διάρκειας του.

Το όριο της θερμοκρασίας προσδιορίζεται είτε με απόλυτο (σταθερό κατώφλι), είτε με σχετικό (σταθερά ή κινούμενα ανώτερα εκατοστημόρια) τρόπο. Σύμφωνα με τους D'Irrpoliti et al. (2010), η μεγάλη διάρκεια ενός καύσωνα μπορεί να επιφέρει περισσότερα αρνητικά αποτελέσματα από έναν καύσωνα μεγαλύτερης έντασης, ενώ σύμφωνα με τους Anderson et al. (2011) το πρώτο κύμα καύσωνα, που έχει μεγάλη διάρκεια και ένταση, είναι πιο επιβλαβές για την υγεία σε σχέση με τα μεταγενέστερα.

Αν η μελέτη του καύσωνα αφορά μία εκτεταμένη χωρική περιοχή, στον ορισμό του φαινομένου εντάσσεται και η παράμετρος:

- της χωρικής έκτασης του φαινομένου.

Η πλειοψηφία των κυμάτων καύσωνα έχει διάρκεια 3-7 ημέρες, ενώ σπάνια η διάρκεια τους είναι μεγαλύτερη των 10 ημερών. Οι θερμές εισβολές καταγράφονται 1-2 φορές τον χρόνο, ενώ σε σπάνιες περιπτώσεις, αυτές μπορεί να διακοπούν μόνο κατά μία ημέρα. Τα έτη 2007 και 2021 καταγράφηκαν στην Ελλάδα δύο κύματα καύσωνα για κάθε έτος. Οι Founda et al. (2022), μελετώντας την περίοδο 1900-2019, μέσω πλήθους ορισμών για τον προσδιορισμό του καύσωνα, διαπίστωσαν ότι, κατά βάση, η συχνότητα τους είναι μεγαλύτερη τον Ιούλιο με ποσοστό μεγαλύτερο του 45% και ακολουθεί ο Αύγουστος με ποσοστό 30-40%. Ωστόσο, κύματα καύσωνα δεν συμβαίνουν κάθε καλοκαίρι, όπως επίσης δεν συμβαίνουν μόνο κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού, καθώς έχουν καταγραφεί και στα τέλη Μαΐου και Αρχές Σεπτεμβρίου (Mitropoulos et al., 2024). Στον Πίνακα 1.1 φαίνονται οι ισχυρότεροι καύσωνες της Ελλάδας και της Ευρώπης.

Πίνακας 1.1: Οι ισχυρότεροι καύσωνες σε Ελλάδα και Ευρώπη

Οι ισχυρότεροι καύσωνες της Ευρώπης	Οι ισχυρότεροι καύσωνες της Ελλάδας
Σε ένταση	Σε ένταση
Αυγ. 2021, 2010, 2018, 2003	Αυγ. 2021, 1987, Ιουλ. 2007, Ιούν. 2021
Σε διάρκεια	Σε διάρκεια
2021, 2010, 2003	Αυγ. 2021, Ιούν. 2007, Ιουλ. 1987, Ιουλ. 2007, Ιούν. 2021

Γενικά καύσωνα είναι μια παρατεταμένη περίοδος ακραίας ζέστης (Γραφείο Μετεωρολογίας BOM, 2011). Ωστόσο πρέπει να υπογραμμιστεί, ότι η έννοια «ακραία ζέστη» ποικίλλει ανάλογα με την τοποθεσία (Bobb et al., 2011). Οι 37 °C για τα μεσογειακά κλίματα θεωρούνται λογικά ως όρια ανεκτών θερμοκρασιών (Founda and Santamouris, 2017 ; Rasilla et al., 2019), αλλά όχι για κλίματα όπως αυτά που επικρατούν στη Φιλανδία (Nayha et al., 2014 ; McCarthy et al., 2019). Μια ζεστή ημέρα σε μία περιοχή με ψυχρό κλίμα, ίσως αντιστοιχεί σε μία κανονική ημέρα ενός θερμότερου κλίματος. Επομένως η δυσκολία στο να οριστεί ένα κύμα καύσωνα, σύμφωνα με τους Granger και Berechree (2009), εντοπίζεται στην καθιέρωση ενός γενικότερου αποδεκτού κατωφλίου στην θερμοκρασία αλλά και στην διάρκεια του, τα οποία θα πρέπει ταυτόχρονα να συσχετίζονται με την κλιματολογία της εκάστοτε περιοχής μελέτης. Ακόμα και σε εθνική κλίμακα παρατηρούνται διαφορετικά κριτήρια για τον ορισμό μίας θερμής εισβολής (Πίνακας 1.2).

Πίνακας 1.2: Διάφοροι ορισμοί για το φαινόμενο του καύσωνα

Παγκόσμιο Μετεωρολογικό Οργανισμό (WMO)	$T_{\max} > 32\text{ }^{\circ}\text{C}$ και Διάρκεια > 3 ημερών
EuroHeat	$T_{\max}, T_{\min} > 90$ ο εκατοστημόριο της μηνιαίας κατανομής για τουλάχιστον δύο μέρες
Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία (EMY)	$T_{\max} > 39\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_{\min} > 26\text{ }^{\circ}\text{C}$ σε ευρεία περιοχή, Διάρκεια > 3 ημερών, άπνοια ή ασθενείς άνεμοι και μικρό θερμοκρασιακό εύρος
Metaxas and Kallos (1979)	Ημέρα καλοκαιριού, $T_{\max} \geq 37\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Αστεροσκοπείο), $T_{\text{mean}24\text{ώρου}} \geq 31\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Αστεροσκοπείο)
Ανδρεάκος (1978)	$T_{\max} > 93\%$ του συνόλου των $T_{\max}$ μιας μακράς περιόδου για τους μήνες Ιούλιο και Αύγουστο.

Σε μία μελέτη για τον εντοπισμό ενός καύσωνα, εκτός από τους ορισμούς που χρησιμοποιούνται με βάση τη θερμοκρασία, μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφοροι δείκτες (βιοκλιματικοί δείκτες) π.χ. δείκτης δυσφορίας, δείκτης θερμικής άνεσης (Founda et al., 2022). Οι βιοκλιματικοί δείκτες συνδυάζουν μετεωρολογικές μεταβλητές όπως τη θερμοκρασία του αέρα, την υγρασία, τη ταχύτητα του ανέμου και την ηλιακή ακτινοβολία.

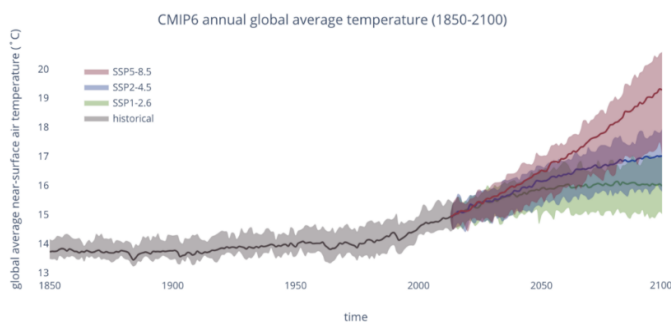
Πολλές έρευνες συγκρίνουν ορισμούς και καταλήγουν στο συμπέρασμα ότι μία μικρή μεταβολή του ορισμού μπορεί να επιφέρει διαφορετικά συμπεράσματα, παραδείγματος χάρη για τον αντίκτυπο ενός καύσωνα στην υγεία (Tong et al., 2010). Επομένως οι ερευνητές, μέσα από τις επιστημονικές τους μελέτες, προσπαθούν να εντοπίσουν τον καταλληλότερο ορισμό.

Έτσι γίνεται αντιληπτό ότι δεν μπορεί να είναι ρεαλιστική η ύπαρξη ενός μοναδικού ορισμού, που θα μπορέσει και να καλύψει όλες τις πιθανές περιοχές μελέτης, αλλά και να είναι ταυτόχρονα κατάλληλος για όλες τις επιστημονικές έρευνες. Παραδείγματος χάρη, τα διάφορα είδη φυτών και ζώων δεν ανταποκρίνονται στην ίδια θερμοκρασία με τον ίδιο τρόπο, καθώς επίσης ο κίνδυνος πυρκαγιάς και οι επιπτώσεις στην υγεία, λόγω των ακραίων υψηλών θερμοκρασιών, επίσης δεν μπορούν να εξεταστούν με το ίδιο θερμοκρασιακό κατώφλι στον ορισμό. Επομένως, η ποικιλομορφία των ορισμών παρ' όλα τα προβλήματα ερμηνείας και γενίκευσης που δημιουργεί είναι δικαιολογημένη. Ο ορισμός που ακολουθεί κάθε χώρα είναι σύμφωνα με την προστασία της υγείας των πολιτών της, έχοντας γενικά

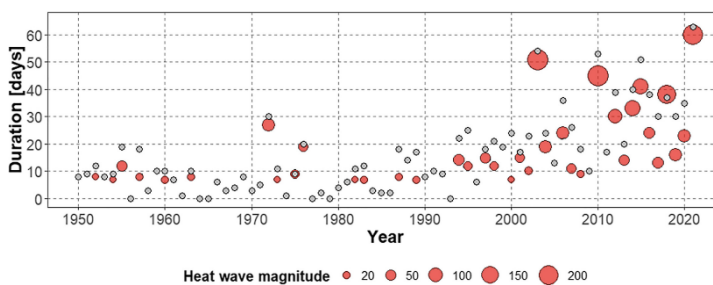
αποδεχτεί, όπως φαίνεται και στον Πίνακα 1.2, η διάρκεια του να είναι μεγαλύτερη των τριών ημερών (Robinson, 2001 ; NWS, 1994).

Κλιματική αλλαγή και καύσωνες

Κατά την επιστημονική μελέτη των Lhotka & Kyselý (2022), τα τελευταία χρόνια η διάρκεια και η ένταση των καυσώνων παρουσιάζουν μία αυξητική τάση (Σχήμα 1.2). Σύμφωνα με μελλοντικά σενάρια της διακυβερνητικής επιτροπής για την κλιματική αλλαγή (IPCC), η Κλιματική Αλλαγή φαίνεται να επηρεάζει τα κύματα καύσωνα αυξάνοντας τη συχνότητα τους, την ένταση τους και τη διάρκεια τους (IPCC, 2022). Αυτές οι αυξήσεις συσχετίζονται με την αύξηση των θερμοκρασιών που παρατηρείται στα μελλοντικά κλιματικά σενάρια ανεξάρτητα αν αυτά θεωρούνται απαισιόδοξα ή αισιόδοξα (Σχήμα 1.1). Σημαντική επίδραση εντοπίζεται ιδιαίτερα στην περιοχή της Ανατολικής Μεσογείου, ενώ παράλληλα εξάγεται το συμπέρασμα ότι οι μέγιστες θερμοκρασίες κατά τη διάρκεια των καυσώνων θα αυξηθούν και αυτές. Τα αποτελέσματα αυτά επιβεβαιώνονται από τις έρευνες των Fischer και Schar (2010), σύμφωνα με τις οποίες η διάρκεια των θερμών εισβολών και οι ξηρασίες θα επηρεάσουν περισσότερο την Ιβηρία και τις περιοχές της Μεσογείου.



Σχήμα 1.1: Με γκρι σκίαση απεικονίζονται οι ιστορικές προσομοιώσεις και οι χρωματιστές σκιάσεις δείχνουν πιθανή μελλοντική αλλαγή θερμοκρασίας με βάση διαφορετικά σενάρια εκπομπής αερίων θερμοκηπίου (το κόκκινο είναι απαισιόδοξο, το μπλε είναι ρεαλιστικό και το πράσινο είναι αισιόδοξο).
Credit: Copernicus Climate Change Service



Σχήμα 1.2: Ετήσιος αριθμός θερμών ημερών (γκρίζοι κύκλοι), συνολική διάρκεια των κυμάτων καύσωνα (άξονας y) και συνολικός δείκτης μεγέθους κύματος καύσωνα (μέγεθος κόκκινων κύκλων).
Lhotka, O., & Kyselý, J. (2022)

1.2 Τρόποι αύξησης της θερμοκρασίας

Μέσω της εξίσωσης του Euler, δηλαδή της εξίσωσης τάσης της θερμοκρασίας (E.1), εξάγεται το συμπέρασμα ότι η θερμοκρασία μπορεί να μεταβληθεί και άρα να αυξηθεί λόγω τριών διεργασιών (Carlson, 1994). Η θερμοδυναμική εξίσωση μπορεί να φανερώσει ποιοι είναι οι παράγοντες που επηρεάζουν την τοπική μεταβολή της θερμοκρασίας ($\partial T/\partial t$) και σε ποιο βαθμό. Όπως φαίνεται από την θερμοδυναμική εξίσωση (E.1), η τοπική μεταβολή της εξαρτάται από τρεις όρους.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \underbrace{\frac{1}{c_p} \cdot \frac{dq}{dt}}_{\text{B}} - \underbrace{\vec{V}_H \cdot \vec{\nabla} T}_{\text{A}} + \underbrace{(\gamma_d - \gamma) \cdot \vec{w}}_{\text{Γ}} \quad (\text{E.1})$$

A) Την οριζόντια μεταφορά της θερμοκρασίας (Temperature advection):

Η οριζόντια μεταφορά θερμότερων ή ψυχρότερων αέριων μαζών (E.1 A) εξαρτάται από το γινόμενο της οριζόντιας ταχύτητας με την οριζόντια θερμοβαθμίδα. Για την περιοχή της Ελλάδας, η μεταφορά θερμών αέριων μαζών κυρίως από την Αφρική, είναι ένας από τους κύριους παράγοντες δημιουργίας καυσώνων (EMY, 2021). Επομένως σε αυτήν την περίπτωση, η γεωγραφική προέλευση του αέρα είναι μία σημαντική παράμετρος, αφού από αυτή εξαρτάται και η αρχική θερμοκρασία της αέριας μάζας. Τα συμπεράσματα των Bieli et al. (2015) και των Zschenderlein et al. (2019) έρχονται σε αντιδιαστολή με τις επιστημονικές έρευνες που αφορούν τον Ελλαδικό χώρο. Σύμφωνα με τα ευρήματα τους γίνεται φανερό ότι η οριζόντια μεταφορά θερμού αέρα δεν παίζει σημαντικό ρόλο στη δημιουργία καυσώνων.

B) Διαβατικές διαδικασίες (θέρμανση/ψύξη) - θερμοκηπικός όρος

Σύμφωνα με την θερμοδυναμική εξίσωση, η αδιαβατική θέρμανση ή ψύξη (E.1 B), παραδείγματος χάρι λόγω απορρόφησης ή εκπομπής ακτινοβολίας, είναι ο δεύτερος παράγοντας που μπορεί να οδηγήσει σε τοπική μεταβολή της θερμοκρασίας.

Γ) Κατακόρυφη μεταφορά της θερμοκρασίας

Τέλος ο τρίτος παράγοντας που παίζει ρόλο στην τοπική μεταβολή της θερμοκρασίας είναι ο όρος της κατακόρυφης μεταφοράς της θερμοκρασίας, λόγω αδιαβατικής θέρμανσης ή ψύξης κατά τις καθοδικές ή ανοδικές κινήσεις αντίστοιχα (E.1 Γ). Επομένως, κατά τη διάρκεια των καθοδικών κινήσεων συμβαίνει αδιαβατική θέρμανση, οδηγώντας με αυτόν τον τρόπο στη θερμή κατακόρυφη μεταφορά. Λόγω αυτής, μειώνεται η σχετική υγρασία των κατερχόμενων αέριων μαζών προκαλώντας τελικά νεφοδιάλυση και αίθριο καιρό. Οι αντικυκλωνικές συνθήκες οι οποίες κατά βάση επικρατούν κατά τη διάρκεια ενός καύσωνα, είναι ένας τρόπος εισαγωγής θερμού αέρα από τα υψηλότερα επίπεδα στην κατώτερη τροπόσφαιρα. Επιπλέον μεταφορά θερμού αέρα προς τα κάτω και άρα αδιαβατική θέρμανση μπορεί να πραγματοποιηθεί και κατά τη διέλευση ενός αεροχειμάρρου πάνω από την περιοχή μελέτης, θέμα που θα αναλυθεί σε επόμενη υποενότητα.

1.3 Αίτια δημιουργίας των καυσώνων

Όσον αφορά την Ελλάδα τα κοινά χαρακτηριστικά των θερμών εισβολών είναι οι αντικυκλωνικές συνθήκες και η μεγάλης κλίμακας καθιζήσεις των αέριων μαζών. Οι συνοπτικές αυτές συνθήκες έχουν ως αποτέλεσμα την μεταφορά θερμών αέριων μαζών από την περιοχή της βόρειας Αφρικής και εν συνεχεία την πρόκληση αδιαβατικής θέρμανσης (Metaxas and Kallos, 1980 ; Giles and Balafoutis, 1990 ; Balafoutis and Makrogiannis, 2000).

Αντικυκλωνικές συνθήκες

Ο αντικυκλώνας είναι το βαρομετρικό σύστημα, το οποίο στη μέση στάθμη θάλασσας, παρουσιάζει στο κέντρο του τιμές ατμοσφαιρικής πίεσης μεγαλύτερες συγκριτικά με τις γύρω περιοχές. Τα πιο θερμά καλοκαίρια συνοδεύονται με αυξημένη συχνότητα αντικυκλωνικών συνθηκών (Cassou et al., 2005), ενώ σύμφωνα με τα αποτελέσματα των Miralles et al. (2014), για να μπορέσει να υπάρξει καύσωνας είναι απαραίτητη η ύπαρξη αντικυκλωνικών καθεστώτων (υψηλές πιέσεις), όπως συνέβη με τις θερμές εισβολές του 2003 και του 2010. Σύμφωνα με την Σπύρου (2000), για την περιοχή της Ελλάδας, φαίνεται ότι δεν απαιτείται η ένταση αυτού του αντικυκλώνα να είναι μεγάλη. Οι αντικυκλωνικές συνθήκες δημιουργούν καθοδικές κινήσεις και επομένως αρνητική μεταφορά στροβιλισμού και ανέφελο ουρανό. Η απουσία νεφοκάλυψης επιτρέπει να φτάσουν στην επιφάνεια του εδάφους μεγαλύτερα ποσά καθαρής, προς τα κάτω, ακτινοβολίας. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της θερμοκρασίας στο επίπεδο του εδάφους καθώς και την πρόκληση συνθηκών ξηρασίας για μία ασυνήθιστα παρατεταμένη περίοδο, όπως θα επεξηγηθεί κατωτέρω. Εδώ και αρκετά χρόνια η αύξηση των στάσιμων αντικυκλωνικών συστημάτων στην περιοχή της Ευρώπης, έχει εντείνει τη συχνότητα εμφάνισης θερμών εισβολών (Tomczyk et al., 2016). Ωστόσο, σύμφωνα με τους Tomczyk et al. (2016), όχι μόνο οι αντικυκλώνες του καλοκαιριού αλλά και αυτοί της άνοιξης επηρεάζουν τις ανωμαλίες των θερμοκρασιών.

Ελάχιστες μελέτες έχουν διεξαχθεί όσον αφορά τη δημιουργία των στάσιμων αντικυκλώνων, λόγω του ασυνήθιστα ζεστού Ατλαντικού ωκεανού στην Ευρώπη (Cassou et al., 2005). Αυτά τα συστήματα υψηλής πίεσης εμποδίζουν τη ροή χαμηλών βαρομετρικών, τα οποία θα επέφεραν βροχοπτώσεις (Schar et al., 2004) και θα αύξαναν με αυτόν τον τρόπο την εδαφική υγρασία σε εκείνες τις περιοχές. Σύμφωνα με τους Rodwell and Hoskins (1996,2001), αντικυκλωνικές συνθήκες μπορούν επίσης να δημιουργηθούν πάνω από τη δυτική Μεσόγειο ως απόρροια της αδιαβατικής καθόδου, που προκαλείται λόγω της αλληλεπίδρασης του Ινδικού Μουσώνα με το ξηρό Μεσογειακό κλίμα.

Ισχυρή θερμή Μεταφορά στην ελεύθερη τροπόσφαιρα

Η γενικότερη κυκλοφορία που επικρατεί λόγω των αντικυκλωνικών συνοπτικών συνθηκών, στην ευρύτερη περιοχή μελέτης, σε ορισμένες περιπτώσεις καυσώνων μπορεί να προκαλέσει μεταφορά θερμών αέριων μαζών, κυρίως από την περιοχή της Βόρειας Αφρικής και δευτερευόντως από την Ανατολική Τουρκία, το Ιράκ και τη Συρία (Ζιακόπουλος και Φραγκούλη, 2015). Ωστόσο, η επίδραση της θερμής αυτής εισβολής διαμορφώνεται σύμφωνα με την θέση της ζωνικής ροής στα 500 hPa, αφού οι κατολισθήσεις του αέρα από τα ανώτερα στρώματα (500 hPa), εξαιτίας του στάσιμου αντικυκλώνα, μπορούν να θερμάνουν περαιτέρω τα κατώτερα στρώματα.

Μείωση Υγρασίας εδάφους (γεωργική ξηρασία)

Η εδαφική υγρασία της άνοιξης σύμφωνα με τους Fischer et al. (2007a,b) είναι μία παράμετρος που επηρεάζει σημαντικά το πως θα εξελιχθούν οι Ευρωπαϊκοί καύσωνες, αλλά επίσης βοηθάει στην εποχική τους πρόγνωση. Η γεωργική ξηρασία μπορεί να επιφέρει την υδρολογική ξηρασία, εφόσον αυτή μπορεί να επηρεάσει τα υδρολογικά συστήματα. Ωστόσο, παρόλο που υπάρχουν επιστημονικές εργασίες που θεωρούν την υγρασία του εδάφους ως βασικό παράγοντα κατά τη διάρκεια των θερμών εισβολών, άλλες έρευνες αμφισβητούν την σημασία της. Οι Fischer et al. (2007a) κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι σε περιόδους καύσωνα η αλληλεπίδραση ξηράς-ατμόσφαιρας επηρεάζει κυρίως τις μέσες και μέγιστες θερμοκρασίες και σε μικρότερο ποσοστό τις ελάχιστες, ενώ ταυτόχρονα αυξάνει τη διάρκεια του καύσωνα. Οι Miralles et al. (2018) υποστηρίζουν ότι η έλλειψη υγρασίας στα εδάφη μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα την μείωση των γεωδυναμικών υψών κατά δεκάδες μέτρα, μειώνοντας περαιτέρω την πιθανότητα για βροχοπτώσεις.

Χαμηλή διαθεσιμότητα εδαφικής υγρασίας μπορεί να προκληθεί είτε από ελλείματα βροχοπτώσεων είτε από πρόωμη ανάπτυξη της βλάστησης, η οποία παίζει σημαντικό ρόλο στην ανταλλαγή νερού και ενέργειας μεταξύ της επιφάνειας του εδάφους και της υπερκείμενης ατμόσφαιρας (Taylor and Lebel, 1998). Στην συνέχεια θα γίνει αντιληπτό ότι και η έλλειψη βροχοπτώσεων μπορεί να οφείλονται σε χαμηλά ποσά υγρασίας στο έδαφος, κάνοντας με αυτόν τον τρόπο φανερό μία θετική ανάδραση μεταξύ τους.

Ελλείμματα βροχοπτώσεων (μετεωρολογική ξηρασία)

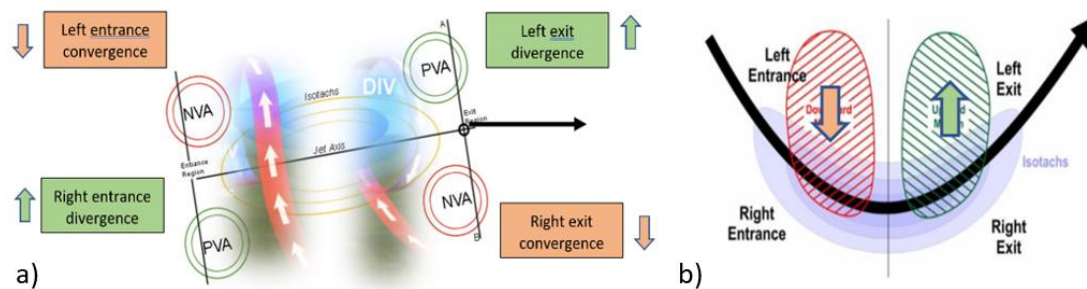
Τα ελλείμματα βροχοπτώσεων μπορούν να συμβάλουν στην ένταση αλλά και τη διάρκεια των επεισοδίων καύσωνα όπως συνέβη το 2003 και το 2010. Η πλειοψηφία των Ευρωπαϊκών καλοκαιρινών θερμών εισβολών προέκυψε ύστερα από ελλείμματα βροχοπτώσεων την άνοιξη, ενώ σύμφωνα με μια κλιματολογική έρευνα, τα έτη που παρουσιάζουν ελλείμματα χειμερινών βροχοπτώσεων στη Νότια Ευρώπη επηρεάζουν το καλοκαιρινό ευρωπαϊκό κλίμα γενικότερα (Vautard et al., 2007). Για παράδειγμα οι καύσωνες των ετών 1976,2003,2005 είχαν συμβεί μετά από τέσσερις μήνες ανομβρίας, ενώ στην περίπτωση του καύσωνα του 2021 στην Ελλάδα, φαίνεται ότι είχαν παρουσιαστεί ελλείμματα εδαφικής υγρασίας καθ' όλην τη διάρκεια του έτους (Copernicus). Οι αλληλεπιδράσεις εδαφικής υγρασίας-θερμοκρασίας, πιο συγκεκριμένα αντιπροσωπεύουν το 50-80% του πλήθους των ζεστών ημερών του καλοκαιριού (Fischer et al., 2007a).

Όπως προαναφέρθηκε οι μειωμένες βροχοπτώσεις μειώνουν την ποσότητα υγρασίας του εδάφους, αλλά ταυτόχρονα η μειωμένη εδαφική υγρασία μειώνει τις βροχοπτώσεις. Η καθαρή ακτινοβολία χωρίζεται σε λανθάνουσα και αισθητή ροή θερμότητας. Όταν υπάρχει έλλειψη υγρασίας στο έδαφος, μειώνεται η εξάτμιση και η λανθάνουσα ροή θερμότητας (Fischer et al., 2007b) και επομένως αυξάνεται η αισθητή ροή θερμότητας. Με αυτόν τον τρόπο η θερμοκρασία κοντά στην επιφάνεια αυξάνεται άμεσα. Κατά τη διάρκεια των θερμών εισβολών, η επικράτηση αντικυκλωνικών συνθηκών, προκαλεί την ύπαρξη αυξημένων ροών ηλιακής ακτινοβολίας λόγω απουσίας νεφών και άρα την επιδείνωση όσον προαναφέρονται. Επιπλέον, μια ξηρή επιφάνεια θερμαίνεται πιο γρήγορα από μια υγρή επιφάνεια, προκαλώντας αύξηση της ροής ακτινοβολίας μακρών κυμάτων (longwave) από την επιφάνεια (Eltahir, 1998), με αποτέλεσμα την περαιτέρω θέρμανση της ατμόσφαιρας. Αυτός είναι ένας επιπλέον μηχανισμός θέρμανσης της ατμόσφαιρας από την επιφάνεια και άρα της επιδείνωσης του καύσωνα. Η αύξηση της θερμοκρασίας μειώνει περαιτέρω τις πιθανότητες

για βροχόπτωση. Επιπλέον τα φυτά σε συνθήκες ξηρού αέρα διαπνέουν μεγαλύτερη ποσότητα νερού, καθιστώντας το έδαφος ξηρότερο και δημιουργώντας πάλι μία θετική ανάδραση μεταξύ θερμοκρασίας και έλλειψη υγρασίας του εδάφους.

1.4 Άλλοι παράγοντες που μπορεί να επηρεάσουν έναν καύσωνα

A) Η παρουσία αεροχειμάρρου



Σχήμα 1.3: Θέση των καθοδικών και ανοδικών κινήσεων ανάλογα με τον τύπο του αεροχειμάρρου: α)οριζόντιος και β)με κλίση (κυκλωνική)

Σύμφωνα με τους Brikas et al. (2006), οι έντονοι καύσωνες που πραγματοποιούνται στην περιοχή των Νότιων Βαλκανίων και επομένως και στην Ελλάδα, επηρεάζονται από τον υποτροπικό αεροχειμάρρο που δημιουργεί μία καμπύλη αντικυκλωνική βόρεια και βορειοδυτικά των Βαλκανίων. Όσο ο υποτροπικός αεροχειμάρρος μετατοπίζεται προς τα βόρεια, το κύτταρο του Hadley και οι τροπικές αέριες μάζες μετακινούνται και εκείνες προς τα βόρεια μαζί του. Η κύρια θέση του υποτροπικού αεροχειμάρρου είναι πάνω από τη νοτιοδυτική Ισπανία, τη Σικελία, τη Νότια Ελλάδα, το Κεντρικό Αιγαίο και τη Νοτιοδυτική Τουρκία (Prezerakos, 1989). Επομένως όταν η θέση του αεροχειμάρρου είναι βόρεια της Ελλάδας, οι επιφανειακές θερμοκρασίες αυξάνονται και όσο ο αεροχειμάρρος μετακινείται βορειότερα, αυτές οι θερμοκρασίες αυξάνονται σημαντικά. Γενικότερα, η θέση του υποτροπικού αεροχειμάρρου στην ανώτερη τροπόσφαιρα είναι, σύμφωνα με τους Balafoutis and Makrogiannis (2001), η βασική συνοπτική κατάσταση για τη δημιουργία θερμών επεισοδίων στην Ελληνική περιοχή. Ο υποτροπικός αεροχειμάρρος είναι επίσης το βόρειο όριο της κυκλοφορίας του Hadley, όπου μία μετατόπιση του αεροχειμάρρου προς τα βόρεια σημαίνει μετατόπιση των καθοδικών κινήσεων σε μεγαλύτερα γεωγραφικά πλάτη λόγω του δακτυλίου. Με τον τρόπο αυτό ο καύσωνας ενισχύεται ακόμα περισσότερο μέσω αδιαβατικής θέρμανσης. Αυτές οι περιοχές απόκλισης και σύγκλισης στα ανώτερα επίπεδα της τροπόσφαιρας (300 hPa) προκαλούν επίσης ένα ζεύγος οριζόντιας απόκλισης και σύγκλισης στην επιφάνεια προκαλώντας δευτερεύουσα κυκλοφορία (Holton, 1982). Όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.3, όταν ο αεροχειμάρρος είναι οριζόντιος, στη δεξιά έξοδο και στην αριστερή είσοδο του, παρατηρούνται καθοδικές κινήσεις των αέριων μαζών από τα ανώτερα προς τα χαμηλότερα στρώματα. Το ίδιο συμβαίνει όταν ο αεροχειμάρρος παρουσιάζει κυκλωνική κλίση, όπου οι καθοδικές κινήσεις καταγράφονται στην περιοχή της εξόδου του αεροχειμάρρου.

Ένας καύσωνας μπορεί να επηρεαστεί από κλιματικά φαινόμενα όπως είναι οι τηλεσυνδέσεις. Η Νότια Κύμανση ¹(ENSO) επηρεάζει τις θερμοκρασίες και τις βροχοπτώσεις όλου του κόσμου (Power et al., 1999; Kushnir et al., 2010; Hoell et al., 2017), επιδρώντας έτσι στην Ευρώπη με έμμεσο τρόπο. Η φάση του La Niña (El Niño) σχετίζεται με ισχυρότερη (ασθενέστερη) καθίζηση 500 hPa πάνω από την Ανατολική Μεσόγειο και μια εντατικοποίηση (εξασθένηση) του Υποτροπικού Jet Stream μεταξύ 35 °B και 50 °B (Logothetis et al., 2022). Επίσης η ταλάντωση του Βόρειου Ατλαντικού² (NAO: North Atlantic Oscillation) επηρεάζει το χειμερινό κλίμα και πιο συγκεκριμένα τις βροχοπτώσεις εκείνης της εποχής. Με αυτόν τον τρόπο επηρεάζονται οι θερμοκρασίες κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού στην Ευρώπη (Wang et al., 2011). Είναι γνωστό από πλήθος ερευνητικών εργασιών (Della-Marta et al., 2007; Vautard et al., 2007), ότι ελλείμματα βροχοπτώσεων τη χειμερινή περίοδο και στις αρχές της άνοιξης προηγούνται από πολλά ξηρά και ζεστά καλοκαίρια. Με τον τρόπο αυτό η εποχική πρόγνωση των θερμών εισβολών αλλά και των ξηρασιών στην περιοχή της Ευρώπης μπορεί να βελτιωθεί. Η επιρροή του NAO στα Ευρωπαϊκά καλοκαίρια έχει αποδειχθεί ότι ναι μεν είναι αδύναμη, αλλά ταυτόχρονα είναι στατιστικά σημαντική. Πέρα της σχέσης του NAO με τις χειμερινές βροχοπτώσεις, οι Kettlewell et al. (2003) βρήκαν ότι υπάρχει αλληλεπίδραση και μεταξύ των καλοκαιρινών βροχοπτώσεων. Γενικότερα, η θετική φάση του NAO συνδέεται με βροχοπτώσεις στην κεντρική και βόρεια Ευρώπη και με ελλείμματα βροχοπτώσεων στη Νότια. Η αρνητική φάση του NAO συνδέεται με μη γραμμικό τρόπο με βροχοπτώσεις στην Μεσόγειο και περιορισμένα ποσά βροχής στην κεντρική και βόρεια Ευρώπη. Τέλος, μία ακόμα ταλάντωση που επηρεάζει με υψηλές θερμοκρασίες όλη την Ευρώπη είναι η πέμπτη φάση της ταλάντωσης Madden-Julian (MJO), χωρίς ωστόσο να υπάρχει επιστημονική εργασία που να έχει συνδέσει κάποιον Ευρωπαϊκό καύσωνα με αυτήν.

1.5 Επιπτώσεις καύσωνα

Τα κύματα καύσωνα κατατάσσονται ανάμεσα στα πιο επικίνδυνα κλιματικά ακραία φαινόμενα, τα οποία έχουν σημαντικές επιπτώσεις στο περιβάλλον, στα οικοσυστήματα αλλά και στις κοινωνίες. Ένας καύσωνας ο οποίος είναι πρώιμος μπορεί να επηρεάσει περισσότερο την υγεία ενός ατόμου, λόγω της έλλειψης εγκλιματισμού ή των υψηλότερων ποσοστών σχετικής υγρασίας (Kysely, 2004; Kalkstein et al., 2008, Chen and Li, 2017; Ragettli et al., 2017). Αντίθετα, ένας καύσωνας που έχει καθυστερήσει να έρθει μπορεί να επιφέρει πολυάριθμες κοινωνικές και περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Επιπρόσθετα, κατά τη διάρκεια των θερμών εισβολών, δημιουργείται φωτοχημική ρύπανση η οποία αυξάνει ακόμα περισσότερο τις ήδη ακραίες θερμοκρασίες. Για παράδειγμα, το όζον σχηματίζεται υπό την παρουσία του ηλιακού φωτός και επομένως οι συγκεντρώσεις που καταγράφονται τις μέρες αυτές βρίσκονται σε υψηλότερα επίπεδα λόγω των ζεστών και ηλιόλουστων ημερών, προκαλώντας τελικά την επιπλέον αύξηση των θερμοκρασιών. Επομένως, ένα μέρος των

¹ Βρίσκεται ανάμεσα στην Ταϊτή και την Αυστραλία.

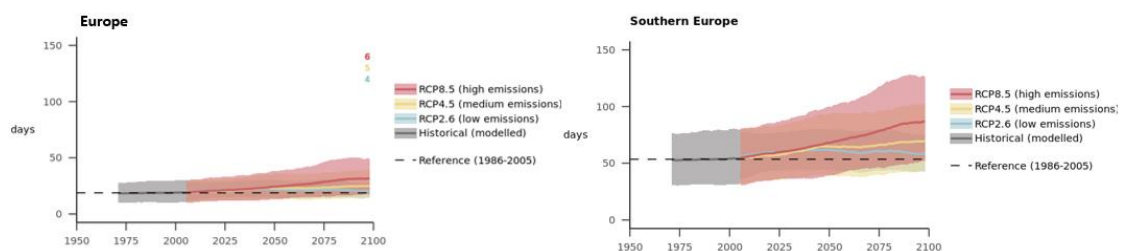
² Καθορίζεται από τα κέντρα του χαμηλού της Ισλανδίας και του αντικυκλώνα των Αζορών.

επιπτώσεων που προαναφέρονται οφείλεται με άμεσο και έμμεσο τρόπο στην αύξηση των ρύπων. Ειδικότερα οι περιβαλλοντικές και κοινωνικές επιπτώσεις αφορούν τα εξής:

α. Φυτά

Λόγω των ακραίων συνθηκών που επικρατούν κατά τη διάρκεια των θερμών εισβολών, τα τρόφιμα και οι καλλιέργειες μπορεί να καταστραφούν ή να αλλοιωθούν. Οι υψηλές θερμοκρασίες είναι ευνοϊκές για την αύξηση της δραστηριότητας των βιοτικών παραγόντων (π.χ. μύκητες, βακτήρια) τα οποία αποδυναμώνουν την άμυνα των φυτών (Boyer, 1995), ενώ ταυτόχρονα αυξάνεται η εμφάνιση παρασίτων (Kurz et al., 2008). Όταν ένας καύσωνας συνδυαστεί με ξηρασία αυτό προκαλεί επιπλέον λειψυδρία, στρες λόγω έλλειψης νερού (water stress) με αποτέλεσμα να προκαλούνται γεωργικές απώλειες και θνησιμότητα των φυτών, με τις απώλειες απόδοσης να κυμαίνονται από σχεδόν 0 έως 39% (Bhatia et al., 2012). Η αυξημένη εξάτμιση που υπάρχει εξαιτίας των συνθηκών που επικρατούν, οδηγεί σε μεγαλύτερη ξηρασία της ρίζας και τελικά στην μη αναστρέψιμη αφυδάτωση του φυτού (Brodribb and Cochard, 2009; Sperry et al., 2002). Επομένως σε παρατεταμένες περιόδους ξηρασίας αυξάνεται η θνησιμότητα των φυτών (Duan et al., 2013 ; Levanic et al., 2011). Η εξάρτηση της παραγωγικότητας και της ποιότητας της γεωργίας από το κλίμα και τις καιρικές συνθήκες θα έχει ως αποτέλεσμα να επηρεαστούν μελλοντικά σημαντικά οι καλλιέργειες, λόγω της αυξημένης θερμικής καταπόνησης και των ελλειμμάτων νερού (Manromatis et al., 2022). Τέλος, οι πυρκαγιές που συνήθως ξεσπούν την περίοδο του καύσωνα και οι συνθήκες που επικρατούν αυξάνουν τις συγκεντρώσεις του CO₂. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την ανάπτυξη των φυτών ως προς το μέγεθός τους καθώς και την αύξηση του δείκτη της φυλλικής επιφάνειας, όμως με πολλές μελέτες να δείχνουν ότι κάτι τέτοιο μειώνει τη διάρκεια ζωής τους (Duan et al., 2013).

β. Πυρκαγιές



Σχήμα 1.4: Οι ημέρες με πυρκαγιά στην Ευρώπη και την Νότια Ευρώπη για τα τρία σενάρια εκπομπής των αερίων του θερμοκηπίου (το κόκκινο είναι το απαισιόδοξο, κίτρινο το ρεαλιστικό και μπλε το αισιόδοξο). Με γκρι σκίαση απεικονίζονται οι ιστορικές προσομοιώσεις. (πηγή: <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/figures/days-with-fire-danger-exceeding>)

Οι πιο ακραίες πυρκαγιές στην περιοχή της Μεσογείου συμβαίνουν όταν υπάρχουν συνθήκες ξηρασίας αλλά και καύσωνα ταυτόχρονα. Παρόλο που δεν έχει καταγραφεί πιο είναι το ποσοστό των πυρκαγιών που έχει ξεσπάσει κατά την διάρκεια των Θερμών εισβολών μέχρι στιγμής, φαίνεται ότι σε βάθος ετών, λόγω της κλιματικής αλλαγής και άρα της αύξησης της συχνότητας, της έντασης και της διάρκειας των καυσώνων, θα υπάρξει αύξηση των ημερών με πυρκαγιά (Σχήμα 1.4) (European Environment Agency, 2022). Οι πυρκαγιές είναι

ένα σημαντικό πρόβλημα που επηρεάζει όχι μόνο το φυσικό περιβάλλον καταστρέφοντας το, αλλά ταυτόχρονα επιδρά στην υγεία των ζωντανών οργανισμών και την οικονομία. Το 2021 στην Ελλάδα κάηκαν 130.000 στρέμματα, δηλαδή το τριπλάσιο της μέσης ετήσιας καμένης έκτασης 2008-2020 της χώρας, με το 70% να σημειώνεται στις ημέρες 3-4 Αυγούστου (ημέρες καύσωνα).

Οι πυρκαγιές σε συνδυασμό με τις καλοκαιρινές συνθήκες που επικρατούν, είναι υπεύθυνες για την αύξηση των λεπτών σωματιδίων στην ατμόσφαιρα, επηρεάζοντας με αυτόν τον τρόπο την υγεία του πληθυσμού. Κατά τη διάρκεια καύσης της βλάστησης εκπέμπεται κυρίως μονοξείδιο του άνθρακα. Αυτή η χημική ένωση είναι αέριο του θερμοκηπίου και επομένως είναι υπεύθυνη για την περαιτέρω αύξηση της θερμοκρασίας.

Οι πυρκαγιές σαν φαινόμενο είναι ιδιαίτερα περίπλοκο και πραγματοποιείται υπό τρεις προϋποθέσεις. Πρώτον να υπάρχει κάποιο καύσιμο το οποίο να είναι στεγνό όπως μία διαθέσιμη ποσότητα ξηρού φυλλώματος, δεύτερον να υφίσταται μία πηγή ανάφλεξης (ανθρώπινη δραστηριότητα ή κεραυνός) και τρίτον να υπάρχουν οι κατάλληλες καιρικές συνθήκες όπου θα ευνοήσουν την ανάπτυξη της (Bradstock, 2010; Boer et al., 2017). Η πλειοψηφία των μεγάλων πυρκαγιών συμβαίνουν υπό αυξημένη ταχύτητα ανέμων (κυρίως τους Mistral και Etesian στην Ελλάδα), υψηλές θερμοκρασίες, έλλειψη βροχοπτώσεων και χαμηλή σχετική υγρασία συγκριτικά με τις προηγούμενες και τις επόμενες μέρες. Η υψηλότερη θερμοκρασία του αέρα αυξάνει τη θερμοκρασία των δέντρων και των καλλιεργειών και τα καθιστά ευαίσθητα στο να πιάσουν φωτιά. Ο άνεμος από την άλλη έχει την ιδιότητα να εμπλουτίζει τη φωτιά με οξυγόνο, να την κινεί με μεγαλύτερη ταχύτητα προς την κατεύθυνση που πνέει. Κατά τη διάρκεια του καύσωνα η σχετική υγρασία μπορεί να πέσει σε ποσοστό 1%. Επομένως σε συνδυασμό με την ξήρανση της βλάστησης, μπορεί να δημιουργηθούν εκτεταμένες πυρκαγιές (Pezza et al., 2012). Στα τέλη του καλοκαιριού η συνθήκες ξηρασίας είναι ακόμα πιο έντονες, με αποτέλεσμα τα κύματα καύσωνα που δημιουργούνται τότε να αυξάνουν τον κίνδυνο για πυρκαγιές (Hulley et al., 2020).

γ. Αερολύματα και Όζον

Κατά τη διάρκεια του καύσωνα φωτοχημικά προϊόντα όπως το όζον, το PAN (ακέτυλο περόξυ νιτρίλιο), η ακετόνη, το PM10 (σωματίδια με αεροδυναμική διάμετρο μικρότερη από 10 μm) παρατηρούνται σε υψηλότερες συγκεντρώσεις. Γενικότερα οι ατμοσφαιρικοί ρύποι και ειδικότερα το επιφανειακό όζον σύμφωνα με πολλές μελέτες (Sartor et al., 1995; Bernard et al., 2001; Patz et al., 2005; Fouillet et al., 2006 ; Tagaris et al., 2009) επηρεάζονται από τις θερμοκρασίες της ατμόσφαιρας, προκαλώντας με την σειρά τους επιβλαβείς επιπτώσεις στην υγεία των ανθρώπων, αφού επηρεάζουν την ποιότητα του αέρα (Vautard et al., 2005). Κατά τη διάρκεια των ημερών καύσωνα οι συγκεντρώσεις όζοντος μπορεί να είναι υψηλές οδηγώντας ακόμα και σε ρεκόρ, όπως συνέβη το καλοκαίρι του 2003 στην Ευρώπη (Vautard et al., 2007).

Επιπλέον η έλλειψη βροχοπτώσεων και το ξηρό έδαφος, που υπάρχουν κατά τη διάρκεια μίας θερμής εισβολής, αυξάνουν τα επίπεδα ορυκτής σκόνης στην ατμόσφαιρα. Γενικότερα, τα ατμοσφαιρικά αερολύματα μπορούν είτε να δημιουργηθούν σε μία περιοχή μελέτης είτε να μεταφερθούν από αλλού. Η λεκάνη της Μεσογείου έχει δύο κύριες πηγές αερολυμάτων: τη Βόρεια Αφρική απ' όπου μεταφέρεται φυσική σκόνη κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού λόγω της γενικής κυκλοφορίας της ατμόσφαιρας, αλλά και την Ευρώπη όπου θεωρείται η κύρια πηγή ανθρωπογενών ρύπων (Kubilay et al., 2000). Τα αερολύματα αυτά,

εκτός των άμεσων επιπτώσεων που έχουν στην υγεία, μπορούν είτε να ψύξουν τον ατμοσφαιρικό αέρα αντανακλώντας την ηλιακή ακτινοβολία, είτε να αυξήσουν τη θερμοκρασία της ατμόσφαιρας, εφόσον είναι αέρια του θερμοκηπίου. Με αυτόν τον τρόπο οι επιπτώσεις λόγω περαιτέρω αύξησης των ακραίων θερμοκρασιών πολλαπλασιάζονται. Περισσότερες πληροφορίες για το όζον και την επίδραση που έχει αυτό αναλύεται στο Κεφάλαιο 1.10.

d. Ανθρώπινη υγεία

Η ανθρώπινη υγεία μπορεί να επηρεαστεί από τα υψηλά επίπεδα θερμοκρασιών που έχει ξεχωριστά η κάθε μία ημέρα ενός καύσωνα. Ωστόσο, εντείνεται η επίδραση της ζέστης όταν συνυπολογίζεται το πλήθος των διαδοχικών ημερών αυτής (η διάρκεια του φαινομένου) (Gasparrini et al., 2011). Σύμφωνα με τους D'Ippoliti et al (2010), η παράμετρος της διάρκειας μπορεί να επιφέρει περισσότερα αρνητικά αποτελέσματα από έναν καύσωνα μεγαλύτερης έντασης, ενώ άλλες έρευνες προσθέτουν ότι αυτό σχετίζεται με τις ζεστές νύχτες. Ορισμένες από τις επιπτώσεις στην υγεία είναι το θερμικό στρες, η θερμική εξάντληση και τα ηλιακά εγκαύματα. Ο θερμός αέρας έχει την ιδιότητα να συγκρατεί μεγαλύτερη ποσότητα υγρασίας και αυτό έχει σαν αποτέλεσμα η ατμόσφαιρα να γίνεται περισσότερο αποπνικτική. Οι μετεωρολογικοί παράμετροι που γενικότερα μπορούν να επηρεάσουν τη θερμοκρασία ενός ανθρώπου είναι η θερμοκρασία του αέρα, η μέση ακτινοβολία και η ταχύτητα του ανέμου. Επομένως, οι βιοκλιματικοί δείκτες που χρησιμοποιούνται για την μελέτη των επιπτώσεων των καυσώνων στην υγεία των πολιτών, συνδυάζουν αυτές τις μετεωρολογικές παραμέτρους.

Οι κοινωνικές ομάδες οι οποίες είναι περισσότερο ευάλωτες σε αυτό το ακραίο φαινόμενο είναι οι ηλικιωμένοι, τα παιδιά, καθώς και όσοι πάσχουν από χρόνιες παθήσεις. Γενικότερα πολλές μελέτες εξάγουν το συμπέρασμα ότι οι άντρες έχουν μεγαλύτερη συχνότητα όσον αφορά εγκεφαλικά επεισόδια, καρδιακές ανακοπές, τραυματισμούς και επιπλέον ασθένειες που οφείλονται στη ζέστη. Αντίθετα η νεφρική υγεία που μπορεί να επηρεαστεί από αφυδάτωση είτε από υπερθερμία, επηρεάζει περισσότερο το γυναικείο πληθυσμό. Όσον αφορά την αναπνευστική νοσηρότητα αυτή μπορεί να επηρεάζεται από την αύξηση των ατμοσφαιρικών ρύπων κατά τη διάρκεια του καύσωνα. Ωστόσο από τις μελέτες δεν έχει βγει ένα ξεκάθαρο συμπέρασμα. Πέρα από τη νοσηρότητα, που προκαλεί ο καύσωνας, η οποία έχει ως αποτέλεσμα τις αυξημένες εισαγωγές στα νοσοκομεία, μπορεί τελικά να οδηγήσει σε αυξημένο ποσοστό θανάτων (Robinson, 2001). Για παράδειγμα το 2003 η θνησιμότητα έσπασε ρεκόρ καταγράφοντας 35.000 θανάτους (Vandentorren et al. 2004; Hémon and Jouglu, 2004; Schar and Jendritzky, 2004). Για κάθε μία προσαύξηση του 1 °C πάνω από την κλιματολογία της κάθε πόλης, εντοπίστηκε μία αύξηση στο ποσοστό θνησιμότητας κατά 2% για πόλεις της Βόρειας Ευρώπης και 3% της Νότιας. Αυτά ήταν τα συμπεράσματα μέσα από μία επιστημονική έρευνα για 10 έτη που αφορούσε 15 ευρωπαϊκές πόλεις. Επιπλέον, σύμφωνα με τους Rosenzweig et al. (2005), η υγεία επιδεινώνεται κυρίως στους κατοίκους των πόλεων, λόγω του φαινομένου που ονομάζεται αστική θερμική νησίδα. Το φαινόμενο της θερμικής νησίδας οφείλεται στην αργοπορημένη ψύξη που υφίσταται η πόλη, συγκριτικά με τις γύρω αγροτικές περιοχές (Barring et al., 1985). Αυτό συμβαίνει διότι, λόγω της αυξημένης ασφάλτου, απορροφάται περισσότερη ηλιακή ακτινοβολία (Allegrini et al., 2012) σε αναλογία με την βλάστηση συγκριτικά με τις γύρω αγροτικές περιοχές (Tremeac et al., 2012 ; Shimoda, 2003). Έτσι οι αστικές περιοχές συσσωρεύουν μεγαλύτερα ποσά θερμότητας σε σχέση με τις αγροτικές περιοχές. Επιπλέον σύμφωνα με τους Tan et al. (2010)

η αστική θερμική νησίδα ευθύνεται άμεσα για την ενίσχυση της έντασης των θερμών εισβολών και άρα την ενίσχυση των επιπτώσεων στην υγεία του πληθυσμού των αστικών κέντρων.

ε. Κοινωνικοοικονομικά

Η χαμηλή κοινωνικοοικονομική κατάσταση ενός ανθρώπου είναι ένας επιπλέον παράγοντας που μπορεί να συμβάλει στην ευαισθησία στην θερμότητα. Τα κύματα καύσωνα μπορούν να επηρεάσουν την ψυχική υγεία ενός ατόμου (Williams et al., 2012a,b). Επομένως άτομα που έχουν κάποια ψυχική διαταραχή γίνετε αντιληπτό ότι θα είναι περισσότερο ευάλωτα κατά τη διάρκεια τέτοιων περιόδων (Cusack et al., 2011). Επιπλέον ένας καύσωνας έχει αντίκτυπο και στον οικονομικό τομέα μίας χώρας. Κατά τη διάρκεια του, δημιουργείται ένα ιδιαίτερα αυξημένο κόστος, εφόσον για την προστασία από αυτόν κρίνεται αναγκαία η χρήση ηλεκτρικών συσκευών για την ανακούφιση από την ζέστη.

φ. Ενέργεια και νερό

Κατά τη διάρκεια μίας θερμής εισβολής η κατανάλωση ενέργειας αυξάνεται, όπως είναι λογικό, για να μπορέσουν οι εσωτερικοί χώροι όπως τα σπίτια, οι χώροι εργασίας αλλά και οι δημόσιοι και ιδιωτικοί φορείς όπως είναι τα νοσοκομεία, να παραμείνουν σε θερμοκρασίες ανεκτές για όσους βρίσκονται μέσα σε αυτά. Η αυξημένη χρήση κλιματιστικών, για λόγους ψύξης, δημιουργεί υψηλά ποσοστά ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας (Yau and Hasbi, 2013; Rubbelke and Vögele, 2013; Strengers, 2012). Ωστόσο, η χρήση κλιματιστικών μειώνει την ικανότητα του ανθρώπου να προσαρμόζεται στη θερμοκρασία, βλέποντας με αυτόν τον τρόπο ότι η χρήση συσκευών ψύξης που χρησιμοποιούν ηλεκτρική ενέργεια δεν επηρεάζει μόνο το κόστος των καταναλωτών αλλά και την υγεία των κατοίκων. Ένα επιπλέον πρόβλημα που δημιουργείται, κατά την περίοδο των ακραίων θερμοκρασιών, είναι όχι μόνο η ανάγκη αυξημένης παραγωγής αλλά και η μεταφορά της παραγόμενης ενέργειας. Τα συστήματα μεταφοράς είναι ευάλωτα στις συνθήκες αυτές (ιδιαίτερα στις υψηλές θερμοκρασίες της νύχτας), καθώς δεν μπορούν να αποβάλλουν την υπερβολική θερμότητα και έτσι μπορεί να προκληθούν μέχρι και διακοπές ρεύματος. Αυτά τα προβλήματα παραγωγής και μεταφοράς ενέργειας, σύμφωνα με τους Matzarakis and Nastos (2011) αυξάνουν τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου ανά μονάδα ενέργειας που καταναλώνεται. Τα αέρια του θερμοκηπίου έχουν σαν ιδιότητα να απορροφούν την γήινη ακτινοβολία και με αυτόν τον τρόπο να θερμαίνουν την ατμόσφαιρα. Επομένως δημιουργείται μία διαδικασία θετικής ανάδρασης.

Την περίοδο της θερμής εισβολής επιπλέον επηρεάζεται το νερό ως προς την ποιότητα του, αλλά και την αυξημένη κατανάλωση του και άρα το κόστος του. Αυτό μπορεί να οφείλεται και στις ζημιές στις υποδομές ύδρευσης. Το νερό μπορεί και αυτό με την σειρά του να επηρεάσει την ενέργεια. Για παράδειγμα, τον Αύγουστο και τον Σεπτέμβριο του 2003 οι ροές των ποταμών μειώθηκαν σύμφωνα με τα επίπεδα της εποχής, έχοντας σαν αποτέλεσμα οι σταθμοί ενέργειας, όπως η γερμανική πυρηνική εγκατάσταση Isar1, να μειώσουν το ποσοστό παραγωγής ενέργειας, αφού χρειάζονταν νερό που θα τους βοηθούσε στην ψύξη των μηχανών. Σύμφωνα με τα παραπάνω γίνεται κατανοητή η σχέση που υπάρχει ανάμεσα σε διάφορες επιπτώσεις που μπορεί να έχει ένας καύσωνας και ο ένας παράγοντας μπορεί με την σειρά του να επηρεάσει κάποιον άλλον, πολλαπλασιάζοντας με τον τρόπο αυτό τις δυσμενείς επιπτώσεις.

γ. Υποδομές και δομικά υλικά

Τα κύματα καύσωνα σύμφωνα με πολλές επιστημονικές έρευνες συνδέονται συνάμα με προβλήματα στις αστικές υποδομές (Smith and Lawson, 2012 ; Depietri et al., 2012). Ενδεικτικά ορισμένα παραδείγματα είναι: να λυγίσουν οι σιδηροδρομικές γραμμές, να προκληθούν ζημιές στο οδικό δίκτυο, στις αστικές υποδομές ύδρευσης ακόμα και να σταματήσουν να είναι ρυθμισμένα τα φανάρια. Όλα τα παραπάνω συμβαίνουν λόγω της επιρροής που ασκείται στα δομικά υλικά από τις ακραίες θερμοκρασίες που επικρατούν. Ο χάλυβας και το σκυρόδεμα είναι υλικά που μπορεί να διασταλούν από τις υψηλές θερμοκρασίες, ενώ σε άλλα δομικά υλικά επηρεάζεται η αντοχή τους (Yau and Hasbi, 2013) λόγω της αυξημένης υπερϊώδους ακτινοβολίας.

1.6 Αντιμετώπιση καύσωνα

Παρατηρώντας τις πολυάριθμες και ποικίλες επιπτώσεις που έχουν οι καύσωνες στον άνθρωπο, είτε άμεσα είτε έμμεσα, αλλά και στο περιβάλλον, κρίνεται απαραίτητη η λήψη πολιτικών αποφάσεων καθώς και η ενημέρωση και ευαισθητοποίηση του κοινού. Παρακάτω αναλύονται τρόποι μετριασμού ή προσαρμογής στο φαινόμενο αυτό, ώστε να προστατευτούν όσοι απειλούνται από τις επιπτώσεις του, είτε βραχυπρόθεσμα είτε μακροπρόθεσμα. Πολλές είναι οι χώρες της Ευρώπης που εφάρμοσαν πρωτόκολλα δράσης ύστερα από το καύσωνα του 2003.

- Να δημιουργηθεί μία βάση δεδομένων με τους ηλικιωμένους και τους χρόνια αρρώστους, ώστε μέσω εφαρμογών να τους δίνονται πιο λεπτομερείς ενημερώσεις και οδηγίες για την αντιμετώπιση των θερμών εισβολών. Γενικότερα είναι αναγκαίο να δημιουργηθεί ένα απλό και συνάμα αξιόπιστο σύστημα έγκαιρης προειδοποίησης-πρόγνωσης θερμότητας, ώστε το κοινό να μην χάσει την πίστη του με τις ψευδείς προειδοποιήσεις (Pascal et al., 2013). Ο πληθυσμός είναι αναγκαίο να είναι σε θέση να αναγνωρίζει συμπτώματα που σχετίζονται με την θερμότητα, ιδιαίτερα όσοι εργάζονται στο χώρο της υγείας. Τα νοσοκομεία με την σειρά τους θα πρέπει να είναι ενημερωμένα για την αύξηση των εισαγωγών, που μπορεί να υπάρξουν κατά τη διάρκεια του φαινομένου, ώστε να υπάρξει καλύτερη διαχείριση των ασθενών.
- Εφόσον η αυξημένη εξάρτηση από τον κλιματισμό μπορεί να αποδυναμώσει την φυσιολογική θερμική προσαρμοστικότητα (Institute of Sustainable Resources, 2010), να προτιμάται η χρήση ηλεκτρικών ανεμιστήρων (Gupta et al., 2012). Αυτή η λύση ταυτόχρονα βοηθάει στο να υπάρχουν μικρότερες ενεργειακές απαιτήσεις την περίοδο αυτή. Οι Yu et al. (2012) επισήμαναν ότι η παρατεταμένη παραμονή σε στατικά κλιματιζόμενα περιβάλλοντα μειώνει την ικανότητα εγκλιματισμού του κατοίκου.
- Αύξηση της χρήσης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, όπως η ηλιακή και η αιολική ενέργεια, το οποίο θα συμβάλλει ταυτόχρονα στην μείωση της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας η οποία παράγεται με ορυκτά καύσιμα, καθώς και στην μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου (Panwar et al., 2011 ; Baniyounes et al., 2012). Επομένως η μετατροπή των κατοικιών σε ενεργειακά αποδοτικά σπίτια θα αποτελούσε μία μακροπρόθεσμη εξομάλυνση αρκετών επιπτώσεων.

- Η αύξηση της συχνότητας των δρομολογίων των μαζικών μέσων μεταφοράς, θα αποτελούσε ένα κίνητρο χρήσης αυτών υπό τέτοιες ακραίες συνθήκες. Αυτό θα είχε ως συνεπακόλουθο τη μείωση χρήσης των αυτοκινήτων και επομένως τη μείωση των εκπομπών καυσαερίων από αυτά, τα οποία στην πλειονότητα τους αποτελούν αέρια του θερμοκηπίου. Επομένως με αυτόν τον τρόπο θα παρεμποδιστεί η περαιτέρω αύξηση της θερμοκρασίας του αέρα και επομένως η επιπλέον αύξηση των σοβαρών επιπτώσεων στον άνθρωπο.
- Δημιουργία πάρκων και κήπων στα αστικά κέντρα, ώστε η αύξηση της βλάστησης να μετριάσει τις επιπτώσεις της αστικής θερμικής νησίδας. Πιο συγκεκριμένα οι Spanaki et al. (2011), Santamouris et al. (2014) και Bianchini and Hewage (2012) επισήμαναν ότι αυτό θα μπορούσε να επιτευχθεί δημιουργώντας πράσινες στέγες, αυξάνοντας με αυτόν τον τρόπο την ανακλαστικότητα της ηλιακής ακτινοβολίας αντί να απορροφάται και να προκαλείται αύξηση της θερμοκρασίας. Μία κάλυψη του 10% των μεγάλων πόλεων, θα μπορούσε να διατηρήσει τη θερμοκρασία της επιφάνειας τη δεκαετία του 2080 κάτω από τα επίπεδα της περιόδου 1961-1990 (Gill et al., 2007). Ωστόσο κάτι τέτοιο θα πρέπει να υλοποιηθεί με σωστό σχεδιασμό, διότι αυτή η αντιμετώπιση απαιτεί παροχή γλυκού νερού το οποίο προβλέπεται να γίνει περισσότερο σπάνιο (McDonald et al., 2011). Επομένως, ειδικά για τις περιοχές που βρίσκονται σε ξηρά κλίματα θα πρέπει ταυτόχρονα να αποθηκεύεται το νερό της βροχής σε δεξαμενές, ώστε στη συνέχεια να γίνεται χρήση αυτού. Γενικότερα, η δημιουργία πολλών μικρών και μεσαίων πράσινων περιοχών σε μία πόλη, όπως τα πάρκα, διέπεται με περισσότερα θετικά αποτελέσματα σε σχέση με τη δημιουργία ενός μεγάλου πάρκου. Ωστόσο είναι αναγκαίο να επισημανθεί ότι σε ακραίες θερμοκρασίες, όπως εκείνες των 42 °C και άνω, υπάρχουν δέντρα όπου αντί να αποτελούν πηγές δροσισμού, αποτελούν πηγές θερμότητας εξαιτίας του κλεισίματος των στομάτων τους. Άρα η επιλογή της βλάστησης θα πρέπει να γίνει με ιδιαίτερη προσοχή.
- Χρήση ειδικών χρωμάτων που θα βοηθάει στην ανακλαστικότητα της ηλιακής ακτινοβολίας. Με αυτόν τον τρόπο τα κτίρια θα μπορούν να διατηρούν τις εσωτερικές τους θερμοκρασίες, μειώνοντας ορισμένες από τις επιπτώσεις του καύσωνα στην κοινωνία. Τα αποτελέσματα της έρευνας των Porritt et al. (2011, 2012) έδειξαν ότι οι πιο αποτελεσματικές μέθοδοι είναι η εξωτερική μόνωση των τοίχων, τα εξωτερικά ρολά παραθύρων και η βαφή των εξωτερικών τοίχων με ανοιχτόχρωμα χρώματα, όταν συγκρίθηκαν με μεθόδους όπως οι ανοιχτόχρωμες ταράτσες. Αυτοί οι μέθοδοι θα δώσουν τη δυνατότητα τα κτίρια να ψύχονται χωρίς την υπερβολική κατανάλωση ρεύματος.

Οι τρόποι αντιμετώπισης που προαναφέρθηκαν έχουν να κάνουν με την προσαρμογή των ανθρώπων σε αυτές τις ακραίες συνθήκες, αλλά και τον μετριασμό του φαινομένου του καύσωνα σε τοπικό επίπεδο. Όμως θα πρέπει να τονιστεί ότι η αύξηση της συχνότητας και της έντασης των καυσώνων έχει να κάνει με την Κλιματική Αλλαγή, η οποία δεν μπορεί να αντιμετωπιστεί με τοπικής κλίμακας μέτρα, αλλά με μειώσεις κατά βάση του διοξειδίου του άνθρακα και του μεθανίου σε παγκόσμιο επίπεδο. Παρόλα αυτά είναι αναγκαίο με την λήξη του καύσωνα η πολιτεία να προχωρήσει στην αξιολόγηση των βραχυπρόθεσμων τρόπων αντιμετώπισης του μέσω των κλήσεων έκτακτης ανάγκης, που πραγματοποιήθηκαν κατά τη διάρκεια του, τον υπολογισμό των εισαγωγών στα νοσοκομεία, το αρχείο όλων των ιατρών καθώς και τα αίτια θνησιμότητας που καταγράφηκαν.

Τα μόρια του όζοντος αποτελούνται από τρία άτομα οξυγόνου, τα οποία είναι ενωμένα μεταξύ τους (O_3). Το όζον είναι ένα άχρωμο και πολύ αντιδραστικό αέριο που μπορεί να βρεθεί σε όλα τα στρώματα της ατμόσφαιρας. Αυτό παράγεται στο πλανητικό οριακό στρώμα, την ελεύθερη τροπόσφαιρα και την στρατόσφαιρα. Οι συγκεντρώσεις του όζοντος εκφράζονται σε μέρη ανά δισεκατομμύριο (ppb) ή σε πυκνότητα μάζας ανά όγκο ($\mu g/m^3$) και το 1 ppb ισοδυναμεί με $1,96 \mu g/m^3$ σε τυπική θερμοκρασία ($25^\circ C$) και πίεση ($1 \text{ atm} = 1,01325 \text{ bar}$). Στη σχέση (1.1) καταγράφεται η μαθηματική τους συσχέτιση. Η πυκνότητα μάζας ανά όγκο ($\mu g/m^3$) έχει το μειονέκτημα ότι εξαρτάται από την πίεση και την θερμοκρασία, επομένως δεν διατηρείται σταθερή, σε αντιδιαστολή με την αναλογία μείγματος κατ' όγκο (ppb) που παραμένει σταθερή, εφόσον η αέρια μάζα θεωρείται ότι δεν αναμειγνύεται.

$$X_A = \rho_A (R/MB_A) (T/P) \quad (1.1)$$

όπου: X_A : αναλογία μείγματος του στοιχείου A κατ' όγκο T: Θερμοκρασία ($^\circ C$)
 MB_A : μοριακό βάρος του στοιχείου A P: Πίεση (atm)
 ρ_A : συγκέντρωση του A σε μονάδες ppb R: Παγκόσμια σταθερά των αερίων

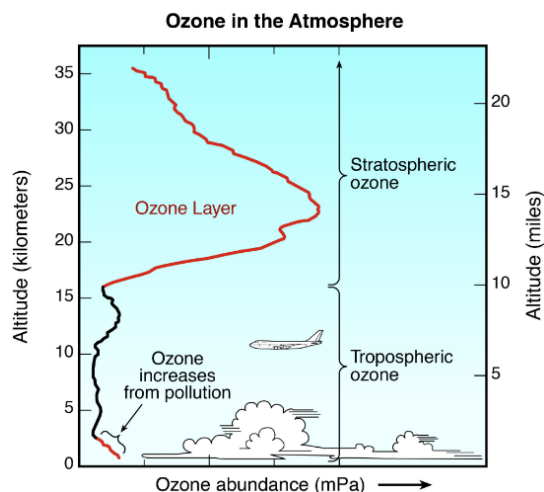
Πού συναντάται το Όζον

Α) Στρατόσφαιρα

Το μεγαλύτερο ποσοστό του όζοντος, περίπου το 90%, βρίσκεται στη στρατόσφαιρα. Ο σχηματισμός του προκύπτει από την φωτόλυση του μοριακού οξυγόνου (O_2), από την υπεριώδη ακτινοβολία ($\lambda \leq 240 \text{ nm}$), παρέχοντας με αυτόν τον τρόπο δύο ατομικά οξυγόνα (O). Έτσι η δημιουργία του όζοντος διευκολύνεται αφού στην συνέχεια το ατομικό οξυγόνο (O) ενώνεται με το μοριακό οξυγόνο (O_2), παρουσία ενός τρίτου σώματος που απορροφά την θερμότητα (Charman, 1930). Αφού τα μόρια του όζοντος απορροφήσουν την υπεριώδη (UV) ακτινοβολία, στην συνέχεια την επανεκπέμπουν, θερμαίνοντας με αυτόν τον τρόπο την στρατόσφαιρα, με την θερμοκρασία να αυξάνει κατά ύψος σε αυτήν την ισοβαρική επιφάνεια. Το οξυγόνο (O_2) βρίσκεται στην ατμόσφαιρα σε ποσοστό 21%, ως το δεύτερο βασικό στοιχείο της μετά το άζωτο (78%).

Το όζον που βρίσκεται στην στρατόσφαιρα, δηλαδή σε υψόμετρο από τα 8-15 χιλιόμετρα από την επιφάνεια του εδάφους έως τα 50 χιλιόμετρα, ονομάζεται στρατοσφαιρικό όζον. Στα 15 έως 35km παρατηρούνται τα μεγαλύτερα ποσά όζοντος και για αυτόν τον λόγο αυτή η περιοχή ονομάζεται οζονόσφαιρα (Σχήμα 1.5). Η ύπαρξη του σε μεγάλες συγκεντρώσεις στο συγκεκριμένο ύψος είναι ιδιαίτερα σημαντική για τη ζωή στον πλανήτη. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι απορροφά το μεγαλύτερο μέρος της εισερχόμενης υπεριώδους ακτινοβολίας (230-290 nm), η οποία είναι επιβλαβής για τους ζώντες οργανισμούς, αφού μπορεί να προκαλέσει ηλιακά εγκαύματα και καρκίνο του δέρματος. Για τον λόγο αυτό, το όζον στην στρατόσφαιρα ονομάζεται αλλιώς και «καλό» όζον. Ωστόσο, το στρατοσφαιρικό όζον μπορεί να καταστραφεί εξαιτίας χημικών ουσιών που απελευθερώνονται από τις ανθρώπινες δραστηριότητες. Η οικογένεια ενώσεων που συνεισφέρει περισσότερο στο συνολικό ρυθμό καταστροφής όζοντος είναι κυρίως τα NO_x (οξειδία του αζώτου) και έπειτα τα ClO_x (οξειδία του χλωρίου). Στο παρελθόν

χρησιμοποιούνταν χλωροφθοράνθρακες (CFCs) από τους ανθρώπους ως συστατικό σε διάφορα προϊόντα. Αυτοί μεταφέρονταν μέχρι την στρατόσφαιρα, και την άνοιξη με την βοήθεια του φωτός, κατέστρεφαν το στρώμα του όζοντος. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα να καταγράφει το 1985, για πρώτη φορά, η «τρύπα του όζοντος» στον Νότιο Πόλο, δηλαδή μία μείωση του πάχους του στρώματος του όζοντος. Το 2019 παρατηρήθηκε ότι η «τρύπα του όζοντος» άρχισε να κλείνει, ενώ παράλληλα εμφανίστηκαν «τρύπες όζοντος» στον Βόρειο πόλο.



Σχήμα 1.5: Η μεταβολή του όζοντος με το ύψος, μέχρι τα 35km

Β) Τροπόσφαιρα

Το όζον στην τροπόσφαιρα, δηλαδή στο χαμηλότερο στρώμα της ατμόσφαιρας, συνεισφέρει μόνο στο 10% στην συνολική στήλη όζοντος. Ωστόσο, τα τελευταία 100 χρόνια, οι συγκεντρώσεις του όζοντος στο στρώμα αυτό αυξάνονται συνεχώς. Ο λόγος που αυτή η αύξηση βρίσκεται υπό παρακολούθηση και μελετάται συνεχώς, είναι το γεγονός ότι σε αυτό το επίπεδο το όζον αποτελεί έναν ατμοσφαιρικό ρύπο. Δηλαδή η υπέρβαση του πάνω από ορισμένα επίπεδα δημιουργεί ιδιαίτερα επιβλαβείς επιπτώσεις σε όλους τους ζωντανούς οργανισμούς (ανθρώπους, ζώα, βλάστηση) (Meleux et al., 2007; Bhatia et al., 2012). Επομένως, εξάγεται το συμπέρασμα ότι εκτός από το πρόβλημα της μείωσης του στρατοσφαιρικού όζοντος, υπάρχει και το πρόβλημα της αύξησης του τροποσφαιρικού όζοντος. Το επιφανειακό όζον είναι ένας δευτερογενής ρύπος, και επομένως δεν εκπέμπεται άμεσα αλλά δημιουργείται μέσω χημικών αντιδράσεων από άλλους πρωτογενείς ρύπους. Αυτές οι ενώσεις ονομάζονται πρόδρομες ενώσεις του όζοντος και είναι τα οξειδία του αζώτου NO_x (NO , NO_2), το μεθάνιο (CH_4), το μονοξείδιο του άνθρακα (CO) και οι πτητικές οργανικές ενώσεις VOCs, με συνέπεια η αυξημένη συγκέντρωσή τους σε κάποια περιοχή να συνεπάγεται την ταυτόχρονη παρατήρηση υψηλών συγκεντρώσεων O_3 . Επιπρόσθετα, η παραγωγή του όζοντος εξαρτάται από μετεωρολογικούς παράγοντες οι οποίοι αναλύονται σε επόμενη ενότητα. Συνάμα, το όζον στο επίπεδο του εδάφους και στην ανώτερη τροπόσφαιρα είναι ένα σημαντικό αέριο του θερμοκηπίου (Solomon et al., 2007). Ως αέριο του θερμοκηπίου θερμαίνει την ατμόσφαιρα, μέσω της απορρόφησης της γήινης ακτινοβολίας (έχει θερμαντική επίδραση στο κλιματικό σύστημα), συμβάλλοντας ακόμα και στην παγκόσμια θέρμανση (Κλιματική Αλλαγή) (Stevenson et al., 2013). Οι επιστήμονες σύμφωνα με τα αποτελέσματα των ερευνών τους διατυπώνουν ότι ο συγκεκριμένος ρύπος ευθύνεται για το 3-7% του φαινομένου του θερμοκηπίου στη Γη (UCAR Center for science education, 2021). Για τους δύο λόγους που προαναφέρθηκαν, το όζον που βρίσκεται στην τροπόσφαιρα ονομάζεται «κακό» όζον.

Οι συγκεντρώσεις του όζοντος μεταβάλλονται κατά τη διάρκεια του έτους, την ώρα της ημέρας, την γεωγραφική θέση, τις μετεωρολογικές συνθήκες, τα χημικά στοιχεία που βρίσκονται στην ατμόσφαιρα, αλλά και την μεταφορά του από άλλες περιοχές ή από την στρατόσφαιρα.

Κατά τη διάρκεια της ημέρας, το ελάχιστο των συγκεντρώσεων του όζοντος παρατηρείται νωρίς το πρωί και το μέγιστο νωρίς το απόγευμα. Ωστόσο, επειδή όπως

προαναφέρθηκε το όζον εξαρτάται από το γεωγραφικό πλάτος της περιοχής, η ημερήσια διακύμανση του δεν είναι παντού η ίδια. Στο Πίνακα 1.3 φαίνονται ορισμένες αποκλίσεις. Τα τελευταία χρόνια λόγω των πολιτικών μείωσης του ΝΟ, το όζον δεν καταναλώνεται όλο κατά τη διάρκεια της νύχτας, μένοντας με αυτόν τον τρόπο υπολείμματα όζοντος τις πρωινές ώρες. Όσον αφορά τον εποχιακό του κύκλο, αυτός είναι αποτέλεσμα της μεσημβρινής κυκλοφορίας στην στρατόσφαιρα, η οποία είναι πιο έντονη τον χειμώνα. Επομένως στα 200 hPa το μέγιστο του όζοντος παρατηρείται αρχές άνοιξης, λόγω του χρόνου που θέλει να μεταφερθεί δυναμικά από τις τροπικές περιοχές όπου σχηματίζεται, προς τα υψηλότερα γεωγραφικά πλάτη. Στα 850 hPa το μέγιστο παρατηρείται αρχές Ιουνίου και μπορεί να είναι αρκετά ευρύ καθώς στο ύψος αυτό δεν παίζει ρόλο μόνο το μεταφερόμενο όζον από την στρατόσφαιρα, αλλά πολλές ακόμα διεργασίες όπου θα αναλυθούν στην ενότητα 1.8. Παρ' όλα αυτά, ο εποχικός κύκλος εξαρτάται και από τη θέση των σταθμών παρατήρησης, συγκριτικά με τη θέση των πηγών. Σε γενικά πλαίσια, το όζον διατηρείται σε μικρότερες τιμές κατά τη διάρκεια του χειμώνα, ενώ το μέγιστο συναντάται νωρίς την άνοιξη. Η περίοδος όπου οι συγκεντρώσεις του είναι υψηλότερες είναι η άνοιξη-καλοκαίρι. Αυτό συμβαίνει επιπρόσθετα διότι η παραγωγή όζοντος αυξάνεται όταν υπάρχουν υψηλές θερμοκρασίες, αυξημένα ποσά ηλιακής ακτινοβολίας και ασθενείς άνεμοι, δηλαδή κατά τη διάρκεια στάσιμων βαρομετρικών υψηλών την θερινή περίοδο. Επομένως, σύμφωνα με τους Querol et al. (2016) σε ορισμένες Μεσογειακές χώρες δρουν συνδυαστικά οι μετεωρολογικοί παράγοντες και η γεωγραφική θέση, έχοντας ως αποτέλεσμα υψηλότερες συγκεντρώσεις.

Πίνακας 1.3: Η χρονική στιγμή μέσα στην ημέρα που καταγράφεται το μέγιστο και το ελάχιστο του όζοντος, ανάλογα με τη θέση της υφιστάμενης περιοχής.

Περιοχές	Μέγιστο	Ελάχιστο
Θαλάσσιες	Πριν την ανατολή του ήλιου	απόγευμα
Χαμηλού υψόμετρου	Πριν από το μεσημέρι	Τη νύχτα
Υψηλού υψόμετρου	Δεν παρατηρείτε ημερήσια διακύμανση	
Υψηλού γεωγραφικού πλάτους	Πριν την ανατολή του ήλιου	απόγευμα

Το όζον έχει μέση διάρκεια ζωής 16 ώρες. Όταν παραχθεί μπορεί να μετακινηθεί σε μικρότερες αποστάσεις (αστική και περιφερειακή κλίμακα) ή μεγαλύτερες γεωγραφικές κλίμακες (ημισφαιρικά ή παγκόσμια). Άρα γίνεται αντιληπτό ότι στην ατμόσφαιρα μπορεί να παραμείνει για μεγάλα χρονικά διαστήματα (Nagashima et al., 2017). Στην ελεύθερη τροπόσφαιρα η διάρκεια ζωής του όζοντος και των πρόδρομων ουσιών του μπορεί να είναι περισσότερη από μήνες. Επομένως γίνεται φανερό ότι η παραγωγή φωτοχημικού όζοντος μπορεί να παίζει σημαντικό ρόλο και σε μεγαλύτερα χρονικά διαστήματα, δηλαδή μερικές εβδομάδες-μήνες.

Οι συγκεντρώσεις του όζοντος στο μέλλον

Οι παγκόσμιες συγκεντρώσεις του τροποσφαιρικού όζοντος συνεχίζουν να αυξάνονται τα τελευταία χρόνια και σύμφωνα με ορισμένες επιστημονικές μελέτες, φαίνεται από τα κλιματολογικά σενάρια, ότι η άνοδος αυτή θα συνεχιστεί και μελλοντικά. Αυτό πραγματώνεται εξαιτίας της αύξησης των πρόδρομων ενώσεων που προέρχονται από τις ανθρώπινες δραστηριότητες. Ωστόσο μία μείωση των πρόδρομων ενώσεων δεν συνεπάγεται

και μείωση του όζοντος. Σύμφωνα με τις εργασίες των Van Vuuren et al. (2011) και Eyring et al. (2013), όλα τα σενάρια RCP που είναι βασισμένα στις μειώσεις των πρόδρομων ενώσεων του όζοντος, δίνουν σε ορισμένες περιοχές αύξηση των συγκεντρώσεων του όζοντος και σε άλλες περιοχές μείωση αυτού. Η αισθητή μείωση των πρόδρομων ενώσεων του όζοντος στην περιοχή της Ευρώπης τις τελευταίες δεκαετίες, έχουν περιορίσει το πλήθος των υπερβάσεων του όζοντος πάνω από εκείνα τα όρια, που θεωρούνται επικίνδυνα για την ανθρώπινη υγεία (Guerreiro et al., 2014). Συμπερασματικά, υπάρχουν μελέτες που δείχνουν αύξηση των συγκεντρώσεων του όζοντος παρ' όλες τις πολιτικές μετριασμού του (Colette et al., 2015), ενώ ταυτόχρονα υπάρχουν μελέτες όπου δείχνουν μείωση του χρόνου ζωής του όζοντος στην τροπόσφαιρα (Stevenson et al., 2005; Racherla and Adams, 2006) και επομένως μείωση των τιμών του σε αυτό το επίπεδο.

Ωστόσο, η συνεχής αύξηση της παραγωγής του όζοντος από τις πρόδρομες ενώσεις σε μία περιοχή δεν αποτελεί το μοναδικό λόγο αύξησης του στο μέλλον. Σύμφωνα με την Royal Society (2008) οι συγκεντρώσεις του όζοντος στις μολυσμένες περιοχές, όπως τα μεγάλα αστικά κέντρα και οι βιομηχανικές περιοχές, θα αυξηθούν λόγω της Κλιματικής Αλλαγής, εκτός και αν εφαρμοστούν ισχυρά μέτρα μείωσης των πρόδρομων ενώσεων. Η κλιματική αλλαγή θα επιφέρει αύξηση των κυμάτων καύσωνα τη θερινή περίοδο και έτσι, ανάλογα με την περιοχή, θα υπάρξει μία αύξηση 70-100% στα επεισόδια του όζοντος. Γενικότερα, η αύξηση των συγκεντρώσεων του όζοντος, που παρατηρείται στα μελλοντικά σενάρια των κλιματικών μοντέλων, μπορεί να οφείλεται κατά κύριο λόγο στις διάφορες μετεωρολογικές συνθήκες που μπορεί να ευνοήσουν προς την κατεύθυνση αυτή, όπως είναι η αύξηση της συχνότητας των θερμών εισβολών, η αυξημένη πιθανότητα για στασιμότητα των αέριων μαζών, καθώς και η μειωμένη νεφοκάλυψη και επομένως οι ελλείψεις στις βροχοπτώσεις. Επιπλέον, το όζον είναι ένα θερμοκηπικό αέριο καθώς απορροφά την ηλιακή ακτινοβολία και θερμαίνει με αυτόν το τρόπο τον ατμοσφαιρικό αέρα, συμβάλλοντας στη θερμοκρασία του κατά 7%. Επομένως μία αύξηση του θα επέφερε περαιτέρω αύξηση της θερμοκρασίας φανερώνοντας μία θετική ανάδραση μεταξύ τους. Μία μείωση του όζοντος θα προκαλούσε αύξηση της αποθήκευσης άνθρακα από τα φυτά και κατ' επέκταση μετριασμό της Κλιματικής Αλλαγής (Lombardozzi et al., 2015; Sitch et al., 2007).

Σύμφωνα με πιο πρόσφατες κλιματολογικές έρευνες, οι οποίες γίνονται μέσω των μοντέλων CMIP6 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 6), σε μελλοντικά σενάρια που περιέχουν ισχυρά μέτρα για την ποιότητα του αέρα (SSP1-1.9, SSP1-2.6) οι μέσες ετήσιες συγκεντρώσεις επιφανειακού όζοντος μειώνονται σε όλες τις περιοχές χάριν στον ισχυρό μετριασμό των εκπομπών (Turnock et al., 2020). Αντιθέτως σε σενάρια ασθενούς μετριασμού (SSP-3.70, SSP-5.85) παρατηρείται αύξηση στις περισσότερες περιοχές (Turnock et al., 2020). Πιο συγκεκριμένα το σενάριο SSP-5.85 παρουσιάζει αύξηση του επιφανειακού όζοντος μέχρι το 2050 και έπειτα μείωση, παρότι την πραγμάτωση μείωσης των εκπομπών των πρόδρομων ενώσεων του όζοντος. Αυτό οφείλεται στην αύξηση του μεθανίου έως το 2080 (Szopa et al., 2021). Όσον αφορά το σενάριο SSP-3.70 σε αυτό προβλέπεται αύξηση του επιφανειακού O_3 στις περισσότερες περιοχές ιδιαίτερα στην Νότια και Ανατολική Ασία (Turnock et al., 2020). Σύμφωνα με τους Zanis et al. (2022), οι οποίοι μελέτησαν το σενάριο SSP-3.70 συμπέραναν ότι σε περιοχές απομακρυσμένες από πηγές ρύπανσης καταγράφεται μείωση του μέσου επιφανειακού όζοντος, λόγω της ενίσχυσης της χημικής καταστροφής του η οποία συμβαίνει χάρη στη παρουσία περισσότερων υδρατμών και υψηλότερων θερμοκρασιών σε ένα θερμότερο κλίμα. Επιπλέον, μειωμένες συγκεντρώσεις όζοντος παρατηρούνται στους

ωκεανούς αλλά και παγκοσμίως για τους ίδιους λόγους. Αντιθέτως, σε περιοχές κοντά σε ανθρωπογενής πηγές ρύπανσης ή κοντά σε ενισχυμένες πηγές εκπομπών φυσικών βιογενών πτητικών οργανικών ενώσεων, οι Zanis et al. (2022) παρατήρησαν ενίσχυση στην αποτελεσματικότητα των πρόδρομων ενώσεων για το σχηματισμό επιφανειακού O_3 με το μέγεθος της να εξαρτάται από τις περιφερειακές εκπομπές και την αντιστάθμιση τους από τη χημική καταστροφή όζοντος μεγάλης κλίμακας. Πιο συγκεκριμένα, η Κίνα και η Ινδία δείχνουν υψηλή ευαισθησία του επιφανειακού όζοντος στην κλιματική αλλαγή λόγω των εκτεταμένων εκπομπών NO_x , ενώ η Ευρώπη και η ΗΠΑ χαμηλή ευαισθησία (ελαφρώς θετικές ή αρνητικές αλλαγές) λόγω λιγότερων NO_x (Zanis et al., 2022).

1.8 Προέλευση τροποσφαιρικού Όζοντος - Όροι που καθορίζουν το ισοζύγιο του όζοντος στην τροπόσφαιρα

Το τροποσφαιρικό όζον προέρχεται κυρίως από τρεις πηγές. Η στρατοσφαιρική εισβολή όζοντος στην τροπόσφαιρα μπορεί να αυξήσει σημαντικά τα επίπεδα όζοντος σε αυτήν. Εν τούτοις, ο επί τόπου σχηματισμός μέσω των φωτοχημικών διεργασιών από πρόδρομες ενώσεις είναι η κύρια πηγή τροποσφαιρικού όζοντος (Crutzen, 1974; Fishman et al., 1979; Logan, 1985; Lelieveld and Dentener, 2000; Monks, 2000). Μία μεγάλη ποσότητα πρόδρομων ενώσεων του όζοντος εκπέμπονται φυσικά λόγω του φωτός και της βιόσφαιρας. Τέλος τα επίπεδα του όζοντος μπορούν να αυξηθούν λόγω μεταφοράς όζοντος από μία άλλη περιοχή. Η ύπαρξη των κλιματικών μοτίβων διευκολύνει τις στρατοσφαιρικές εισβολές και την παραγωγή όζοντος μέσω φωτοχημικών αντιδράσεων λόγω των μετεωρολογικών συνθηκών που προκαλούν. Πλην όμως, θα πρέπει να υπογραμμιστεί ότι διαφορετικοί παράγοντες μπορούν να επηρεάζουν τις συγκεντρώσεις του όζοντος σε διαφορετικές ημέρες και περιοχές. Οι διαδικασίες οι οποίες συμβάλουν στην μείωση του όζοντος σε μία περιοχή είναι οι χημικές αντιδράσεις που βοηθούν στην καταστροφή αυτού του ρύπου, αλλά και η ξηρή εναπόθεση του. Αναλυτικότερα, οι όροι που καθορίζουν το ισοζύγιο του όζοντος στην τροπόσφαιρα είναι οι εξής:

α)στρατοσφαιρική διείσδυση/εισβολή όζοντος

Η προς τα κάτω μεταφορά στρατοσφαιρικού όζοντος συνεισφέρει σημαντικά στο ισοζύγιο του τροποσφαιρικού όζοντος (Danielsen, 1968; Roelofs and Lelieveld, 1997; Cristofanelli et al., 2006; Ordonez et al., 2007; Zanis et al., 2014; Akritidis et al., 2016). Σε παγκόσμια κλίμακα συμβάλει περίπου σε **565Tg/έτος** (Lelieveld and Dentener, 2000). Αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική στην ανώτερη τροπόσφαιρα όπου η ακτινοβολία έχει μεγαλύτερη επίδραση.

Στις εισόδους των αεροχειμάρρων δημιουργούνται πτυχώσεις στην τροπόπαυση και μέσω αυτών διεισδύει αέρας από την στρατόσφαιρα στην τροπόσφαιρα (στρατοσφαιρική εισβολή), πλούσια σε όζον και χαμηλή σε αναλογία ανάμειξης υδρατμών (Holton et al., 1995). Τη θερινή περίοδο, λόγω του υποτροπικού αεροχειμάρρου και του αντικυκλώνα της Νότιας Ασίας, εμφανίζονται πολλές αναδιπλώσεις στην περιοχή της Ανατολικής Μεσογείου (Tyrlis et al., 2014). Επιπλέον, όταν επικρατούν υψηλές πιέσεις, η αέρια μάζα κατέρχεται από την ανώτερη τροπόσφαιρα στην κατώτερη, μεταφέροντας και άρα αυξάνοντας με τον τρόπο αυτό τις συγκεντρώσεις όζοντος της κατώτερης τροπόσφαιρας και μειώνοντας τη σχετική

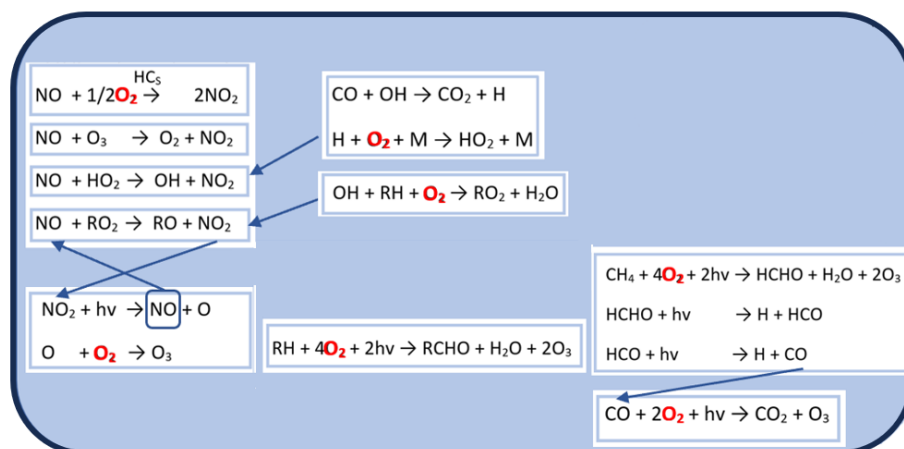
υγρασία. Επομένως την περίοδο του καλοκαιριού, όταν επικρατούν αντικυκλωνικές συνθήκες, το όζον βρίσκεται στο μέγιστό του στην Ευρώπη (Thouret et al., 2006). Ειδικότερα, στην Ανατολική Μεσόγειο οι καθιζήσεις αέρα που έχουν παρατηρηθεί είναι ιδιαίτερα σημαντικές, οδηγώντας στις αυξημένες τιμές του. Αντίστοιχα σε Κυκλωνικές συνθήκες καταγράφονται μικρότερα ποσά όζοντος στο στρώμα αυτό. Η εισροή όζοντος από την στρατόσφαιρα στην τροπόσφαιρα κορυφώνεται κατά τη διάρκεια της άνοιξης. Αυτό συμβαίνει διότι την εποχή εκείνη οι κατακόρυφες κινήσεις μεγιστοποιούνται στο Βόρειο Ημισφαίριο. Άρα, σε υποκείμενη αύξηση της στρατοσφαιρικής κυκλοφορίας τα ποσά του στρατοσφαιρικού όζοντος στην τροπόσφαιρα θα ήταν πιθανόν μεγαλύτερα. Σε αυτό το σημείο πρέπει να επισημανθεί, ότι τα αυξημένα αέρια του θερμοκηπίου σύμφωνα με έρευνες μπορούν να ενισχύσουν την στρατοσφαιρική κυκλοφορία.

β) χημικές αντιδράσεις στην ελεύθερη τροπόσφαιρα

Σε παγκόσμια κλίμακα όμως φαίνεται τον σημαντικότερο ρόλο στο ισοζύγιο του όζοντος να παίζει η **παραγωγή και η καταστροφή** όζοντος μέσω των χημικών αντιδράσεων. Πιο συγκεκριμένα, σύμφωνα με τους Lelieveld and Dentener (2000), αυτοί οι δύο όροι ευθύνονται για **3314 και 3174 Tg/έτος** αντίστοιχα.

Παραγωγή του τροποσφαιρικού όζοντος

Η ένωση του όζοντος είναι ένας δευτερεύον ρύπος, δηλαδή δεν εκπέμπεται απευθείας στην ατμόσφαιρα, αλλά προκύπτει ως προϊόν των χημικών αντιδράσεων των πρόδρομων ενώσεων του όζοντος, υπό συνθήκες υπεριώδους ακτινοβολίας (Σχήμα 1.6). Οι πρόδρομες ενώσεις, οι οποίες ευθύνονται για τον σχηματισμό του όζοντος, είναι τα οξειδία του αζώτου (NO_x), το μεθάνιο (CH_4), το μονοξείδιο του άνθρακα (CO) και οι πτητικές οργανικές ενώσεις VOCs (Crutzen, 1973; Chameides and Walker, 1973). Οι πρόδρομες ουσίες του όζοντος έχουν φυσικές και ανθρωπογενείς πηγές, όπως φαίνεται στο Πίνακα 1.4. Παρ' όλα αυτά, οι συγκεντρώσεις τους δεν σχετίζονται γραμμικά με αυτές του όζοντος (Lewis, Lee and Carpenter, 2004). Όσο μεγαλύτεροι είναι οι χρόνοι ζωής των ενώσεων, από τα οποία μπορεί να δημιουργηθεί το όζον, τόσο μεγαλύτερη είναι η επίδραση τους σε αυτό. Επομένως οι εκπομπές του μονοξειδίου του άνθρακα και του μεθανίου επηρεάζουν το όζον σε περιφερειακή και παγκόσμια κλίμακα λόγω του χρόνου ζωής τους.



Σχήμα 1.6: Αντιδράσεις πρόδρομων ενώσεων για την παραγωγή του όζοντος

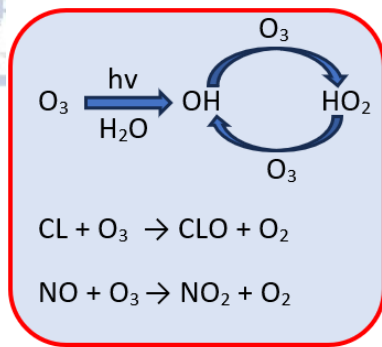
Πίνακας 1.4: Η προέλευση και ο χρόνος ζωής των πρόδρομων ενώσεων του όζοντος.

Χημική ένωση	Προέλευση	Χρόνος ζωής
Οξειδία του αζώτου (NO _x)	κατά κύριο λόγο προϊόν καύσης ορυκτών καυσίμων π.χ. καυσαέρια αυτοκινήτων, παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (63%), αλλά δευτερευόντως είναι αποτέλεσμα καύσης βιομάζας (14%), κεραυνών (10%), μικροβιακές και γεωχημικές διεργασίες στο έδαφος (11%), λιπάσματα N, και άλλες μικρές πηγές.	~6 ημέρες
Μονοξείδιο του άνθρακα (CO)	Περιλαμβάνεται στα αέρια καύσιμα (φυσικό αέριο, προπάνιο), καυσαέρια οχημάτων (75%), βιομάζα, ατελή καύση ορυκτών καυσίμων (25%), χρήση βιομηχανικών διαλυτών, φυσικές εκπομπές βλάστησης	2-4 μήνες
Πτητικές οργανικές ενώσεις (VOCs): Μεθάνιο (CH ₄) Ισοπρένιο (C ₅ H ₈) [υδρογονάνθρακας C _x H _y]	Λόγω εκπομπών ορυκτών καυσίμων, καθώς και της άμεσης εξάτμισης των καυσίμων, της χρήσης διαλυτών, της χρήσης λιπασμάτων, της φυσικής βλάστησης, καύση βιομάζας, ερημική σκόνη, ηφαιστειακές εκρήξεις.	Λίγες μέρες έως 10 χρόνια Μεθάνιο(10χρ.)

Επομένως, λόγω της αφθονίας των πρόδρομων ενώσεων του όζοντος στις μεγάλες αστικές περιοχές, οι συγκεντρώσεις του όζοντος που καταγράφονται εκεί είναι επίσης υψηλές. Πριν την εφαρμογή πολιτικών για μείωση των οξειδίων του αζώτου και των πτητικών οργανικών ενώσεων, οι συγκεντρώσεις ήταν αρκετά υψηλές ασκώντας πολλές αρνητικές επιδράσεις. Παρ' όλα αυτά, μία μείωση σωματιδίων όπως PM_{2.5}, PM₁₀ και NO_x έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της ηλιακής ακτινοβολίας και άρα την αύξηση των συγκεντρώσεων του (Li et al., 2019). Παράλληλα, κατά τη διάρκεια ενός καύσωνα όπου επικρατεί ξηρασία και ζέστη, μπορούν να παρατηρηθούν εκτεταμένες δασικές πυρκαγιές οι οποίες μεγιστοποιούν τα επίπεδα του όζοντος, όπως συνέβει το 2003 (Solberg et al., 2005). Αυτή η αύξηση του οφείλεται στην εκπομπή CO λόγω της καύσης βιομάζας.

Οι φωτοχημικές αντιδράσεις επιπλέον εξαρτώνται, όπως προαναφέρθηκε, σε μεγάλο βαθμό από τη διαθεσιμότητα της ηλιακής ακτινοβολίας σύμφωνα με τα αποτελέσματα των Pu et al. (2017). Κατά την περίοδο καύσωνα, οι χημικές αντιδράσεις παίζουν τον πιο σημαντικό ρόλο στην αύξηση των συγκεντρώσεων του επιφανειακού όζοντος. Αυτό συμβαίνει διότι οι χημικές αντιδράσεις του όζοντος μπορούν να επηρεαστούν και από άλλους μετεωρολογικούς παράγοντες, όπως είναι η πίεση, η σχετική υγρασία, η θερμοκρασία του αέρα και η νεφοκάλυψη. Οι παράγοντες αυτοί είναι στενά συνδεδεμένοι μεταξύ τους, αφού για παράδειγμα η σχετική υγρασία επηρεάζει τον παράγοντα της νεφοκάλυψης, που κατ' επέκταση μειώνει αισθητά την καθαρή προς τα κάτω ηλιακή ακτινοβολία. Σύμφωνα με την Katragkou et al. (2011) η μειωμένη νεφοκάλυψη, η θερμοκρασία, η ηλιακή ακτινοβολία και ο τύπος κυκλοφορίας θα αυξήσει τις συγκεντρώσεις του όζοντος μακροπρόθεσμα δηλαδή μέχρι το τέλος του 21^{ου} αιώνα.

Καταστροφή του τροποσφαιρικού όζοντος



Σχήμα 1.7: Αντιδράσεις καταστροφής του όζοντος

Το όζον επιπλέον μπορεί να καταστραφεί μέσω μίας άλλης σειράς χημικών αντιδράσεων (Σχήμα 1.7).

Το όζον κατά τη διάρκεια της νύχτας καταστρέφεται με την βοήθεια της χημικής ένωσης του μονοξειδίου του αζώτου (NO). Τα τελευταία χρόνια, κατά τις πρώτες πρωινές ώρες, παρατηρούνται ορισμένα υπολείμματα όζοντος, τα οποία οφείλονται στην μείωση των εκπομπών του NO που συμβαίνει τα τελευταία έτη. Επομένως, η μείωση των συγκεντρώσεων του NO μπορεί να επιφέρει αύξηση του όζοντος (Yan et al., 2018). Γενικότερα, τα υπολείμματα του όζοντος το πρωί, έχουν βρεθεί ότι είναι ο βασικός παράγοντας ενίσχυσης του όζοντος κατά τη διάρκεια της ημέρας (Lee et al., 2006). Ωστόσο, οι εξαιρετικά αυξημένες τιμές του όζοντος μία ημέρα, μπορούν να επιφέρουν υψηλές συγκεντρώσεις και τις επόμενες ημέρες.

Παράλληλα, η ελεύθερη ρίζα υδροξυλίου (OH) αποτελεί βασική καταβόθρα πολλών θερμοκηπικών αερίων, όπως αυτή του όζοντος. Στην περίπτωση εκείνη που ο αέρας είναι ξηρός, όπως συμβαίνει την περίοδο των θερμών εισβολών, η παραγωγή OH μειώνεται (Σχήμα 1.7). Επομένως, όσο πιο έντονος γίνεται ένας καύσωνας τόσο αυξάνεται η συγκέντρωση του όζοντος.

c)μεταφορά-διάχυση

Ξεκινώντας από τις πολύ μικρές κλίμακες (εκατοστών έως λίγων μέτρων), η διασπορά των ρύπων γίνεται μέσω της τύρβης στο ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα. Η τύρβη μπορεί να είναι είτε μηχανική, δηλαδή λόγω εμποδίων όπως τα βουνά, είτε θερμική λόγω του ότι η γη δεν θερμαίνεται παντού με τον ίδιο τρόπο. Στις μέσες κλίμακες (εκατοντάδων μέτρων έως λίγων χιλιομέτρων) σημαντικό ρόλο στη διάχυση των ρύπων παίζουν οι αύρες όπως η θαλάσσια αύρα στις παραθαλάσσιες περιοχές και η αύρα κοιλάδας. Επιπλέον, το όζον μπορεί να μεταφερθεί σε μία άλλη περιοχή, διαφορετική από αυτή που σχηματίστηκε, με τη βοήθεια των τοπικών ανέμων (Oltmans and Levy II, 1994).

Πηγαίνοντας στη συνοπτική κλίμακα, οι ρύποι μεταφέρονται με τη βοήθεια των μετώπων και των κυκλωνικών και αντικυκλωνικών συστημάτων. Ωστόσο σε καταστάσεις υψηλών πιέσεων (κατά τη διάρκεια καυσώνων), η ατμοσφαιρική διασπορά είναι χαμηλή λόγω της σχετικής στασιμότητας του συστήματος, ενώ ταυτόχρονα υπάρχουν έντονες καταστάσεις ανάμειξης. Οι καλοκαιρινοί αντικυκλώνες είναι πλούσιοι σε όζον καθώς επιπλέον μεταφέρουν προς τα κάτω το όζον της ανώτερης τροπόσφαιρας, το οποίο βρίσκεται σε σημαντικές συγκεντρώσεις στην Ευρώπη το καλοκαίρι (Thouret et al., 2006). Τα αποτελέσματα της ερευνητικής εργασίας των Solberg et al. (2008), που μελέτησαν επιφανειακές παρατηρήσεις και τροχιές του όζοντος, δηλώνουν ότι ο χρόνος παραμονής των πακέτων αέρα στο οριακό στρώμα αυξάνει την παραγωγή όζοντος, ειδικά όταν η τροχιά τους βρίσκεται πάνω από πηγές όζοντος. Παράλληλα, πέραν από το όζον, παγιδεύονται και συσσωρεύονται στην ατμόσφαιρα και πρόδρομες ενώσεις του όζοντος, οι οποίες εμπλουτίζουν τον αντικυκλώνα καθώς περνάει πάνω από τις μολυσμένες περιοχές.

Τέλος, όσον αφορά την παγκόσμια κλίμακα η μεταφορά του όζοντος επιτυγχάνεται από την συμβολή της γενικής κυκλοφορίας. Επιπρόσθετα, η διασυννοριακή μεταφορά των πρόδρομων ενώσεων του όζοντος, έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση του όζοντος σε άλλες περιοχές όπου υπό άλλες συνθήκες δεν θα υπήρχε. Η μεταφορά μεγάλης εμβέλειας είναι πιο σημαντική την περίοδο του Χειμώνα. Σύμφωνα με εργασίες όπως αυτή των Fishman and Crutzen (1978), η μεγάλης εμβέλειας μεταφορά πρόδρομων ουσιών του όζοντος είναι υψηλής σημασίας. Επομένως εξάγεται το συμπέρασμα, ότι οι συγκεντρώσεις του επιφανειακού όζοντος ελέγχονται από τις τοπικές και περιφερειακές εκπομπές (Grewé, 2007), όχι μόνο του όζοντος αλλά και όλων εκείνων των ενώσεων που μπορεί να αντιδράσουν και να παράξουν τελικά όζον.

d) Ξηρή εναπόθεση

Ξηρή εναπόθεση είναι η απευθείας απορρόφηση ενός ρύπου από μία επιφάνεια ή η πρόσληψή του από τα φυτά. Η ξηρή εναπόθεση του όζοντος είναι ένας από τους κύριους παράγοντες από τους οποίους εξαρτώνται οι συγκεντρώσεις του επιφανειακού όζοντος. Αυτή εξαρτάται από την ταχύτητα εναπόθεσης και τις συγκεντρώσεις του αέριου ρυπαντή. Η ταχύτητα εναπόθεσης του όζοντος είναι μεγαλύτερη πάνω από το έδαφος (0,4 cm/s) και μικρότερη πάνω από τη θάλασσα (Seinfeld and Pandis, 1998). Μειωμένη ξηρή εναπόθεση στα φυτά, δηλαδή μικρή ποσοτικά πρόσληψη όζοντος μπορεί να δημιουργηθεί λόγω του κλεισίματος των στομάτων των φυτών. Αυτή η αντίσταση των στομάτων των φυτών συνδέεται στενά με την θερμοκρασία, την υγρασία, το φως του ήλιου και τις συνθήκες ξηρασίας (Embersen et al., 2001 ; Simpson et al., 2007b). Επιπλέον η μείωση της ξηρής εναπόθεσης μπορεί να οφείλεται στις υψηλές θερμοκρασίες και στα ελλείμματα βροχοπτώσεων κατά την περίοδο άνοιξη-καλοκαίρι (Vautard et al., 2005).

e) Κλιματικά μοτίβα μεγάλης κλίμακας

Σύμφωνα με τους Gouldsbrough et al. (2022), οι στατιστικά σημαντικές συσχετίσεις που παρατηρούνται ανάμεσα σε γεωγραφικά απομακρυσμένες περιοχές επηρεάζουν την μεταβολή του όζοντος. Η φάση El Nino της Νότιας Κύμανσης (Southern Oscillation) (ENSO) και η Ατλαντική πολυδεκαδική ταλάντωση (Atlantic Multidecadal Oscillation)³(AMO) παίζουν σημαντικό ρόλο στη χωρική κατανομή του όζοντος. Όσον αφορά τη φάση El Nino του ENSO αυτή ενισχύει τη στρατοσφαιρική κυκλοφορία, ιδιαίτερα την περίοδο του χειμώνα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να αυξάνονται οι ροές από την στρατόσφαιρα προς την τροπόσφαιρα και κατ' επέκταση το τροποσφαιρικό όζον. Αντιθέτως την περίοδο που υπάρχει η φάση La Nina του ENSO, η στρατοσφαιρική κυκλοφορία εξασθενεί και άρα το τροποσφαιρικό όζον είναι κατά βάση μειωμένο, λόγω της μικρότερης συγκέντρωσης στρατοσφαιρικής προέλευσης όζοντος στην τροπόσφαιρα. Τέλος, μία ακόμη ταλάντωση η οποία ωστόσο έχει σχετικά μέτρια επίδραση στην μεταβολή του όζοντος της τροπόσφαιρας είναι αυτή του Βορείου Ατλαντικού (North Atlantic Oscillation) (NAO) (Gouldsbrough et al., 2022).

³ Εμφανίζεται στον Βόρειο Ατλαντικό ωκεανό με περίοδο 60-80 έτη. Βασίζεται στις μέσες θερμοκρασιακές ανωμαλίες της θάλασσας του Βορείου Ατλαντικού (συνήθως 0-80N).

1.9 Μετεωρολογικές συνθήκες από τις οποίες επηρεάζεται το τροποσφαιρικό όζον

Η σχέση μεταξύ των μετεωρολογικών συνθηκών και του όζοντος έχουν προσελκύσει το επιστημονικό ενδιαφέρον (Liu et al., 2015; Reddy and Pfister, 2016). Ισχυρός σχηματισμός όζοντος παρατηρείται κατά τη διάρκεια ημερών με υψηλές θερμοκρασίες, ανέφελο καιρό και χαμηλή ταχύτητα ανέμου. Η ηλιακή ακτινοβολία, η θερμοκρασία και η υγρασία αλλάζουν τον καταμερισμό και την αποτελεσματικότητα των χημικών αντιδράσεων και επομένως ρυθμίζουν τη δημιουργία και την καταστροφή του όζοντος. Επιπλέον, οι υψηλές θερμοκρασίες, οι ασθενείς άνεμοι και οι ελλείψεις βροχοπτώσεων βοηθούν τη βελτιστοποίηση της χημείας των πρόδρομων ενώσεων του όζοντος και την απόδοση της φωτοχημικής παραγωγής όζοντος (Guicherit and Dor, 1977). Σύμφωνα με τα συμπεράσματα των Pu et al. (2017), συγκρίνοντας ημέρες καύσωνα και ημέρες όχι σε περίοδο καύσωνα, όταν υπάρχει υψηλή θερμοκρασία, οι χημικές αντιδράσεις παίζουν τον πιο σημαντικό ρόλο στα επίπεδα του όζοντος κατά τη διάρκεια ενός επεισοδίου καύσωνα.

Επομένως, οι μέγιστες συγκεντρώσεις όζοντος καταγράφονται στην Ευρώπη την περίοδο του καλοκαιριού, λόγω των μετεωρολογικών συνθηκών που επικρατούν. Γενικότερα, οι μετεωρολογικές συνθήκες από τις οποίες επηρεάζεται το τροποσφαιρικό όζον είναι οι εξής:

▪ Θερμοκρασία

Σύμφωνα με τους Dawson et al. (2007), η μετεωρολογική παράμετρος που επηρεάζει περισσότερο τις συγκεντρώσεις του όζοντος είναι η θερμοκρασία. Οι υψηλές θερμοκρασίες ταυτόχρονα επιδρούν στην κατακόρυφη τύρβη και στην οριζόντια μεταφορά (advection), οι οποίες βοηθούν στην απομάκρυνση του όζοντος. Εν τούτοις, οι κλίμακες είναι πολύ μικρότερες συγκριτικά με τη θετική επίδραση που έχει η θερμοκρασία στη δημιουργία όζοντος μέσω των χημικών αντιδράσεων.

Η συγκέντρωση του όζοντος/επιφανειακού όζοντος και η θερμοκρασία/επιφανειακή θερμοκρασία, σύμφωνα με πολλές μελέτες, συσχετίζονται ισχυρά και μάλιστα θετικά (Camalier et al., 2007 ; Bloomer et al., 2009). Ωστόσο, παρόλο που τα μεγάλα ποσά όζοντος συσχετίζονται συχνά με υψηλές θερμοκρασίες, με γραμμικό τρόπο (Im et al., 2011), το αντίστροφο δεν ισχύει πάντα. Κατ' επέκταση η υψηλότερη θερμοκρασία δεν ταυτίζεται πάντα με το μέγιστο όζον, όπως επίσης μία δεδομένη τιμή θερμοκρασίας δεν αντιστοιχεί σε μία συγκεκριμένη τιμή όζοντος. Σύμφωνα με τους Steiner και Finlayson-Pitts (2010), όταν υπάρχουν εξαιρετικά υψηλές θερμοκρασίες παρατηρείται καταστολή του όζοντος (δεν αυξάνεται άλλο) στο επίπεδο του εδάφους, ενώ σύμφωνα με τους Jaén et al. (2021) αυτή η θερμοκρασία προσδιορίζεται στους 39 °C. Σύμφωνα με επιστημονικές έρευνες έχει παρατηρηθεί, ότι η διάρκεια ενός γεγονότος ακραίας θερμότητας, σε ορισμένες περιπτώσεις, συνδέεται με μεγαλύτερα ποσά όζοντος (Krug et al., 2019), συγκριτικά με ένα κύμα καύσωνα μεγαλύτερης έντασης.

Ο σχηματισμός του όζοντος βασίζεται στην ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας, η οποία συνδέεται με τη θερμοκρασία της ατμόσφαιρας. Η αύξηση της θερμοκρασίας επιταχύνει τις χημικές αντιδράσεις στην ατμόσφαιρα, οι οποίες ευθύνονται για την παραγωγή όζοντος (Clark and Karl, 1982 ; Walcek and Yuan, 1999), ενώ επίσης επηρεάζει και την εκπομπή των

πρόδρομων ενώσεων του όζοντος. Η επίδραση αυτή στις πρόδρομες ενώσεις του όζοντος, προκαλεί αύξηση των συγκεντρώσεων του (Krug et al., 2019). Παραδείγματος χάρη, η αύξηση της θερμοκρασίας αυξάνει τις βιογενείς εκπομπές πτητικών οργανικών ενώσεων VOCs (Constable et al., 1999) από την βλάστηση (Nagumi et al., 2009), οι οποίες μάλιστα αποτελούν μεγάλο μέρος των συνολικών συγκεντρώσεων, υπερβαίνοντας σε ορισμένες περιπτώσεις και αυτές που προέρχονται από τον ανθρώπινο παράγοντα (Fuentes et al., 2000). Επιπλέον, η επιφανειακή θερμοκρασία σε συνδυασμό με την ηλιακή ακτινοβολία μπορούν να αυξήσουν τις συγκεντρώσεις του βιογενούς ισοπρενίου. Αυτό συμπέραναν στην επιστημονική τους έρευνα οι Meleux et al. (2007), οι οποίοι μελετώντας το καλοκαιρινό όζον στην περιοχή της Ευρώπης, διαπίστωσαν ότι το ισοπρένιο είναι ο κυριότερος παράγοντας ευαισθησίας του όζοντος. Επομένως, όπως γίνεται αντιληπτό από τα ανωτέρω, στις αστικές περιοχές λόγω του φαινομένου της θερμικής νησίδας αυξάνεται γενικότερα η αστική ρύπανση.

▪ Υψηλή ακτινοβολία

Το όζον είναι κυρίως προϊόν περίπλοκων φωτοχημικών αλυσιδωτών αντιδράσεων. Για να ξεκινήσουν αυτές οι αντιδράσεις είναι απαραίτητη προϋπόθεση η ύπαρξη της ηλιακής ακτινοβολίας. Το ισχυρό ηλιακό φως σε συνδυασμό με τους χαμηλούς ανέμους ευνοούν τη φωτοχημική παραγωγή όζοντος και τη συσσώρευση των πρόδρομων ενώσεων του. Οι περίοδοι υψηλών πιέσεων συνδέονται με απουσία νεφών, το οποίο έχει ως αποτέλεσμα τα ποσά της υπεριώδους ακτινοβολίας να είναι μεγαλύτερα. Στα αστικά περιβάλλοντα οι τιμές του όζοντος αυξάνονται κυρίως λόγω της υψηλής ακτινοβολίας και των ήδη υπαρχόντων ρύπων σε αυτήν, που έχουν προκύψει γενικότερα από το φαινόμενο της θερμικής νησίδας. Τέλος, τα υψηλά ποσά ηλιακής ακτινοβολίας αυξάνουν τη θερμοκρασία, προκαλώντας πολλά ερωτηματικά στην επιστημονική κοινότητα για το ποιος από τους δύο παράγοντες παίζει το σημαντικότερο ρόλο στη δημιουργία όζοντος.

▪ Σχετική υγρασία- Νεφοκάλυψη

Το όζον με τη σχετική υγρασία συσχετίζονται ισχυρά και αρνητικά, δηλαδή μία αύξηση της σχετικής υγρασίας επιφέρει μείωση των συγκεντρώσεων του όζοντος. Μία αλλαγή της σχετικής υγρασίας επηρεάζει την νεφοκάλυψη, η οποία με την σειρά της μεταβάλλει άμεσα την καθαρή προς τα κάτω ηλιακή ακτινοβολία. Όπως έχει ήδη προαναφερθεί, η παρουσία νεφών στην ατμόσφαιρα μειώνει τα ποσά ηλιακής ακτινοβολίας που φτάνουν στο έδαφος, με αποτέλεσμα τη μείωση του όζοντος στην τροπόσφαιρα.

▪ Άνεμος

Η ταχύτητα και η διεύθυνση του ανέμου είναι ακόμη δύο παράγοντες οι οποίοι ελέγχουν το επιφανειακό όζον. Όσον αφορά την κατεύθυνση του ανέμου, αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική καθώς είναι αυτή που παίζει ρόλο στην μεταφορά της ρύπανσης. Σε ορισμένες περιπτώσεις, η μεταφορά του όζοντος έχει σαν αποτέλεσμα να συσσωρεύονται οι υψηλές συγκεντρώσεις του σε ορισμένες περιοχές από τις οποίες είναι δύσκολο να διαφύγει, οδηγώντας σε τοπική υποβάθμιση της ποιότητας του επιφανειακού αέρα. Η χαμηλή ταχύτητα ανέμου περιορίζει τη μεταφορά όζοντος, με επακόλουθο η ατμόσφαιρα να λιμνάζει, γεγονός το οποίο προκαλεί την αύξηση των συγκεντρώσεων του. Σύμφωνα με τα

παραπάνω, μία μεταβολή της κυκλοφορίας του ατμοσφαιρικού αέρα, μπορεί να μεταβάλλει τις συγκεντρώσεις του τροποσφαιρικού όζοντος σε συνοπτική κλίμακα (Davies et al., 1992). Κατά τη θερινή περίοδο, στην περιοχή του Αιγαίου πνέουν οι Ετησίες άνεμοι με βορειοανατολική συνιστώσα στο βόρειο Αιγαίο, βόρεια στο κεντρικό - νότιο Αιγαίο και βορειοδυτική στις νότιες ακτές της Τουρκίας (Kotroni et al., 2001). Αυτοί, εκτός από τη διασπορά των ρύπων σε ορισμένες περιοχές και τη συσσώρευση τους σε άλλες, βοηθούν στην πτώση της επιφανειακής θερμοκρασίας λόγω του χαρακτηριστικού που έχουν να είναι δροσεροί (Melas et al., 1998).

1.10 Επιπτώσεις του Όζοντος

Ατμοσφαιρική ρύπανση είναι η παρουσία χημικών στοιχείων (όπως το όζον) σε ποσότητα, συγκέντρωση ή διάρκεια, που μπορούν να προκαλέσουν αρνητικές επιπτώσεις στην υγεία των ζωντανών οργανισμών και στα οικοσυστήματα, είτε βραχυπρόθεσμα είτε μακροπρόθεσμα.

Το όζον είναι ένα ισχυρό οξειδωτικό μέσο που ρυθμίζει την ικανότητα οξείδωσης της τροπόσφαιρας (Monks, 2005). Ως εκ τούτου, κοντά στην επιφάνεια της γης μπορεί να έχει πολλές αρνητικές επιπτώσεις στη δημόσια υγεία, τα ζώα, τα φυτά αλλά και τα υλικά, όταν ξεπεράσει κάποια όρια. Το κατώφλι ενημέρωσης του κοινού είναι τα 90 ppb, ενώ το όριο του όζοντος που θεωρείται επικίνδυνο είναι τα 120 ppb και άνω. Τα φυτά είναι περισσότερο ευαίσθητα ως προς το όζον. Πιο συγκεκριμένα, κατά τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου, οι συγκεντρώσεις του όζοντος δεν θα πρέπει να ξεπερνούν τα 40 ppb. Πιθανές αυξήσεις στις συγκεντρώσεις του όζοντος στο μέλλον, θα προκαλούσαν αύξηση των δυσμενών επιπτώσεων. Ως δευτερεύον ρύπος, καθίσταται δύσκολο στο να είναι υπό έλεγχο οι τιμές του στο περιβάλλον.

α. Φυτά

Οι αρνητικές επιδράσεις του όζοντος στα φυτά εντοπίστηκαν για πρώτη φορά το 1950, καθιστώντας το τελικά ως τον πιο σημαντικό αγροτικό ατμοσφαιρικό ρύπο (Bhatia et al., 2012). Τα επίπεδα των συγκεντρώσεων του όζοντος που θεωρούνται επιβλαβή για τα φυτά είναι τα 30-40 ppb (Bhatia et al., 2012), δηλαδή συγκεντρώσεις πολύ πιο χαμηλές από εκείνες που αντίστοιχα θεωρούνται επιβλαβείς για τον άνθρωπο. Βέβαια, για την περιοχή της Ανατολικής Μεσογείου φαίνεται ότι τα φυτά είναι περισσότερο ανθεκτικά και άρα το κατώφλι αυτό θα μπορούσε να είναι υψηλότερα. Το όζον είναι ένα πολύ ισχυρό οξειδωτικό, δηλαδή έχει υψηλή οξειδωτική ικανότητα, ενώ ταυτόχρονα παράγει και άλλες τοξικές ουσίες, με αποτέλεσμα να επηρεάζει τα φυτά (Lombardozi et al., 2013). Οι επιδράσεις του όζοντος εξαρτώνται από παράγοντες όπως η συγκέντρωση του όζοντος, ο χρόνος έκθεσης σε αυτό, οι συνθήκες που γενικότερα επικρατούν, αλλά και τα είδη και οι ποικιλίες των καλλιεργειών. Σύμφωνα με τους Mills et al. (2007) το σιτάρι, το καρπούζι, τα όσπρια, το βαμβάκι, το αγγούρι, η ντομάτα, το κρεμμύδι, η σόγια και το μαρούλι είναι οι πιο ευαίσθητες καλλιέργειες στο όζον. Το τροποσφαιρικό όζον επηρεάζει την απόδοση των καλλιεργειών (Tai et al., 2014 ; Chuwah et al., 2015), υποβαθμίζοντας με αυτόν τον τρόπο την ποιότητα των προϊόντων. Επίσης αναστέλλει τη φωτοσύνθεση, την παραγωγικότητα των δασών, αλλά και τη συσσώρευση βιομάζας (Ashmore, 2005 ; Ainsworth et al., 2012 ; Leisner and Ainsworth,

2011 ; Tai et al., 2014). Η προσοδευτική αύξηση του όζοντος αυξάνει το ρυθμό γήρανσης των φύλλων, καθώς επίσης επηρεάζει τη φυλλική επιφάνεια και τον αριθμό των φύλλων, ενώ επιπλέον μειώνει την ανάπτυξη των ριζών, των βλαστών και γενικότερα των φυτών και του ύψους τους. Τέλος το όζον αυξάνει τον τραυματισμό (injury) των φυτών, ρυθμίζει την ωρίμανση της γύρης, καθώς επίσης αλλάζει τις κυτταρικές λειτουργίες, προκαλώντας πρόωρη γήρανση ακόμα και κυτταρικό θάνατο.

Στα φύλλα των φυτών υπάρχουν τα στόματα, τα οποία ανοίγουν ώστε τα φυτά να προσλαμβάνουν την απαραίτητη ποσότητα διοξειδίου του άνθρακα και νερού. Διαμέσου αυτών εισέρχεται και όζον, το οποίο διαχέεται, επηρεάζοντας με τον τρόπο αυτό τις φυσιολογικές διεργασίες των φυτών και επομένως την ανάπτυξη αλλά και την απόδοση τους. Η απορρόφηση του όζοντος από τα φυτά εξαρτάται από τη στοματική αγωγιμότητα, αλλά και τις συγκεντρώσεις του όζοντος στο περιβάλλον. Επομένως το κλείσιμο των στομάτων των φυτών μπορεί να μειώσει τις συγκεντρώσεις του όζοντος στα φυτά. Αυτό θα είχε ως αποτέλεσμα τη μείωση των επιπτώσεων στα φυτά, αλλά την αύξηση των συγκεντρώσεων του στην ατμόσφαιρα. Οι περιβαλλοντικές συνθήκες που συνδέονται με το κλείσιμο των στομάτων είναι η θερμοκρασία, η υγρασία, η ηλιακή ακτινοβολία και οι συνθήκες ξηρασίας. Κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού, λόγω των συνθηκών που επικρατούν, στην περιοχή της Μεσογείου μειώνεται η αγωγιμότητα των στομάτων, ιδιαίτερα κατά τις ώρες του μεσημεριού (Tenhunen et al., 1987). Οι σημαντικές επιπτώσεις του όζοντος στα φυτά, οι οποίες μειώνουν την ποιότητα και την ποσότητα των φρούτων, των σπόρων, των λαχανικών, τελικά επηρεάζει σημαντικά και τον άνθρωπο.

b. Ανθρώπινη υγεία

Το επιφανειακό όζον επιδρά αρνητικά και στην υγεία των ανθρώπων. Μπορεί να προκαλέσει διάφορα αναπνευστικά προβλήματα, όπως είναι το άσμα και η αλλεργική ρινίτιδα (Wang et al., 2017), ενώ τα προβλήματα εντείνονται κατά τη διάρκεια των θερμών εισβολών που επικρατούν ταυτόχρονα ακραίες θερμοκρασίες. Είναι λογικό, ότι ο ηλιόλουστος καιρός ευνοεί την αύξηση των υπαίθριων δραστηριοτήτων και επομένως την αυξημένη παραμονή σε περιβάλλον με υψηλές συγκεντρώσεις όζοντος. Οι αναπνευστικές και οι οφθαλμολογικές παθήσεις είναι οι κυριότεροι κίνδυνοι στη βραχυπρόθεσμη έκθεση σε μεγάλες συγκεντρώσεις όζοντος (Lee et al., 2013 ; Molino and Wright, 1991). Επιπλέον, όταν η έκθεση γίνει χρόνια μπορεί να οδηγήσει σε καρδιαγγειακές παθήσεις αλλά και σε παιδικό άσθμα (Sousa et al., 2013). Οι επιπτώσεις στην υγεία μπορεί να γίνουν τόσο σημαντικές, που ενδέχεται να οδηγήσουν ακόμα και σε θνησιμότητα (Levy and Patz, 2015).

Οι θερμές εισβολές και τα ακραία συμβάντα ρύπανσης συχνά συμβαίνουν το ίδιο χρονικό διάστημα (Schnell et al., 2017). Με τη βοήθεια επιστημονικών μελετών έχει αποδειχθεί, ότι ο συνδυασμός όζοντος και θερμοκρασίας επιδεινώνει τη νοσηρότητα και τη θνησιμότητα (Schnell et al., 2017). Οι κοινωνικές ομάδες οι οποίες είναι περισσότερο ευάλωτες υπό υψηλές θερμοκρασίες και όζον είναι οι ηλικιωμένοι, όσοι πάσχουν από αναπνευστικά και καρδιαγγειακά νοσήματα, τα άτομα χαμηλής κοινωνικοοικονομικής κατάστασης, αλλά και όσοι ζουν σε πυκνοκατοικημένες περιοχές. Γενικότερα, κρίνεται απαραίτητη η διεξαγωγή και άλλων επιστημονικών ερευνών, ώστε να γίνει τελικά διακριτή η προέλευση των επιπτώσεων στην υγεία κατά την περίοδο θερμών εισβολών, που συνυπάρχουν οι υψηλές θερμοκρασίες και το όζον. Αυτός είναι και ένας από τους λόγους που είναι δύσκολη η σχεδίαση δράσεων-παρεμβάσεων, αφού πολλές φορές οι επιπτώσεις

αποδίδονται στις υψηλές θερμοκρασίες και όχι στη φωτοχημική ρύπανση. Στην Ευρώπη, σύμφωνα με το ΕΕΑ (European Environment Agency, 2007), το όζον φαίνεται να είναι υπεύθυνο για 21.400 θανάτους ετησίως. Η Ευρωπαϊκή Ένωση προειδοποιεί για την ποιότητα του αέρα, έχοντας θέσει κάποια σταθερά κατώφλια τα οποία συνεχώς αναδιαπραγματεύονται, ενώ όσον αφορά τη θερμοκρασία κατά τη διάρκεια επεισοδίων ρύπανσης όζοντος δεν έχει τεθεί κάποιο κάτω όριο. Τα τελευταία χρόνια στην Ευρώπη ο πληθυσμός της εκτίθενται σε συγκεντρώσεις όζοντος αλλά και σε άλλους ατμοσφαιρικούς ρύπους, οι οποίοι ξεπερνούν τα όρια που έχουν τεθεί. Στις Ηνωμένες Πολιτείες το 2016 το 90% των υπερβάσεων των ορίων, που αφορούσε την ποιότητα του αέρα, ήταν για το όζον.

Στην Ευρώπη, το κατώφλι για την ενημέρωση του κοινού για τις συγκεντρώσεις του όζοντος στην ατμόσφαιρα είναι στα $180 \mu\text{gr}/\text{m}^3/\text{h}$ (90 ppb) σε επίπεδο επιφάνειας. Το κατώφλι αυτό υπάρχει, ώστε να προειδοποιούνται οι ευαίσθητες κοινωνικές ομάδες ότι μπορεί να έχουν επιπτώσεις στην υγεία τους, ύστερα από μία σύντομη παραμονή σε αυτό. Το όριο συναγερμού έχει τεθεί για την Ευρωπαϊκή Ένωση στα $240 \mu\text{gr}/\text{m}^3$ (120 ppb), κατά τη διάρκεια του οποίου είναι αναγκαία η έκδοση προειδοποιήσεων για την υγεία του γενικού πληθυσμού, ενώ παράλληλα οι τοπικοί φορείς πρέπει να εφαρμόσουν μέτρα για τη μείωση των συγκεντρώσεων. Το όριο αυτό έχει προέλθει ύστερα από τη διεξαγωγή πλήθους επιστημονικών ερευνών, όσον αφορά τη σχέση του όζοντος με τη νοσηρότητα και τη θνησιμότητα κατά τη διάρκεια ακραίων επεισοδίων. Ωστόσο, υπάρχουν πολλές ερευνητικές εργασίες που υπογραμμίζουν ότι σε επεισόδια ρύπανσης μεγαλύτερης διάρκειας τα κατώφλια θα έπρεπε να είναι ακόμα πιο χαμηλά. Ο Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας (ΠΟΥ) το 2005 είχε επισημάνει ότι είναι αναγκαία η αναθεώρηση των κατωφλίων αυτών, μειώνοντας τα από 120 ppb σε 100 ppb για οκτάωρη μέγιστη συγκέντρωση. Παρ' όλα αυτά η κάθε χώρα μπορεί να θέσει τα δικά της όρια. Η Κίνα έχει θέσει τα όρια των συγκεντρώσεων του όζοντος με βάση σε ποια κατηγορία ανήκει η περιοχή στην οποία καταγράφονται. Πιο συγκεκριμένα, για τις αστικές, βιομηχανικές και τις γύρω περιοχές οι τιμές είναι $160 \mu\text{gr}/\text{m}^3/8\text{h}$ ή $200 \mu\text{gr}/\text{m}^3/\text{h}$, ενώ για τις απομακρυσμένες περιοχές είναι $100 \mu\text{gr}/\text{m}^3/8\text{h}$ ή $160 \mu\text{gr}/\text{m}^3/\text{h}$. Κατά τη διάρκεια του καύσωνα το 2003 στη Γαλλία, οι συγκεντρώσεις του όζοντος έφτασαν τις ακραίες τιμές των 200 ppb. Αντίθετα, σε ορισμένες πόλεις της Αμερικής και της Ασίας αυτά τα ακραία ποσά όζοντος είναι ένα κοινότυπο χαρακτηριστικό.

c. Κύκλος του αζώτου (N)

Το άζωτο είναι απαραίτητο για την ανάπτυξη των φυτών. Όταν επικρατούν συνθήκες αυξημένου όζοντος μπορεί να προκληθεί είτε αύξηση είτε μείωση της φυλλικής επιφάνειας, με αυτό να εξαρτάται από το είδος του φυτού, την ποικιλία του, καθώς επίσης από τις συγκεντρώσεις του όζοντος (πόσο αυξήθηκε το όζον). Μείωση της φυλλικής επιφάνειας δύναται να επιφέρει επιπλέον επιπτώσεις. Όταν τα φύλλα ενός φυτού πέφτουν στο έδαφος, αποικοδομούνται από μικροοργανισμούς και κατ' επέκταση παρέχουν μεγάλη ποσότητα θρεπτικών συστατικών στο χώμα, όπως αυτό του αζώτου. Επομένως, μείωση της ποσότητας των φύλλων επιφέρει μείωση του αζώτου στο έδαφος, επηρεάζοντας τον κύκλο του. Αντιστοίχως, η αύξηση της φυλλικής επιφάνειας λόγω της αύξησης του όζοντος ασκεί πάλι επίδραση στον κύκλο του αζώτου, αλλά αυτήν τη φορά με θετικό αντίκτυπο.

d. Κατανομή του άνθρακα (C)

Το όζον επηρεάζει την κατανομή του άνθρακα (C) πάνω και κάτω από το έδαφος. Προκαλεί μία σειρά διεργασιών στα φύλλα, η οποία δημιουργεί αύξηση της ζήτησης του άνθρακα και μείωση της κατανομής του κάτω από το έδαφος. Όσον αφορά την υπόγεια κατανομή του, το όζον μεταβάλλει την κατανομή C στις ρίζες των φυτών. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, τη μείωση του ρυθμού αναπνοής της ρίζας και του εδάφους, ενώ ταυτόχρονα μειώνεται η ανάπτυξη της ρίζας.

1.11 Δράσεις μείωσης του όζοντος

Έχει δημιουργηθεί μία Έκθεση Αξιολόγησης Τροποσφαιρικού Όζοντος (TOAR) από το International Global Atmospheric Chemistry Project (IGAC), που έχει ως στόχο τη δημιουργία δεδομένων από αστικές τοποθεσίες και μη, που είναι εύκολα προσβάσιμες. Με τον τρόπο αυτό γίνεται μία παγκόσμια αξιολόγηση του τροποσφαιρικού όζοντος.

- Οι κυβερνητικοί και οι μη κυβερνητικοί οργανισμοί είναι αναγκαίο να συνεργαστούν για την προστασία της υγείας των πολιτών, ιδιαίτερα των ευάλωτων ομάδων, κατά τη διάρκεια των επεισοδίων του όζοντος. Γι' αυτό είναι επιτακτική η ανάγκη δημιουργίας ειδικών δεικτών θνησιμότητας, που θα λαμβάνουν υπ' όψιν τη νοσηρότητα σε σχεδόν πραγματικό χρόνο. Με τον τρόπο αυτό θα είναι περισσότερο αποτελεσματική η έγκαιρη προειδοποίηση του κοινού, όπως συνέβη στην Γαλλία (Josseran et al., 2010).
- Μία μείωση των ανθρωπογενών εκπομπών των πρόδρομων ουσιών του όζοντος (οξείδια του αζώτου NO_x όπως το μονοξείδιο του άνθρακα, μεθάνιο, VOCs) μπορεί να επιφέρουν μείωση των συγκεντρώσεων του όζοντος στην επιφάνεια του εδάφους γενικότερα, αλλά και κατά τη διάρκεια της θερινής περιόδου. Αυτό φαίνεται να υποστηρίζεται από τους Wu et al. (2008) και Val Martin et al. (2015), οι οποίοι έχουν πραγματοποιήσει μελέτες με μελλοντικά σενάρια. Ο έλεγχος των πρόδρομων ουσιών φαίνεται να είναι μία πολλά υποσχόμενη στρατηγική, καθώς το όζον ως δευτερεύον ρύπος είναι δύσκολο να ελεγχθεί. Επομένως είναι απαραίτητος, για παράδειγμα, ο περιορισμός της ανεξέλεγκτης χρήσης των ορυκτών καυσίμων, ώστε να μειωθούν τα NO_x και οι πτητικές οργανικές ενώσεις (VOCs). Η μείωση των συγκεντρώσεων του NO_x θα επιφέρει σημαντική βελτίωση στην ποιότητα του αέρα όσον αφορά το όζον, αλλά κάτι τέτοιο μπορεί να μην αρκεί για την τήρηση των παγκόσμιων κατωφλίων. Τέτοιες προσπάθειες για τη βελτίωση, κατ' επέκταση της ποιότητας του αέρα μέσω της μείωσης του όζοντος, έχει εφαρμοστεί πιο πολύ στην Ευρώπη και τη Βόρεια Αμερική. Παρ' όλα αυτά, μελέτες δείχνουν ότι όσο και να μειωθούν οι ανθρωπογενείς εκπομπές πρόδρομων ενώσεων του όζοντος στην Ελλάδα, δεν θα επιφέρουν μία σημαντική μείωση στις συγκεντρώσεις του όζοντος. Γι' αυτό τον λόγο είναι απαραίτητη η μείωση τους σε διακρατική και Ευρωπαϊκή κλίμακα, δεδομένου ότι τα μεγαλύτερα ποσοστά όζοντος που καταγράφονται στην Ελλάδα έχουν προέλευση την Ηπειρωτική Ευρώπη.

Προτάσεις:

1. Για να μειωθεί η παραγωγή όζοντος για τις επόμενες λίγες ημέρες, πρέπει να στοχευθεί η μείωση των πρόδρομων ενώσεων του, που είναι πολύ ή μετρίως δραστικές. Πολλές από αυτές είναι υδρογονάνθρακες (C_xH_y) και άρα είναι αναγκαία η μείωση της κυκλοφορίας των αυτοκινήτων. Σύμφωνα με τα παραπάνω θα πρέπει να προτιμάται η χρήση μέσων μαζικής μεταφοράς (MMM), το περπάτημα και όπου είναι δυνατόν το ποδήλατο, έναντι των αυτοκινήτων. Ωστόσο για να μπορέσει κάτι τέτοιο να πραγματοποιηθεί με επιτυχία, θα πρέπει η πολιτεία να έχει κάνει έναν σωστό σχεδιασμό των δρομολόγιων των MMM και της συχνότητάς τους. Κάτι τέτοιο είναι ιδιαίτερα σημαντικό αν αναλογιστούμε ότι τα αυξημένα ποσοστά συγκεντρώσεων όζοντος καταγράφονται κατά τους θερινούς μήνες και ιδιαίτερα κατά τη διάρκεια των κυμάτων καύσωνα.
2. Πολλές εργασίες, ιδιαίτερα την περίοδο του καλοκαιριού, θα πρέπει να γίνονται κατά τις ώρες της νύχτας π.χ. ανεφοδιασμός αυτοκινήτου, κούρεμα γκαζόν κ.λπ. Συνεπώς, θα είναι πιο δύσκολη η μετατροπή των ρύπων, που εκπέμπονται, σε όζον, αφού εκείνες τις ώρες δεν υπάρχει ηλιακή ακτινοβολία που βοηθάει στην πραγματοποίηση των αντίστοιχων χημικών αντιδράσεων.
3. Γενικά, είναι απαραίτητος ένας καλύτερος πολεοδομικός σχεδιασμός. Οι στενοί δρόμοι εμποδίζουν τη διάχυση των ρύπων, με συνέπεια τη σημαντική αύξηση των συγκεντρώσεων του όζοντος σε ορισμένες γειτονιές. Επιπρόσθετα, τα κτήρια θα πρέπει να γίνουν ενεργειακά αποδοτικά προσθέτοντας φωτοβολταϊκά, μονώνοντας το κτίσμα και γενικότερα μετατρέποντας τα σε ενεργειακά αυτόνομα κτίρια. Γνωρίζοντας ότι το μεγαλύτερο μέρος της ενέργειας που δαπανάται σε μία πόλη γίνεται από τα κτίρια, αναβαθμίζοντάς τα ενεργειακά, θα μειωνόταν η κατανάλωση ορυκτών καυσίμων και άρα η εκπομπή πρόδρομων ενώσεων του όζοντος. Γενικότερα, η παραγωγή ηλιακής ενέργειας πχ σε στέγες θα ελαχιστοποιούσε τη χρήση ορυκτών καυσίμων και άρα τις εκπομπές ρύπων από αυτά, ακόμα και κατά τη μεταφορά τους.
4. Τέλος, μπορούν να γίνουν αρκετές δράσεις οι οποίες θα βοηθήσουν τη μείωση του μεθανίου (πρόδρομη ένωση του όζοντος) στην ατμόσφαιρα. Αρχικά, είναι απαραίτητη η εύρεση τρόπου διαχείρισης των εκπομπών μεθανίου από τα ζώα. Επομένως θα πρέπει να γίνει βελτίωση της διαχείρισης της κοπριάς των ζώων, αλλά και των ζωοτροφών. Με αυτόν τον τρόπο θα βελτιωθεί η υγεία και η κτηνοτροφία των ζώων. Παράλληλα, θα πρέπει να γίνει διαχείριση των αποβλήτων σε τοποθεσίες απομακρυσμένες από τον γενικό πληθυσμό, ώστε να μην υπάρχουν πιθανές επιπτώσεις στην υγεία του. Τα αστικά απόβλητα όλων των περιοχών, θα πρέπει να μετατρέπονται σε κομπόστ ή βιοενέργεια και γενικότερα να γίνεται η επεξεργασία τους σε αναβαθμισμένες εγκαταστάσεις, μηδενίζοντας με τον τρόπο αυτό εκπομπές ανθυγιεινών αερίων. Σε αντίστοιχες επεξεργασίες θα πρέπει να υπόκεινται γενικότερα όλα τα απόβλητα, όπως παραδείγματος χάρη από την βιομηχανία τροφίμων. Τέλος τα ορυκτά καύσιμα είναι και αυτά υπεύθυνα για εκπομπές μεθανίου. Η χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας θα ήταν ιδανική σε σύγκριση με τη χρήση πετρελαίου, φυσικού αερίου ή άλλων ορυκτών καυσίμων. Ακόμη όμως και μία μείωση των διαρροών από αγωγούς μεταφοράς ή η μείωση των αποστάσεων, όπου μεταφέρονται αυτά, θα ήταν ιδιαίτερα σημαντική.

Οι τρόποι δράσεις, που αναφέρονται παραπάνω, έχουν να κάνουν με δράσεις μείωσης του όζοντος σε τοπική κλίμακα κατά τη διάρκεια ακραίων θερμών καιρικών συνθηκών (για λίγες ημέρες), αλλά και δράσεις που θα οδηγήσουν μακροπρόθεσμα σε μικρότερες συγκεντρώσεις όζοντος στην τροπόσφαιρα. Άρα είναι αναγκαίο να διευκρινιστεί, ότι για την μείωση του όζοντος σε παγκόσμια κλίμακα, οι πολιτικές μετριασμού παύουν να ασχολούνται με τις ενώσεις που είναι πολύ ή μετρίως δραστικές (πολλοί υδρογονάνθρακες), αλλά ασχολούνται πλέον με ενώσεις που οι χρονικές κλίμακες που γίνονται οι αντιδράσεις τους είναι μεγάλες, όπως είναι για παράδειγμα το μονοξείδιο του άνθρακα (CO) και το μεθάνιο (CH₄) (Πίνακας 1.4).

1.12 Τα θετικά του όζοντος

Το όζον, όπως προαναφέρθηκε, χωρίζεται σε «καλό» και «κακό» όζον, δηλαδή σε στρατοσφαιρικό και τροποσφαιρικό όζον αντίστοιχα. Παρ' όλο που σε υψηλές συγκεντρώσεις το όζον μπορεί να είναι θανατηφόρο για τον άνθρωπο, σε χαμηλές συγκεντρώσεις δεν θεωρείται επικίνδυνο αέριο. Το όζον σε μικρές ποσότητες, της τάξης των 1,5 ppm, έχει ισχυρές αντιμικροβιακές ιδιότητες και τα τελευταία χρόνια όλο και αυξάνεται το ενδιαφέρον για τη χρήση του. Για τον λόγο αυτό, το όζον χρησιμοποιείται ευρέως για την απολύμανση του νερού (Nickols and Varas, 1992). Απολυμαίνει από ιούς, βακτήρια και μύκητες, μειώνοντας ταυτόχρονα τα υπολείμματα των φυτοφαρμάκων που μπορεί να υπάρχουν σε αυτό (Nickols and Varas, 1992). Με τον τρόπο αυτό το νερό μπορεί να ανακυκλωθεί και να επαναχρησιμοποιηθεί ή ακόμα και να γίνει χρήση νερού το οποίο ήταν προηγουμένως κακής ποιότητας. Ένα αξιοσημείωτο πλεονέκτημα του όζοντος, έναντι των υπολοίπων απολυμαντικών, είναι ότι αποσυντίθενται γρήγορα χωρίς να αφήνει κατάλοιπα.

Επιπρόσθετα, η συμβολή του όζοντος στη γεωργία και την επεξεργασία τροφίμων κατέστη ιδιαίτερα σημαντική από το 1997 (EPRI Expert Panel 1997). Το όζον θεωρείται ασφαλές και υγιεινό προς τα τρόφιμα (χαρακτηρίστηκε ως Generally Recognized as Safe το 1997). Στην αρχή το όζον εγκρίθηκε για τη χρήση του σε κρέατα και βιολογικά προϊόντα. Εν συνεχεία διαπιστώθηκε ότι ελέγχει στα φυτά ασθένειες που μπορεί να εμφανιστούν και επιβραδύνει το ρυθμό αύξησης των πιθανών μολυσμένων περιοχών, χωρίς ωστόσο να μειώνει τις υπάρχοντες μολύνσεις. Για το λόγο αυτό το όζον χρησιμοποιείται είτε για το πλύσιμο είτε κατά την αποθήκευση των φρούτων και λαχανικών (Spalding, 1968), καθώς επίσης δεν υπάρχει θέμα διαχείρισης των αποβλήτων πλύσης. Η χρήση του όζοντος στην επεξεργασία των τροφίμων έχει εγκριθεί σε πολλές χώρες, συμπεριλαμβανομένων των ΗΠΑ, της Ιαπωνίας, της Αυστραλίας, της Γαλλίας και του Καναδά.

1.13 Σκοπός της εργασίας

Το κλίμα της Ελλάδας είναι τυπικά Μεσογειακό, δηλαδή επικρατούν ήπιοι και υγροί χειμώνες και σχετικά θερμά και ξηρά καλοκαίρια. Η θερμότερη περίοδος είναι το τελευταίο δεκαήμερο του Ιουλίου και το πρώτο του Αυγούστου (ΕΜΥ, 2021), όπου η μέγιστη θερμοκρασία κυμαίνεται από 29 °C μέχρι 35 °C. Το 2021 η Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία (ΕΜΥ) στις 26/7 εξέδωσε έκτακτο δελτίο επικίνδυνων θερμών καιρικών συνθηκών, με τη χώρα να μπαίνει σε πορτοκαλί επίπεδο την επόμενη ημέρα.

Η 28^η Ιουλίου του 2021 ήταν η ημέρα έναρξης (κόκκινο επίπεδο) του εντονότερου ($T_{max}=44.9$ °C) και του μεγαλύτερου σε διάρκεια καύσωνα, που είχε καταγραφεί ως τότε στην περιοχή της Ελλάδας. Είχε διάρκεια 9 ημέρες με την ημερομηνία ολοκλήρωσης του να καταγράφεται στις 5 Αυγούστου του 2021, σύμφωνα με την ΕΜΥ, με αυτόν να είναι ο δεύτερος σε σειρά καύσωνας που εκτυλίχθηκε το καλοκαίρι του 2021 στην Ελλάδα. Κατά τη διάρκεια του, παρατηρήθηκαν πολλές πυρκαγιές. Κάηκαν 130.000 στρέμματα, με αυτά να αποτελούν το τριπλάσιο της μέσης ετήσιας καμένης έκτασης 2008-2020 της χώρας, με το 70 % να σημειώνεται στις ημέρες 3-4 Αυγούστου. Οι δυσμενείς επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία που πιθανότατα υπήρξαν, λόγω των ακραίων συνθηκών που επικρατούσαν, δεν αναφέρονται επισήμως εξαιτίας της ταυτόχρονης ύπαρξης του Κορονοϊού. Γενικότερα, στην ευρύτερη περιοχή της Ευρώπης, το καλοκαίρι του 2021 ήταν το θερμότερο που είχε καταγραφεί ως τότε, βρισκόμενο με 1 °C πάνω από το μέσο όρο για την περίοδο αναφοράς 1991-2020 (Copernicus, 2021).

Ένας από τους κύριους σκοπούς της εργασίας είναι η αξιολόγηση, κατά την περίοδο του καύσωνα του 28/7/2021 - 5/8/2021 στην Ελλάδα, των δεδομένων πρόγνωσης του επιφανειακού όζοντος από το παγκόσμιο μοντέλο CAMS καθώς και από το περιοχικό μοντέλο CAMS. Μέσω της αξιολόγησης αυτής, η οποία θα γίνει σε δύο στάδια, θα αναδειχθεί ποιο από τα δύο μοντέλα ήταν πιο κοντά στην πραγματικότητα δηλαδή στα δεδομένα επανάλυσης (α' φάση) και σε παρατηρήσεις από επίγειους σταθμούς μέτρησης ατμοσφαιρικής ρύπανσης (β' φάση). Πριν την πραγματοποίηση της κατάλληλης μεθοδολογίας για την επίτευξη του στόχου αυτού, γίνεται ανάλυση των συνοπτικών συνθηκών που επικράτησαν στην ευρύτερη περιοχή κατά τη διάρκεια της θερμής εισβολής, ενώ στη συνέχεια γίνεται επισκόπηση του ατμοσφαιρικού ρύπου του όζοντος, για να φανεί σε τι βαθμό επέδρασαν οι μετεωρολογικές συνθήκες σε αυτόν. Η επισκόπηση του όζοντος γίνεται αρχικά μέσω δεδομένων από μοντέλα και στη συνέχεια από επίγειες παρατηρήσεις. Περισσότερες λεπτομέρειες περιγράφονται στο κεφάλαιο 2.

Κεφάλαιο 2 – Δεδομένα και Μεθοδολογία

2.1 Copernicus: δεδομένα επανάλυσης και πρόγνωσης

Η Ευρωπαϊκή Ένωση δημιούργησε ένα πρόγραμμα, για την προστασία των πολιτών της, το οποίο παρατηρεί τη Γη και το περιβάλλον της. Αυτό το πρόγραμμα το ονόμασε Copernicus, ενώ παλαιότερα ήταν γνωστό ως GMES (Παγκόσμια Παρακολούθηση του Περιβάλλοντος και της Ασφάλειας). Οι πληροφορίες εξάγονται από δορυφορικές και επίγειες παρατηρήσεις όπως: επίγειους σταθμούς, αερομεταφορές και θαλάσσιες μεταφορές. Το πρόγραμμα υλοποιείται σε συνεργασία με τα κράτη μέλη, τον Ευρωπαϊκό Οργανισμό Διαστήματος (ESA), τον Ευρωπαϊκό Οργανισμό Εκμετάλλευσης Μετεωρολογικών Δορυφόρων (EUMETSAT), το Ευρωπαϊκό Κέντρο Μεσοπρόθεσμων Μετεωρολογικών Προγνώσεων (ECMWF), τους οργανισμούς της ΕΕ και την εταιρεία Mercator Océan. Οι χρήστες μπορούν να το χρησιμοποιήσουν για ευρύ φάσμα εφαρμογών σε διάφορους τομείς, όπως η γεωργία και η υγεία (Copernicus, 2023). Για τον σκοπό αυτό, στην ιστοσελίδα του Copernicus υπάρχουν διάφορα είδη δεδομένων όπως επανάλυσης (reanalysis), πρόγνωσης (forecast) και κλιματολογικά (climate projections).

Τα δεδομένα reanalysis είναι δεδομένα αριθμητικών μοντέλων, στα οποία έχει γίνει αφομοίωση δεδομένων (data assimilation) από παρατηρήσεις. Με αυτόν τον τρόπο τα δεδομένα του αριθμητικού μοντέλου διορθώνονται. Ωστόσο, υπάρχει η δυνατότητα περαιτέρω βελτιστοποίησης των δεδομένων, αφού η συλλογή των παρατηρήσεων συνεχίζεται και μετά την έκδοσή τους, δίνοντας τη δυνατότητα μελλοντικά για λήψη βελτιωμένων εκδόσεων τους, προς όφελος τελικά της ποιότητας τους (Copernicus, 2023). Όσον αφορά τα μοντέλα, είναι ένας αλγόριθμος που βασίζεται σε μαθηματικές σχέσεις, οι οποίες αντιπροσωπεύουν τις φυσικές ή και χημικές διεργασίες που συμβαίνουν στην ατμόσφαιρα. Δεδομένα επανάλυσης που διατίθενται από το Copernicus προς το κοινό είναι τα ERA5 και τα CAMS reanalysis.

Τα αριθμητικά μοντέλα χρησιμοποιούνται επίσης για την πρόγνωση της κίνησης του ατμοσφαιρικού αέρα και άρα της πρόγνωσης παραγόντων, όπως είναι η θερμοκρασία, η υγρασία και οι ρύποι. Για τη δημιουργία της επόμενης πρόγνωσης, εισάγονται δεδομένα από την προηγούμενη πρόγνωση του μοντέλου και από παρατηρήσεις (π.χ. δορυφορικές), τα οποία συνδυάζονται μέσω της αφομοίωσης δεδομένων. Η προγνωστική ικανότητα βελτιώθηκε, ύστερα από την ενδυνάμωση των υπολογιστών αλλά και την εισροή δορυφορικών δεδομένων πέρα από των επίγειων. Η πρώτη πρόγνωση καιρού 48- ωρών πραγματοποιήθηκε το 1949 από τους Jules Charney, R. Fjortoft και John von Neumann. Τα αριθμητικά μοντέλα αφορούν την πρόγνωση για τις επόμενες λίγες ημέρες (έως 8). Παραδείγματος χάρη, τα δεδομένα πρόγνωσης που προσφέρει το πρόγραμμα Copernicus για τους ρύπους της ατμόσφαιρας είναι τα CAMS forecast.

Ωστόσο, υπάρχουν και τα κλιματικά μοντέλα, από τα οποία φανερώνεται η τάση αύξησης ή μείωσης των μετεωρολογικών και χημικών παραγόντων τα επόμενα χρόνια (π.χ. 100).

2.2 Περιγραφή και διαμόρφωση μοντέλων

2.2.1 ERA5

Τα ERA5 είναι δεδομένα επανάλυσης (reanalysis) πέμπτης γενιάς του Ευρωπαϊκού Κέντρου Μεσοπρόθεσμων Προγνώσεων Καιρού (ECMWF), τα οποία αφορούν τα έτη 1940 μέχρι σήμερα. Πριν τη δημιουργία των ERA5 υπήρχαν τα δεδομένα reanalysis ERA-Interim, των οποίων η παραγωγή τους σταμάτησε τον Αύγουστο του 2019. Τα ERA5 παράγονται χρησιμοποιώντας αφομοίωση δεδομένων 4D-Var (4D-Variational Data Assimilation = 4D-αφομοίωση δεδομένων) με βάση τους νόμους της φυσικής. Τα δεδομένα είναι τύπου πλέγματος και έχουν παγκόσμια οριζόντια κάλυψη με ανάλυση $0,25^\circ \times 0,25^\circ$. Το κοινό μπορεί να λάβει ωριαία δεδομένα που αφορούν ένα μόνο επίπεδο (single levels) ή διάφορα ισοβαρικά επίπεδα (1000 hPa έως 1 hPa) (pressure levels) (κάθετη κάλυψη). Η κατακόρυφη ανάλυση των δεδομένων στα pressure levels είναι 37 επίπεδα πίεσης. Τα ωριαία ERA5 ενημερώνονται καθημερινά με καθυστέρηση περίπου πέντε ημερών, με μία πρώιμη κυκλοφορία η οποία ονομάζεται ERA5T, με την τελική έκδοση των ERA5 να έρχεται 2-3 μήνες αργότερα.

Ωστόσο, εκτός των ωριαίων δεδομένων, διατίθενται και μηνιαία δεδομένα για τα έτη 1940 έως σήμερα. Γενικότερα, τα μηνιαία δεδομένα που προσφέρει το Copernicus προκύπτουν από τα ωριαία. Επομένως, τα μηνιαία δεδομένα συνεχίζουν να διαθέτουν τα χαρακτηριστικά των ωριαίων, ως προς την οριζόντια και κατακόρυφη ανάλυση αλλά και την κατακόρυφη και οριζόντια κάλυψη. Όσον αφορά τα μηνιαία ERA5 δεδομένα, η συχνότητα ενημέρωσης τους είναι μηνιαία.

2.2.2 CAMS reanalysis

Το Copernicus πραγματεύεται 6 θεματικές ενότητες, με μία από αυτές να είναι η υπηρεσία παρακολούθησης Copernicus (CAMS), η οποία υλοποιείται από το Ευρωπαϊκό Κέντρο Μεσοπρόθεσμων Προγνώσεων Καιρού (ECMWF). Το CAMS προσφέρει επανάλυσης (reanalysis) και προγνωστικά (forecast) δεδομένα, στην Ευρώπη (regional) και σε παγκόσμια (global) κλίμακα.

Τα επανάλυσης δεδομένα CAMS (ECMWF Atmospheric Composition Reanalysis: EAC4), είναι η τέταρτη γενιά παγκόσμιας ανάλυσης της ατμοσφαιρικής σύνθεσης του ECMWF. Το CAMS reanalysis είναι το πιο πρόσφατο σύνολο δεδομένων παγκόσμιας επανάλυσης της ατμοσφαιρικής σύνθεσης (AC), που παράγεται από την CAMS (Copernicus Atmosphere Monitoring Service) και αποτελείται από 3-διάστατα χρονικά συνεπή πεδία AC, συμπεριλαμβανομένων αερολυμάτων, χημικών ειδών και αερίων του θερμοκηπίου. Τα reanalysis CAMS δεδομένα είναι διαθέσιμα μόνο από το έτος 2003 και μετά, το οποίο έχει να κάνει με τα αραιά δίκτυα που υπήρχαν πριν το 2003. Επομένως, για να μην υπάρξουν λιγότερο ακριβείς εκτιμήσεις από το σύστημα αφομοίωσης, λόγω των ελλείψεων που υπάρχουν στα δεδομένα, τα CAMS reanalysis διατίθενται από τη χρονιά του 2003 και έπειτα δηλαδή έως το Δεκέμβριο του 2022. Η μέθοδος αφομοίωσης που χρησιμοποιείται είναι η 4D-Var, η οποία είναι η ίδια με των ERA5. Το reanalysis, με τη μέθοδο αυτή, συνδυάζει δεδομένα μοντέλων με παρατηρήσεις από όλο τον κόσμο, χρησιμοποιώντας ένα μοντέλο της ατμόσφαιρας που βασίζεται στους νόμους της φυσικής και της χημείας. Οι παράμετροι που διατίθενται είναι μετεωρολογικές, χημικά είδη, αερολύματα, ενώ τα αέρια του θερμοκηπίου

βρίσκονται σε διαφορετική βάση δεδομένων (EGG4). Τα δεδομένα είναι τύπου πλέγματος και έχουν παγκόσμια οριζόντια κάλυψη με ανάλυση $0,75^\circ \times 0,75^\circ$. Το κοινό μπορεί να λάβει δεδομένα με χρονικό βήμα τις τρεις ώρες (0,3,6,9,12,15,18 και 21 UTC). Επιπλέον, υπάρχουν δεδομένα τα οποία αφορούν ένα μόνο επίπεδο (single levels) και δεδομένα τα οποία μπορούν να επιλεγούν, είτε με βάση το επίπεδο της πίεσης είτε με βάση του επίπεδο του μοντέλου (σίγμα). Όσον αφορά τα επίπεδα του μοντέλου αυτά είναι 60 (1 έως 60), με το 60 να αφορά το επίπεδο της επιφάνειας. Όσον αφορά τα επίπεδα πίεσης αυτά είναι 25 από τα 1000 έως τα 1 hPa. Τα ημερήσια CAMS ενημερώνονται δύο φορές το χρόνο με καθυστέρηση περίπου 4-6 μήνες.

Επιπρόσθετα, μέσω των δεδομένων EAC4 εξάγονται και τα μηνιαία δεδομένα, τα οποία προφανώς έχουν τα ίδια χαρακτηριστικά. Η μοναδική διαφορά έγκειται στο γεγονός ότι τα μηνιαία δεδομένα διατίθενται, όσον αφορά το επίπεδο του μοντέλου, μόνο στο χαμηλότερο δηλαδή στο 60.

2.2.3 CAMS forecast

Εκτός των επαναλύσεων, το CAMS διαθέτει και προγνώσεις (forecast) ρύπων, αερολυμάτων και αερίων του θερμοκηπίου. Το CAMS είναι ένα μοντέλο της ατμόσφαιρας που βασίζεται στους νόμους της φυσικής και της χημείας. Οι προγνώσεις που διαθέτει το Copernicus είναι σε παγκόσμια (global) αλλά και σε Ευρωπαϊκή (περιοχική) κλίμακα (regional).

Global forecast CAMS

Όσον αφορά το παγκόσμιο μοντέλο αυτό παρέχει δεδομένα πρόγνωσης από το 2015 έως σήμερα. Οι προγνώσεις παράγονται κάθε 00 UTC και 12 UTC (δύο φορές την ημέρα) και έχουν χρονική επίλυση ανά μία ώρα για τα single levels και ανά τρεις ώρες για τις παραμέτρους που εντοπίζονται σε πολλαπλά επίπεδα. Αυτές οι προγνώσεις γίνονται για τις επόμενες 5 ημέρες και αφορούν 50 χημικά είδη όπως το όζον, 7 τύπους αερολυμάτων και αρκετές μετεωρολογικές μεταβλητές. Οι αρχικές συνθήκες της πρόγνωσης προκύπτουν συνδυάζοντας μια προηγούμενη πρόγνωση με δορυφορικές παρατηρήσεις του οπτικού βάθους αερολύματος, του όζοντος (O_3), του μονοξειδίου του άνθρακα (CO), του διοξειδίου του αζώτου (NO_2) και του διοξειδίου του θείου (SO_2) καθώς και εκτιμήσεις με βάση παρατηρήσεις επιφανείας μέσω της διαδικασίας αφομοίωσης δεδομένων 4D - VAR. Το παγκόσμιο μοντέλο πρόγνωσης CAMS αναβαθμίζεται μία φορά το χρόνο με τεχνικές και επιστημονικές αλλαγές. Τα δεδομένα είναι τύπου πλέγματος και έχουν παγκόσμια οριζόντια κάλυψη με ανάλυση $0,4^\circ \times 0,4^\circ$. Το κοινό μπορεί να λάβει δεδομένα στα πολλαπλά επίπεδα, είτε με βάση το επίπεδο της πίεσης είτε με βάση το επίπεδο του μοντέλου (σίγμα). Όσον αφορά τα επίπεδα πίεσης αυτά είναι 25 από τα 1000 έως το 1 hPa. Όσον αφορά τα επίπεδα του μοντέλου αυτά ήταν 60, ενώ στις 00 UTC της 7^{ης} Ιουλίου του 2019 αυξήθηκαν σε 137. Οι τιμές επιφανείας αντιστοιχούν πάντα στο υψηλότερο επίπεδο του μοντέλου που προσφέρεται. Αυτή είναι η αιτία που τα πεδία σε επίπεδο μοντέλου πάνω από την επιφάνεια της γης δεν είναι συγκρίσιμα μεταξύ προγνώσεων σε διαφορετικές κατακόρυφες αναλύσεις.

Regional forecast CAMS

Εκτός από το παγκόσμιο μοντέλο πρόγνωσης CAMS, υπάρχουν και τα περιοχικά (regional) μοντέλα πρόγνωσης (Πίνακας 2.1) που αφορούν την Ευρώπη (25° Δ, 45° Α, 30° Ν, 72° Β), τα οποία τροφοδοτούνται με οριακές συνθήκες από το παγκόσμιο (μέθοδος δυναμικού υποβιβασμού: dynamically downscaled). Τα περιοχικά μοντέλα παρέχουν δεδομένα τύπου πλέγματος ανά μία ώρα με υψηλή χωρική ανάλυση 0,1° x 0,1° στην επιφάνεια αλλά και σε άλλα ύψη. Η πρόγνωση γίνεται σε βάθος μέχρι τεσσάρων ημερών για αερολύματα, ατμοσφαιρικούς ρύπους και αέρια του θερμοκηπίου. Στο regional CAMS forecast model υπάρχει η δυνατότητα λήψης δεδομένων, τα οποία προκύπτουν ως μία μέση τιμή (Marecal et al., 2015) από 9 διακριτά μοντέλα (Πίνακας 2.1), με αυτά να ονομάζονται Ensemble median. Πιο συγκεκριμένα, η μέθοδος του μοντέλου που εξάγει τα Ensemble median δεδομένα, είναι ότι για κάθε τιμή πλέγματος η τιμή αντιστοιχεί στη διάμεσο των 9 διαφορετικών τιμών των μοντέλων. Τα συγκεκριμένα δεδομένα θεωρούνται ότι είναι στατιστικά σημαντικά και καλύτερης ποιότητας από τα μεμονωμένα δεδομένα των μοντέλων, γι' αυτό πολλές φορές και προτιμώνται. Τα εννέα μεμονωμένα μοντέλα έχουν διαφορετικά εγγενή χωρικά πλέγματα.

Σε αντιδιαστολή με το global forecast CAMS, στο regional forecast CAMS οι αρχικές συνθήκες της πρόγνωσης προκύπτουν συνδυάζοντας μια προηγούμενη πρόγνωση με τις επίγειες μετρήσεις από δίκτυα σταθμών παρακολούθησης της ατμοσφαιρικής ρύπανσης. Επιπλέον, η μέθοδος της αφομοίωσης δεδομένων για την ενσωμάτωση των δεδομένων παρατήρησης είναι διαφορετική για κάθε ένα από 9 μοντέλα απ' τα οποία υπολογίζεται το τελικό προϊόν (ensemble).

Πίνακας 2.1: Τα περιοχικά μοντέλα τα οποία συμβάλουν στο Ensemble median

Model names	Institutes
CHIMERE	INERIS (France)
DEHM	AARHUS UNIVERSITY (Denmark)
EMEP	MET Norway (Norway)
EURAD-IM	FZJ-IEK8 (Germany)
GEM-AQ	IEP-NRI (Poland)
LOTOS-EUROS	KNMI, TNO (The Netherlands)
MATCH	SMHI (Sweden)
MOCAGE	Meteo-France (France)
SILAM	FMI (Finland)

Η ημερήσια πρόγνωση εκτελείται στις 00 UTC κάθε ημέρα, με χρονική ανάλυση μίας ώρας και περίοδο προγνώσεων 0h έως το βήμα 96h (4 ημέρες). Τα δεδομένα διατίθενται για επτά επίπεδα ύψους (level), από τα 0 μέτρα δηλαδή την επιφάνεια έως τα 5000μέτρα από την επιφάνεια. Ωστόσο, πρέπει να διευκρινιστεί ότι ορισμένοι από τους ρύπους που διατίθενται δεν είναι επικυρωμένοι (validated) από επίγειες παρατηρήσεις και έτσι θεωρούνται πειραματικοί (experimental). Παραδείγματος χάρη το όζον είναι ένας επικυρωμένος ρύπος. Η χρονική κάλυψη των δεδομένων αυτών είναι τριετής κυλιόμενη.

2.3 Δεδομένα και Μεθοδολογία

Στην ενότητα αυτή γίνεται λεπτομερή καταγραφή των δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία, καθώς και ο σκοπός της χρήσης τους. Τα δεδομένα που ήταν αναγκαία για την επίτευξη του στόχου της εργασίας, ήταν τα επανάλυσης (reanalysis) ERA5 και CAMS, καθώς επίσης και τα δεδομένα πρόγνωσης (forecast) CAMS. Επιπλέον, χρησιμοποιήθηκαν πραγματικές συγκεντρώσεις επιφανειακού όζοντος από 4 σταθμούς. Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για την επεξεργασία των δεδομένων και η περιοχή μελέτης, αναφέρεται σε κάθε μία από τις υποενότητες (2.3.1, 2.3.2, 2.3.3, 2.3.4). Στην υποενότητα 3.3.5 αναλύεται ξεχωριστά όλη η μεθοδολογία που εφαρμόστηκε για την αξιολόγηση των προγνωστικών δεδομένων του επιφανειακού όζοντος.

2.3.1 ERA5 δεδομένα και μεθοδολογία

Για την εκπόνηση της συγκεκριμένης εργασίας, αρχικά έγινε λήψη ωριαίων δεδομένων επανάλυσης ERA5 (cds.climate.copernicus.eu) για τη χρονική περίοδο 15 Ιουλίου έως 15 Αυγούστου του 2021, στην οποία συμπεριλαμβάνονται οι ημέρες του καύσωνα. Οι single level παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν είναι οι εξής: θερμοκρασία στα 2 μέτρα (T2m) και πίεση στη μέση στάθμη της θάλασσας (mslp). Ταυτόχρονα, χρησιμοποιήθηκαν ωριαία δεδομένα, που συναντώνται σε πολλά ισοβαρικά επίπεδα, με αυτά να είναι: η θερμοκρασία (850, 500 και 1000-100 hPa), το γεωδυναμικό ύψος (geopotential) στα 850 και 500 hPa, η κατακόρυφη ταχύτητα (vertical velocity) (500 hPa), η σχετική υγρασία (relative humidity) (700 και 1000-100 hPa) και τέλος οι u και v – συνιστώσες του ανέμου στα 300 hPa για την προβολή του αεροχειμάρρου. Ο στόχος της ανάλυσης των μετεωρολογικών παραμέτρων που προαναφέρθηκαν, έχει να κάνει με τον έλεγχο του τρόπου δημιουργίας του καύσωνα που μελετάται, αλλά και τα θερμοκρασιακά αποτελέσματα του στην Ελλάδα. Επομένως, για τη διερεύνηση των συνοπτικών συνθηκών που επικράτησαν, μελετήθηκε ο ευρύτερος Ευρωπαϊκός χώρος (25° Δ, 45° Α, 20° Ν, 70° Β).

Εκτός των ωριαίων δεδομένων, χρησιμοποιήθηκαν μηνιαία δεδομένα μεσοποιημένα ανά ώρα (monthly averaged reanalysis by hour of day), για τους μήνες Ιουλίου και Αυγούστου των ετών 1959-2020. Ο λόγος λήψης τους ήταν η δημιουργία ανωμαλιών για ορισμένες από τις παραμέτρους που προαναφέρθηκαν. Οι παράμετροι που χρειάστηκαν ήταν η θερμοκρασία στα 2 μέτρα, η πίεση στη μέση στάθμη της θάλασσας καθώς επίσης και η θερμοκρασία και το γεωδυναμικό ύψος στα 850 και 500 hPa. Με αυτό τον τρόπο ελέγχθηκε η ένταση του καύσωνα συγκριτικά με μία περίοδο αναφοράς.

Επομένως, τα ERA5 reanalysis δεδομένα χρησιμοποιήθηκαν για την ανάλυση του φαινομένου του καύσωνα, που επηρέασε την περιοχή της Ελλάδας, τη χρονική περίοδο 28 Ιουλίου έως 5 Αυγούστου του 2021. Για την επεξεργασία και την οπτικοποίηση των δεδομένων, έγινε εισαγωγή των NetCDF αρχείων στην πλατφόρμα προγραμματισμού R, όπου αναπτύχθηκαν κατάλληλοι κώδικες για την πραγματοποίηση των παραπάνω. Πριν την δημιουργία των αντίστοιχων χαρτών, για την ανάλυση της θερμής εισβολής, έγινε μετατροπή των μονάδων μέτρησης από τις αρχικές, όπου ήταν αποθηκευμένα τα δεδομένα στην ιστοσελίδα του Copernicus, σύμφωνα με τον Πίνακα 2.2.

Πίνακας 2.2: Μετεωρολογικές παράμετροι ERA5 που χρησιμοποιήθηκαν στην εργασία, οι αρχικές μονάδες μέτρησης τους (input unit), καθώς και οι μονάδες στις οποίες τελικά οπτικοποιήθηκαν (output unit).

Μετεωρολογικές παράμετροι	input unit	output unit
Θερμοκρασία	K (Kelvin)	°C
Γεωδυναμικό ύψος	$m^2 s^{-2}$	m
Πίεση στην μέση στάθμη θάλασσας	Pa	hPa
Σχετική υγρασία	%	%
Κατακόρυφη ταχύτητα	$Pa s^{-1}$	$Pa s^{-1}$
Οριζόντια ταχύτητα	ms^{-1}	ms^{-1}

2.3.2 CAMS δεδομένα επανάλυσης και μεθοδολογία

Στη συνέχεια, για την εκπόνηση της συγκεκριμένης εργασίας, έγινε λήψη της ν-συνιστώσας του ανέμου στα 10 μέτρα και υ-συνιστώσας του ανέμου στα 10 μέτρα από το μοντέλο global reanalysis CAMS (ads.atmosphere.copernicus.eu). Οι υ και ν συνιστώσες του ανέμου συνδυάστηκαν με σκοπό την οπτικοποίηση της ταχύτητας και της κατεύθυνσης του οριζόντιου ανέμου στα 10 μέτρα πάνω από την επιφάνεια της γης. Επιπλέον, χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα όζοντος στο επίπεδο του μοντέλου 60, το οποίο αντιστοιχεί στην επιφάνεια, ώστε να ακολουθείται η τοπογραφία του μοντέλου και να μην τμηθούν τα βουνά, όπως συμβαίνει με τις συντεταγμένες της πίεσης. Είναι απαραίτητο να διευκρινιστεί, ότι η επιλογή των global reanalysis δεδομένων έναντι των περιοχικών (regional) reanalysis δεδομένων έχει να κάνει με την απουσία των περιοχικών δεδομένων από το 2021 και έπειτα (τελευταία διαθέσιμη χρονιά: 2020). Η λήψη των τρίωρων reanalysis παγκόσμιων δεδομένων του όζοντος έγινε με σκοπό τη διερεύνηση των επιπέδων του όζοντος στην περιοχή της Μεσογείου, την περίοδο του καύσωνα στην Ελλάδα. Με στόχο αυτήν τη διερεύνηση, η περίοδος του καύσωνα συγκρίνεται με άλλες δύο κοντινές περιόδους. Επομένως, τα τρίωρα δεδομένων επανάλυσης CAMS που χρησιμοποιήθηκαν, αφορούν τη χρονική περίοδο 15 Ιουλίου έως 15 Αυγούστου του 2021, στην οποία περιλαμβάνονται οι ημέρες του καύσωνα. Η ανάλυση του όζοντος έγινε ξεχωριστά για τις ώρες της ημέρας και για τις ώρες της νύχτας. Οι ώρες ημέρας θεωρήθηκαν οι 6 έως 17 UTC, και ώρες νύχτας θεωρήθηκαν οι 18 έως 5 UTC, σύμφωνα με την ώρα ανατολής και δύσης του ηλίου τις συγκεκριμένες ημερομηνίες με βάση την περιοχή της Αθήνας. Η οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων έχει πραγματοποιηθεί με την βοήθεια της πλατφόρμας προγραμματισμού R. Ως περιοχή μελέτης επιλέγεται ο ευρύτερος Ευρωπαϊκός χώρος (10° Δ, 45° Α, 25° Ν, 50° Β), με την περιοχή όμως πρωταρχικού ενδιαφέροντος να αποτελεί η ελληνική περιοχή, στην οποία εκτυλίχθηκε το φαινόμενο του καύσωνα. Επιπλέον, τα δεδομένα global reanalysis χρησιμοποιούνται ως δεδομένα επικύρωσης των προγνωστικών μοντέλων CAMS. Η μεθοδολογία που ακολουθείται για την αξιολόγηση αυτή αναλύεται στην υποενότητα 2.3.5.

Επιπλέον, εκτός των τρίωρων δεδομένων χρησιμοποιήθηκαν μηνιαία δεδομένα, μεσοποιημένα ανά τρεις ώρες (monthly averaged global reanalysis by hour of day) για τους μήνες του Ιουλίου και του Αυγούστου των ετών 2003-2020. Η παράμετρος που χρειάστηκε ήταν το όζον στο επίπεδο του μοντέλου 60 (επιφάνεια). Ο λόγος λήψης τους ήταν ο έλεγχος

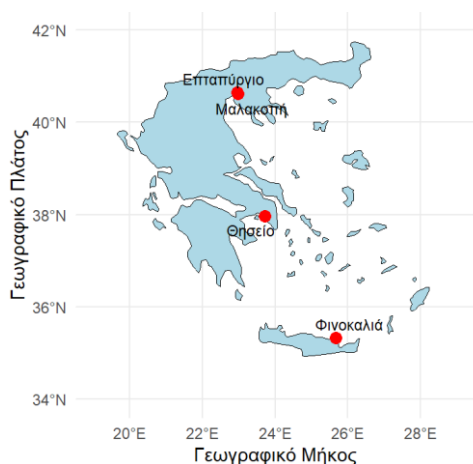
των συγκεντρώσεων όζοντος που καταγράφηκαν την περίοδο της θερμής εισβολής συγκριτικά με μία περίοδο αναφοράς, ώστε να φανεί ποια ήταν η επίδραση των ακραίων συνθηκών που επικράτησαν σε αυτόν. Η επεξεργασία των δεδομένων, τα οποία βρίσκονταν σε αρχεία NetCDF, έγινε και πάλι μέσω του προγράμματος R. Οι συγκεντρώσεις του όζοντος, για την οπτικοποίηση τους, μετατράπηκαν από kg kg^{-1} σε μονάδες ppb.

2.3.3 Παρατηρήσεις (observations) και μεθοδολογία

Στη συνέχεια της εργασίας χρησιμοποιούνται ωριαίες παρατηρήσεις όζοντος από επίγειους σταθμούς μέτρησης ατμοσφαιρικής ρύπανσης της ελληνικής επικράτειας για την περίοδο Ιούλιο-Αύγουστο 2021, κατά την οποία συμπεριλαμβάνονται οι ημέρες του καύσωνα. Αυτοί οι σταθμοί είναι του Επταπυργίου και της Μαλακοπής στην περιοχή της Θεσσαλονίκης, του Θησείου το οποίο βρίσκεται στην περιοχή της Αθήνας και της Φινοκαλίας που εδράζεται στην Κρήτη. Στον Πίνακα 2.3 και στο Σχήμα 2.1 απεικονίζεται η θέση του κάθε σταθμού.

Πίνακας 2.3: Οι σταθμοί που μελετήθηκαν για τις συγκεντρώσεις του επιφανειακού όζοντος, καθώς και οι θέσεις τους, ο τύπος του σταθμού, οι μονάδες μέτρησης και η ζώνη ώρας στην οποία βρίσκονταν αρχικά τα δεδομένα.

Σταθμοί	Γεωγραφικό μήκος	Γεωγραφικό πλάτος	Ύψος	Χαρακτηρισμός	Μονάδα Μέτρησης	Ζώνη Ώρας
Επταπύργιο	22.96	40.64	183m	αστικού υποβάθρου	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	UTC+2
Μαλακοπή	22.98	40.61	96m	αστικού υποβάθρου	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	UTC+2
Θησείο	23.71	37.97	110m	αστικός	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	UTC+2
Φινοκαλιά	25.67	35.33	219m	περιοχικού υποβάθρου	ppb	UTC



Σχήμα 2.1: Θέση των επίγειων σταθμών μέτρησης ατμοσφαιρικής ρύπανσης που χρησιμοποιήθηκαν στη μελέτη

Ο σκοπός χρήσης των δεδομένων αυτών είναι αρχικά η διερεύνηση, με τη βοήθεια χρονοσειρών, των επιπέδων του όζοντος στους τέσσερις σταθμούς, την περίοδο του καύσωνα, ώστε να φανεί αν οι ακραίες μετεωρολογικές συνθήκες που επικράτησαν κατά τη διάρκεια του, επηρέασαν τις συγκεντρώσεις του επιφανειακού όζοντος. Τα ωριαία δεδομένα δόθηκαν σε αρχεία Excel και πριν τη μεταφορά τους και τη δημιουργία των χρονοσειρών αυτών στο πρόγραμμα προγραμματισμού R, τα δεδομένα μετατράπηκαν σε κοινές μονάδες μέτρησης συγκεντρώσεων (ppb) και σε ώρες UTC, ώστε τα δεδομένα να είναι συγκρίσιμα. Στην συνέχεια, οι παρατηρήσεις χρησιμοποιούνται ως δεδομένα επικύρωσης των μοντέλων (reanalysis & forecast) CAMS. Η μεθοδολογία της αξιολόγησης αναλύεται στην

υποενότητα 2.3.5. Επιπλέον, για τους σταθμούς του Θησείου και του Επταπυργίου, δόθηκαν και ωριαίες τιμές όζοντος για τους μήνες Ιούλιο και Αύγουστο για τα έτη 2018-2020 και 2010-2020 αντίστοιχα, ενώ για το σταθμό της Φινοκαλιάς εξήχθησαν δεδομένα από τη μεταπτυχιακή διατριβή του Τσικερδέκη (2013) για την ημερήσια μεταβολή του επιφανειακού όζοντος Ιουλίου και Αυγούστου 1997-2010. Μέσω της μέσης τιμής αυτών, οι συγκεντρώσεις του όζοντος της επιφάνειας την περίοδο της θερμής εισβολής συγκρίνονται με την εκάστοτε δοθείσα περίοδο αναφοράς, για να φανεί πόσο σημαντική ήταν η επίδραση των μετεωρολογικών συνθηκών που επικράτησαν την περίοδο του καύσωνα.

2.3.4 Δεδομένα του παγκόσμιου και περιοχικού προγνωστικού συστήματος μοντέλων CAMS

Το CAMS, εκτός των δεδομένων reanalysis, διαθέτει και προγνωστικά δεδομένα περιοχικής και παγκόσμιας κλίμακας (ads.atmosphere.copernicus.eu). Τα δεδομένα πρόγνωσης χρησιμοποιήθηκαν για την επίτευξη του βασικού σκοπού της παρούσας εργασίας, που όπως προαναφέρθηκε στο πρώτο Κεφάλαιο, είναι η αξιολόγηση και σύγκριση των παγκόσμιων και περιοχικών προγνωστικών δεδομένων CAMS για το επιφανειακό όζον. Με αυτόν τον τρόπο θα φανεί πιο από τα δύο μοντέλα ήταν πιο κοντά στην παρατήρηση και τα πεδία reanalysis για τον ρύπο αυτό, την περίοδο της θερμής μεταφοράς το καλοκαίρι του 2021 στην Ελλάδα. Τα προγνωστικά δεδομένα CAMS που χρησιμοποιήθηκαν για τους παραπάνω στόχους είναι τα εξής:

Παγκόσμια δεδομένα πρόγνωσης CAMS

Από το συγκεκριμένο σύνολο δεδομένων χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα όζοντος που παράχθηκαν την ώρα (time) 00 UTC και αφορούν προγνώσεις με χρονικό βήμα τριών ωρών (leadtime hour) σε χρόνο 0 και τις επόμενες 21 ώρες (ανά 3 ώρες). Το επίπεδο για το οποίο έγινε λήψη των δεδομένων ήταν το επίπεδο μοντέλου 137, δηλαδή το επίπεδο της επιφάνειας.

Περιοχικά δεδομένα πρόγνωσης CAMS

Για την παρούσα εργασία επίσης έχει γίνει λήψη περιοχικών προγνωστικών δεδομένων όζοντος της επιφάνειας, δηλαδή σε ύψος (level) 0, που παράχθηκαν (time) την ώρα 00 UTC και αφορούν προγνώσεις με χρονικό βήμα μίας ώρας (leadtime hour) σε χρόνο 0 και τις επόμενες 23 ώρες (ανά 1 ώρα).

Όπως γίνεται φανερό και στα δύο προγνωστικά μοντέλα επιλέχθηκε η ίδια ώρα παραγωγής των προγνωστικών δεδομένων (00 UTC), ώστε τα δεδομένα να είναι συγκρίσιμα. Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για την επεξεργασία των παραπάνω δεδομένων και την επίτευξη του κύριου σκοπού της παρούσας εργασίας αναλύεται στην επόμενη υποενότητα (2.3.5).

2.3.5 Μεθοδολογία αξιολόγησης μοντέλων πρόγνωσης CAMS για το επιφανειακό O₃

Όσον αφορά τη μεθοδολογία της αξιολόγησης του παγκόσμιου προγνωστικού μοντέλου και του περιοχικού προγνωστικού μοντέλου CAMS, αυτή γίνεται στις εξής δύο φάσεις:

Στο πρώτο στάδιο συγκρίνονται τα προγνωστικά δεδομένα με τα δεδομένα global reanalysis CAMS, τα οποία είναι δεδομένα από μοντέλο που έχουν διορθωθεί από παρατηρήσεις και άρα θεωρούνται κοντά στην πραγματικότητα. Τα global reanalysis που χρειάστηκαν έχουν αναφερθεί στην υποενότητα 2.3.2. Για το πρώτο στάδιο της αξιολόγησης, η σύγκριση των προγνωστικών δεδομένων με τα παγκόσμια δεδομένα reanalysis έγινε μέσω χαρτών που αφορούν την ευρύτερη περιοχή της Ευρώπης (25° Δ, 45° Α, 30° Ν, 70° Β) σε κοινές μονάδες μέτρησης (ppb), με σκοπό τα αποτελέσματα να είναι συγκρίσιμα προς διευκόλυνση του αναγνώστη. Αυτή η σύγκριση έγινε με στόχο την αξιολόγηση της χωρικής κατανομής του επιφανειακού όζοντος από τα προγνωστικά μοντέλα, η οποία προφανώς δεν μπορεί να επιτευχθεί με τα σημειακά δεδομένα που προσφέρουν οι επίγειοι σταθμοί. Ωστόσο, το μειονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι η σύγκριση με τα global reanalysis δεν είναι τόσο αξιόπιστη, λόγω πιθανών σφαλμάτων από το μοντέλο. Πριν την οπτικοποίηση των δεδομένων των αριθμητικών μοντέλων, τα παγκόσμια δεδομένα (forecast, reanalysis) από kg kg⁻¹ μετατράπηκαν σε μονάδες ppb, ενώ τα προγνωστικά δεδομένα από το περιοχικό μοντέλο μετατράπηκαν από μg/m³ και πάλι σε ppb. Η επεξεργασία και η οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων έγινε μέσω της πλατφόρμας προγραμματισμού R, όπου αναπτύχθηκαν κατάλληλοι κώδικες. Τα αποτελέσματα αυτά, ωστόσο, προκάλεσαν τη μετέπειτα υπολογιστική σύγκριση των global reanalysis με τις επίγειες παρατηρήσεις των σταθμών μέσω στατιστικών παραμέτρων. Η στατιστική αυτή σύγκριση πραγματοποιήθηκε για να φανεί κατά πόσο τα reanalysis δεδομένα είναι κοντά στην πραγματικότητα, την ευρύτερη περίοδο της θερμής μεταφοράς (15/7/2021-15/8/2021) και άρα κατά πόσο η αξιολόγηση των προγνωστικών μοντέλων, με τη βοήθεια των global reanalysis, θεωρείται αξιόπιστη. Η μέθοδος υπολογισμού των στατιστικών παραμέτρων για τον υπολογισμό των σφαλμάτων γίνεται με τις πιο συχνά χρησιμοποιούμενες μετρήσεις σφαλμάτων λόγω της επάρκειάς τους, οι οποίες περιγράφονται στη συνέχεια.

Στη δεύτερη φάση της αξιολόγησης, τα προγνωστικά δεδομένα συγκρίνονται με παρατηρήσεις από επίγειους σταθμούς. Τα δεδομένα (forecast, επίγειες παρατηρήσεις) που χρησιμοποιήθηκαν αφορούν τη χρονική περίοδο 15 Ιουλίου έως 15 Αυγούστου του 2021, στην οποία περιλαμβάνονται οι ημέρες του καύσωνα. Τα επίγεια δεδομένα που επιλέχθηκαν έχουν αναλυθεί σε προηγούμενη παράγραφο. Για την αξιολόγηση των προγνωστικών δεδομένων, οι επίγειες παρατηρήσεις του κάθε σταθμού συγκρίνονται με το κοντινότερο σημείο πλέγματος του παγκόσμιου και περιοχικού συστήματος μοντέλων πρόγνωσης CAMS. Για την επιτυχή ολοκλήρωση των αποτελεσμάτων, χρησιμοποιήθηκε η στατιστική μέθοδος για την αξιολόγηση των προγνωστικών δεδομένων. Μέσω της πλατφόρμας προγραμματισμού R έγινε διαλογή των απαιτούμενων δεδομένων, τα οποία στη συνέχεια οργανώθηκαν κατάλληλα μέσω του εξωτερικού λογισμικού Excel. Τα δεδομένα επιλέχθηκαν να εξαχθούν στο πρόγραμμα Excel για την πιο εύκολη οργάνωσή τους, αφού το χρονικό βήμα που είχαν τα περιοχικά και τα δεδομένα παρατηρήσεων ήταν ανά μία ώρα, ενώ αντίθετα τα

παγκόσμια δεδομένα (forecast και reanalysis) ήταν ανά τρεις ώρες. Με αυτόν τον τρόπο δημιουργήθηκαν τα κατάλληλα αρχεία, τα οποία στην συνέχεια φορτώθηκαν στην R για την δημιουργία χρονοσειρών και τον υπολογισμό των στατιστικών μετρήσεων σφάλματος των προγνωστικών μοντέλων. Με την ίδια διαδικασία υπολογίστηκαν και τα στατιστικά σφάλματα των global reanalysis με τις παρατηρήσεις στην α' φάση αξιολόγησης των προγνωστικών μοντέλων.

Οι στατιστικές παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν για τον έλεγχο των σφαλμάτων των προγνωστικών δεδομένων αλλά και των δεδομένων επανάλυσης με βάση τις παρατηρήσεις ήταν: ο συντελεστής συσχέτισης (cc: correlation coefficient), το μέσο σφάλμα (MBE: Mean Bias Error), το μέσο απόλυτο σφάλμα (MAE: Mean Absolute Error), η ρίζα του μέσου τετραγωνικού σφάλματος (RMSE: Root Mean Square Error) και η τροποποιημένη κανονικοποιημένη μέση απόκλιση (MNMB: Modified Normalized mean bias). Αυτές θεωρούνται ως οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενες μετρήσεις σφαλμάτων στην επιστημονική βιβλιογραφία.

cc (correlation coefficient= συντελεστής συσχέτισης):

Ο συντελεστής συσχέτισης μετράει το βαθμό της γραμμικής συσχέτισης μεταξύ δύο μεταβλητών. Οι τιμές που μπορεί να πάρει κυμαίνονται μεταξύ του -1 και 1. Το 1 δηλώνει τέλεια θετική συσχέτιση, το -1 τέλεια αρνητική συσχέτιση και το 0 ότι είναι ασυσχέτιστα. Οι ενδιάμεσες κατηγοριοποιήσεις φαίνονται στον Πίνακα 2.4.

Πίνακας 2.4: Οδηγίες ερμηνείας του συντελεστή συσχέτισης (Rizqullah et al., 2021)

Interval Coefficient	Level of relationship
0.00 – 0.199	Very Weak
0.20 – 0.399	Weak
0.40 – 0.599	Medium
0.60 – 0.799	Strong
0.80 – 1.000	Very Strong

Η μαθηματική του σχέση είναι η εξής:

$$cc = \frac{\sum(f_i - \bar{f})(o_i - \bar{o})}{\sqrt{\sum(f_i - \bar{f})^2 \sum(o_i - \bar{o})^2}} \quad (2.1)$$

όπου το f αφορά την τιμή πρόγνωσης και το o την τιμή παρατήρησης για μία συγκεκριμένη χρονική στιγμή i . Τα $\bar{f}$ και $\bar{o}$ είναι η μέση τιμή, όλων των διαθέσιμων προγνώσεων και παρατηρήσεων αντίστοιχα, για έναν συγκεκριμένο σταθμό.

MBE (Mean Bias Error=Μέσο σφάλμα παρατήρησης):

Το μέσο σφάλμα παρατήρησης μετράει το μέσο όρο των διαφορών μεταξύ των προβλεπόμενων και των πραγματικών τιμών. Ουσιαστικά, εκφράζει την απόκλιση στην πρόγνωση, για υπερεκτίμηση ή υποεκτίμηση, ενός εξεταζόμενου μοντέλου, δηλαδή ένα συστηματικό σφάλμα του μοντέλου που αξιολογείται. Ο συντελεστής αυτός μπορεί να λάβει και θετικές και αρνητικές τιμές. Η τιμή 0 δηλώνει ότι η τιμή πρόγνωσης και η πραγματική τιμή ταυτίζεται. Μία θετική τιμή συνεπάγεται ότι η τιμή πρόγνωσης (f_i) είναι μεγαλύτερη από την τιμή παρατήρησης (o_i) και άρα το μοντέλο υπερεκτιμά. Αντίστοιχα, όταν πάρει αρνητική τιμή σημαίνει ότι το μοντέλο υποεκτιμά. Επομένως, το πλεονέκτημα του συντελεστή αυτού είναι ότι δίνει πληροφορίες για τον τρόπο με τον οποίο οι προγνώσεις απέχουν από τις πραγματικές τιμές, λαμβάνοντας υπόψη και την κατεύθυνση των αποκλίσεων εκτός του μεγέθους τους, η οποία δεν μπορεί να προσδιοριστεί στις περιπτώσεις των MAE και RMSE (Kambezidis, 2012). Η μαθηματική του σχέση είναι η εξής:

$$MBE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (f_i - o_i) \quad (2.2)$$

όπου το f αφορά την τιμή πρόγνωσης και το o την τιμή παρατήρησης για μία συγκεκριμένη χρονική στιγμή i . Το N είναι το πλήθος των διαθέσιμων χρονικών στιγμών.

MAE (Mean Absolute Error=Μέσο απόλυτο σφάλμα):

Το μέσο απόλυτο σφάλμα μετράει τη διαφορά των δεδομένων πρόγνωσης (f_i) και των παρατηρήσεων (o_i) και δίνει τον μέσο όρο των απόλυτων τιμών. Ο συντελεστής αυτός μπορεί να λάβει μόνο θετικές τιμές, ενώ πιο συγκεκριμένα μία μεγαλύτερη τιμή συνεπάγεται περισσότερα ή μεγαλύτερα σφάλματα. Ο τρόπος υπολογισμού του δίνεται από την μαθηματική σχέση:

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |f_i - o_i| \quad (2.3)$$

RMSE (Root Mean Square Error=Ρίζα του μέσου τετραγωνικού σφάλματος):

Η ρίζα του μέσου τετραγωνικού σφάλματος μετράει τη μέση διαφορά μεταξύ των προβλεπόμενων τιμών και των πραγματικών τιμών. Ουσιαστικά είναι η τυπική απόκλιση της απόστασης των σημειακών δεδομένων από την γραμμική παλινδρόμηση, δηλαδή ποσοτικοποιεί πόσο συγκεντρωμένα είναι τα παρατηρούμενα δεδομένα από τις προβλεπόμενες τιμές (συνολική απόκλιση). Οι τιμές του RMSE μπορεί να είναι από 0 έως το $+\infty$. Το 0 σημαίνει ότι προβλεπόμενες τιμές ταιριάζουν απόλυτα με τις πραγματικές. Όσο αυξάνονται οι τιμές τότε υποδηλώνονται περισσότερα σφάλματα και λιγότερες ακριβείς προγνώσεις. Παρά το γεγονός ότι το RMSE και το MAE είναι παρόμοιες μετρήσεις (δίνουν κοντινές τιμές), σε πολλές περιπτώσεις συνιστάται η αναφορά και των δύο τιμών (Efthimiou et al., 2013). Ο συντελεστής μέτρησης σφάλματος RMSE είναι ευαίσθητος στις ακραίες τιμές,



δηλαδή δίνει μεγαλύτερη βαρύτητα στα μεγάλα σφάλματα λόγω της τετραγωνικής ρίζας, με αποτέλεσμα να προτιμάται πολλές φορές ο MAE. Η μαθηματική του σχέση είναι η εξής:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (f_i - o_i)^2}{N}} \quad (2.4)$$

MNMB (Modified Normalized mean bias=Τροποποιημένη κανονικοποιημένη μέση απόκλιση):

Η τροποποιημένη κανονικοποιημένη μέση απόκλιση δίνει το μέτρο της απόκλισης των προσομοιωμένων έναντι των παρατηρούμενων τιμών. Οι τιμές του κυμαίνονται μεταξύ -1 και 1, και αποδίδεται συμμετρικά η υπερεκτίμηση ή η υποεκτίμηση των προγνώσεων. Η κύρια συνεισφορά του είναι ότι, σε αντίθεση με τις μη κανονικοποιημένες μετρήσεις που αναφέρθηκαν παραπάνω, το συγκεκριμένο στατιστικό σφάλμα μπορεί να εκφραστεί και ως ποσοστό, επιτρέποντας έτσι ενδοσυγκρίσεις (π.χ., μεταξύ διαφορετικών εποχών), αφού οι μετρήσεις αποσυνδέονται από τη μοναδιαία κλίμακα (Kambezidis, 2012). Αυτός είναι ο λόγος που πολλές φορές χρησιμοποιείται συνδυαστικά με τα παραπάνω στατιστικά σφάλματα. Η μαθηματική του σχέση είναι η εξής:

$$MNMB = \frac{2}{N} \sum_{i=1}^N \frac{(f_i - o_i)}{(f_i + o_i)} \quad (2.5)$$

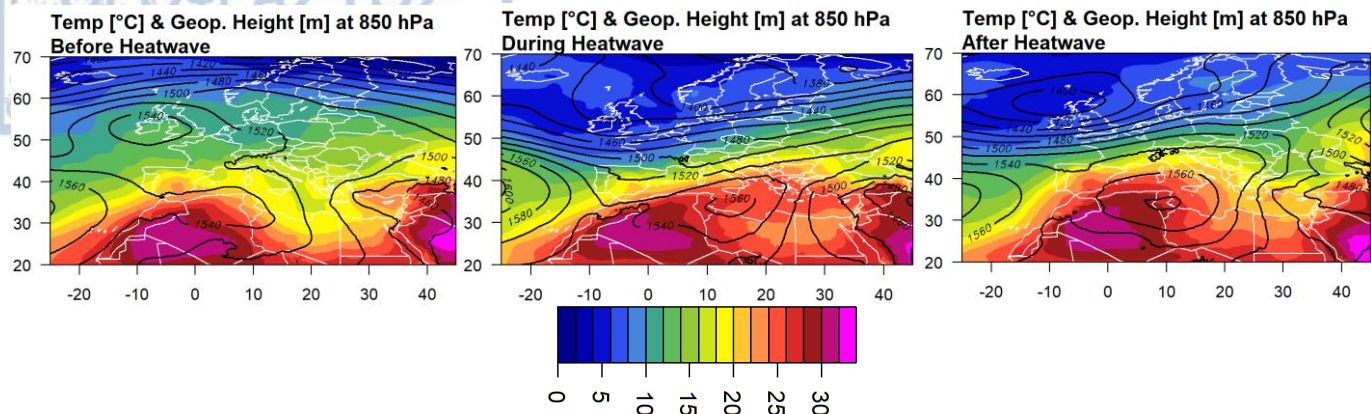
Κεφάλαιο 3 – Αποτελέσματα

3.1 Συνοπτική Ανάλυση του καύσωνα

Στην παρούσα ενότητα γίνεται η συνοπτική ανάλυση του φαινομένου του καύσωνα που επηρέασε την περιοχή της Ελλάδας στις 28 Ιουλίου έως τις 5 Αυγούστου του 2021. Όπως έχει ήδη αναφερθεί για την ανάλυση του φαινομένου μελετάται η ευρύτερη περιοχή της Ευρώπης, έχοντας ως επίκεντρο την Ελλάδα. Για την επίτευξη της διερεύνησης του τρόπου δημιουργίας του καύσωνα, αλλά και των θερμοκρασιακών αποτελεσμάτων του στην επιφάνεια, χρησιμοποιούνται οι κατάλληλοι μετεωρολογικοί παράμετροι από το μοντέλο ERA5, που έχουν προαναφερθεί σε προηγούμενη ενότητα. Αρχικά, αναλύεται η θερμοκρασία συνδυαστικά με το γεωδυναμικό ύψος στην ισοβαρική επιφάνεια των 850 hPa.

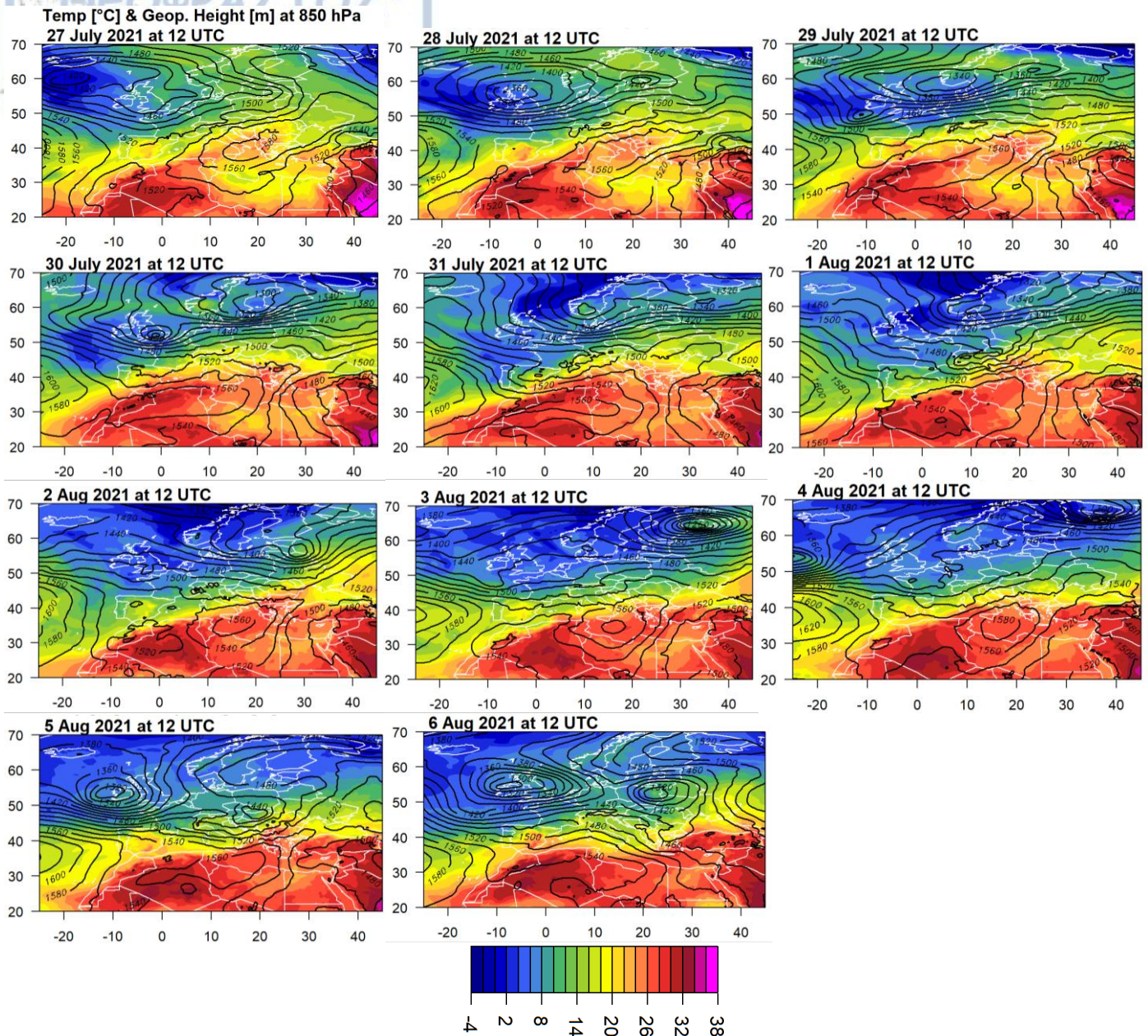
Η κυριότερη αιτία για την εμφάνιση υψηλών θερμοκρασιών στη χώρα μας είναι η μεταφορά θερμών αερίων μαζών από τις ακτές της Αφρικής. Το επίπεδο των 850 hPa είναι συνήθως ακριβώς πάνω από το οριακό στρώμα και σε αυτό το επίπεδο η διακύμανση της θερμοκρασίας την ημέρα με την νύχτα είναι γενικά αμελητέα. Συνεπώς, η θερμοκρασία του αέρα στα 850 hPa μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη διάκριση μεταξύ των θερμών και ψυχρών αερίων μαζών ή για την ένδειξη μετωπικών ζωνών (δηλαδή περιοχές με μεγάλη κλίση θερμοκρασίας, όπου οι ισόθερμες είναι πιο κοντά μεταξύ τους). Επομένως, για τον εντοπισμό της αιτίας δημιουργίας του καύσωνα που μελετάται, χρησιμοποιείται ο χάρτης της θερμοκρασίας στην ισοβαρική επιφάνεια των 850 hPa. Αυτή συνδυάζεται με το γεωδυναμικό ύψος στο ίδιο ισοβαρικό επίπεδο.

Αρχικά, πραγματοποιείται σύγκριση των μέσων τιμών των θερμοκρασιών και του γεωδυναμικού ύψους στα 850 hPa για όλα τα εικοσιτετράωρα, που καταγράφηκαν κατά τη διάρκεια του καύσωνα, συγκριτικά με τις δύο χρονικά πλησιέστερες περιόδους, δηλαδή τις 13 προηγούμενες ημέρες (15/7-27/8) και τις 10 επόμενες ημέρες (6/8-15/8) από αυτόν (Σχήμα 3.1). Οι ημέρες που προηγήθηκαν του καύσωνα, παρουσίασαν ένα εντυπωσιακά διαφορετικό συνοπτικό μοτίβο σε σχέση με την περίοδο της θερμής εισβολής, με τις μέσες ημερήσιες θερμοκρασίες σε αυτήν την ισοβαρική επιφάνεια να κυμαίνονται από 15 έως 20 °C στην περιοχή της Ελλάδας. Κατά τη διάρκεια του καύσωνα, η μέση θερμοκρασία ήταν 25-30 °C με ένα υψηλό των γεωδυναμικών υψών να παρατηρείται νοτιοδυτικά της Ελλάδας (Σχήμα 3.1). Η παρουσία αυτού είχε ως αποτέλεσμα τη δημιουργία νότιας ροής πάνω από την περιοχή μελέτης. Επομένως, η γενικότερη κυκλοφορία που επικράτησε σε συνδυασμό με τη ζωνική ροή στο βόρειο τμήμα της χώρας, είχε ως αποτέλεσμα τη μεταφορά θερμών αερίων μαζών από την περιοχή της Βόρειας Αφρικής προς αυτήν, επηρεάζοντας την χώρα σε όλη την έκταση της. Μετά το πέρας της περιόδου του καύσωνα, δηλαδή από τις 6 έως τις 15 Αυγούστου, ο αντικυκλώνας παρέμεινε στην περιοχή, αλλά αυτήν τη φορά η γενικότερη κυκλοφορία που επικράτησε επέφερε βορειοανατολική ροή προκαλώντας ψυχρή μεταφορά αερίων μαζών από τα μεγαλύτερα γεωγραφικά πλάτη και άρα πτώση της θερμοκρασίας. Αυτό γίνεται αντιληπτό και από τους ημερήσιους χάρτες (Σχήμα 3.2) και πιο συγκεκριμένα από εκείνον στις 6 Αυγούστου του 2021.



Σχήμα 3.1: Μέση ημερήσια χωρική κατανομή της θερμοκρασίας (°C, χρωματική κλίμακα) και του γεωδυναμικού ύψους (m, μαύρες γραμμές ανά 20m) στα 850 hPa για τρεις χρονικές περιόδους. Η πρώτη (Before Heatwave) αφορά τις ημέρες 15 έως 27 Ιουλίου 2021, η δεύτερη (During Heatwave) αφορά τις ημέρες του καύσωνα και τέλος η Τρίτη (After Heatwave) αφορά την περίοδο μετά τον καύσωνα δηλαδή 6 έως 15 Αυγούστου. (Data: Era5)

Στο Σχήμα 3.2 απεικονίζονται οι ίδιοι μετεωρολογικοί παράμετροι στα 850 hPa, αλλά αυτή τη φορά ανά είκοσι τέσσερις ώρες, δηλαδή στις 12 UTC των ημερών 27/7 έως 6/8, δείχνοντας έτσι την εξέλιξη του καύσωνα, αλλά και τι συμβαίνει το προηγούμενο και το επόμενο εικοσιτετράωρο από αυτόν. Από το σχήμα, γίνεται φανερό η σταδιακή επέκταση όλης της θερμής ζώνης από την περιοχή της Βόρειας Αφρικής προς τα βόρεια, η οποία επηρεάζει κυρίως την περιοχή της Νοτιοανατολικής Ευρώπης. Πιο αναλυτικά, στις 28 Ιουλίου 12 UTC οι θερμοκρασίες στα 850 hPa αρχίζουν να αυξάνονται, επειδή η αντικυκλωνική ροή που εμφανίζεται στην περιοχή επιτρέπει την μετακίνηση θερμών αέριων μαζών προς τα βόρεια. Καθώς ο αντικυκλώνας αποκτά μεγαλύτερη έκταση (29 July), οι θερμές αέριες μάζες συνεχίζουν να κατέρχονται προς τα χαμηλότερα ύψη. Αυτή η έντονη και επίμονη κορυφογραμμή που κυριαρχούσε στον Ελλαδικό χώρο εξαιτίας του κέντρου του αντικυκλώνα τη χρονική περίοδο του καύσωνα, επέτρεψε τη συσσώρευση θερμότητας στην κατώτερη τροπόσφαιρα, όπως αποδεικνύεται από την αύξηση της θερμοκρασίας στο επίπεδο των 850 hPa από τις 2 έως τις 5 Αυγούστου. Η θερμοκρασία εκείνη τη χρονική περίοδο είναι κατά μέσο όρο 28 °C. Η αντικυκλωνική ροή διατηρείται στην περιοχή μέχρι και τις 4 Αυγούστου, όπου και παρατηρείται η μεγαλύτερη ένταση (κέντρο ύψους μεγαλύτερο από 1580 μέτρα), ενώ στις 5 Αυγούστου φαίνεται να υποχωρεί προς τα νοτιοδυτικά. Στα βόρεια της περιοχής του αντικυκλώνα (40-50° B) η ροή της ατμοσφαιρικής κυκλοφορίας είναι ζωνική, με αποτέλεσμα την παρεμπόδιση της περαιτέρω κίνησης της θερμής εισβολής προς τα μεγαλύτερα γεωγραφικά πλάτη. Τις ημέρες που το κέντρο των υψηλών γεωδυναμικών υψών βρισκόταν στην μικρότερη απόσταση από τον ελληνικό χώρο και εμφάνιζε τα υψηλότερα γεωδυναμικά ύψη ήταν στις 27 και 28 Ιουλίου, δηλαδή κατά την έναρξη της θερμής μεταφοράς, αλλά και στις 2 έως 4 Αυγούστου, που σύμφωνα με το μοντέλο τότε καταγράφηκαν οι υψηλότερες θερμοκρασίες στο επίπεδο αυτό (30 °C). Γενικότερα οι θερμοκρασίες των 850 hPa που επικράτησαν πάνω από την Ελλάδα κατά τη διάρκεια του καύσωνα ήταν 25 έως 30 °C, με αυτό το μέγιστο να επιτυγχάνεται σταδιακά.

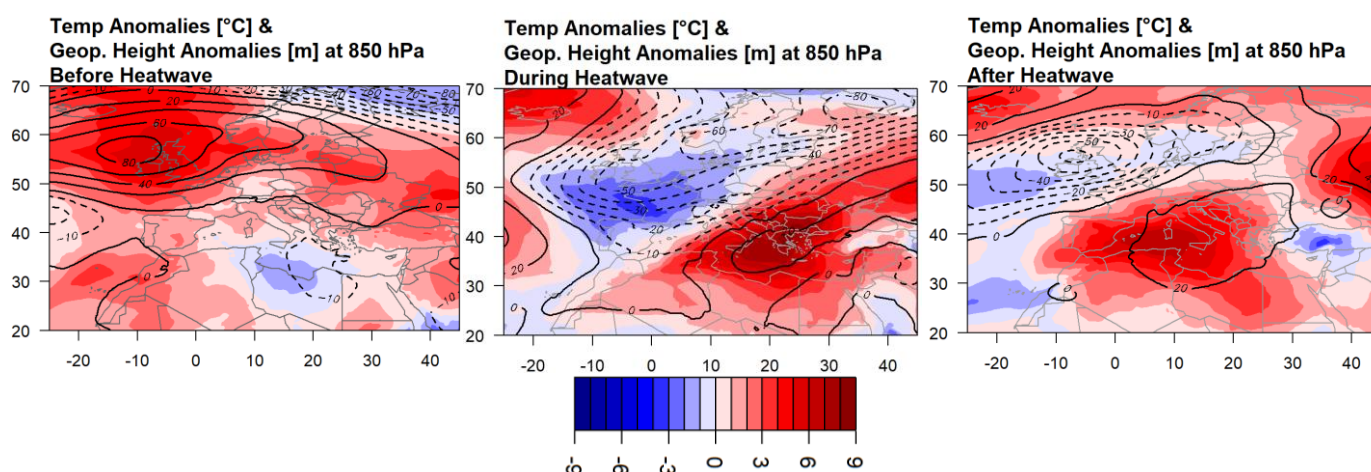


Σχήμα 3.2: Χωρική κατανομή των θερμοκρασιών (°C, χρωματική κλίμακα) και των γεωδυναμικών υψών (m, μαύρες γραμμές ανά 20m) στα 850 hPa από τις 27 Ιουλίου 2021 έως τις 6 Αυγούστου 2021. Το χρονικό βήμα της οπτικοποίησης είναι 24 ώρες (12 UTC). (Data: Era5)

Η παρουσία θερμών αέριων μαζών επιβεβαιώνεται επίσης από τους χάρτες χωρικής κατανομής των θερμοκρασιακών ανωμαλιών στην ισοβαρική επιφάνεια των 850 hPa. Την περίοδο του καύσωνα το κέντρο των μέσων θερμοκρασιακών ανωμαλιών, το οποίο βρίσκεται στην νοτιοανατολική Ευρώπη, φτάνει τους 9 °C (Σχήμα 3.3). Ωστόσο, ταυτόχρονα φανερώνεται η δημιουργία ενός δίπολου στα 850 hPa, με τη δυτική Ευρώπη να βρίσκεται κάτω από αρνητικές θερμοκρασιακές ανωμαλίες. Για να επιτευχθεί η μελέτη των συστημάτων κυκλοφορίας που ευνόησαν αυτό το μοτίβο θερμοκρασιακών ανωμαλιών, κατασκευάζονται χάρτες που εμπεριέχουν και τις γεωδυναμικές ανωμαλίες στην ίδια ισοβαρική επιφάνεια (Σχήμα 3.3). Επομένως, στην περιοχή των θετικών θερμοκρασιακών ανωμαλιών σημειώνονται θετικές ανωμαλίες ύψους, που αντιστοιχούν σε αντικυκλωνικές

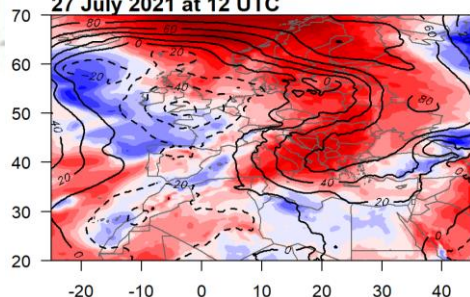
συνθήκες κυκλοφορίας οι οποίες φτάνουν τα 20 μέτρα ανωμαλίας, ενώ στην περιοχή των αρνητικών θερμοκρασιακών ανωμαλιών (Βορειοδυτική Ευρώπη) επικρατούν κυκλωνικές συνθήκες (-50 μέτρα ανωμαλίας). Οι θετικές ανωμαλίες μέσης κυκλοφορίας είναι ιδιαίτερα ενισχυμένες πάνω από την ελληνική περιοχή, συμβάλλοντας στη μεταφορά θερμών αερίων μαζών από την Βόρεια Αφρική προς την περιοχή μελέτης. Το χρονικό διάστημα πριν τη θερμή μεταφορά, οι θερμοκρασιακές ανωμαλίες στα 850 hPa είναι από -2 έως +2 °C στην ευρύτερη περιοχή μελέτης. Επομένως, συγκρίνοντας τη χρονική περίοδο πριν με αυτήν που ακολούθησε τη θερμή μεταφορά, γίνεται αντιληπτό ότι οι θερμοκρασιακές ανωμαλίες μετά τον καύσωνα είναι πιο έντονες σε σχέση με πριν, με αυτές να παραμένουν σε υψηλότερα για την εποχή επίπεδα κατά περίπου 3 °C. Γενικότερα, σύμφωνα με το Σχήμα 3.3 καταγράφεται η μετακίνηση μίας θετικής αντικυκλωνικής ανωμαλίας προς τα νοτιοανατολικά, η οποία ταυτίζεται χωρικά με την αύξηση των θερμοκρασιακών ανωμαλιών στο επίπεδο αυτό.

Παράλληλα, μέσω των ανωμαλιών στις 12 UTC των διαδοχικών ημερών (Σχήμα 3.4), φαίνεται ότι ήδη από την προηγούμενη ημέρα του καύσωνα (27 Ιουλίου) το θετικό κέντρο γεωδυναμικών ανωμαλιών, που εντοπίστηκε στο Σχήμα 3.3 (During HW), βρισκόταν ήδη στην περιοχή μελέτης. Αυτή η μετακίνηση συνέβη χωρίς όμως να έχει προλάβει να επηρεάσει τις επιφανειακές θερμοκρασίες και άρα να καταγραφεί ως ημέρα έναρξης του καύσωνα. Στις 2-4 Αυγούστου, που οι θετικές ανωμαλίες των υψών είναι οι μεγαλύτερες (>40μέτρα) και το κέντρο είναι οργανωμένο και εκτείνεται στην ευρύτερη περιοχή της Ελλάδας, οι θερμοκρασιακές ανωμαλίες φτάνουν και εκείνες τις μέγιστες τιμές (12 °C). Από τις 5 Αυγούστου το κέντρο των ανωμαλιών αρχίζει να εξασθενεί και οι θερμοκρασίες να μειώνονται. Στις 6 Αυγούστου πλέον η κυκλοφορία της ατμόσφαιρας είναι κυκλωνική πάνω από την Ελλάδα (διακεκομμένες γραμμές) και ξεκινάει η ψυχρή μεταφορά (θερμοκρασιακές ανωμαλίες: -4 έως +6 °C).

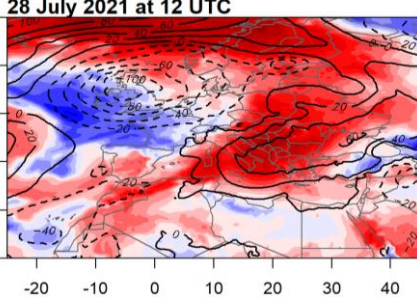


Σχήμα 3.3: Μέση ημερήσια χωρική κατανομή των θερμοκρασιακών ανωμαλιών (°C, χρωματική κλίμακα) και των ανωμαλιών του γεωδυναμικού ύψους (m, θετικές ανωμαλίες με συνεχείς γραμμές και αρνητικές ανωμαλίες με διακεκομμένες γραμμές ανά 20m) στα 850 hPa για τρεις χρονικές περιόδους. Η πρώτη (Before Heatwave) αφορά τις ημέρες 15 έως 27 Ιουλίου, η δεύτερη (During Heatwave) αφορά τις ημέρες του καύσωνα και η τρίτη (After Heatwave) αφορά την περίοδο μετά τον καύσωνα δηλαδή 6 έως 15 Αυγούστου. Περίοδος αναφοράς: ωριαίες τιμές Ιουλίου και Αυγούστου 1959-2020. (Data:Era5)

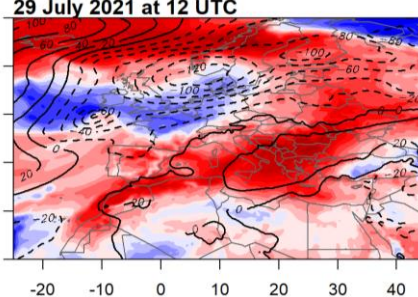
Temp Anomalies [$^{\circ}\text{C}$] &
Geop. Height Anomalies [m] at 850 hPa
27 July 2021 at 12 UTC



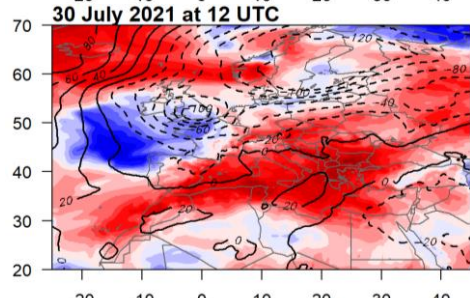
28 July 2021 at 12 UTC



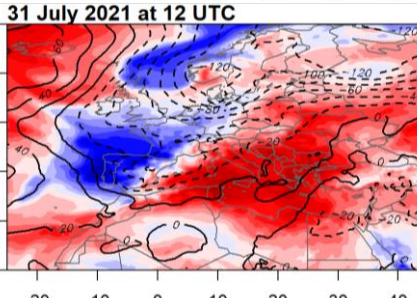
29 July 2021 at 12 UTC



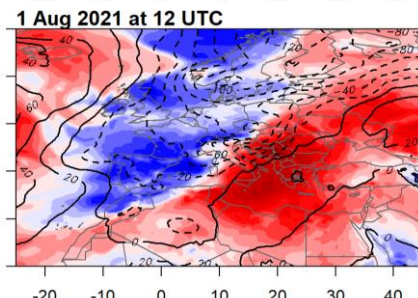
30 July 2021 at 12 UTC



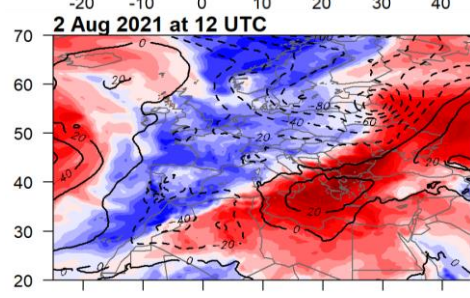
31 July 2021 at 12 UTC



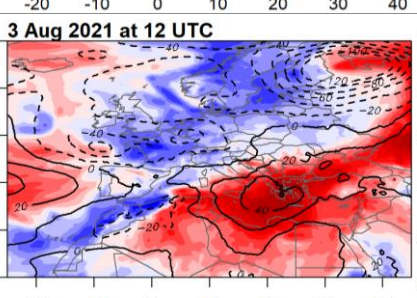
1 Aug 2021 at 12 UTC



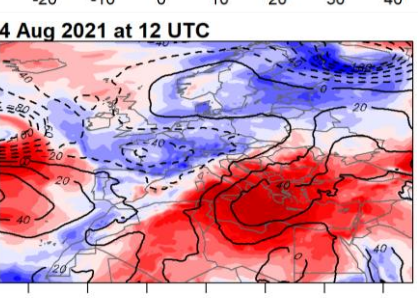
2 Aug 2021 at 12 UTC



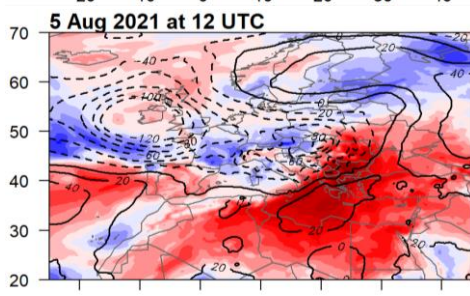
3 Aug 2021 at 12 UTC



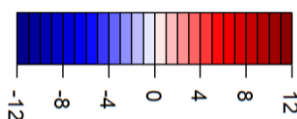
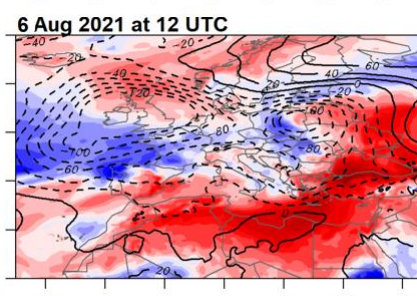
4 Aug 2021 at 12 UTC



5 Aug 2021 at 12 UTC



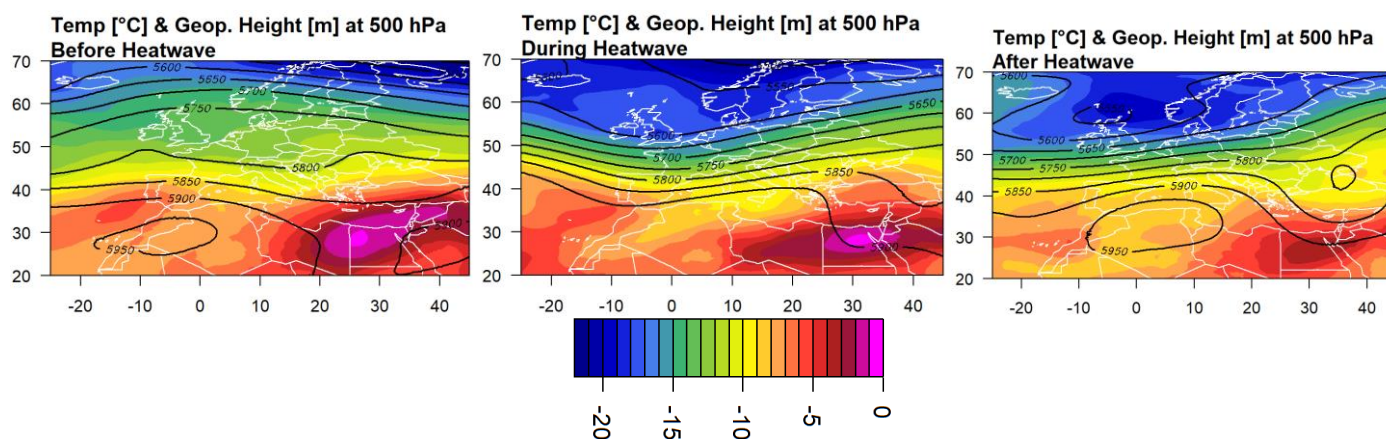
6 Aug 2021 at 12 UTC



Σχήμα 3.4: Χωρική κατανομή των ανωμαλιών της θερμοκρασίας ($^{\circ}\text{C}$, χρωματική κλίμακα) και των ανωμαλιών του γεωδυναμικού ύψους (m, θετικές ανωμαλίες με συνεχείς γραμμές και αρνητικές ανωμαλίες με διακεκομμένες γραμμές ανά 20m) στα 850 hPa. Περίοδος αναφοράς: 12 UTC Ιουλίου και Αυγούστου 1959-2020. (Data:Era5)

Η μετεωρολογική παρατήρηση του φαινομένου του καύσωνα, δηλαδή της μεταφοράς των θερμών αερίων μαζών, εκτός από τις κατώτερες στάθμες της ατμόσφαιρας (στα 850 hPa-περίπου στα 1500 μέτρα), γίνεται και μέσω των ανώτερων επιπέδων (στα 500 hPa), στα οποία παρατηρούνται υψηλά γεωδυναμικά ύψη. Για το λόγο αυτό, στη συνέχεια ετοιμάστηκαν οι χάρτες της θερμοκρασίας του αέρα και του γεωδυναμικού ύψους για την ανώτερη ατμόσφαιρα (500 hPa) (Σχήμα 3.5 και Σχήμα 3.6).

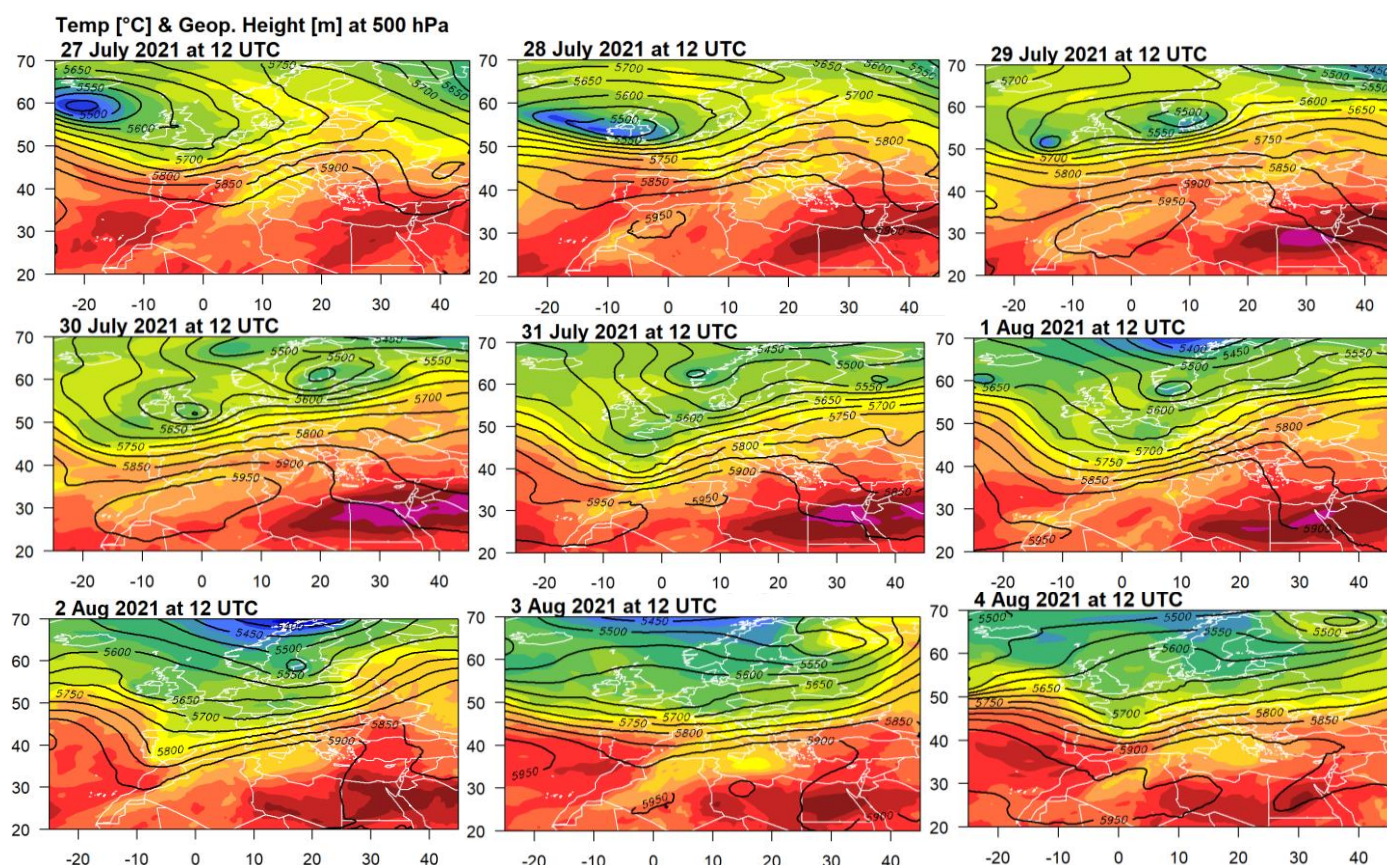
Στο Σχήμα 3.5 απεικονίζονται οι μέσες ημερήσιες θερμοκρασίες και τα γεωδυναμικά ύψη στο επίπεδο των 500 hPa τις ημέρες πριν τον καύσωνα της Ελλάδας, κατά τη διάρκεια του, αλλά και μετά την προσπέλαση του. Αυτό που διακρίνεται αισθητά είναι η ύπαρξη υψηλών θερμοκρασιών νότια της περιοχής μελέτης, οι οποίες τις δύο πρώτες περιόδους φτάνουν τους 0 °C και με αυτές να ερμηνεύονται ως μια πιθανή περιοχή με έντονες καθοδικές κινήσεις. Όσον αφορά το γεωδυναμικό ύψος, φαίνεται ότι υπάρχει ζωνική ροή πάνω από την περιοχή μελέτης πριν την εμφάνιση του καύσωνα, ενώ στη Βόρεια Αφρική παρατηρείται ένα κέντρο υψηλών υψών (5950m). Αυτό το κέντρο είναι η αιτία για την κατολισθήση των αέριων μαζών, οι οποίες προκαλούν θέρμανση στα κατώτερα στρώματα. Κατά τη διάρκεια της θερμής εισβολής τα κύματα Rossby δημιουργούν μία ράχη (ridge) με γεωδυναμικό ύψος 5900 μέτρα πάνω από την ελληνική περιοχή, η οποία όμως δεν είναι έντονη (δεν έχει μεγάλη έκταση) ώστε να επηρεάσει την υπόλοιπη Ευρώπη. Αυτή η ράχη ήταν ο λόγος της πρόκλησης αντικυκλωνικής ροής στην ευρύτερη περιοχή μελέτης. Εκείνη τη χρονική περίοδο (ημέρες καύσωνα) η θερμοκρασία σε αυτό το ισοβαρικό επίπεδο στην Ελλάδα είναι μικρότερη (περίπου -9 °C) συγκριτικά με την προηγούμενη περίοδο και η πτώση που καταγράφεται οφείλεται στην κλίση καθ' ύψος που παρατηρείται στα συνοπτικά συστήματα. Η περίοδος μετά τον καύσωνα χαρακτηρίζεται από περαιτέρω μείωση των θερμοκρασιών στην περιοχή μελέτης. Γενικότερα, η εικόνα που παρατηρείται στα γεωδυναμικά ύψη, λίγο πριν την έναρξη του καύσωνα αλλά και κατά τη διάρκεια του, είναι μία συνήθης εικόνα για τους καύσωνες της νοτιοανατολικής Ευρώπης. Μάλιστα, η ανάλυση ορισμένων περιπτώσεων καύσωνα στην Ελλάδα φανερώνει τον πρωτεύοντα ρόλο που διαδραματίζουν, στη γένεση συνθηκών καύσωνα, οι αντικυκλωνικές κινήσεις του αέρα στην ανώτερη ατμόσφαιρα, λόγω της αδιαβατικής θέρμανσης που αυτές συνεπάγονται (Σπύρου, 2000).

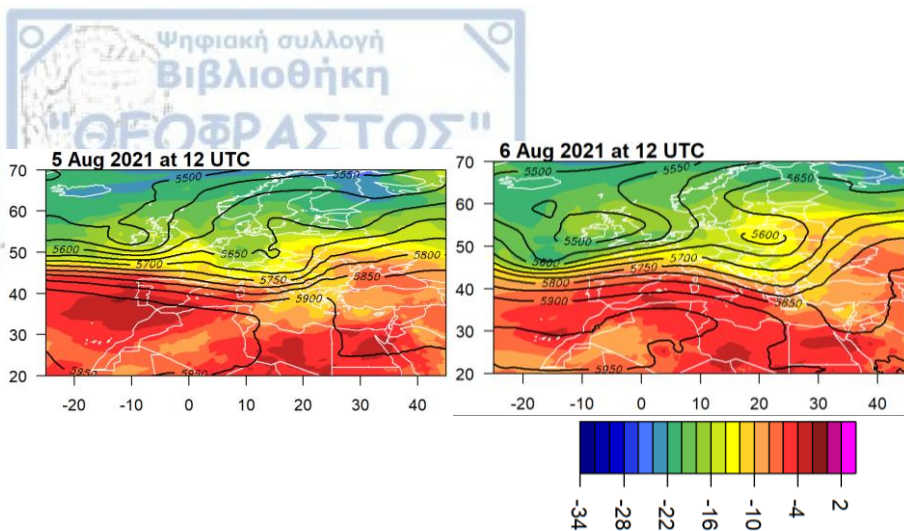


Σχήμα 3.5: Μέση ημερήσια χωρική κατανομή της θερμοκρασίας (°C, χρωματική κλίμακα) και του γεωδυναμικού ύψους (m, μαύρες γραμμές ανά 50m) στα 500 hPa για τις τρεις χρονικές περιόδους, ομοίως με το Σχήμα 3.1. (Data: Era5)

Στο Σχήμα 3.6 απεικονίζονται οι ίδιες μεταβλητές για τις 12 UTC για κάθε μία ημέρα του καύσωνα, καθώς και μία ημέρα πριν και μία ημέρα μετά. Όσον αφορά τα γεωδυναμικά ύψη την πρώτη ημέρα του καύσωνα, στην περιοχή της βορειοδυτικής Αφρικής εμφανίζεται ένα κέντρο των υψών το οποίο παραμένει τη μεγαλύτερη περίοδο της θερμής μεταφοράς. Αυτά τα υψηλά ύψη που παρατηρούνται γενικότερα στην ευρύτερη περιοχή της νότιας Ευρώπης, προκαλούν κατολισθήσεις των αερίων μαζών, οι οποίες προσθέτουν περισσότερη θερμότητα στα κατώτερα στρώματα. Αυτό το σύστημα επιπλέον προκαλεί μείωση της

ταχύτητας του ανέμου φέρνοντας ουρανούς χωρίς σύννεφα, και σε συνδυασμό με τη μεταφορά ξηρού αέρα από την Βόρεια Αφρική, οδηγούν σε αύξηση της θερμοκρασίας. Παράλληλα, τις πρώτες μέρες του καύσωνα, πάνω από την περιοχή μελέτης εμφανίζεται μία ράχη (ridge), η οποία διαδίδεται με αργούς ρυθμούς προς τα ανατολικά, με αυτήν να προκαλεί νοτιοδυτική ροή πάνω από την εξεταζόμενη περιοχή. Κατά το ίδιο χρονικό διάστημα οι θερμοκρασίες στο επίπεδο των 500 hPa αρχίζουν σταδιακά να αυξάνονται και από περίπου -8 να φτάνουν τους -6 °C, ενώ νότια της Ελλάδας παρατηρείται ένα θερμοκρασιακό κέντρο το οποίο από -2 φτάνει τους 2 °C την 1^η Αυγούστου του 2021. Στις 2 Αυγούστου 2021 η ροή άρχισε να μετατρέπεται σε ζωνική, με τη θερμοκρασία να μειώνεται σταδιακά πέφτοντας και πάλι στους -11 °C, σε αντίθεση με τη θερμοκρασία στα 850 hPa η οποία καταγράφει άνοδο εκείνη τη χρονική περίοδο. Αυτό οφείλεται, όπως έχει ήδη αναφερθεί, στην κλίση κατά ύψος που παρουσιάζουν τέτοια συστήματα. Επιπλέον σύμφωνα με επιστημονικές έρευνες, όταν οι κορυφογραμμές διαδίδονται αργά στην κατεύθυνση της ζώνης, ευνοούν και διατηρούν διαδικασίες που εντείνουν ανωμαλίες της χαμηλότερης τροποσφαιρικής θερμοκρασίας και οδηγούν σε παρατεταμένες ακραίες θερμοκρασίες στην επιφάνεια (Kunkel et al., 1996). Αυτός ίσως, ήταν ο λόγος της μεγάλης διάρκειας του καύσωνα αυτού (9 ημέρες). Όταν η ροή έγινε ζωνική πάνω από την περιοχή μελέτης, ο καύσωνας άρχισε να εξασθενεί.



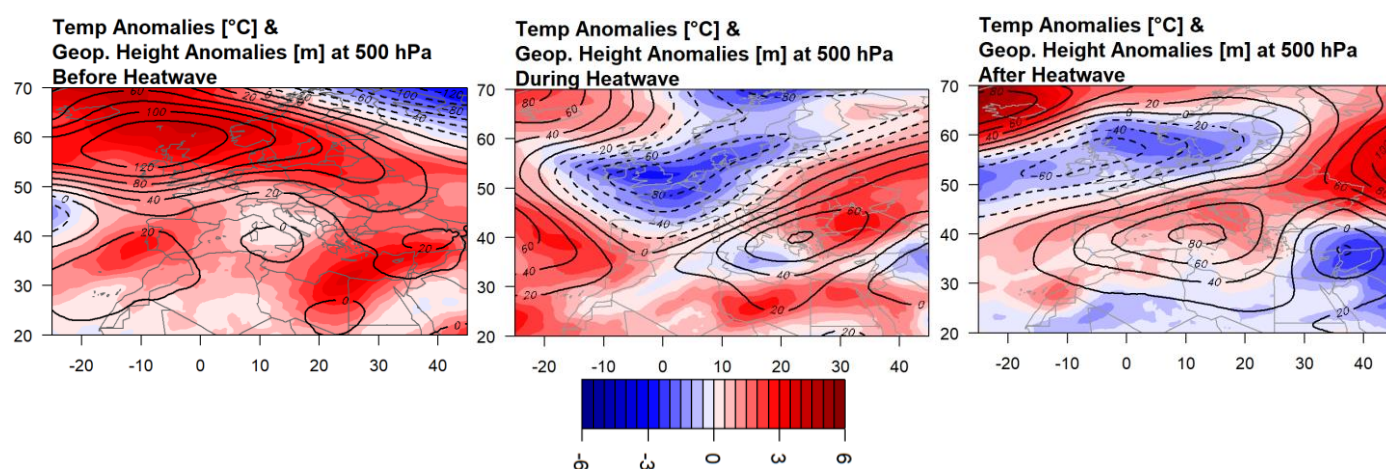


Σχήμα 3.6: Χωρική κατανομή των θερμοκρασιών ($^{\circ}\text{C}$, χρωματική κλίμακα) και των γεωδυναμικών υψών (m, μαύρες γραμμές ανά 50m) στα 500 hPa από τις 27 Ιουλίου έως τις 6 Αυγούστου 2021. (Data: Era5)

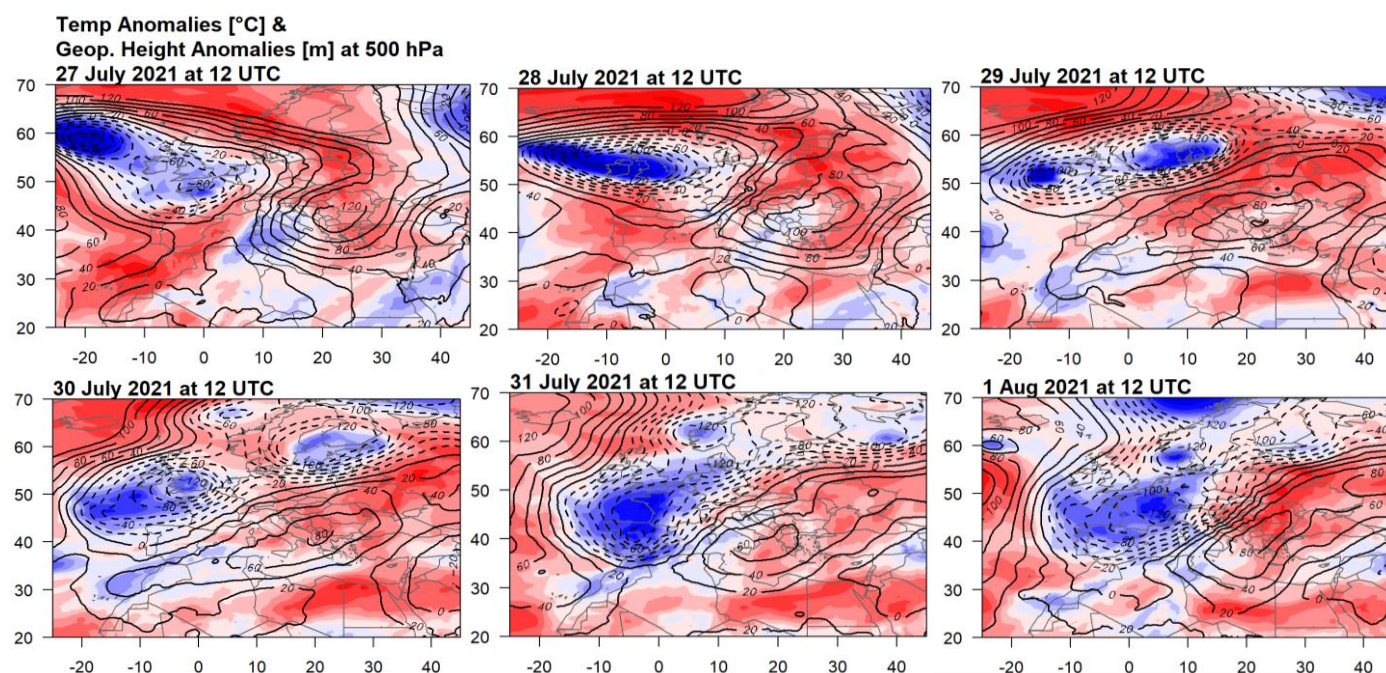
Η άνοδος της θερμοκρασίας στα 500 hPa έως την 1^η Αυγούστου και η μετέπειτα πτώση της από τις 2 Αυγούστου, επιβεβαιώνεται και μέσω των θερμοκρασιακών ανωμαλιών στο ίδιο ισοβαρικό επίπεδο (Σχήμα 3.8). Οι θερμοκρασιακές ανωμαλίες συνδυάζονται με τις γεωδυναμικές ανωμαλίες στα 500 hPa (Σχ.3.7 και Σχ.3.8), διότι σύμφωνα με τους Stefanon et al. (2012), το χωρικό μοτίβο της ανωμαλίας του γεωδυναμικού ύψους των 500 hPa συσχετίζεται ισχυρά με την ανωμαλία της θερμοκρασίας της επιφάνειας. Πιο αναλυτικά, ήδη από τις 27 Ιουλίου, οι ανωμαλίες της θερμοκρασίας παρουσιάζουν θετικό πρόσημο στην ευρύτερη περιοχή της Ελλάδας, φτάνοντας τους 4°C , ενώ από τις 2 Αυγούστου και μέχρι την τελευταία ημέρα του καύσωνα οι θερμοκρασιακές ανωμαλίες είναι αρνητικές, φτάνοντας τελικά στις 5 Αυγούστου (τελευταία ημέρα του καύσωνα) να βρίσκονται στους -4°C κάτω από την κλιματολογία (Σχήμα 3.8). Η παράμετρος των ανωμαλιών του γεωδυναμικού ύψους των 500 hPa ήταν και εκείνη υψηλότερα από το συνηθισμένο ($+60\text{m}$) ήδη από τις 24 Ιουλίου του 2021, με το κέντρο των θετικών ανωμαλιών να εντοπίζεται πάνω από την Ιταλία (δεν φαίνεται στους χάρτες). Στη συνέχεια μετακινείται προς την περιοχή της Ελλάδας, όπου στις 25/7 βρίσκεται στα βόρεια της και τότε 25-26 Ιουλίου αρχίζει να δυναμώνει (80-100 μέτρα). Την ημέρα πριν την έναρξη του καύσωνα στην Ελλάδα, το κέντρο των θετικών ανωμαλιών γεωδυναμικού ύψους (συνεχείς γραμμές) φτάνει τη μέγιστη τιμή του ξεπερνώντας τα 120 μέτρα. Σταδιακά από τις 28 Ιουλίου αρχίζει να μειώνεται, ώσπου την τελευταία μέρα του καύσωνα φτάνει τα 70 μέτρα θετικής ανωμαλίας. Στις 6 Αυγούστου, πάνω από το μεγαλύτερο μέρος της περιοχής μελέτης, βρίσκονται αρνητικές γεωδυναμικές ανωμαλίες περίπου 20 μέτρων (διακεκομμένες γραμμές).

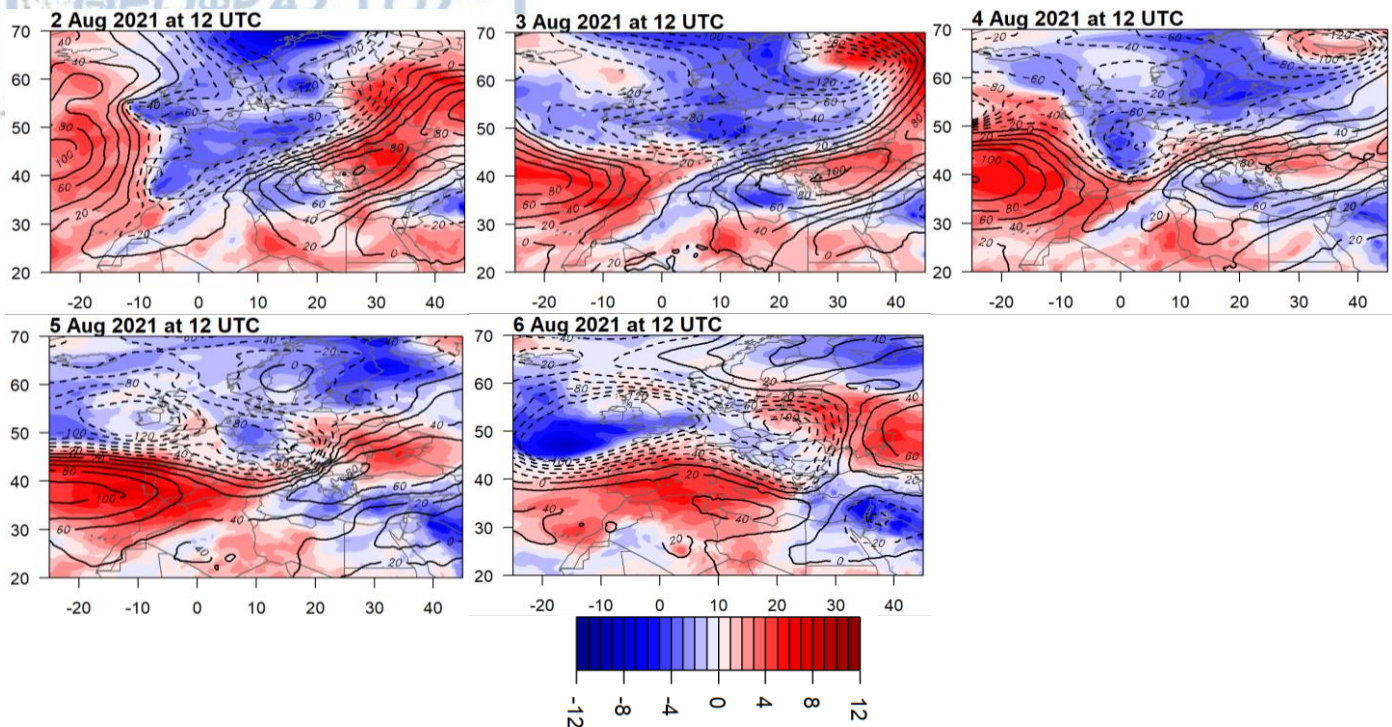
Συγκρίνοντας τις μέσες θερμοκρασιακές και γεωδυναμικές ανωμαλίες κατά τη διάρκεια της θερμής εισβολής με τις χρονικές περιόδους πριν και μετά από αυτήν (Σχήμα 3.7), γίνεται αντιληπτό ότι καθ' όλη τη διάρκεια του καύσωνα καταγράφεται ένα θετικό κέντρο γεωδυναμικών ανωμαλιών πάνω από την Ελληνική περιοχή (80 μέτρα). Ωστόσο, όπως ελέγχθηκε με βάση τις ημερήσιες αναλύσεις, αυτό το κέντρο βρισκόταν στην περιοχή μελέτης ήδη από τις 25 Ιουλίου του 2021. Με αυτόν τον τρόπο σχηματίζεται ένα δίπολο γεωδυναμικών ανωμαλιών, με θετικό πρόσημο στην περιοχή μελέτης και αρνητικό πρόσημο στην ευρύτερη περιοχή της Αγγλίας (Σχήμα 3.7). Την πρώτη χρονική περίοδο, δηλαδή πριν την έναρξη του καύσωνα, στη βορειοδυτική Ευρώπη και συγκεκριμένα βόρεια της Αγγλίας παρατηρείται μία θετική ανωμαλία των υψών όπου το κέντρο της ξεπέρασε τα 120 μέτρα.

Στην ίδια περιοχή αυτή η αντικυκλωνική ροή είχε παρατηρηθεί και στην ισοβαρική επιφάνεια των 850 hPa, η οποία συνεχίζει να συνοδεύεται και στα 500 hPa από υψηλές θερμοκρασιακές ανωμαλίες (6 °C). Ταυτόχρονα, πάνω από την ελληνική περιοχή καταγράφονται ισχυρές θερμοκρασιακές ανωμαλίες (+5 °C), οι οποίες είναι ελαφρώς πιο θετικές σε σχέση με την περίοδο του καύσωνα (+2 °C) και την περίοδο μετά από αυτόν (+1 °C). Με το πέρας της θερμής μεταφοράς η αντικυκλωνική ροή παραμένει στην περιοχή της Μεσογείου (το κέντρο πάνω από την Ιταλία), κάνοντας με αυτόν τον τρόπο εμφανή τη διατήρηση του δίπολου, το οποίο είναι εμφανώς μετατοπισμένο και ο αρνητικός του πόλος ελαφρώς εξασθενημένος (κατά 20 μέτρα). Γενικά, η εικόνα που παρατηρήθηκε στα 500 hPa είναι η ίδια με αυτήν των 850 hPa (Σχήμα 3.3), φανερώνοντας και πάλι τη μετακίνηση ενός Αντικυκλώνα προς την περιοχή μελέτης.



Σχήμα 3.7: Μέση ημερήσια χωρική κατανομή των θερμοκρασιακών ανωμαλιών (°C, χρωματική κλίμακα) και των ανωμαλιών του γεωδυναμικού ύψους (m, θετικές ανωμαλίες με συνεχείς γραμμές και αρνητικές ανωμαλίες με διακεκομμένες γραμμές ανά 20m) στα 500 hPa για τρεις χρονικές περιόδους, ομοίως με το Σχήμα 3.3.





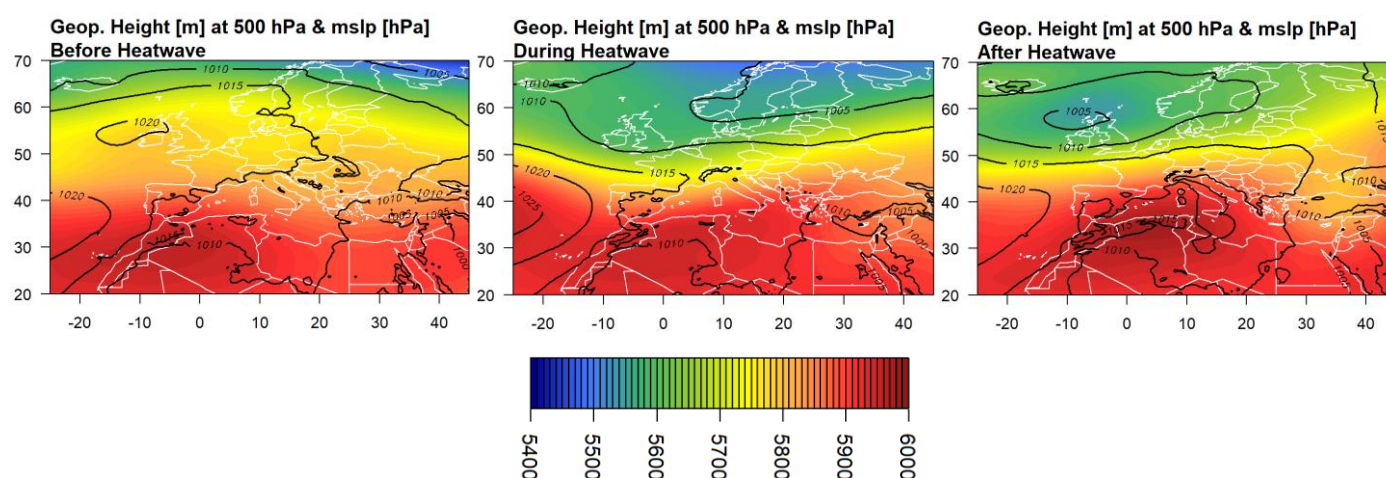
Σχήμα 3.8: Χωρική κατανομή των ανωμαλιών της θερμοκρασίας ($^{\circ}\text{C}$, χρωματική κλίμακα) και του γεωδυναμικού ύψους (m, μαύρες γραμμές) στα 500 hPa, ομοίως με το Σχήμα 3.4.

Στη συνέχεια, εξετάζεται η πίεση στη μέση στάθμη της θάλασσας (mslp) ημερησίως κατά τη διάρκεια του καύσωνα (Σχήμα 3.10), καθώς και η μέση τιμή της για την περίοδο της θερμής εισβολής, πριν και μετά από αυτήν (Σχήμα 3.9). Η πίεση στη μέση στάθμη της θάλασσας εξετάζεται, δεδομένου ότι οι αντικυκλώνες (Υψηλό Βαρομετρικό) στο επίπεδο αυτό φαίνεται να παίζουν σημαντικό ρόλο κατά τη διάρκεια πολλών Ευρωπαϊκών καυσώνων.

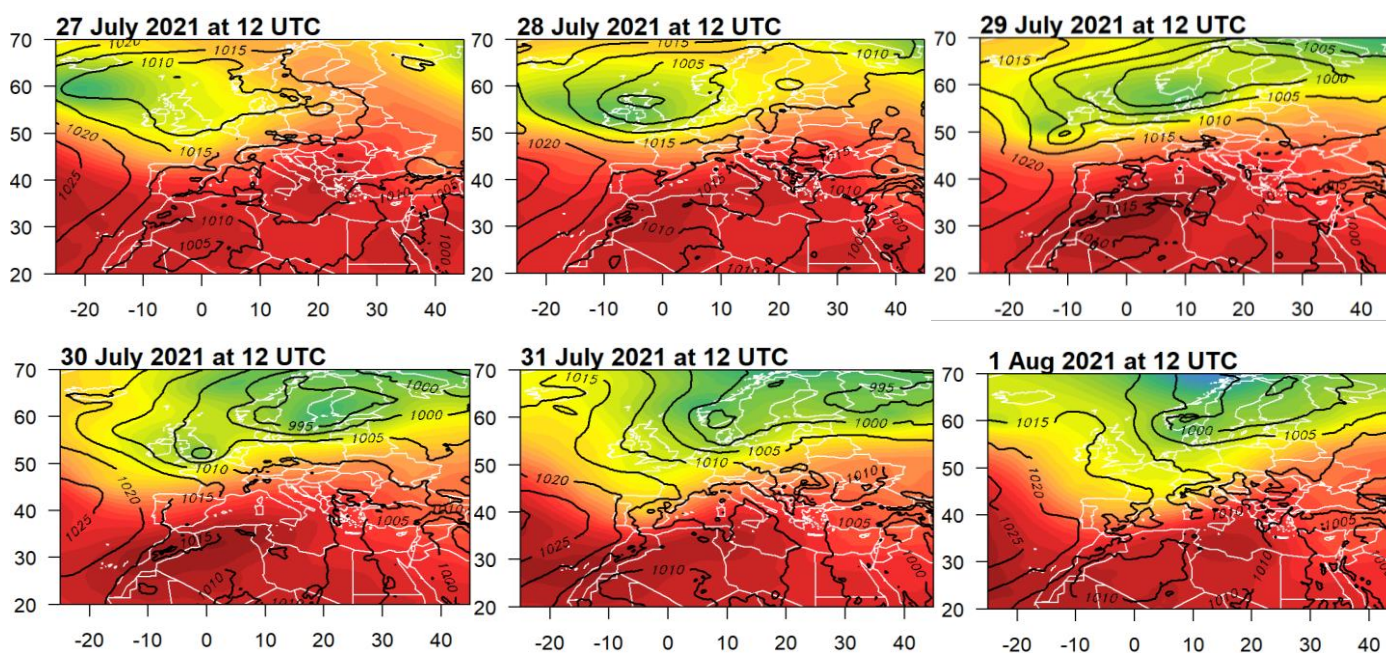
Τη χρονική περίοδο πριν την έναρξη της θερμής εισβολής καταγράφονται υψηλές πιέσεις στα Βορειοδυτικά της Ευρώπης (>1015 hPa) ως μία επέκταση του αντικυκλώνα των Αζορών, ενώ στο νοτιοανατολικό τμήμα της παρουσιάζονται πιέσεις που κυμαίνονται στα 1010 hPa. Τη χρονική περίοδο της θερμής μεταφοράς, στο μεγαλύτερο τμήμα της Ευρώπης, οι πιέσεις που καταγράφονται είναι περίπου 1010 hPa. Τα αποτελέσματα αυτά συμφωνούν με τα ευρήματα της Σπύρου (2000), όπου έδειξε ότι κατά τη διάρκεια καυσώνων στην Ελλάδα δεν παρατηρούνται ισχυρά κέντρα υψηλών βαρομετρικών κοντά στην περιοχή μελέτης. Επιπλέον, κατά τη διάρκεια του καύσωνα που μελετάται, ο αντικυκλώνας των Αζορών είχε μικρότερη έκταση συγκριτικά με τις χρονικές περιόδους πριν και μετά από αυτόν. Παρόλα αυτά, η μέση τιμή του κέντρου του είναι μεγαλύτερη (>1025 hPa) από τις άλλες δύο περιόδους.

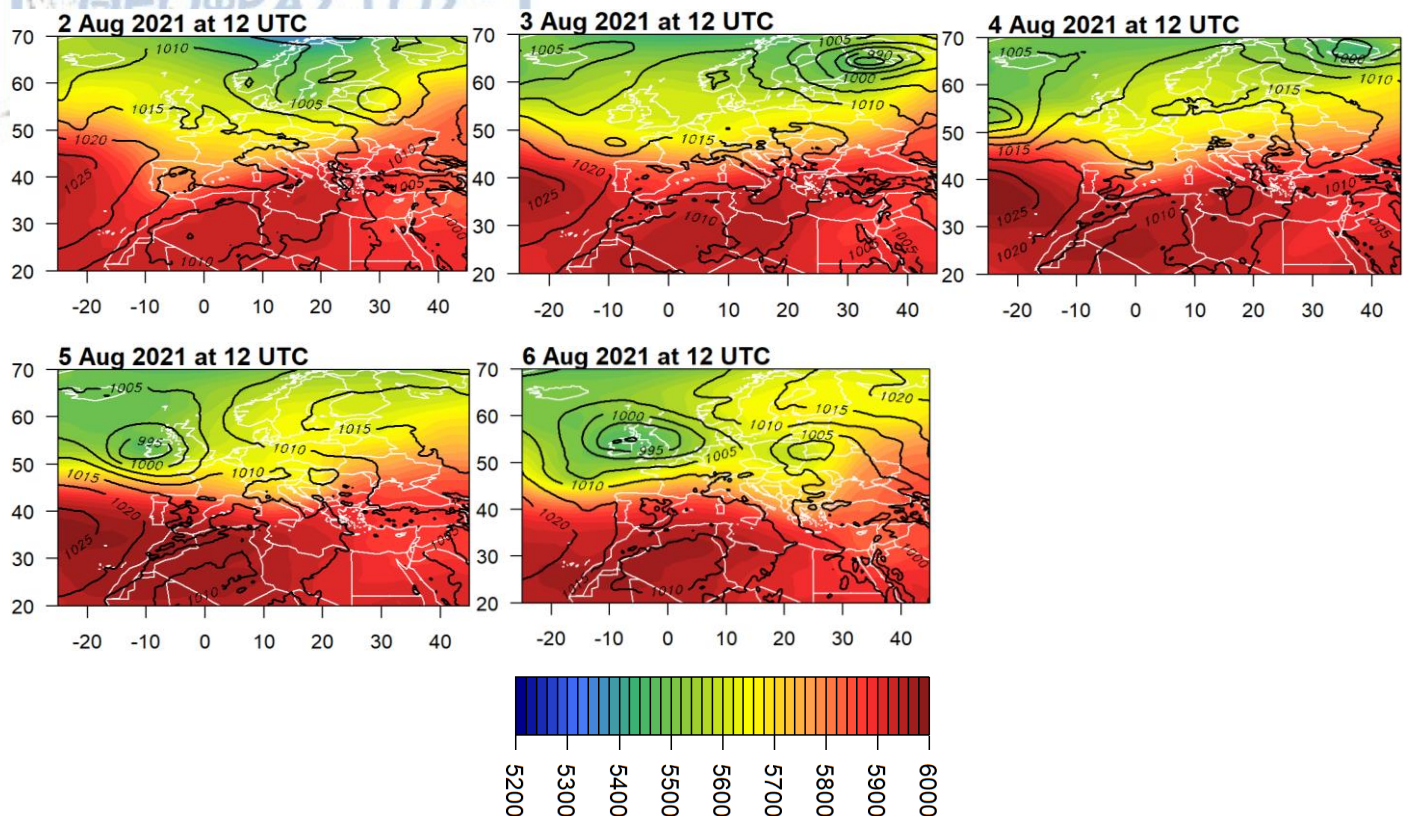
Ωστόσο, είναι ιδιαίτερα ενδιαφέρον και χρήζει διευκρινίσεως ότι, παρόλο που οι πιέσεις που επικρατούν την περίοδο του καύσωνα κυμαίνονται στα 1010 hPa, την ημέρα έναρξης του καύσωνα καθώς και την επόμενη ημέρα, ο αντικυκλώνας των Αζορών εκτείνεται μέχρι την περιοχή της Ελλάδας, ξεπερνώντας τα 1015 hPa πάνω από την περιοχή μελέτης (Σχήμα 3.10). Το σύστημα αυτό προκάλεσε σύγκλιση θερμών αέριων μαζών από τα νοτιοδυτικά προς την περιοχή αυτή. Μετά την υποχώρηση της προέκτασης του αντικυκλώνα τις επόμενες ημέρες, στις 2 Αυγούστου το κέντρο του αντικυκλώνα ξεκίνησε πάλι να

προεκτείνεται μέχρι την Ιταλία και την επόμενη ημέρα (3/8) να επηρεάζει ξανά την περιοχή μελέτης (1015 hPa). Επομένως, η αντικυκλωνική κυκλοφορία που εντοπίστηκε στα υψηλότερα επίπεδα (850 & 500 hPa) δεν εμφανίζεται τόσο έντονα στο επίπεδο της επιφάνειας. Τα αποτελέσματα αυτά συμφωνούν με τα ευρήματα της Σπύρου (2000), όπου σύμφωνα με την κλιματολογική της έρευνα για τους καύσωνες στην περιοχή της Ελλάδας, φαίνεται ότι στην επιφάνεια η Ελλάδα είναι δυνατόν να επηρεάζεται από ομαλό βαρομετρικό πεδίο ή από ασθενή αντικυκλώνα με κέντρο πάνω από την δυτική Ευρώπη κατά τη διάρκεια των καυσώνων. Επιπρόσθετα, στα βόρεια της ελληνικής περιοχής η ροή είναι ζωνική (Σχήμα 3.9), εμποδίζοντας με αυτόν το τρόπο οι αέριες μάζες να κινηθούν σε μεγαλύτερα γεωγραφικά πλάτη. Στην περιοχή της βόρειας Ευρώπης γίνεται φανερή η διέλευση χαμηλών βαρομετρικών κέντρων ως απόρροια της μοναδικής διεξόδου προς τα ανατολικά των υγρών αέριων μαζών που προέρχονται από τον Ατλαντικό.



Σχήμα 3.9: Μέσο ημερήσιο γεωδυναμικό ύψος στα 500 hPa (m, χρωματική κλίμακα) και μέση πίεση στη μέση στάθμη της θάλασσας (hPa, μαύρες γραμμές ανά 5 hPa) για τρεις χρονικές περιόδους ομοίως με το Σχήμα 3.1. (Data: Era5)



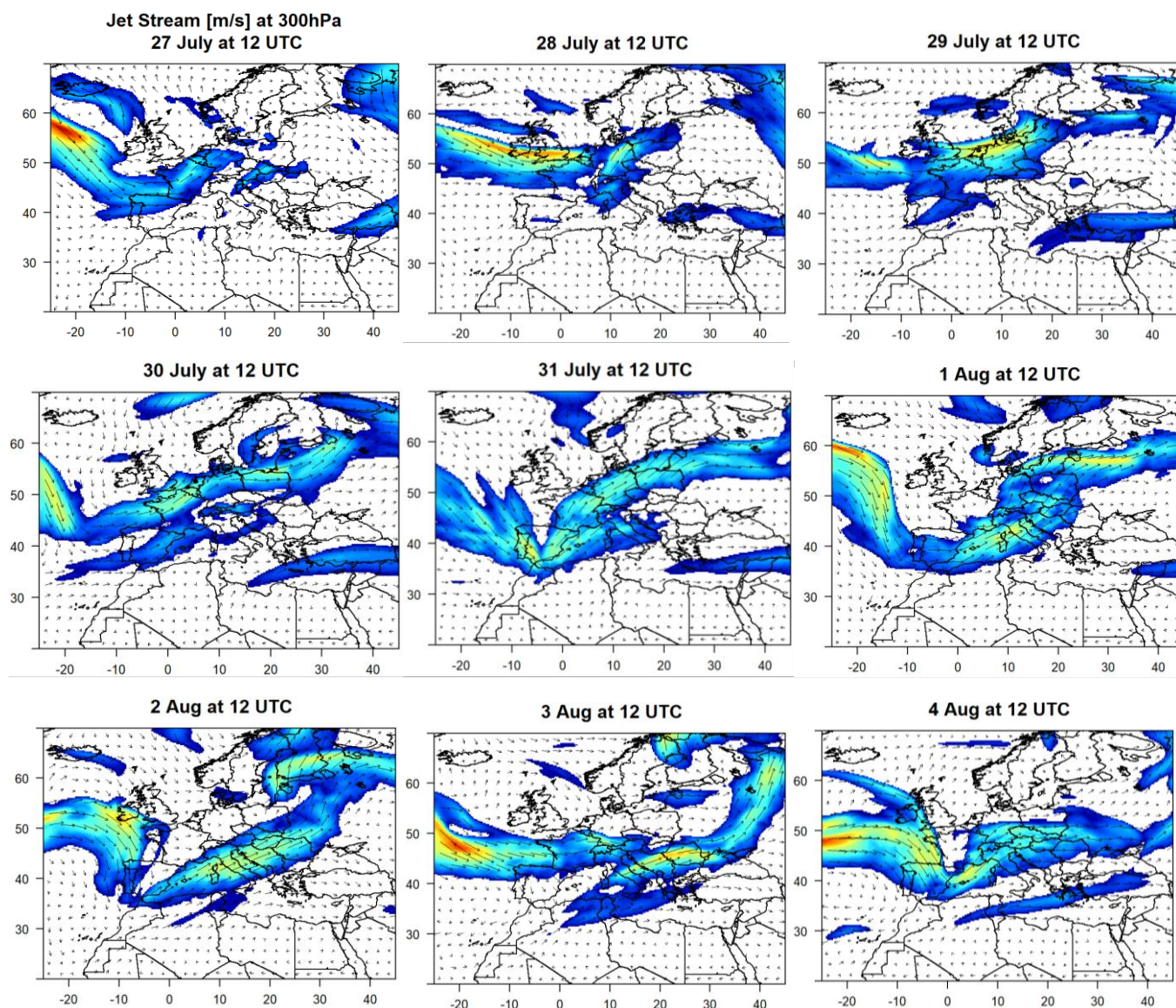


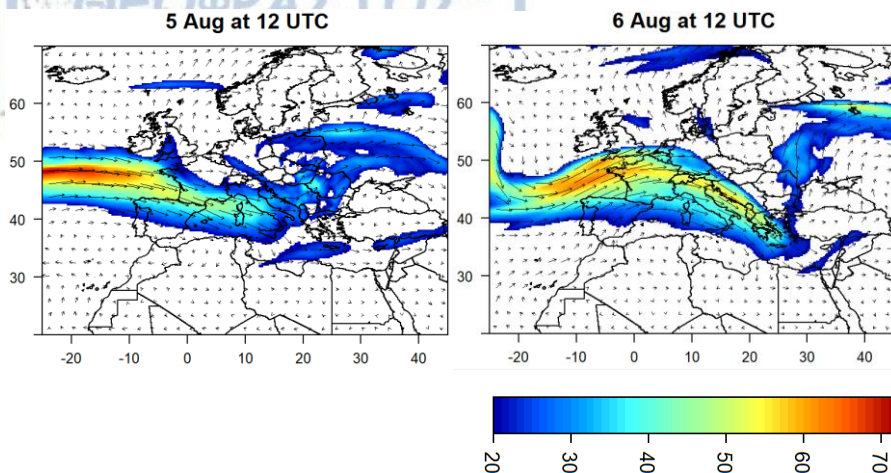
Σχήμα 3.10: Γεωδυναμικό ύψος στα 500 hPa (m, χρωματική κλίμακα) και πίεση στη μέση στάθμη της θάλασσας (hPa, μαύρες γραμμές ανά 5 hPa) από τις 27/7/2021 έως 6/8/2021 ανά 24 ώρες (12 UTC).

Άλλος ένας παράγοντας, που όπως έχει αναφερθεί στο Κεφάλαιο 1, μπορεί να επηρεάσει την ένταση του καύσωνα στις περιοχές της Ανατολικής Μεσογείου, είναι η θέση του υποτροπικού αεροχειμάρρου (Jetstream) (Brikas et al., 2006). Κατά συνέπεια, στο Σχήμα 3.11 έχει τυπωθεί το ανεμολογικό πεδίο στην ισοβαρική επιφάνεια των 300 hPa, για τον εντοπισμό του. Οι ταχύτητες που εμφανίζονται με τη χρωματική κλίμακα στο Σχήμα 3.11 είναι από 20m/s και άνω, καθώς οι μικρότερες ταχύτητες θεωρούνται πολύ χαμηλές για να ονομαστεί αεροχειμάρρος (Jetstream) το σχετικό ρεύμα ανέμου.

Μελετώντας το Σχήμα 3.11, στις 27 Ιουλίου του 2021 καταγράφονται δύο κλάδοι του υποτροπικού αεροχειμάρρου, με το βορειότερο να βρίσκεται στις 65° Β και 20° Δ και ο δεύτερος στις 45° Β και 10° Δ, οι οποίοι στις 29 Ιουλίου συνενώνονται. Καθώς σταδιακά (27-31/7) το Jetstream διαδίδεται προς τα βορειοανατολικά, σύμφωνα με το Σχήμα 3.2 γίνεται φανερό ότι οι τροπικές αέριες μάζες ακολουθούν την πορεία του υποτροπικού αεροχειμάρρου. Επομένως, η βόρεια μετατόπιση του αεροχειμάρρου, που παρατηρείται τις πρώτες ημέρες του καύσωνα στην Ελλάδα, συνδέεται με το γεγονός της θερμής μεταφοράς προς τα βόρεια. Όταν ο αεροχειμάρρος φτάσει τις 55° βόρεια της περιοχής μελέτης, η θερμή εισβολή εμποδίζεται να μετακινηθεί βορειότερα (Σχήμα 3.2). Επιπλέον, στις 30 Ιουλίου δημιουργείται μία κυκλωνική καμπυλότητα (45° Β και 20° Δ), η οποία σταδιακά μετακινείται προς τα ανατολικά. Από τις 2 Αυγούστου, ο αεροχειμάρρος αρχίζει να περιορίζεται προς τα νότια, συνεχίζοντας να παραμένει ωστόσο βόρεια της Ελλάδας, ενώ ταυτόχρονα οι τιμές της ταχύτητας του ανέμου αυξάνονται, φτάνοντας στις 3 Αυγούστου τη μέγιστη τιμή τους τα

60m/s ($60 \times 3,6 = 216$ km/h). Η κίνηση του αεροχειμάρρου προς τα νότια προκαλεί και την σταδιακή υποχώρηση της θερμής εισβολής στα υψηλότερα επίπεδα της ατμόσφαιρας, αφού την εμποδίζει να κινηθεί προς τα μεγαλύτερα γεωγραφικά πλάτη. Γενικότερα, από την 1^η έως τις 5 Αυγούστου, όπου ο αεροχειμάρρος παραμένει βόρεια της Ελλάδας και σιγά σιγά υποχωρεί, τότε παρατηρούνται οι μέγιστες θερμοκρασιακές ανωμαλίες στην ισοβαρική επιφάνεια των 850 hPa (Σχήμα 3.4). Στις 6 Αυγούστου, δηλαδή την πρώτη ημέρα μετά την λήξη του καύσωνα, ο αεροχειμάρρος βρίσκεται πλέον πάνω από την ελληνική περιοχή ελαφρώς αντικυκλωνικά καμπυλώμενος. Με αυτόν το τρόπο υποχωρεί ξανά στην κλιματολογική του θέση και επέρχεται η λήξη του καύσωνα. Η θέση του υποτροπικού αεροχειμάρρου σύμφωνα με την Κλιματολογία είναι 37° Β, και όταν βρίσκεται ο αεροχειμάρρος σε αυτήν τη θέση η Μεσόγειος γενικότερα είναι σχετικά δροσερή. Τα αποτελέσματα έρχονται σε συμφωνία με τα αποτελέσματα των Brikas et al. (2006), οι οποίοι συμπεράναν ότι σε περίοδο καυσώνων η περιοχή της Ανατολικής Μεσογείου επηρεάζεται από τη θέση του υποτροπικού αεροχειμάρρου.



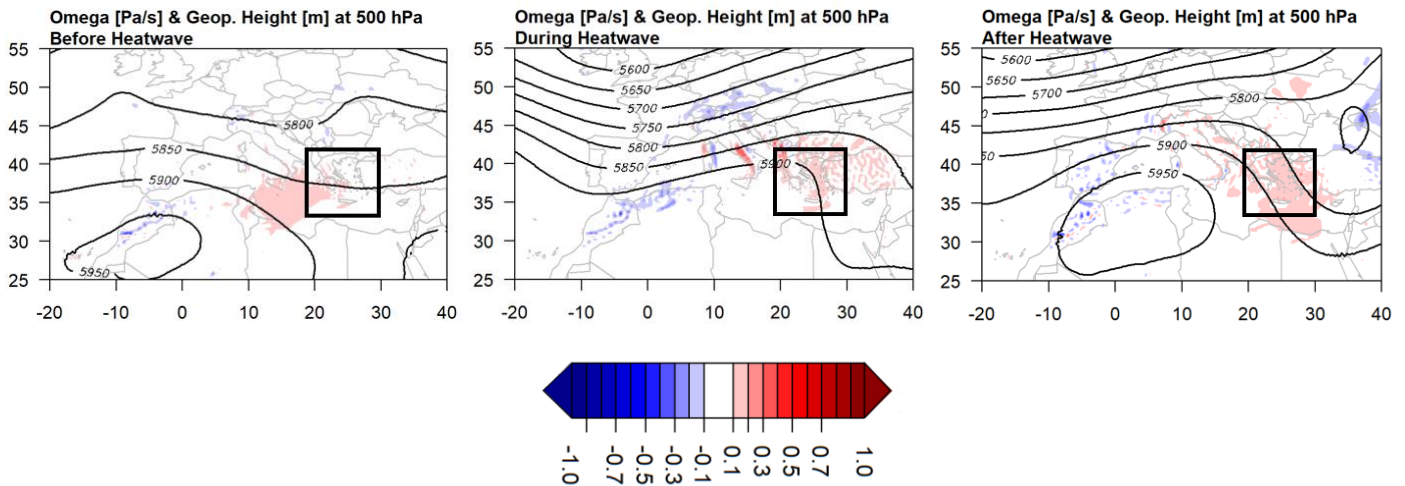


Σχήμα 3.11: Οριζόντιος άνεμος(U,V) (m/s, μαύρα βέλη) στα 300 hPa από τις 27/7/2021 έως τις 6/8/2021 ανά 24 ώρες (12 UTC). Άνω των 20m/s φαίνεται η θέση του υποτροπικού αεροχειμάρρου (m/s, χρωματική κλίμακα). (Data: Era5)

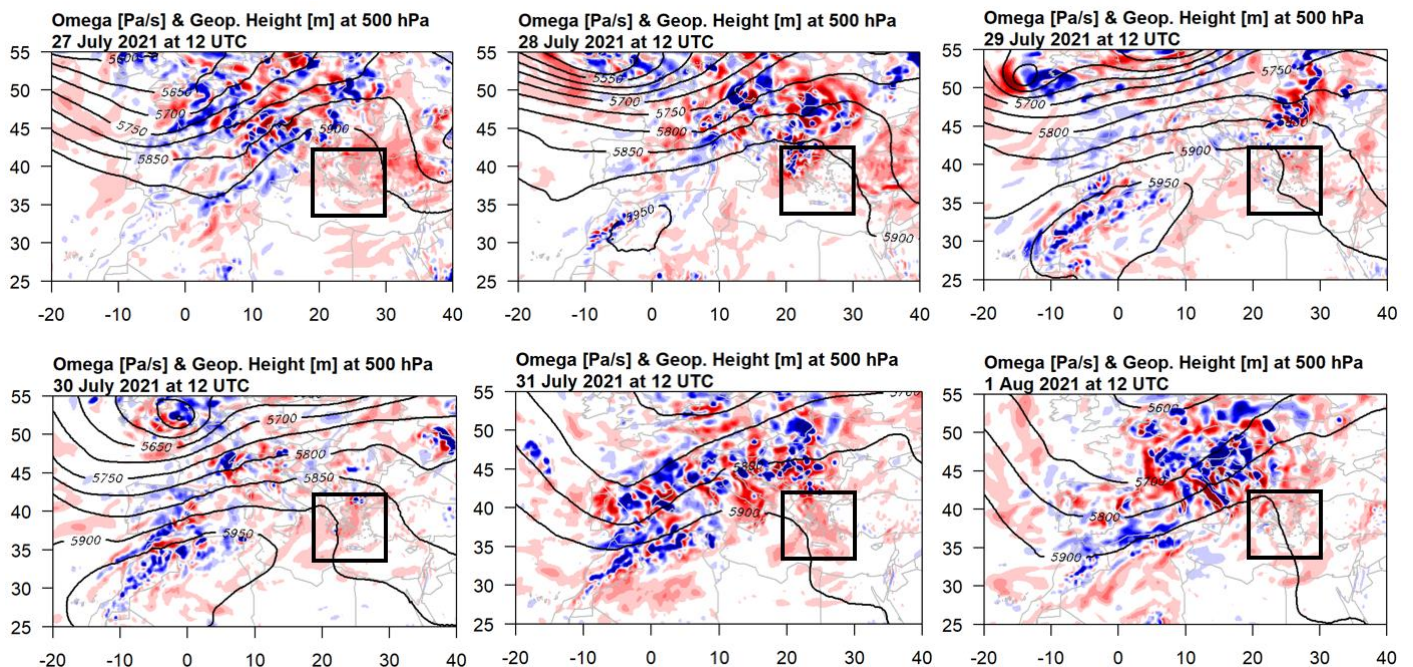
Τα Σχήματα 3.12 και 3.13 δείχνουν την κατακόρυφη ταχύτητα (ωμέγα) στα 500 hPa, όπου οι θετικές τιμές του ωμέγα υποδηλώνουν καθοδικές κινήσεις (ζώνη καθίζησης), ενώ οι αρνητικές τιμές δηλώνουν ότι η περιοχή βρίσκεται σε μια ζώνη ανοδικής κίνησης. Αυτό συμβαίνει διότι το ολοκληρωμένο σύστημα Προγνώσεων ECMWF (IFS) χρησιμοποιεί ένα σύστημα κατακόρυφων συντεταγμένων που βασίζεται στην πίεση, η οποία ως γνωστόν μειώνεται κατά ύψος.

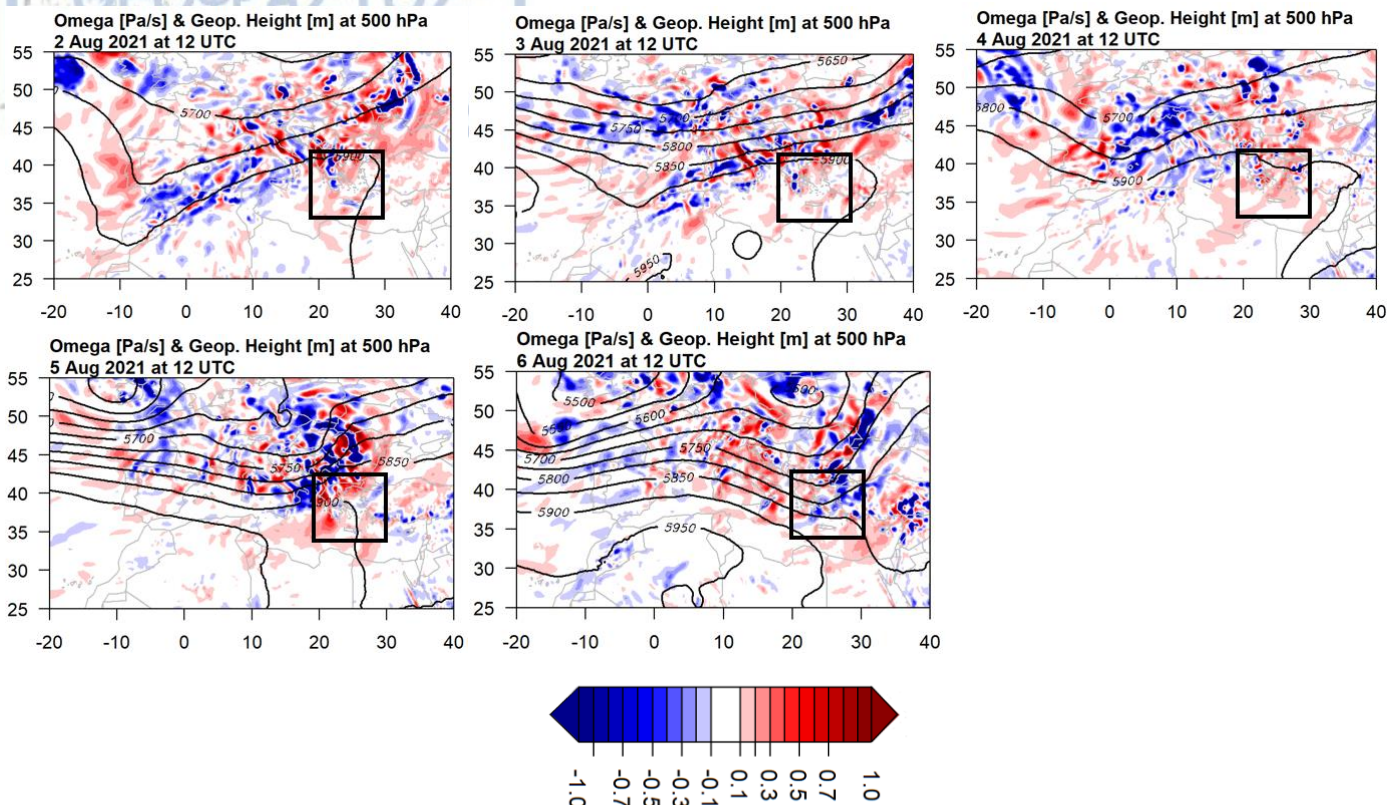
Σύμφωνα με τα αποτελέσματα, καθ' όλη τη διάρκεια της θερμής εισβολής, στο μεγαλύτερο τμήμα της χώρας καταγράφονται καθοδικές κινήσεις με μέση τιμή 0,2 Pa/s (Σχήμα 3.12). Στον καύσωνα, οι υψηλότερες θετικές κατακόρυφες μεταφορές αέριων μαζών από τα ανώτερα στρώματα προς την επιφάνεια συμβαίνουν δύο χρονικές περιόδους. Η πρώτη είναι στις 28 Ιουλίου του 2021, η οποία φαίνεται να είναι λόγω των υψηλών πιέσεων ms1p που επικρατούν κοντά στην περιοχή μελέτης, ενώ η δεύτερη είναι στις 2 έως 5 Αυγούστου 2021 με αυτήν να οφείλεται στη θέση του υποτροπικού αεροχειμάρρου. Πιο αναλυτικά, την ημέρα πριν την έναρξη του καύσωνα, σε όλη την έκταση της ελληνικής περιοχής καταγράφονται θετικές τιμές κατακόρυφης ταχύτητας και επομένως κίνηση αέριων μαζών από τα ανώτερα στρώματα της ατμοσφαιράς προς το έδαφος (Σχήμα 3.13). Την πρώτη ημέρα του καύσωνα (28/7) οι θετικές τιμές του ωμέγα φτάνουν το 1Pa/s, ενώ καταγράφονται και αρνητικές τιμές (-0,9 Pa/s) στα βορειοδυτικά τμήματα της χώρας. Το επόμενο χρονικό διάστημα (29/7-1/8), η χωρική κατανομή του ωμέγα διαμορφώνεται με ασθενέστερες θετικές τιμές (0,3-0,6 Pa/s), ενώ την περίοδο 2 έως 5 Αυγούστου οι τιμές είναι σταθερά υψηλές φτάνοντας και πάλι το 1 Pa/s. Αυτή η χρονική στιγμή ταυτίζεται με την υποχώρηση του αεροχειμάρρου προς τα νότια, ενώ ταυτόχρονα περιοχές από το δυτικό τμήμα της χώρας αναπτύσσουν ανοδικές κινήσεις των αέριων μαζών οι οποίες φτάνουν τα -1,5 Pa/s. Επιπλέον, είναι αναγκαίο να υπογραμμιστεί ότι οι υψηλότερες κατακόρυφες κινήσεις (1Pa/s), πέραν των δύο προαναφερόμενων χρονικών περιόδων, συμπίπτουν χρονικά και με την ύπαρξη ενός κέντρου υψηλών γεωδυναμικών υψών στα 850 hPa, το οποίο τις συγκεκριμένες ημερομηνίες (28/7 και 2-5/8) όπως έχει φανεί παρουσιάζει τη μικρότερη του απόσταση από τον ελληνικό χώρο (Σχήμα 3.1). Με την λήξη του καύσωνα, στο μεγαλύτερο τμήμα της χώρας, καταγράφονται αρνητικές τιμές κατακόρυφων κινήσεων. Ωστόσο και οι τρεις περίοδοι (πριν-

κατά τη διάρκεια – και μετά τον καύσωνα) απαρτίζονται με θετικές μέσες τιμές ωμέγα, με μόνη διαφορά τη θέση αυτού του κέντρου θετικών τιμών (Σχήμα 3.12). Τη χρονική περίοδο πριν τη θερμή μεταφορά (15/7-27/7), το κέντρο των θετικών τιμών ωμέγα βρίσκεται νοτιοδυτικά της Ελλάδας, κατά τη διάρκεια της βρίσκεται πάνω από την Ελλάδα, ενώ τη χρονική περίοδο που ακολουθεί (6/8-15/8), οι θετικές τιμές βρίσκονται στην ελληνική περιοχή αλλά και νοτιοανατολικά της.



Σχήμα 3.12: Μέση ημερήσια κατακόρυφη ταχύτητα (Pa/s με θετικές τιμές να αντιπροσωπεύουν τις καθοδικές κινήσεις και με αρνητικές τιμές τις ανοδικές κινήσεις, χρωματική κλίμακα) και γεωδυναμικό ύψος (m, μαύρες γραμμές ανά 50m) στα 500 hPa για τις τρεις χρονικές περιόδους, ομοίως με το Σχήμα 3.1. (Data: Era5)





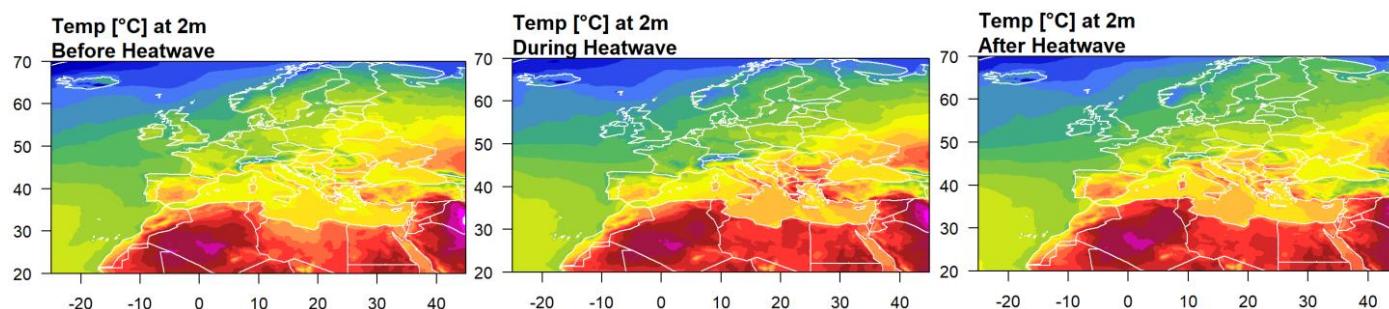
Σχήμα 3.13: Κατακόρυφη ταχύτητα (Pa/s, χρωματική κλίμακα) και γεωδυναμικό ύψος (m, μαύρες γραμμές ανά 50m) στα 500 hPa από 27/7/2021 έως 6/8/2021 ανά 24 ώρες (12 UTC).

Οι ατμοσφαιρικές συνθήκες που αναλύθηκαν, όπως οι οριζόντιες κινήσεις στα μεσαία στρώματα και την ανώτερη τροπόσφαιρα αλλά και οι καθοδικές κινήσεις των αερίων μαζών, που προέκυψαν λόγω των πιέσεων στην μέση στάθμη της θάλασσας αλλά και της θέσης του αεροχειμάρρου, συνέβαλαν στην αύξηση της επιφανειακής θερμοκρασίας (T2m). Η επίδραση αυτή αποτυπώνεται στο Σχήμα 3.14 όπου μεσοποιούνται οι ημερήσιες θερμοκρασίες επιφανείας για τις τρεις περιόδους (πριν – κατά τη διάρκεια του καύσωνα – μετά από αυτόν). Επομένως, εξάγεται το συμπέρασμα ότι την περίοδο της θερμής εισβολής οι θερμοκρασίες της ημέρας (6-17 UTC) και της νύχτας (18-5 UTC) είναι ιδιαίτερα αυξημένες, συγκριτικά με τη χρονική περίοδο που προηγήθηκε και που ακολούθησε. Οι ελάχιστες θερμοκρασίες στα 2 μέτρα κατά τη διάρκεια της νύχτας αυξάνονται, λόγω της απελευθέρωσης της θερμότητας που συμβαίνει αργά τη νύχτα, η οποία έχει απορροφηθεί κατά τη διάρκεια της ημέρας. Επιπλέον, όπως είναι αναμενόμενο, οι μέσες θερμοκρασίες της ημέρας και της νύχτας μετά τη θερμή μεταφορά είναι υψηλότερες συγκριτικά με εκείνες πριν.

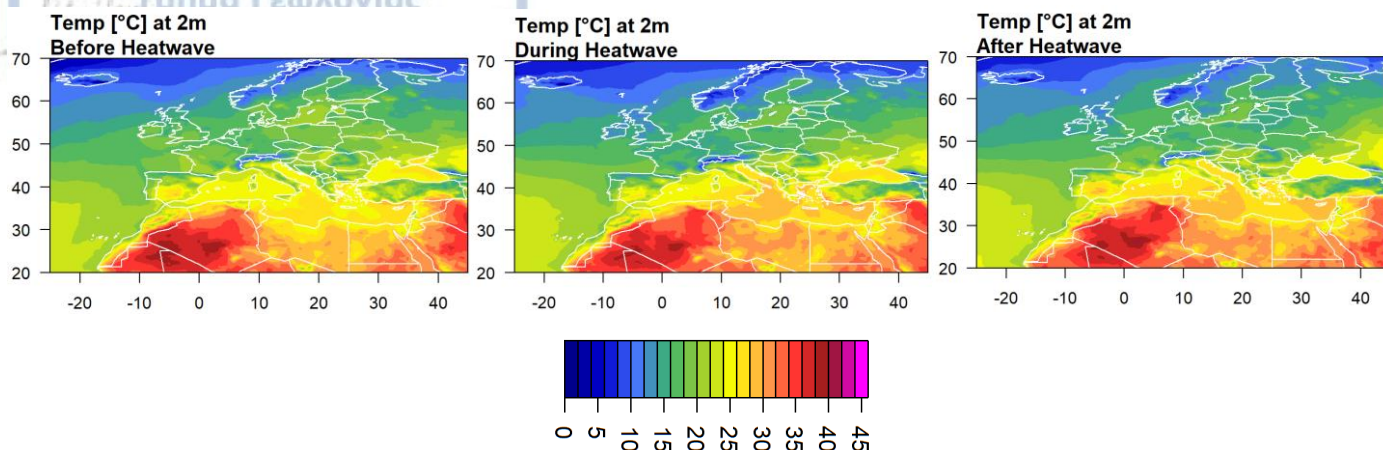
Πιο αναλυτικά, την πρώτη ημέρα του καύσωνα, η θερμοκρασία του επιφανειακού αέρα αυξήθηκε φτάνοντας έως τους 39 °C σε ορισμένες περιοχές, ξεπερνώντας κατά έναν βαθμό τα επίπεδα της προηγούμενης ημέρας, και ενεργοποιώντας έτσι την έναρξη του καύσωνα (Σχήμα 3.15). Τις επόμενες ημέρες οι θερμοκρασίες στα 2 μέτρα από το έδαφος συνέχισαν να αυξάνονται σταδιακά, ενώ ορισμένες περιοχές της Ελλάδας, όπως η Λάρισα και η Αττική, έφτασαν σε ακραίες θερμοκρασίες άμεσα. Όσον αφορά την περιοχή της Λάρισας, η θερμοκρασία την πρώτη μέρα του καύσωνα κυμαινόταν στους 39 °C, ενώ τη δεύτερη και τη τρίτη ημέρα ξεπέρασε τους 41.5 και 43 °C αντίστοιχα. Στην Αττική οι επιφανειακές

Θερμοκρασίες, τις ίδιες μέρες, από 29 °C εκτοξεύθηκαν στους 40 °C. Οι θερμοκρασίες πάνω από την θάλασσα, τις πρώτες μέρες της θερμής μεταφοράς, παρέμειναν στα ίδια επίπεδα με πριν (25-27 °C), με αυτές να αυξάνουν πιο γρήγορα γύρω από τις ακτογραμμές, λόγω της επίδρασης της θαλάσσιας αύρας. Αυτό που αξίζει να σημειωθεί είναι ότι παρόλη τη σταδιακή αύξηση της επιφανειακής θερμοκρασίας πάνω από το έδαφος, την 1^η Αυγούστου η θερμοκρασία είχε μία μικρή πτώση περίπου κατά 1 °C, ενώ από την επομένη αυξήθηκε και πάλι ιδιαίτερα απότομα για πολλές περιοχές. Αυτές οι δύο έντονες άνοδοι της θερμοκρασίας ταυτίζονται χρονικά με τις δύο περιόδους καθοδικών κινήσεων, που εντοπίστηκαν πάνω από την περιοχή μελέτης (Σχήμα 3.13), αλλά και με την ύπαρξη ενός κέντρου υψηλών υψών στα 850 hPa κοντά στην Ελλάδα. Χαρακτηριστικό παράδειγμα της δεύτερης απότομης ανόδου είναι η περιοχή της Λάρισας και της Αθήνας, όπου ενώ την 1^η Αυγούστου η θερμοκρασία στη Λάρισα κυμάνθηκε στους 41.5 °C, στις 2 και 3 Αυγούστου οι θερμοκρασίες ξεπέρασαν τους 44 και 44.5 °C αντίστοιχα. Στην Αττική ομοίως από τους 39 °C (1/8), στις 2/8 και 3/8 κυμάνθηκαν στους 41 και 43 °C αντίστοιχα. Τα αποτελέσματα αυτά βρίσκονται πολύ κοντά στα δεδομένα της ΕΜΥ, που σύμφωνα με αυτά οι μέγιστες θερμοκρασίες που καταγράφηκαν στο Θησείο ήταν 43.9 °C και στη Λάρισα 44 °C. Γενικότερα, καθώς το jet stream πλησιάζει την περιοχή της Ελλάδας αντικυκλωνικά καμπυλώμενος, οι επιφανειακές θερμοκρασίες φαίνεται να αυξάνονται σταδιακά στην πλειονότητα των ελληνικών περιοχών. Η θέση του αεροχειμάρρου προκαλεί ισχυρή καθίζηση και αδιαβατική θέρμανση της τροπόσφαιρας και του αέρα στα δύο μέτρα. Τα ευρήματά μας συμφωνούν με εκείνα των Brikas et al. (2006), οι οποίοι συμπέραναν ότι τα έντονα κύματα καύσωνα στα Νότια Βαλκάνια και την Ελλάδα ευνοούνται όταν ο υποτροπικός αεροχείμαρρος είναι αντικυκλωνικά καμπυλώμενος. Επιπλέον, σύμφωνα με την Σπύρου (2000), μία έντονη μετακίνηση του αεροχειμάρρου προς το βορρά συνδέεται με την περαιτέρω ενίσχυση των ακραίων θερμοκρασιών, το οποίο επαληθεύεται και στην περίπτωση μας. Από τις 4 Αυγούστου οι υψηλές θερμοκρασίες άρχισαν να μειώνονται. Την τελευταία μέρα της θερμής εισβολής (5/8), σε περιοχές όπως η Λάρισα και η Αττική τα T2m πέφτουν στους 43 και 40 °C αντίστοιχα, ενώ την επομένη οι θερμοκρασίες υποχωρούν στους 38 °C και για τις δύο περιοχές (λήξη καύσωνα). Οι υπόλοιπες πόλεις της Ελλάδας βρίσκονται θερμοκρασιακά σε ακόμα χαμηλότερα επίπεδα. Στις 6 Αυγούστου, σύμφωνα με το Σχήμα 3.11, ο άξονας του αεροχειμάρρου βρίσκεται πάνω από την ελληνική περιοχή (ελαφρώς αντικυκλωνικά καμπυλωμένος) και αυτό συνεπάγεται την υποχώρηση της θερμής εισβολής νότια της Ελλάδας (Σχήμα 3.2) και την πτώση των θερμοκρασιών στα 2 μέτρα (25-38 °C).

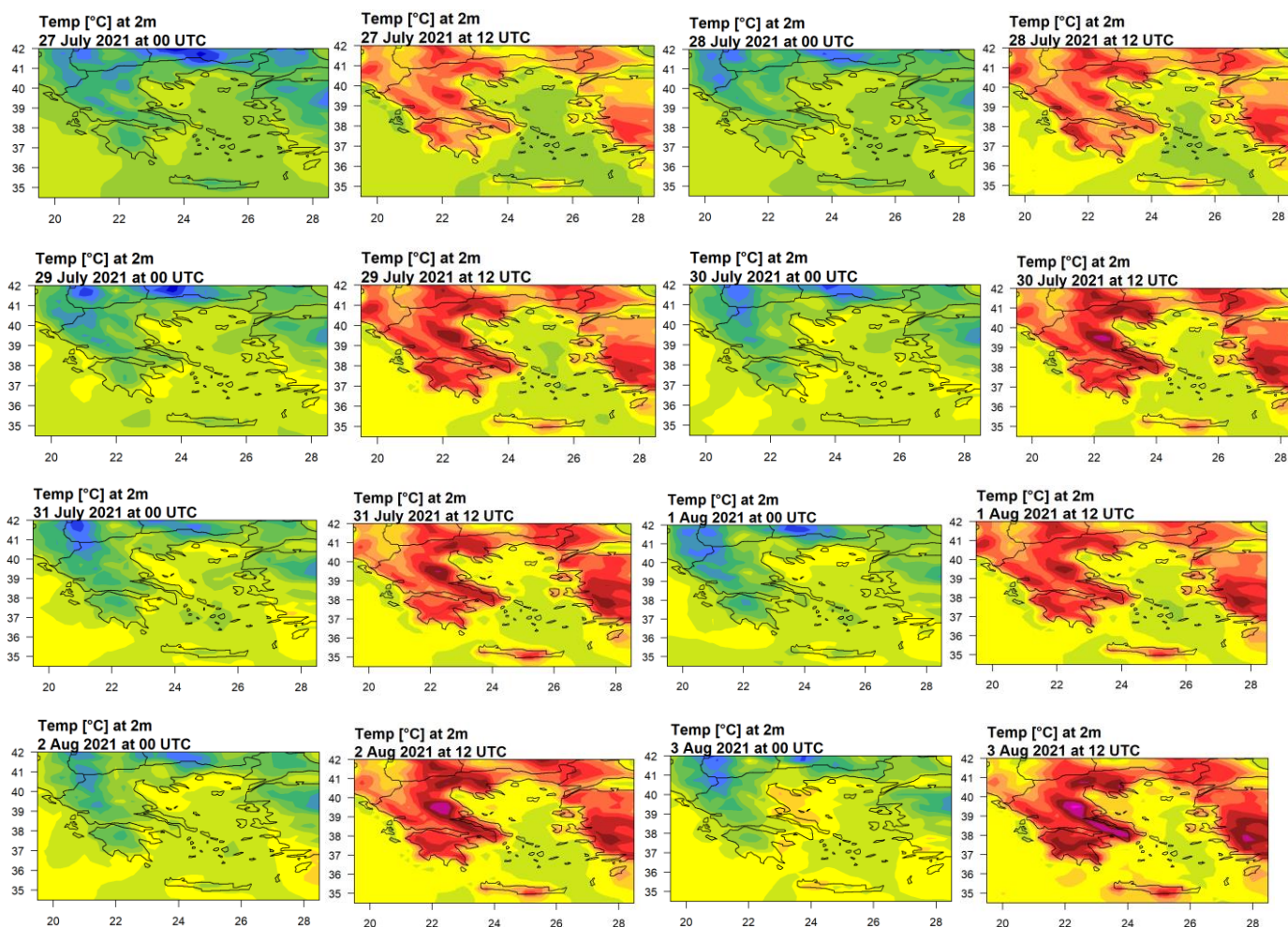
During the daylight (6-17 UTC):

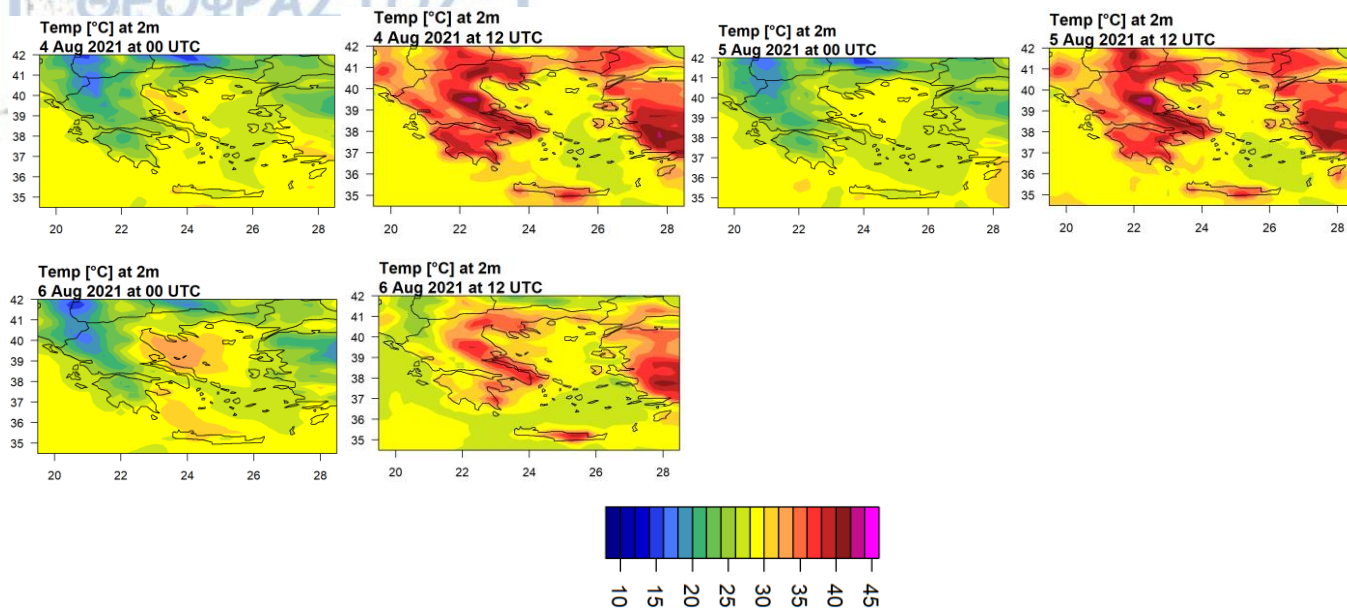


During the night (18-5 UTC):



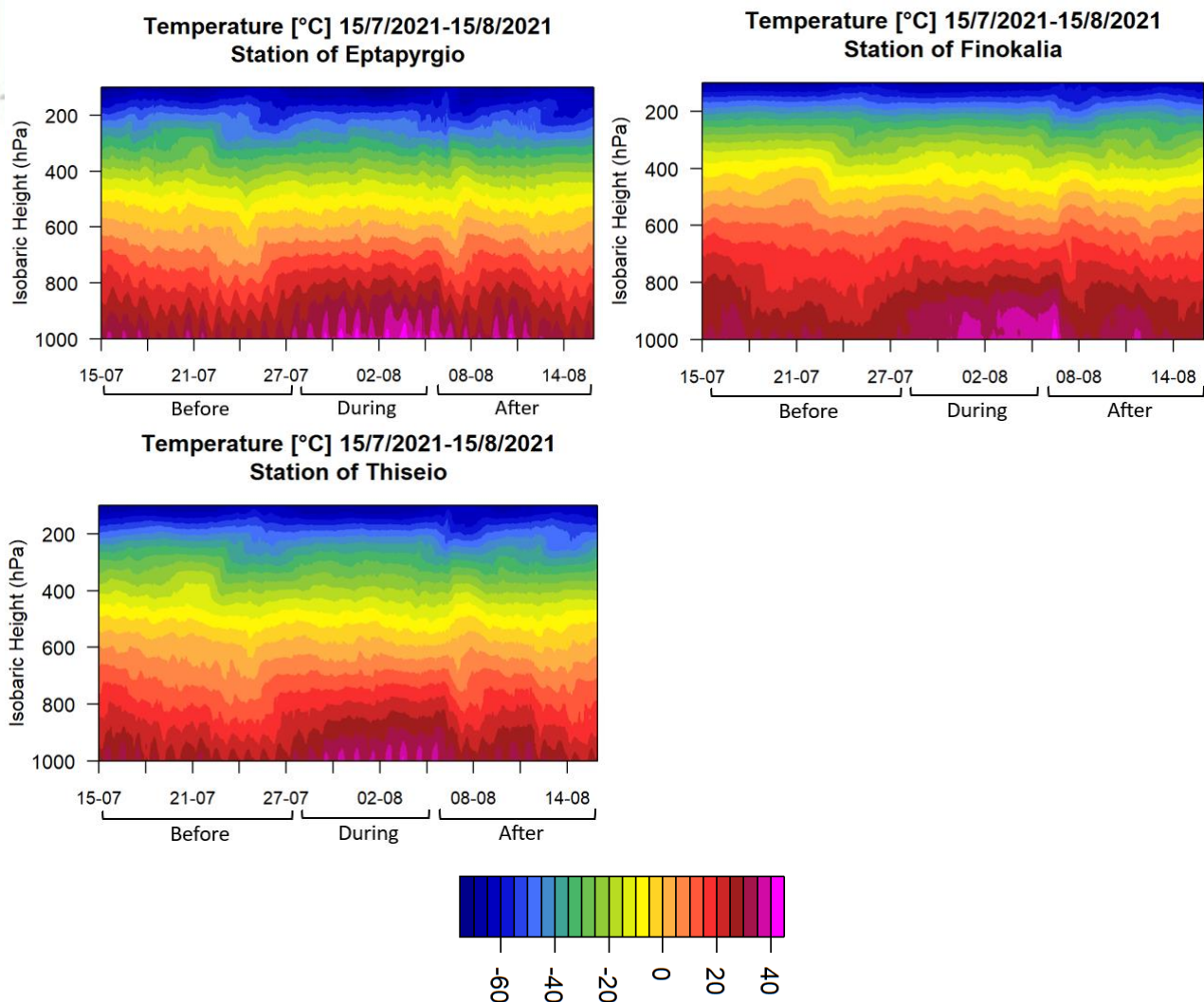
Σχήμα 3.14: Μέση ημερήσια θερμοκρασία στα 2 μέτρα από την επιφάνεια της γης (°C, χρωματική κλίμακα) κατά τις ώρες της ημέρας (6-17 UTC) και τις ώρες τις νύχτας (18-5 UTC) για τις 3 χρονικές περιόδους, ομοίως με το Σχήμα 3.1. (Data: Era5)





Σχήμα 3.15: Θερμοκρασία στα 2 μέτρα (°C, χρωματική κλίμακα) για την Ελλάδα τις ημέρες 27/7/2021 έως 6/8/2021 ανά 12 ώρες (00 και 12 UTC). (Data: Era5)

Στη συνέχεια, απεικονίζεται η χρονική εξέλιξη των θερμοκρασιών (15/7 έως 15/8) καθ' ύψος (1000 hPa έως 100 hPa), για το κοντινότερο σημείο πλέγματος (grid point) στις περιοχές του Επταπυργίου, της Φινοκαλιάς και του Θησείου (Σχήμα 3.16). Σε όλες αυτές τις περιοχές, στο ισοβαρικό ύψος των 850 hPa, διακρίνεται η θερμή μεταφορά που εξετάζεται αναλυτικά στις προηγούμενες παραγράφους. Όσον αφορά τα κατώτερα στρώματα της τροπόσφαιρας, το Επταπύργιο φαίνεται να είναι η περιοχή που επηρέασε ο καύσωνας έντονα από την πρώτη ημέρα, σε αντίθεση με τις άλλες δύο περιοχές που υπήρχε μία χρονική καθυστέρηση. Ταυτόχρονα, το Επταπύργιο φαίνεται επιπλέον να έχει επηρεαστεί περισσότερο θερμοκρασιακά καθ' ύψος συγκριτικά με τις άλλες δύο περιοχές. Στις 2 Αυγούστου καταγράφεται μία μικρή μείωση των θερμοκρασιών των χαμηλότερων στρωμάτων, η οποία αφορά και τις τρεις περιοχές μελέτης, με αυτή να εντοπίζεται και στην ανάλυση του Σχήματος 3.15. Οι θερμοκρασίες μετά τις 2 Αυγούστου του 2021 έγιναν ακόμη πιο έντονες, από το έδαφος έως τα μεσαία επίπεδα της τροπόσφαιρας (έως τα 900 hPa), ενώ συνέχισαν να παραμένουν υψηλές και μετά το πέρας της Θερμής Εισβολής. Αυτό ίσως δείχνει ότι το μεγαλύτερο ρόλο στην αύξηση καθ' ύψος των θερμοκρασιών έπαιξε η θέση του αεροχειμάρρου και η κίνηση του προς τα νότια εκείνη τη χρονική περίοδο (2/8-5/8) (Σχήμα 3.11). Στο σημείο πλέγματος που αντιπροσωπεύει την περιοχή του Θησείου φαίνεται ότι οι ακραίες θερμοκρασίες περιορίζονται κοντά στην επιφάνεια, κάτι το οποίο έρχεται σε αντίθεση με τους άλλους δύο σταθμούς. Πιο συγκεκριμένα, στους σταθμούς του Επταπυργίου και της Φινοκαλιάς, κατά τη διάρκεια του καύσωνα οι μωβ περιοχές (39-41°C) παρατηρούνται και στα υψηλότερα στρώματα (1000-850 hPa).



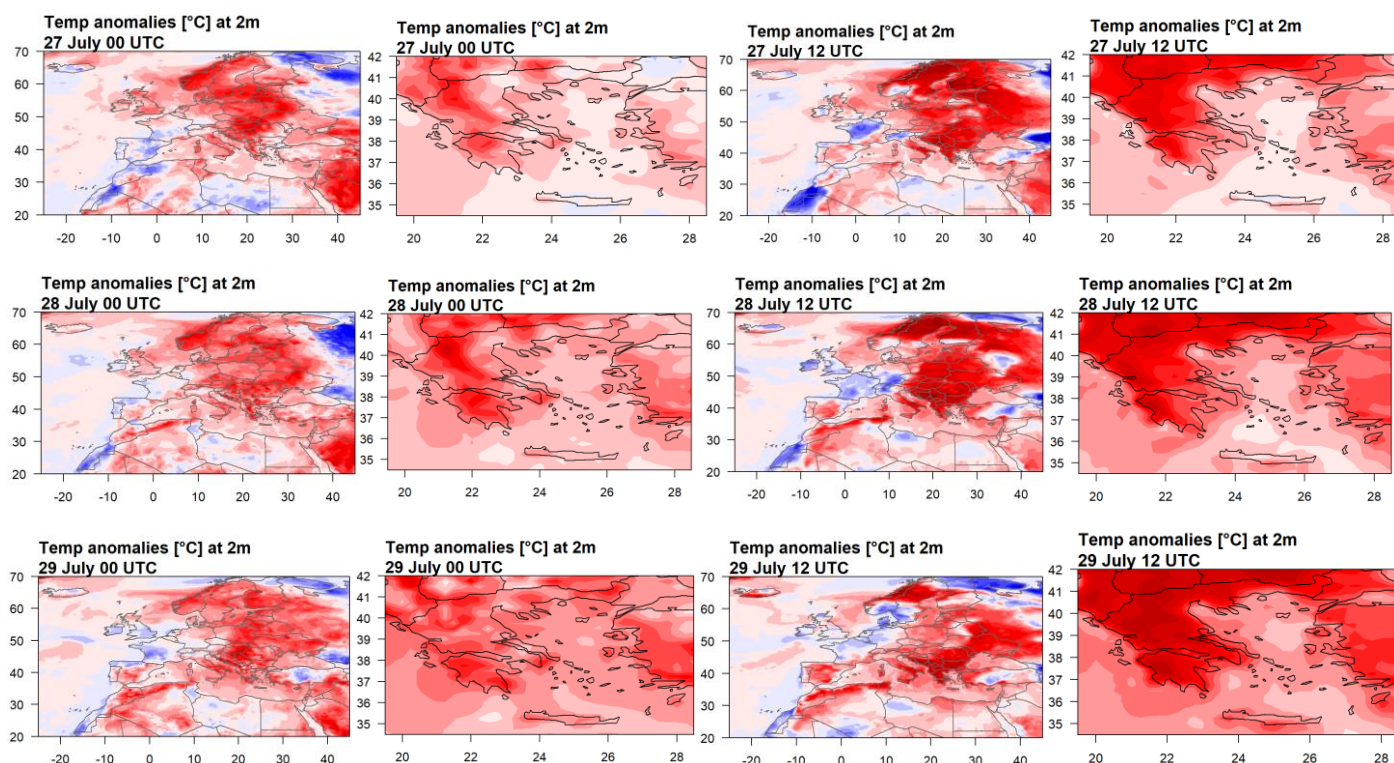
Σχήμα 3.16: Hovmöller διαγράμματα των ημερών 15/7/2021 έως 15/8/2021 της θερμοκρασίας στα 2m (°C, χρωματική κλίμακα) κατά ισοβαρικό ύψος (1000-100 hPa) για τις περιοχές: Επταπύργιο, Φινοκαλιά, Θησείο (Data: Era5)

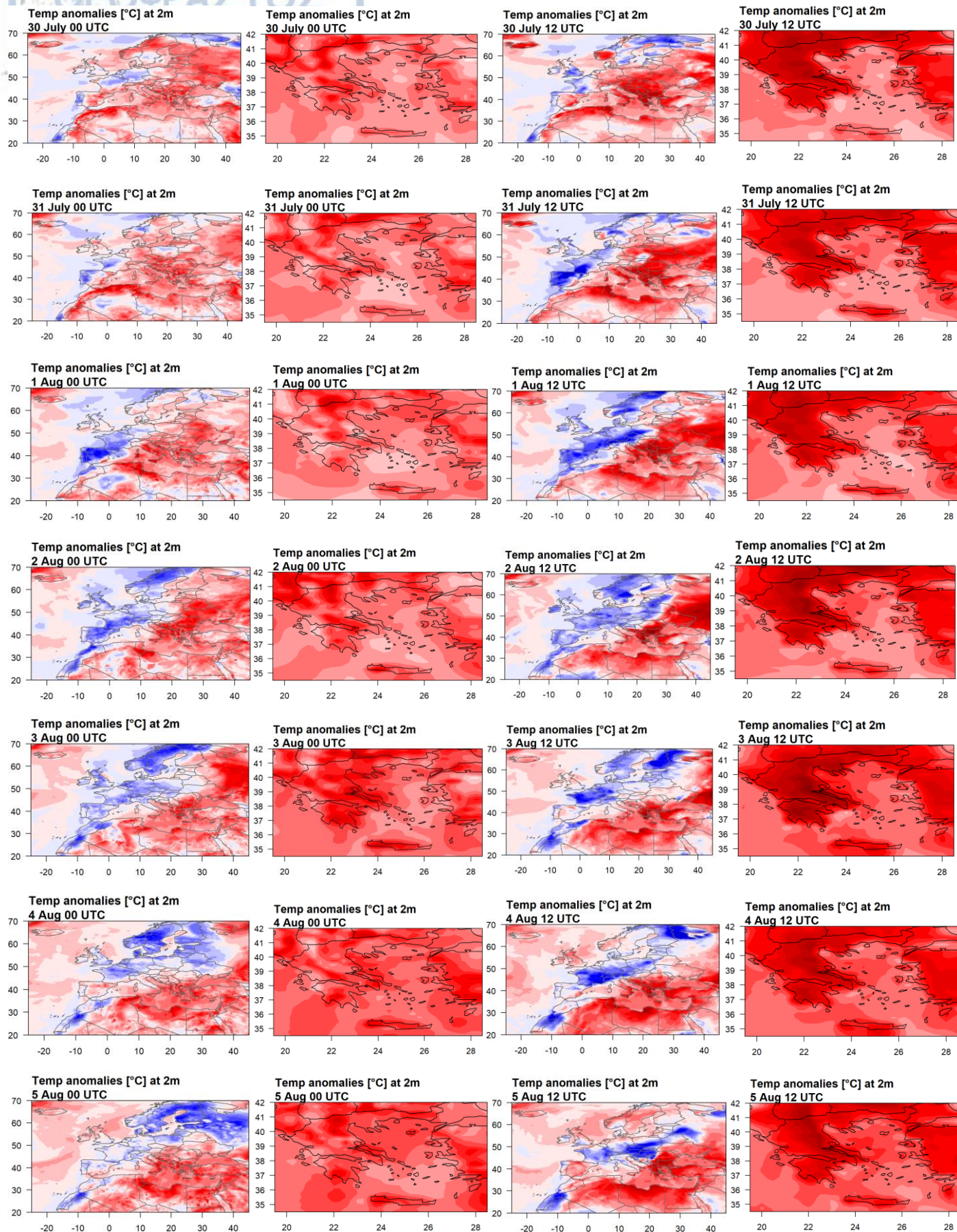
Επομένως, όλες οι συνθήκες οι οποίες έχουν αναλυθεί έως τώρα, συνέβαλαν στη δημιουργία θετικών θερμοκρασιακών ανωμαλιών στην ευρύτερη περιοχή της Ελλάδας. Άλλος ένας παράγοντας που μπορεί να προκαλέσει περαιτέρω αύξηση των θερμοκρασιών στις αστικές περιοχές και άρα των θερμοκρασιακών ανωμαλιών εκεί, είναι το φαινόμενο της αστικής θερμικής νησίδας. Στο Σχήμα 3.17 έχουν υπολογιστεί οι μέσες θερμοκρασιακές ανωμαλίες για την ημέρα και για τη νύχτα για τρεις χρονικές περιόδους (πριν, κατά τη διάρκεια και μετά τον καύσωνα). Κατά βάση, στην περιοχή της Μεσογείου, υπάρχουν θετικές θερμοκρασιακές ανωμαλίες, ανεξάρτητα από τις χρονικές περιόδους που προαναφέρονται, ή το αν είναι ημέρα ή νύχτα. Στην Ελλάδα οι θερμοκρασιακές ανωμαλίες, που καταγράφηκαν κατά τη διάρκεια της ημέρας (+5 °C) και της νύχτας (+6 °C) στον καύσωνα, είναι μεγαλύτερες συγκριτικά με το τι συνέβη τις περιόδους πριν και μετά. Ωστόσο, κάτι τέτοιο φαίνεται να μην ισχύει με τις θερμοκρασίες πάνω από τη θάλασσα στο νότιο τμήμα της χώρας, όπου φαίνεται να υπάρχει μία μικρή χρονικά καθυστέρηση στη θέρμανση του αέρα, με αποτέλεσμα οι θερμοκρασίες την τρίτη περίοδο να είναι μεγαλύτερες συγκριτικά με την περίοδο της θερμής μεταφοράς. Επιπλέον, τη νύχτα, όπως και κατά τη διάρκεια της ημέρας, οι θερμοκρασιακές

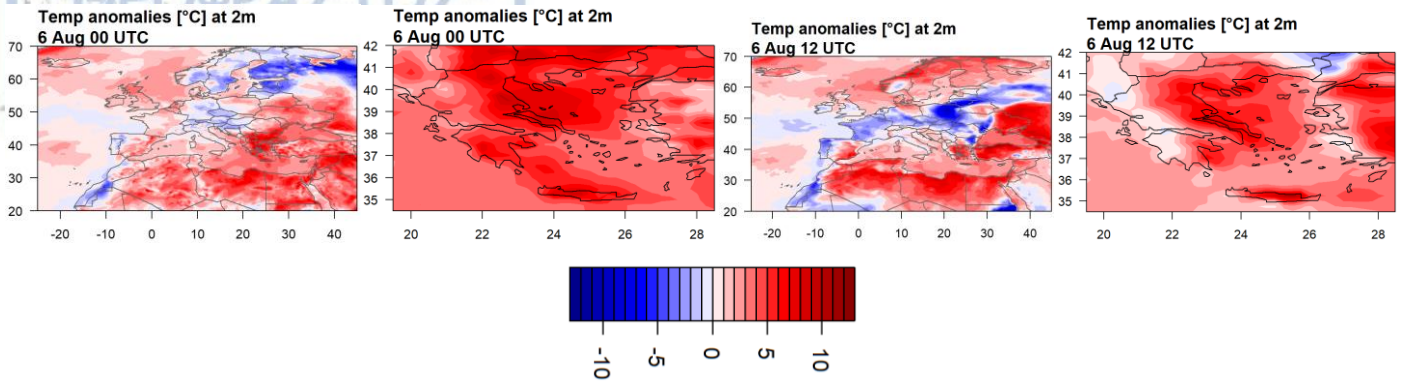
Στο Σχήμα 3.18 καταγράφονται οι θερμοκρασιακές ανωμαλίες στα 2 μέτρα, αλλά αυτήν τη φορά μόνο για τις ημέρες του καύσωνα ανά 12 ώρες (00 UTC και 12 UTC), για την περιοχή της Ελλάδας αλλά και για την Ευρώπη - Βόρεια Αφρική. Στους χάρτες αποτυπώνεται η σταδιακή αύξηση της επιφανειακής θερμοκρασιακής ανωμαλίας. Επιβεβαιώνοντας τα ευρήματα του Σχήματος 3.15, οι θερμοκρασιακές ανωμαλίες αυξάνονται σταδιακά μέχρι την 1^η Αυγούστου του 2021, ενώ από τις 2 Αυγούστου οι ανωμαλίες γίνονται ιδιαίτερα σημαντικές στο μεγαλύτερο τμήμα της ηπειρωτικής χώρας. Η 1^η Αυγούστου (Σχήμα 3.18), είναι η ημέρα που παρουσιάζεται μία μικρή μείωση της θετικής θερμοκρασιακής ανωμαλίας. Στις 4 Αυγούστου καταγράφεται το μέγιστο των T2m ανωμαλιών, στην περιοχή της Λάρισας. Παρ' όλα αυτά, οι μέγιστες ανωμαλίες της επιφανειακής θερμοκρασίας δεν είναι ευδιάκριτες

στο συγκεκριμένο σχήμα, διότι δεν έχουν μεγάλη χωρική έκταση. Οι μέγιστες θερμοκρασιακές ανωμαλίες στην επιφάνεια, ταυτίζονται χρονικά με την ύπαρξη ενός παρακλαδιού μεγάλης ταχύτητας αέρα στα 300 hPa, νότια του κεντρικού κλάδου του υποτροπικού αεροχείμαρρου, το οποίο έχει ταχύτητα περίπου 35 m/s και παρεμβάλλει το μεγαλύτερο τμήμα της ηπειρωτικής Ελλάδας (Σχήμα 3.11). Από τις 6 Αυγούστου (πρώτη μέρα μετά τον καύσωνα), οι ανωμαλίες μειώνονται σε όλη την περιοχή μελέτης, ενώ πιο συγκεκριμένα στο δυτικό τμήμα της χώρας κυμαίνονται γύρω από το μηδέν.

Βλέποντας τη γενικότερη εικόνα της Ευρώπης, φαίνεται να δημιουργούνται δύο θερμοκρασιακοί πόλοι ανωμαλιών, με θετικό πρόσημο στην Νοτιοανατολική Ευρώπη και αρνητικό πρόσημο στην Βορειοδυτική Ευρώπη. Αυτή η εικόνα έχει ήδη εντοπιστεί στα σχήματα Σχ.3.4, Σχ.3.8 και Σχ.3.10. Επομένως, η δημιουργία αυτού του δίπολου οφείλεται στην συνοπτική κατάσταση που επικρατεί, που όπως έχει προαναφερθεί, προκάλεσε κίνηση χαμηλών βαρομετρικών από τον Ατλαντικό προς τις χώρες της βορειοδυτικής Ευρώπης, με αποτέλεσμα την πτώση της επιφανειακής θερμοκρασίας σε αυτές τις περιοχές. Αυτό το δίπολο κατά τη διάρκεια της νύχτας εξασθενεί. Τέλος, οι θερμοκρασιακές ανωμαλίες κατά τη διάρκεια της νύχτας αυξάνονται σταδιακά την περίοδο της θερμής μεταφοράς στην Ελλάδα, ενώ αξίζει να σημειωθεί ότι την μεγαλύτερη ανωμαλία την παρουσιάζουν στις 00 UTC στις 6 Αυγούστου, όπου φαίνεται ότι ο καύσωνας συνεχίζει να ασκεί επίδραση στα χαμηλά στρώματα της ατμόσφαιρας.





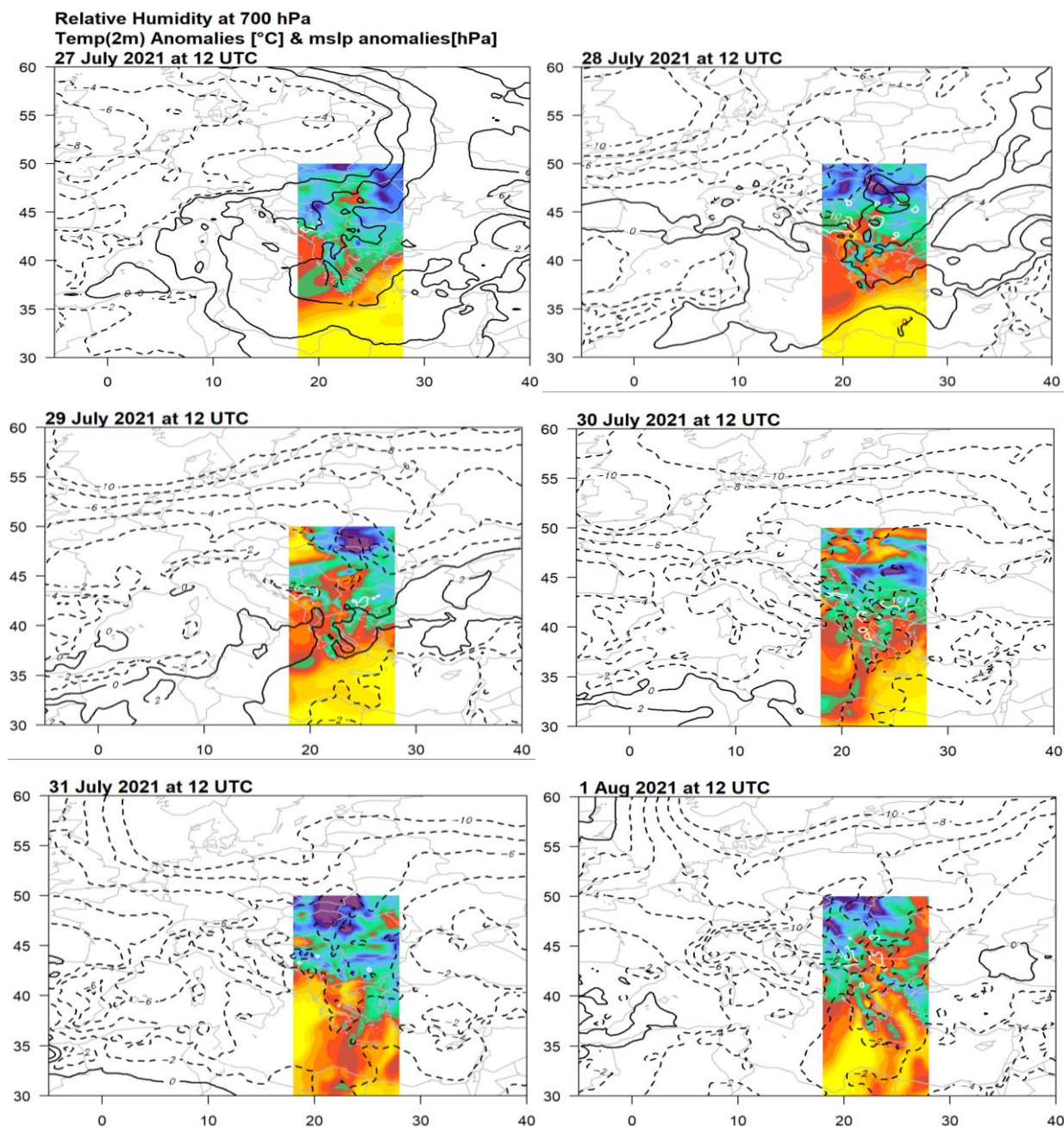


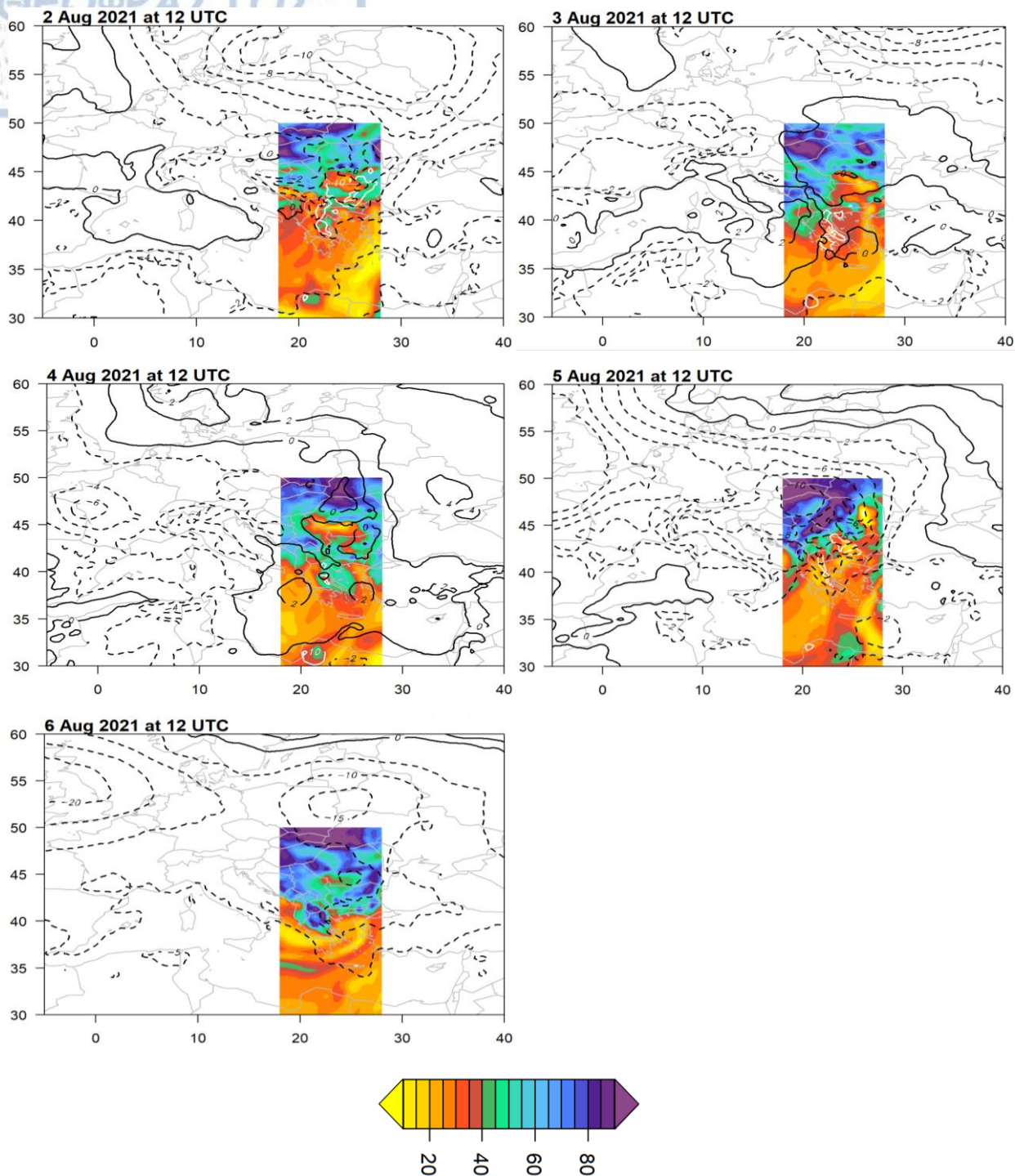
Σχήμα 3.18: Θερμοκρασιακές ανωμαλίες στα 2 μέτρα ($^{\circ}\text{C}$, χρωματική κλίμακα) για την Ευρώπη και την Ελλάδα για τις ημέρες 27/7/2021 έως 6/8/2021 ανά 12 ώρες (00 και 12 UTC). Περίοδος αναφοράς: οι αντίστοιχες ωριαίες τιμές (00 και 12 UTC) Ιουλίου και Αυγούστου 1959-2020.

Τέλος, ελέγχονται συνδυαστικά, ανά 24 ώρες (12 UTC) για τις ημέρες 27/7 έως 6/8, τα επίπεδα υγρασίας στην ισοβαρική επιφάνεια των 700 hPa (χρωματιστή κλίμακα), οι ανωμαλίες της πίεσης στη μέση στάθμη της θάλασσας (συνεχείς και διακεκομμένες μαύρες γραμμές) και οι θερμοκρασιακές ανωμαλίες της επιφάνειας με κατώφλι τους 10°C (λευκές συνεχείς γραμμές) (Σχήμα 3.19). Ήδη από τις 27 Ιουλίου η υγρασία στα 700 hPa, πάνω από την Μεσόγειο θάλασσα στο νότιο τμήμα της Ελλάδας, έχει τιμές περίπου 1%. Αυτά τα χαμηλά ποσά υγρασίας μετατοπίζονται προς τα βόρεια με τη μέγιστη τιμή υγρασίας να φτάνει το 40% σε ορισμένες περιοχές κοντά σε ψηλά βουνά και οροσειρές. Η γενικότερη κυκλοφορία της ατμόσφαιρας, η οποία έχει ήδη αναλυθεί, σε συνδυασμό με τις καθοδικές κινήσεις των αέριων μαζών που προκύπτουν από τη θέση του αεροχειμάρρου και από τις θετικές ανωμαλίες του ms1p (4 hPa) (27/7 έως 28/7), προκαλούν μεταφορά αυτών των ξηρών πακέτων αέρα στα κατώτερα στρώματα. Οι ξηρές συνθήκες, που δημιουργήθηκαν στην επιφάνεια, λόγω αυτής της μεταφοράς του ξηρού αέρα και άλλων παραγόντων, συνέβαλαν με τη σειρά τους στην περαιτέρω αύξηση της επιφανειακής θερμοκρασίας. Πιο αναλυτικά, όπως φαίνεται στο συμπληρωματικό υλικό, ο αέρας στα 1000 hPa έγινε πιο ξηρός άμεσα μετά τις δύο χρονικές περιόδους των καθοδικών κινήσεων, αυξάνοντας τις επιφανειακές θερμοκρασιακές ανωμαλίες. Με αυτόν τον τρόπο, φανερώνεται η στενή σχέση της επιφανειακής υγρασίας με τις ανωμαλίες των θερμοκρασιών στα 2 μέτρα (Συμπληρωματικό υλικό).

Όσον αφορά τις ανωμαλίες της πίεσης στη μέση στάθμη της θάλασσας, από τις 29 Ιουλίου και τις υπόλοιπες ημέρες που εξελίχθηκε ο καύσωνας, κυμάνθηκαν γύρω από το μηδέν, με τις περισσότερες περιπτώσεις να πέφτουν και κάτω από το μηδέν έως 2 hPa κατά απόλυτη τιμή. Συνεπώς, γίνεται φανερό ότι η πίεση της μέσης στάθμης της θάλασσας, εκτός των ημερών 27/7 και 28/7 που οι ανωμαλίες ήταν +4 και +2 hPa αντίστοιχα, δεν έπαιξε περαιτέρω ρόλο στην επιπλέον αύξηση της επιφανειακής θερμοκρασίας τις επόμενες ημέρες. Σύμφωνα με την κλιματολογική έρευνα της Σπύρου (2000) φαίνεται ότι γενικότερα οι καύσωνες στην Ελλάδα δεν χαρακτηρίζονται από υψηλές πιέσεις στο επίπεδο της μέσης στάθμης της θάλασσας. Πιο συγκεκριμένα, τα αποτελέσματα της συμφωνούν με τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας, διότι συμπέρανε ότι οι εν λόγω συνθήκες, που επικρατούν στην επιφάνεια σε περιόδους καύσωνα, συνεπάγονται την επικράτηση

μηδενικών ή ελαφρώς αρνητικών τιμών ανωμαλιών πίεσης πάνω από την Ελλάδα. Επομένως, γίνεται αντιληπτό ότι ένας πολύ ισχυρός καύσωνας δεν προϋποθέτει την ύπαρξη μιας ισχυρής ανωμαλίας της πίεσης στη μέση στάθμη της θάλασσας. Αυτό επιβεβαιώνεται από το Σχήμα 3.19 όπου οι ημέρες που εμφανίστηκαν οι ακραίες θερμοκρασιακές ανωμαλίες, με τυχαίο κατώφλι τους 10 °C, δεν συνδέονται με τις ανωμαλίες του mslp. Είναι αναγκαίο ωστόσο να επισημανθεί, ότι για την παρούσα μελέτη η περίοδος αναφοράς που χρησιμοποιήθηκε αφορούσε τους μήνες Ιούλιου και Αυγούστου, που γενικότερα επικρατούν υψηλές τιμές της πίεσης στο επίπεδο της θάλασσας. Άρα φάνηκε ότι η κλιματολογία βρίσκεται πολύ κοντά και λίγο πιο αυξημένη σε σχέση με τις ημέρες της Θερμής εισβολής.





Σχήμα 3.19: Η σχετική υγρασία στα 700 hPa (%), χρωματική κλίμακα), οι ανωμαλίες της πίεσης στη μέση στάθμη της θάλασσας (hPa, θετικές με συνεχείς μαύρες γραμμές και αρνητικές με διακεκομμένες γραμμές) και οι ανωμαλίες της θερμοκρασίας στα 2m με κατώφλι 10 °C (°C, λευκές γραμμές) από τις 27/7 έως 6/8 στις 12 UTC. (Data: Era5)

3.2 Ανάλυση του επιφανειακού όζοντος

Κατόπιν πραγματοποίησης της συνοπτικής ανάλυσης του καύσωνα με επίκεντρο μελέτης την περιοχή της Ελλάδας, στη συνέχεια ελέγχονται τα επίπεδα όζοντος την ίδια χρονική περίοδο, ώστε να φανεί η επίδραση, που μπορεί να είχαν οι ακραίες θερμοκρασίες και οι υπόλοιπες συνθήκες που επικράτησαν, σε αυτόν τον ατμοσφαιρικό ρύπο. Όπως είναι γνωστό, ένας καύσωνα δημιουργεί ευνοϊκές συνθήκες για τη συσσώρευση ρύπανσης και παραγωγή όζοντος (Ding et al., 2013). Η ανάλυση του επιφανειακού όζοντος γίνεται αρχικά μέσω δεδομένων από το μοντέλο CAMS global reanalysis, ενώ στη συνέχεια γίνεται και με τη βοήθεια πραγματικών παρατηρήσεων από επίγειους σταθμούς. Οι προσομοιώσεις των μοντέλων δίνουν τη δυνατότητα να διερευνηθεί η χωρική κατανομή των συγκεντρώσεων του όζοντος, κάτι το οποίο μέσω σημειακών μετρήσεων δεν είναι δυνατό. Επιπλέον, σύμφωνα με πλήθος επιστημονικών ερευνών (Wang et al., 2020; Wagner et al., 2021), τα δεδομένα global reanalysis CAMS θεωρούνται αξιόπιστα στη χρήση τους.

3.2.1 Μέσω δεδομένων από το CAMS reanalysis

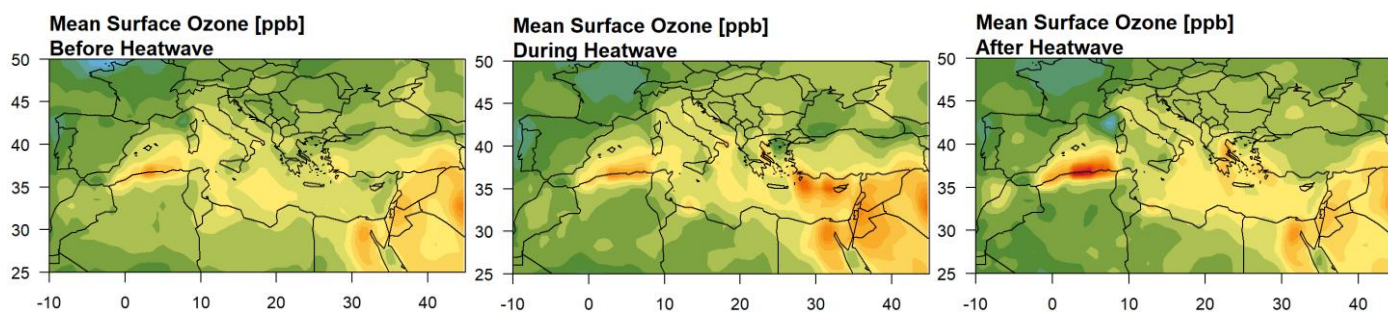
Για τη διερεύνηση των επιπέδων του όζοντος, αρχικά δημιουργούνται χάρτες που απεικονίζουν τις μέσες συγκεντρώσεις όζοντος, ημέρας και νύχτας, για τρεις χρονικές περιόδους: κατά τη διάρκεια του θερμού κύματος, πριν αλλά και μετά από αυτό (Σχήμα 3.20). Ο λόγος της δημιουργίας τους είναι η πραγματοποίηση σύγκρισης της περιόδου του καύσωνα με δύο κοντινές χρονικά περιόδους. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα κατά τη διάρκεια της ημέρας, η περίοδος των ακραίων θερμοκρασιών παρουσιάζει υψηλότερες μέσες τιμές όζοντος συγκριτικά με την προηγούμενη περίοδο. Ωστόσο, η περίοδος που ακολουθεί τον καύσωνα παρουσιάζει, για το μεγαλύτερο μέρος της ηπειρωτικής χώρας, μεγαλύτερες μέσες τιμές όζοντος συγκριτικά με την περίοδο της θερμής εισβολής. Οι μέγιστες συγκεντρώσεις όζοντος που καταγράφονται στη συνέχεια (Σχήμα 3.21) είναι εμφανώς μεγαλύτερες και μάλιστα ακραία αυξημένες (360 ppb) την περίοδο του καύσωνα, έναντι των άλλων περιόδων, όμως καλύπτουν ένα μικρό τμήμα της χώρας (βόρεια Εύβοια). Συνδυάζοντας αυτές τις δύο πληροφορίες εξάγεται το συμπέρασμα ότι οι ακραία υψηλές συγκεντρώσεις, που καταγράφηκαν κάποια χρονική στιγμή σε ορισμένες περιοχές, συνδυάστηκαν με πολύ χαμηλές τιμές όζοντος κάποιες άλλες ώρες, δημιουργώντας έτσι τελικά μικρότερες μέσες τιμές όζοντος την περίοδο του καύσωνα. Ωστόσο, στο μεγαλύτερο τμήμα της υπόλοιπης Ελλάδας, οι μέγιστες τιμές όζοντος που εμφανίζονται την περίοδο μετά τη θερμή εισβολή είναι αισθητά υψηλότερες συγκριτικά με την ακραία θερμή περίοδο.

Οι εξαιρετικά υψηλές μέγιστες τιμές στο όζον, που καταγράφηκαν από το μοντέλο κατά τη διάρκεια του καύσωνα, θα μπορούσαν να αποτελούν προϊόν μεταφοράς από τα ανώτερα στρώματα, μέσω των καθοδικών κινήσεων που παρατηρήθηκαν, αλλά και παραγωγής εξαιτίας των ακραίων μετεωρολογικών συνθηκών και της μεγάλης πυρκαγιάς στη βόρεια Εύβοια, που συνέβησαν κατά τη διάρκεια του καύσωνα. Στο συμπληρωματικό υλικό έχει οπτικοποιηθεί η σχετική υγρασία καθ' ύψος για τις περιοχές του Θησείου, του Επταπυργίου και της Φινοκαλιάς, από την 15/7 έως την 15/8. Αυτή επιβεβαιώνει την ύπαρξη

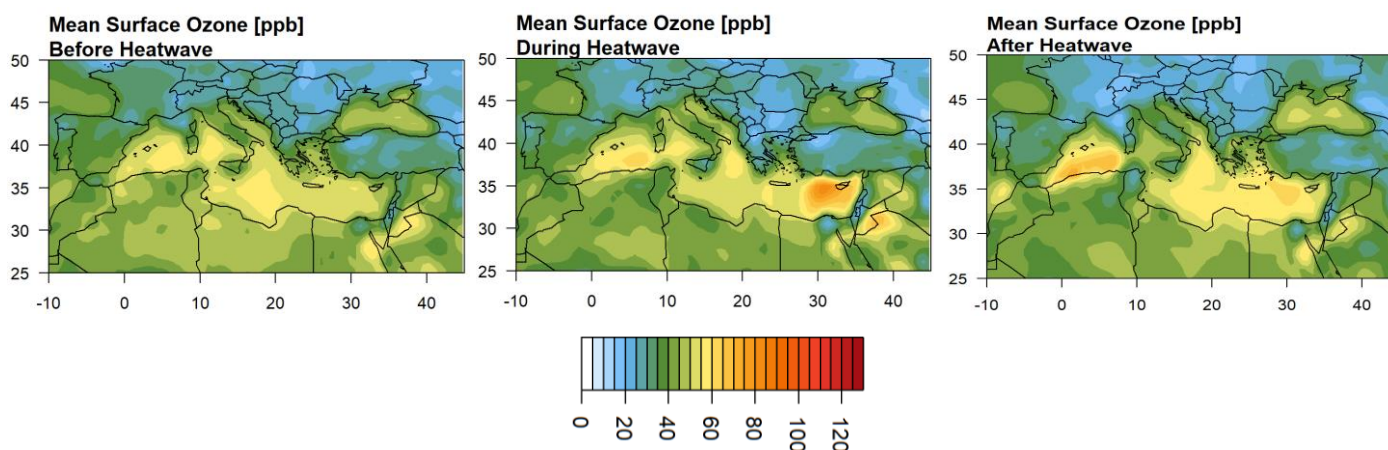
μιας κατακόρυφης ζώνης χαμηλών τιμών υγρασίας από τα υψηλότερα προς τα χαμηλότερα στρώματα λίγο πριν την έναρξη του καύσωνα, με αυτήν να είναι εμφανώς διακριτή στην περιοχή του Θησείου. Γενικότερα, ο παράγοντας των κατακόρυφων κινήσεων και της υγρασίας είναι ένας δείκτης καθοδικών κινήσεων και επομένως με αυτόν τον τρόπο μπορεί να φανεί τυχόν μεταφορά όζοντος από τα ανώτερα προς τα κατώτερα στρώματα. Ωστόσο, οι αξιοσημείωτα αυξημένες τιμές του επιφανειακού όζοντος, που δίνει το CAMS global reanalysis, χρήζουν περαιτέρω διερεύνησης. Όσον αφορά την αύξηση των μέγιστων τιμών όζοντος πάνω από το Αιγαίο, την περίοδο μετά τον καύσωνα, αυτή μπορεί να οφείλεται στη μεταφορά του από τους ανέμους προς εκείνη την περιοχή.

Μία διαφορετική εικόνα για το ρύπο του όζοντος αποτυπώνεται κατά τη διάρκεια της νύχτας. Όσον αφορά τις μέσες τιμές όζοντος της νύχτας την περίοδο της θερμής μεταφοράς για την περιοχή της Ελλάδας, οι τιμές του όζοντος είναι μικρότερες σε σχέση με τη χρονική περίοδο πριν και μετά από αυτήν (Σχήμα 3.20). Παράλληλα, οι μέγιστες συγκεντρώσεις που παρατηρήθηκαν μετά τη δύση του ηλίου, είναι μεγαλύτερες τη χρονική περίοδο μετά το πέρας της θερμής μεταφοράς συγκριτικά με τις άλλες δύο περιόδους, με αυτές να καταλαμβάνουν εμφανώς μεγαλύτερη χωρική έκταση συγκριτικά με το μέγιστο της ημέρας στην περίοδο του καύσωνα.

During the daylight (6-17 UTC):

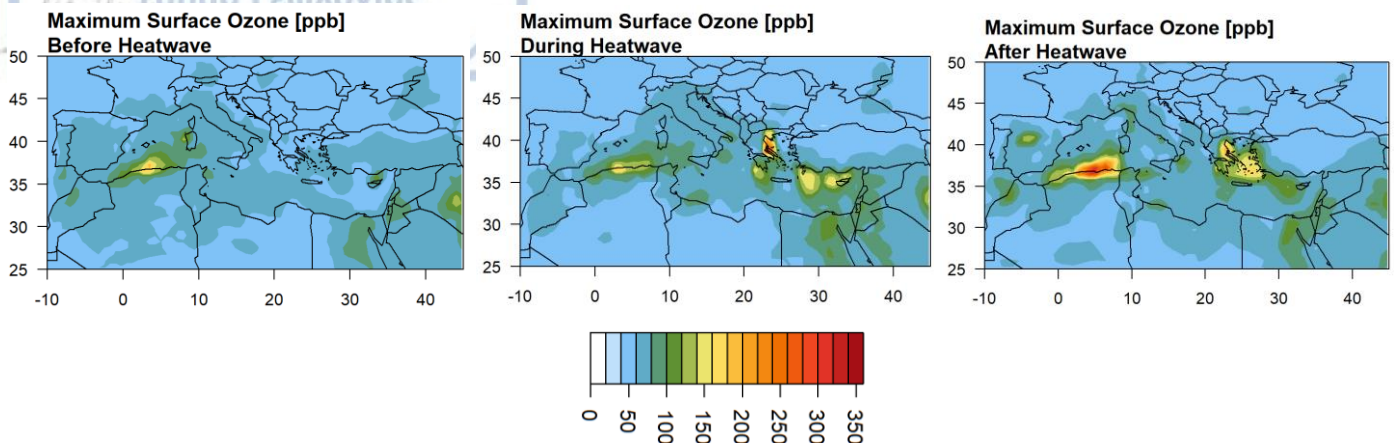


During the night (18-5 UTC):

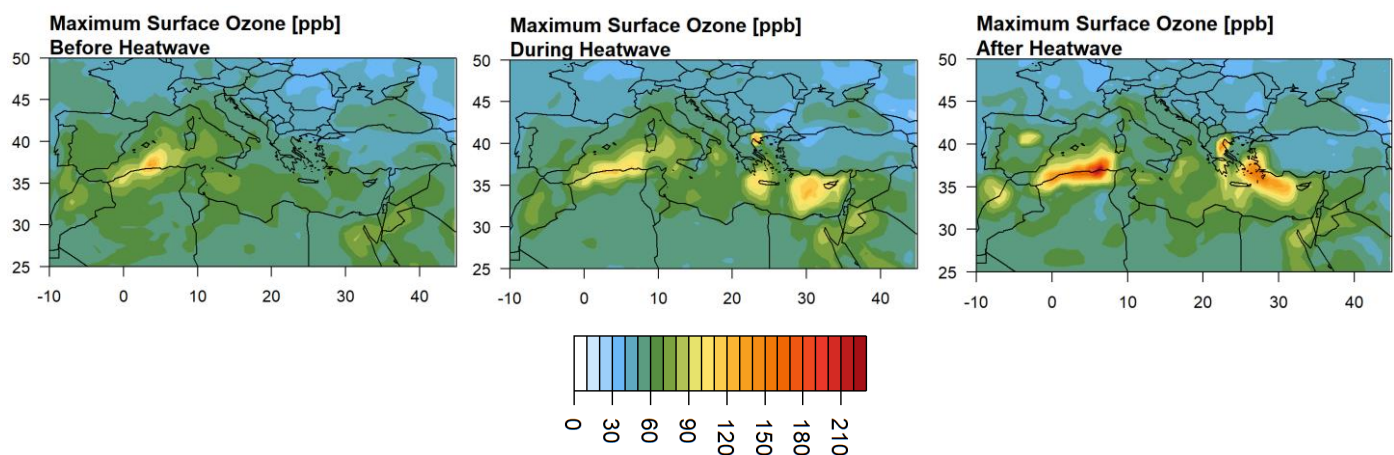


Σχήμα 3.20: Μέσες συγκεντρώσεις επιφανειακού όζοντος (ppb, χρωματική κλίμακα), κατά τις ώρες της ημέρας (6-17 UTC) και τις ώρες της νύχτας (18-5 UTC) για τις 3 χρονικές περιόδους. (Data: CAMS global reanalysis, surface: model level=60)

During the daylight (6-17 UTC):



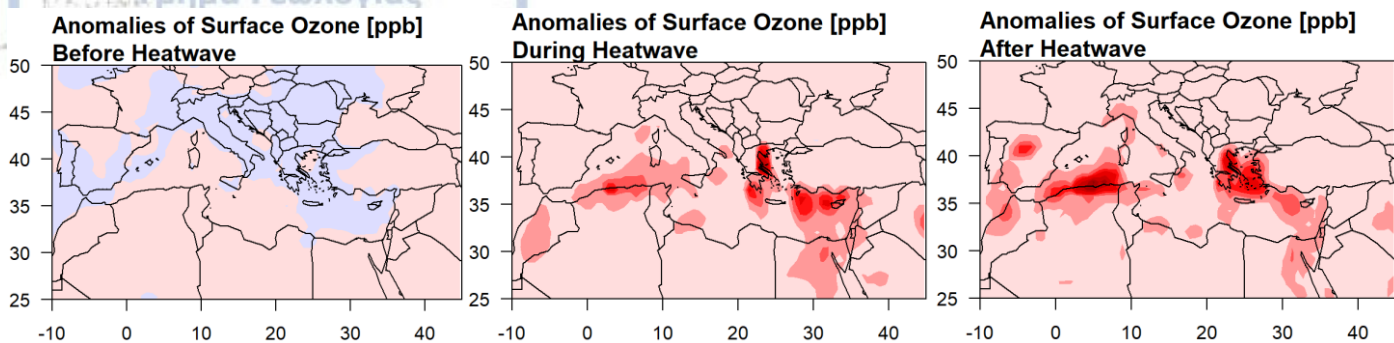
During the night (18-5 UTC):



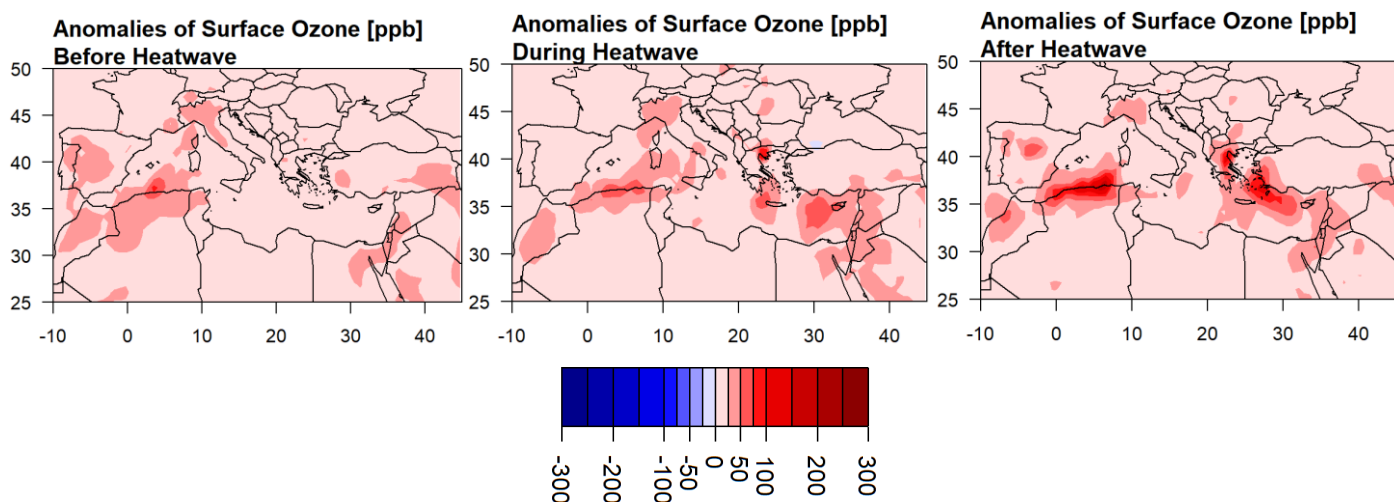
Σχήμα 3.21: Μέγιστες συγκεντρώσεις επιφανειακού όζοντος (ppb, χρωματική κλίμακα), ομοίως με το Σχήμα 3.20. (Data: CAMS global reanalysis, surface: model level=60)

Εξαιτίας των εξαιρετικά υψηλών συγκεντρώσεων του επιφανειακού όζοντος, που δίνει το παγκόσμιο μοντέλο επανάλυσης CAMS κατά τη διάρκεια του καύσωνα, οι ανωμαλίες του όζοντος φτάνουν τα 300 ppb (Σχήμα 3.22). Η μεγαλύτερη θετική ανωμαλία παρατηρείται εκεί που καταγράφονται οι μέγιστες συγκεντρώσεις όζοντος, δηλαδή στη βόρεια Εύβοια και στην ευρύτερη περιοχή της. Κατά τη διάρκεια της ημέρας την περίοδο του καύσωνα, οι ανωμαλίες παρουσιάζουν ακραία αυξημένες τιμές αλλά χωρικά δεν καλύπτουν μεγάλη έκταση, με την πλειονότητα των περιοχών να εμφανίζουν ανωμαλίες έως 50 ppb. Στη χρονική περίοδο που προηγείται, οι ανωμαλίες είναι ± 25 ppb, ενώ η περίοδος που ακολουθεί παρουσιάζει και πάλι ακραίες ανωμαλίες, με αυτές να καλύπτουν το μεγαλύτερο τμήμα της χώρας, χωρίς ωστόσο να φτάνουν τα επίπεδα της περιόδου του καύσωνα. Κατά τη διάρκεια της νύχτας, οι ανωμαλίες μετά τη θερμή περίοδο είναι οι μεγαλύτερες και σε ένταση αλλά και σε έκταση, σε σχέση με τις άλλες δύο χρονικές περιόδους. Γενικότερα, ανεξάρτητα αν είναι ημέρα ή νύχτα, οι ανωμαλίες πριν τον ερχομό του καύσωνα είναι μικρότερες συγκριτικά με τις περιόδους της θερμής μεταφοράς και μετά από το πέρας αυτής.

During the daylight (6-17 UTC):



During the night (18-5 UTC):



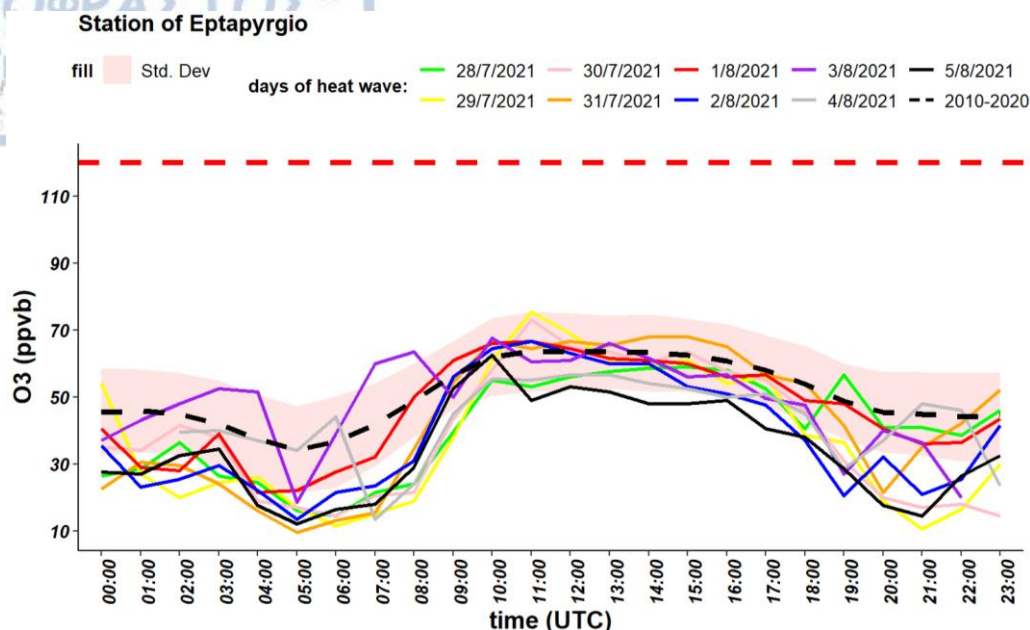
Σχήμα 3.22: Ανωμαλίες των συγκεντρώσεων του επιφανειακού όζοντος (ppb, χρωματική κλίμακα), ομοίως με το Σχήμα 3.14. Περίοδος αναφοράς: οι αντίστοιχες ωριαίες τιμές Ιουλίου και Αυγούστου 2003-2020. (Data: CAMS global reanalysis, surface: model level=60)

2.2.2 Μέσω παρατηρήσεων από επίγειους σταθμούς

Αφού αποκτήθηκε μία γενική εικόνα των συγκεντρώσεων και της χωρικής κατανομής του όζοντος την περίοδο της θερμής μεταφοράς με τη βοήθεια των δεδομένων CAMS παγκόσμιας επανάλυσης, στη συνέχεια γίνεται διερεύνηση των τιμών του επιφανειακού όζοντος, αυτή τη φορά με τη βοήθεια πραγματικών μετρήσεων από σταθμούς (παρατηρήσεις). Στην αρχή δημιουργήθηκαν χρονοσειρές που απεικονίζουν τις ημερήσιες μεταβολές του όζοντος, για κάθε μία ημέρα του καύσωνα, για τους τέσσερις σταθμούς μέτρησης ατμοσφαιρικής ρύπανσης: Επταπύργιο, Μαλακοπή, Φινοκαλιά και Θησείο. Για όλες τις χρονοσειρές οι τιμές αντιστοιχούν σε ώρες UTC και έχουν μονάδες μέτρησης ppb. Με αυτόν τον τρόπο μπορεί να γίνει αντιληπτή η υπέρβαση των κατωφλίων των 90 ppb, που είναι για την ενημέρωση του κοινού, και των 120 ppb που αφορά την έκδοση προειδοποιήσεων (με διακεκομμένη κόκκινη γραμμή).

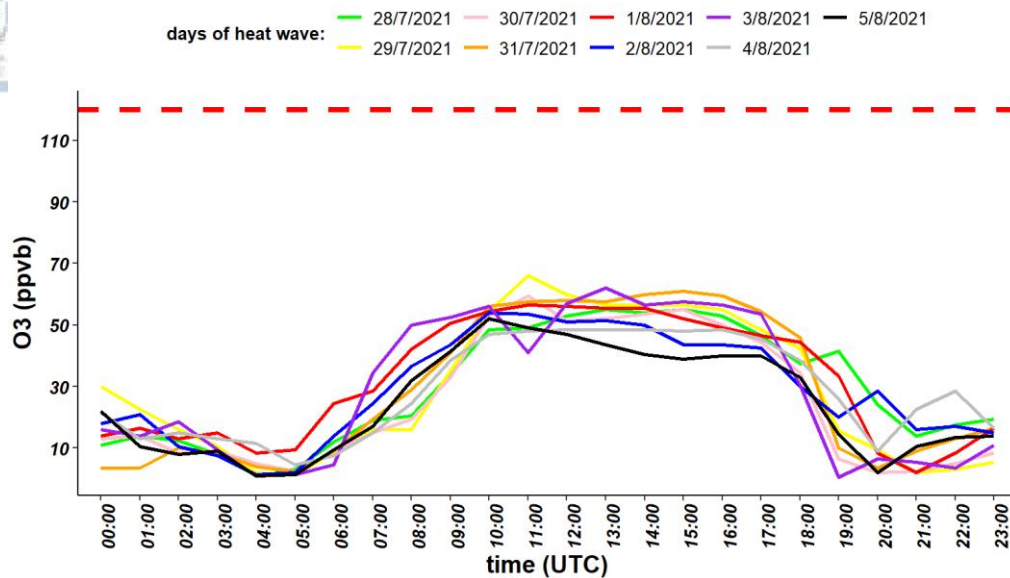
Αρχικά για τον σταθμό του Επταπυργίου, η ημερήσια διακύμανση του όζοντος που καταγράφεται για κάθε μία ημέρα του καύσωνα, παρουσιάζει κανονική κατανομή, με τις μεσημεριανές ώρες να αποτυπώνονται οι μέγιστες ημερήσιες συγκεντρώσεις (Σχήμα 3.23). Το όζον για να σχηματιστεί χρειάζεται ηλιοφάνεια ώστε να τροφοδοτηθεί η χημική αντίδραση. Επομένως είναι λογικό, ότι καθώς ο ήλιος αρχίζει να ανατέλλει οι συγκεντρώσεις του όζοντος αυξάνονται σταδιακά, ενώ όταν ο ήλιος δύει η παραγωγή όζοντος αρχίζει να μειώνεται. Γενικότερα, σύμφωνα με τους Bloomer et al. (2009) η αύξηση των συγκεντρώσεων, που συμβαίνει κατά προσέγγιση τις ώρες 8 έως 19 UTC, οφείλεται στην επίδραση που έχει η θερμοκρασία και η ηλιακή ακτινοβολία σε αυτόν τον ρύπο. Ειδικότερα, για το συγκεκριμένο σταθμό, στις 29 και 30 Ιουλίου καταγράφονται οι υψηλότερες τιμές όζοντος, οι οποίες φτάνουν τα 75.5 ppb. Τη τελευταία μέρα της θερμής εισβολής, κατά τις μεσημεριανές ώρες φαίνεται ότι οι μετεωρολογικές συνθήκες που επικρατούν στην περιοχή είναι τέτοιες που δεν ασκούν ιδιαίτερη επίδραση στο όζον, με αποτέλεσμα να μη αυξάνεται όσο τις προηγούμενες ημέρες.

Με μαύρη διακεκομμένη γραμμή εμφανίζεται η μέση τιμή ανά ώρα για τους μήνες Ιούλιο και Αύγουστο της χρονικής περιόδου 2010-2020. Ο στόχος είναι η σύγκριση των μέσων ωριαίων συγκεντρώσεων των 11 ετών με κάθε μία από τις ημέρες του καύσωνα, ώστε να φανεί πόσο σημαντική ήταν η επίδραση των ακραίων μετεωρολογικών συνθηκών στο όζον, συγκριτικά με μία περίοδο αναφοράς. Με κόκκινη σκιαγράφηση, επιπλέον, έχει υπολογιστεί η τυπική απόκλιση αυτής της μέσης τιμής. Όπως γίνεται φανερό, υπάρχουν μέρες που υπερβαίνουν αυτή τη μέση τιμή αισθητά. Στις 3 Αυγούστου κατά τη διάρκεια της νύχτας, οι τιμές του όζοντος φτάνουν σε ιδιαίτερα υψηλές τιμές με βάση την κλιματολογία της περιοχής, καταγράφοντας ένα τοπικό μέγιστο (52.5 ppb) κατά τη διάρκεια της νύχτας στις 3-4 UTC. Επιπλέον, εκτός της προαναφερθείσας εξαίρεσης, αξίζει να σημειωθεί ότι οι τιμές του όζοντος τις βραδινές ώρες βρίσκονται αρκετά πιο χαμηλά από τη μέση τιμή των ετών 2010-2020, ενώ κατά τη διάρκεια της μέρας οι τιμές βρίσκονται σε κανονικά επίπεδα για την εποχή. Αυτό δείχνει ότι αυτός ο ισχυρός καύσωνας, για το συγκεκριμένο σταθμό, δεν είχε σημαντική επίδραση στις τιμές του όζοντος κατά τη διάρκεια της μέρας. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το Επταπύργιο είναι ένας σταθμός αστικού υποβάθρου και επομένως υπάρχουν NOx ώστε να σχηματίσουν φωτοχημικά O₃ την ημέρα, αλλά δεν είναι τόσο μεγάλες οι συγκεντρώσεις των NOx ώστε να παραχθούν μεγαλύτερες συγκεντρώσεις σε σχέση με την κλιματολογία. Οι πολύ χαμηλές συγκεντρώσεις της νύχτας, συμφωνούν με την κλιματολογική έρευνα των Pyrgou et. al. (2018), οι οποίοι συμπέραναν ότι οι συγκεντρώσεις του όζοντος της νύχτας την περίοδο καυσώνων (HW) είναι μικρότερες συγκριτικά με περιόδους χωρίς καύσωνα το καλοκαίρι. Σύμφωνα με τα ευρήματά τους, η υψηλότερη μείωση στις μετρήσεις του όζοντος το πρωί (γύρω στις 7:00 π.μ.) υπό συνθήκες HW αποδίδεται στην ενίσχυση του προϋπολογισμού των NOx. Στο Επταπύργιο, ως σταθμός αστικού υποβάθρου, υπάρχουν αρκετά NOx τα οποία όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.7 αντιδρούν με το όζον παράγοντας NO₂, δίνοντας τελικά την εικόνα των πολύ χαμηλών συγκεντρώσεων O₃ κατά τις βραδινές ώρες. Γενικότερα, οι συγκεντρώσεις καθ' όλη τη διάρκεια του καύσωνα παραμένουν κάτω από το κατώφλι των ειδοποιήσεων του κοινού (90 ppb).



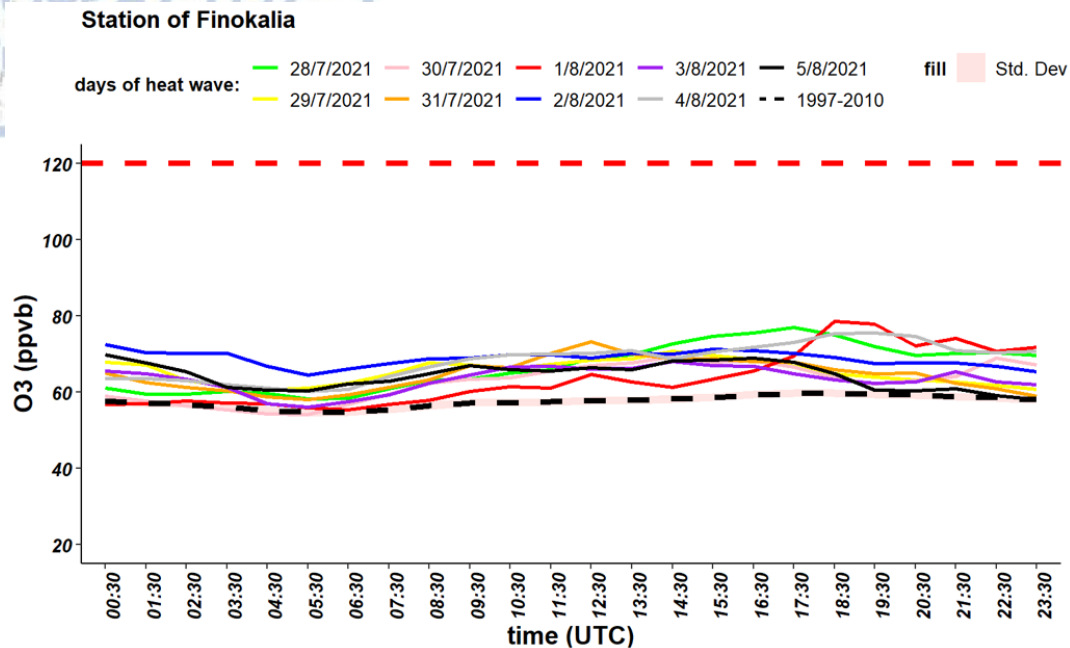
Σχήμα 3.23: Ημερήσια διακύμανση του επιφανειακού όζοντος στο σταθμό του Επταπυργίου για τις ημέρες του καύσωνα (ppbv, συνεχείς γραμμές) και οι μέσες ωριαίες τιμές Ιουλίου και Αυγούστου 2010-2020 (ppbv, διακεκομμένη μαύρη γραμμή) με την τυπική απόκλιση της (κόκκινη σκιαγράφιση). Τα 120 ppbv είναι το κατώφλι συναγερμού (διακεκομμένη κόκκινη).

Στη συνέχεια, αναλύονται οι ημερήσιες τιμές του όζοντος κατά τη διάρκεια του καύσωνα, για το σταθμό της Μαλακοπής (Σχήμα 3.24), ο οποίος βρίσκεται αρκετά κοντά σε αυτόν του Επταπυργίου. Ομοίως και για αυτόν το σταθμό, η ημερήσια διακύμανση του όζοντος ακολουθεί κανονική κατανομή. Τα χαμηλότερα ποσά όζοντος κατά τις μεσημεριανές ώρες καταγράφονται την τελευταία ημέρα του καύσωνα, ενώ οι υψηλότερες συγκεντρώσεις του στις 29 Ιουλίου και 3 Αυγούστου με τιμές όζοντος να αγγίζουν τα 66 και 62 ppbv αντίστοιχα. Επομένως, γίνεται φανερό ότι το όζον στο σταθμό της Μαλακοπής δεν επηρεάζεται σημαντικά από τις συνθήκες που επικρατούν τη συγκεκριμένη χρονική περίοδο, με αποτέλεσμα οι τιμές του να μην φτάνουν ούτε τα επίπεδα για την προειδοποίηση του κοινού.



Σχήμα 3.24: Η ημερήσια διακύμανση του επιφανειακού όζοντος στο σταθμό της Μαλακοπής για τις ημέρες του καύσωνα (ppb, συνεχείς γραμμές). Τα 120 ppb είναι το κατώφλι συναγερμού (διακεκομμένη κόκκινη).

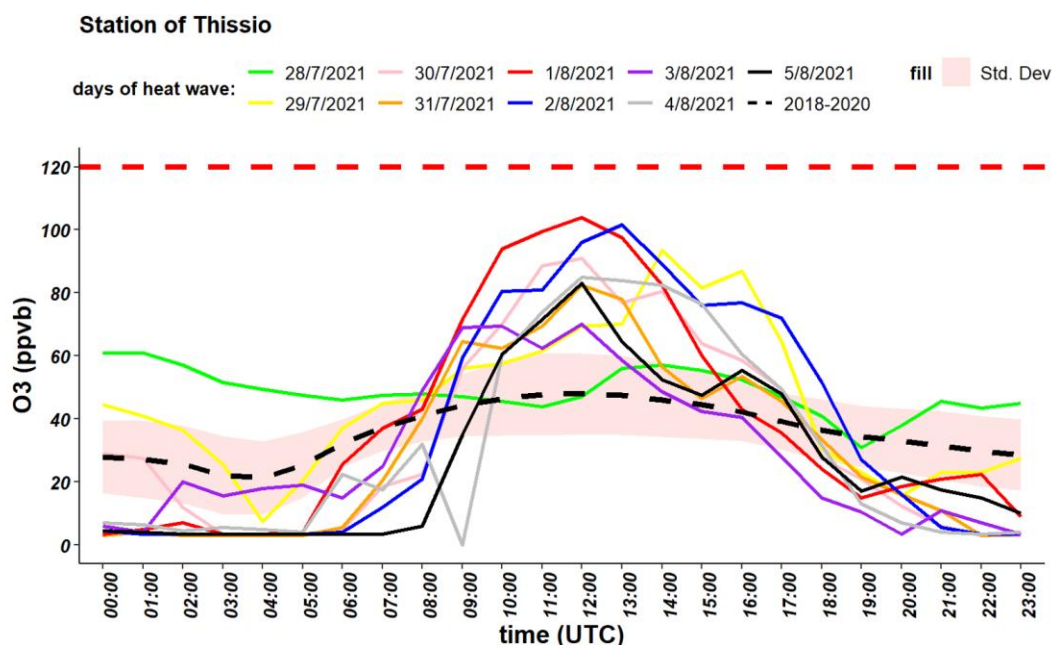
Μία διαφορετική εικόνα φαίνεται να έχει διαμορφωθεί από τις συγκεντρώσεις του όζοντος που καταγράφηκαν στο σταθμό της Φινοκαλιάς (Σχήμα 3.25). Καθ' όλη τη διάρκεια της θερμής μεταφοράς, οι συγκεντρώσεις παραμένουν στα ίδια επίπεδα χωρίς να καταγράφεται κάποια σημαντική μεταβολή (περίπου 15 ppb) ανάμεσα στην ημέρα με τη νύχτα. Έτσι φαίνεται ότι οι συγκεντρώσεις του όζοντος, δεν ακολουθούν την κανονική κατανομή, αλλά κυμαίνονται μεταξύ 55-75 ppb και βρίσκονται σταθερά πάνω από τον μέσο όρο. Την 1^η Αυγούστου στις 18:30 UTC καταγράφονται 78.6 ppb όζοντος, με αυτή να αποτελεί τη μέγιστη τιμή παρατήρησης της περιόδου καύσωνα για το συγκεκριμένο σταθμό. Την ίδια ημέρα, πριν την επίτευξη του μεγίστου αυτού, οι συγκεντρώσεις του όζοντος είναι οι χαμηλότερες που καταγράφονται συγκριτικά με τις υπόλοιπες ημέρες του καύσωνα. Η ημέρα που παρουσιάζει το δεύτερο μέγιστο όζοντος είναι η πρώτη μέρα του καύσωνα (28/7) στις 17:30 UTC, με τιμή 77 ppb. Και πάλι οι συγκεντρώσεις του όζοντος τις προηγούμενες ώρες ήταν σχετικά χαμηλότερες συγκριτικά με τις υπόλοιπες ημέρες του καύσωνα. Γενικότερα, στο σταθμό της Φινοκαλιάς, οι συνθήκες που επικράτησαν κατά το HW, δεν προκάλεσαν σημαντικές αυξήσεις του όζοντος κατά τη διάρκεια της ημέρας σε σχέση με την κλιματολογία, αλλά ούτε και μειώσεις κατά τη διάρκεια της νύχτας. Οι υψηλές συγκεντρώσεις τις νυχτερινές ώρες έρχονται σε αντιδιαστολή με τους υπόλοιπους σταθμούς, όπου οι τιμές του επιφανειακού όζοντος κυμαίνονταν στα 20 ppb. Η διαφορετική εικόνα που περιγράφεται για τον σταθμό της Φινοκαλιάς συγκριτικά με άλλους τρεις σταθμούς έγκειται στο γεγονός ότι ο συγκεκριμένος σταθμός είναι ένας σταθμός περιοχικού υποβάθρου. Επομένως δεν υπάρχουν σε κοντινή απόσταση σημαντικές εκπομπές πρόδρομων ενώσεων του όζοντος, ώστε να συντελέσουν στην παραγωγή ή την καταστροφή του επιφανειακού όζοντος. Αυτό που σίγουρα γίνεται αντιληπτό είναι ότι οι συγκεντρώσεις του όζοντος παρέμειναν, υπό αυτές τις συνθήκες και δεδομένης της χαρακτηριστικής του θέσης, σε επίπεδα υπό των 90 ppb, πάνω από τα οποία θα γινόταν ενημέρωση του κοινού για την επικινδυνότητα του ρύπου αυτού.



Σχήμα 3.25: Ημερήσια διακύμανση του επιφανειακού όζοντος στο σταθμό της Φινοκαλιάς για τις ημέρες του καύσωνα (ppb, συνεχείς γραμμές) και οι μέσες ωριαίες τιμές Ιουλίου και Αυγούστου 1997-2010 (ppb, διακεκομμένη μαύρη γραμμή) με την τυπική της απόκλιση (κόκκινη σκιαγράφιση). Τα 120 ppb είναι το κατώφλι συναγερμού (διακεκομμένη κόκκινη).

Ο σταθμός, ανάμεσα στους τέσσερις που μελετώνται, που φαίνεται να έχει επηρεαστεί περισσότερο όσον αφορά τις συγκεντρώσεις του όζοντος, είναι το Θησείο (Σχήμα 3.26). Επομένως, αυτός ο ισχυρός καύσωνας για τη συγκεκριμένη περιοχή συνδέεται με μία σειρά απογεματινών κορυφών του όζοντος, δείχνοντας έτσι ότι η ημερήσια μεταβολή του όζοντος ακολουθεί κανονική κατανομή (σχήμα καμπάνας). Οι συγκεντρώσεις του όζοντος φαίνεται να έχουν ξεπεράσει τα 100 ppb στις 1/8/2021 (104 ppb) και 2/8/2021 (101.5 ppb) κατά τις μεσημεριανές ώρες, 12 και 13 UTC αντίστοιχα. Γενικότερα, οι ημέρες που έχει ξεπεραστεί το κατώφλι των 90 ppb, το οποίο αφορά την ενημέρωση του κοινού, πέραν των δύο προαναφερθέντων ημερομηνιών είναι στις 29 και στις 30 Ιουλίου του 2021. Την ημέρα έναρξης της θερμής εισβολής, οι συγκεντρώσεις του παρέμειναν σε κανονικά για την εποχή επίπεδα κατά τις μεσημεριανές ώρες, ενώ κατά τη διάρκεια της νύχτας είναι υψηλότερες από τη μέση τιμή των ετών 2018-2020 κατά περίπου 30 ppb. Έτσι, την πρώτη ημέρα φαίνεται το όζον να μην ακολουθεί την κανονική κατανομή, που ακολούθησε τελικά τις επόμενες ημέρες. Συγκρίνοντας τις ημερήσιες μεταβολές των ημερών του καύσωνα με την ημερήσια μεταβολή της μέσης τιμής των μηνών Ιουλίου και Αυγούστου τις χρονιές 2018-2020, φαίνεται ότι κατά τη διάρκεια των μεσημεριανών ωρών οι τιμές είναι εμφανώς υψηλότερες (έως και +60 ppb) από τη μέση τιμή 2018-2020. Αντίθετα, οι τιμές κατά τη διάρκεια της νύχτας είναι χαμηλότερες από την περίοδο 2018-2020, συγκλίνοντας σε πολλές περιπτώσεις στο μηδέν. Αυτή η διαφορά ανάμεσα στις μέσες τιμές και στις πολύ χαμηλές τιμές των συγκεντρώσεων τις ώρες της νύχτας, είχε παρατηρηθεί και στο σταθμό του Επταπυργίου (Σχήμα 3.23) και έχει ήδη αποδοθεί στην παρουσία των NO_x (Pyrgou et. al., 2018). Παράλληλα οι πολύ υψηλές τιμές κατά τις μεσημεριανές ώρες, οι οποίες είναι αξιοσημείωτα υψηλότερες σε σχέση με τους άλλους τρεις σταθμούς, οφείλονται στο γεγονός ότι το Θησείο είναι ένας αστικός σταθμός. Επομένως οι συγκεντρώσεις των NO_x που παρατηρούνται σε αυτόν είναι πολύ

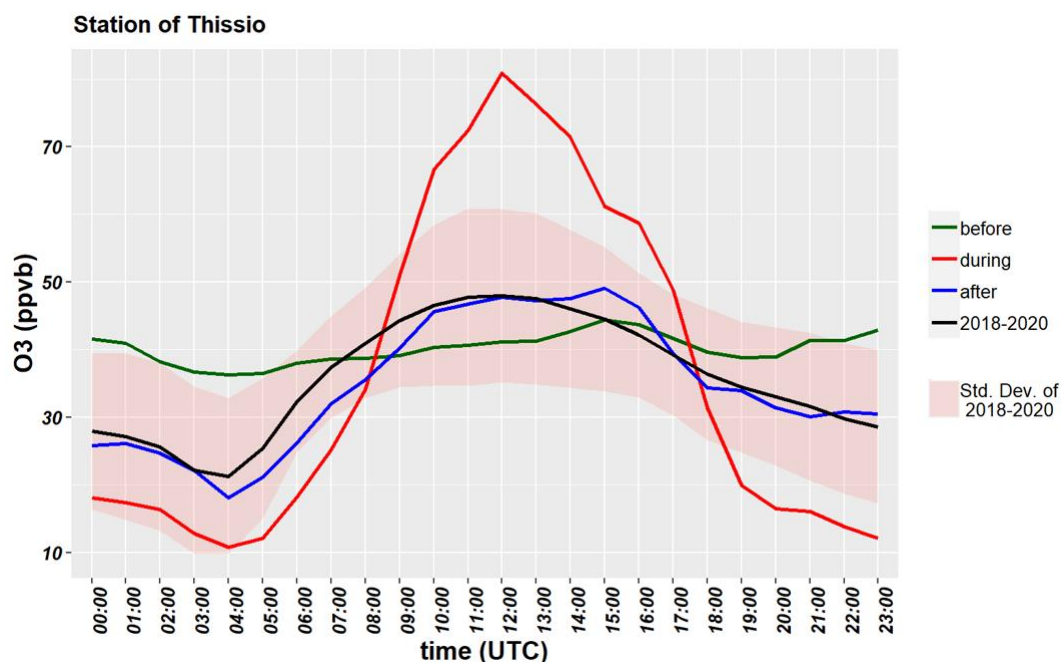
μεγαλύτερες σε σχέση με τους σταθμούς αστικού υποβάθρου (Μαλακοπή, Επταπύργιο) και φυσικά τους σταθμούς περιοχικού υποβάθρου (Φινοκαλιά). Εξάιρεση των ακραία χαμηλών τιμών όζοντος της νύχτας φαίνεται να αποτελούν οι δύο πρώτες νύχτες του καύσωνα, με την πρώτη ημέρα να βρίσκεται μόνιμα πάνω από τον μέσο όρο κατά τη διάρκεια της νύχτας, ενώ η δεύτερη ημέρα βρίσκεται πάνω από τον μέσο όρο, εκτός από μία απότομη μείωση που καταγράφεται στις 4 UTC.



Σχήμα 3.26: Ημερήσια διακύμανση του επιφανειακού όζοντος στο σταθμό του Θησείου για τις ημέρες του καύσωνα (ppb, συνεχείς γραμμές) και οι μέσες ωριαίες τιμές Ιουλίου και Αυγούστου 2018-2020 (ppb, διακεκομμένη μαύρη γραμμή) με την τυπική της απόκλιση (κόκκινη σκιαγράφιση). Τα 120 ppb είναι το κατώφλι συναγερμού (διακεκομμένη κόκκινη).

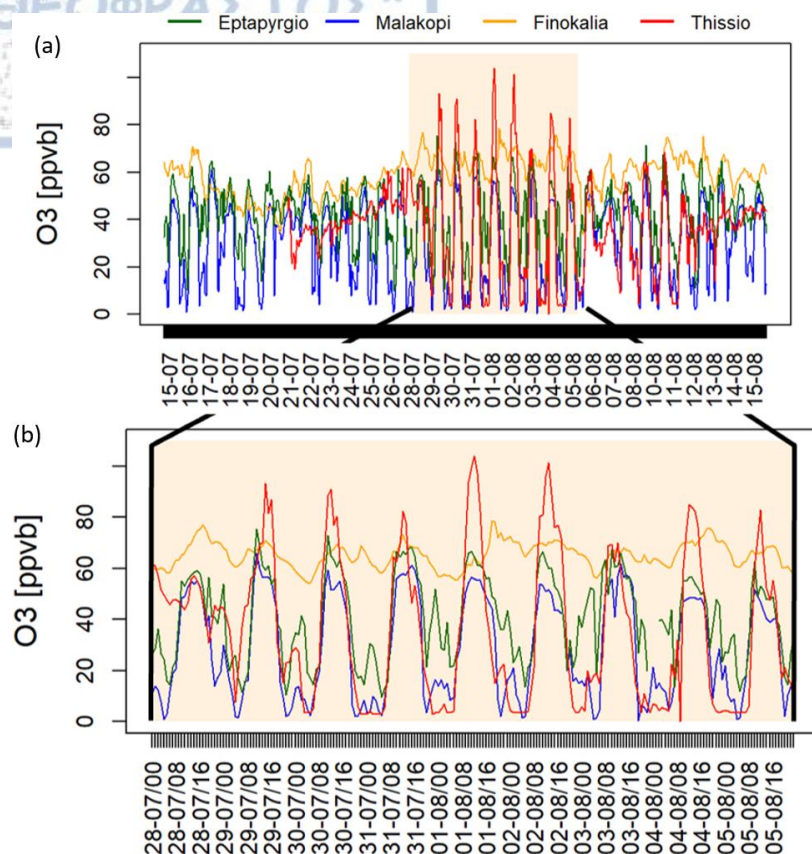
Ο σταθμός του Θησείου, όπως έχει ήδη προαναφερθεί, είναι ο σταθμός στον οποίο υπήρξε η μεγαλύτερη επίδραση των συγκεντρώσεων του όζοντος από τις συνθήκες που επικράτησαν κατά τη διάρκεια του καύσωνα. Επομένως, θέλοντας να φανεί ο βαθμός της επίδρασης αυτής πραγματοποιήθηκε σύγκριση των ωριαίων μέσων τιμών των ημερών του καύσωνα (κόκκινη γραμμή), με δύο κοντινές χρονικά περιόδους αλλά και με την μέση τιμή των ωριαίων συγκεντρώσεων των μηνών Ιουλίου και Αυγούστου της χρονικής περιόδου 2018-2020 (μαύρη γραμμή) (Σχήμα 3.27). Η πρώτη κοντινή χρονικά περίοδος είναι πριν την έναρξη της θερμής εισβολής, δηλαδή από 15/7 έως 27/7 και αναπαρίσταται με πράσινο χρώμα, ενώ η δεύτερη περίοδος είναι οι ημέρες ακριβώς μετά της λήξης της (6/8-15/8), η οποία απεικονίζεται με μπλε απόχρωση. Όπως γίνεται κατανοητό στις ημέρες του καύσωνα, κατά τη διάρκεια του μεσημεριού καταγράφονται οι υψηλότερες τιμές με την μέση τιμή να ξεπερνά τα 80 ppb στις 12 UTC, ενώ ταυτόχρονα καταγράφονται και οι μικρότερες μέσες τιμές με αυτές να αγγίζουν τα 10 ppb στις 4 UTC. Γενικότερα, κατά τη διάρκεια της ημέρας οι τιμές του όζοντος την περίοδο του καύσωνα βρίσκονται σταθερά πάνω από τις αντίστοιχες ώρες των υπόλοιπων χρονικών περιόδων, ενώ κατά τις βραδινές ώρες αυτές βρίσκονται σταθερά κάτω από τις υπόλοιπες. Αξιοσημείωτη είναι, εν συνεχεία, η πολύ καλή συσχέτιση που φαίνεται να υπάρχει μεταξύ της μέσης τιμής της περιόδου 2018-2020 με την περίοδο που αντιστοιχεί μετά το πέρας του καύσωνα. Όσον αφορά τις συγκεντρώσεις του όζοντος

πριν την έναρξη της θερμής μεταφοράς, δεν φαίνεται να ακολουθούν την κανονική κατανομή όπως οι υπόλοιπες χρονικές περιόδους. Σε αυτό το χρονικό διάστημα των 13 ημερών, οι μέσες συγκεντρώσεις του όζοντος μένουν σχετικά σταθερές κατά τη διάρκεια όλου του εικοσιτετράωρου με τις τιμές να κυμαίνονται περίπου στα 40 ppb. Αυτή η απουσία ημερήσιας διακύμανσης θυμίζει τις συγκεντρώσεις του όζοντος στον σταθμό της Φινοκαλιάς για κάθε μία ημέρα καύσωνα (Σχήμα 3.25). Τέλος, με κόκκινη απόχρωση έχει σκιαγραφηθεί η τυπική απόκλιση (standard deviation) της μέσης τιμής του όζοντος των μηνών Ιουλίου και Αυγούστου τη χρονική περίοδο 2018-2020.



Σχήμα 3.27: Μέση ημερήσια διακύμανση του επιφανειακού όζοντος (ppb) των ημερών καύσωνα (κόκκινη γραμμή), της περιόδου πριν (15-27/7/2021, πράσινη) αλλά και μετά από αυτόν (6-15/8/2021, μπλε) και της μέσης τιμής Ιουλίου και Αυγούστου 2018-2020 (μαύρη γραμμή) με την τυπική της απόκλιση (κόκκινη σκιαγράφιση).

Στο Σχήμα 3.28a γίνεται σύγκριση των επίγειων ωριαίων μετρήσεων του όζοντος, και για τους τέσσερις διαθέσιμους σταθμούς, τη χρονική περίοδο 15/7/2021 έως 15/8/2021. Σε αυτή τη χρονική περίοδο περιλαμβάνονται οι ημέρες όπου εκτυλίχθηκε το θερμό κύμα στην περιοχή της Ελλάδας (28/7/2021-5/8/2021). Στο Σχήμα 3.28b φαίνονται σε μεγέθυνση οι αντίστοιχες ημέρες, όπου στον x άξονα αποτυπώνεται ο χρόνος ως εξής: μέρα-μήνας/ώρα. Ωστόσο, πρέπει να διευκρινιστεί ότι υπάρχουν ελλείψεις δεδομένων, οι οποίες είναι εμφανείς στις αντίστοιχες χρονοσειρές, με την πιο σημαντική να είναι αυτή του Θησείου από τις 15/7 έως τις 20/7. Σε αυτά τα σχήματα καταγράφονται τα όσα αναλύθηκαν σε κάθε έναν από τους σταθμούς ξεχωριστά.



Σχήμα 3.28: Ημερήσια διακύμανση του επιφανειακού όζοντος για τους σταθμούς του Επταπυργίου (πράσινο), της Μαλακοπής (μπλε), της Φινοκαλίας (πορτοκαλί) και του Θησείου (κόκκινο) για α) 15/7/2021 έως 15/8/2021 β) ημέρες καύσωνα (ημέρα-μήνας/ώρα)

3.3 Αξιολόγηση των παγκόσμιων και περιοχικών δεδομένων πρόγνωσης O_3 του συστήματος μοντέλων CAMS

Ύστερα από τη συνοπτική ανάλυση του καύσωνα και των συγκεντρώσεων του επιφανειακού όζοντος από τα δεδομένα CAMS global reanalysis καθώς και τα δεδομένα παρατηρήσεων για την ίδια χρονική περίοδο, σε αυτήν την υποενότητα θα πραγματοποιηθεί αξιολόγηση των προγνωστικών δεδομένων του επιφανειακού όζοντος από το παγκόσμιο και το περιοχικό προγνωστικό σύστημα μοντέλων CAMS. Η αξιολόγηση των προγνωστικών δεδομένων O_3 CAMS, περιοχικής και παγκόσμιας κλίμακας, στην περιοχή μελέτης και την ευρύτερη περιοχή, αποτελεί έναν από τους βασικούς σκοπούς της παρούσας εργασίας. Για την επίτευξη του στόχου αυτού χρησιμοποιούνται δεδομένα από CAMS reanalysis (global reanalysis CAMS) και παρατηρήσεις. Τα παγκόσμια δεδομένα επανάληψης θα αναγράφονται και ως GLR, τα παγκόσμια δεδομένα πρόγνωσης θα αναφέρονται και ως GLF, ενώ τα περιοχικά δεδομένα πρόγνωσης θα αναγράφονται και με τα αρχικά RF.

3.3.1 Μέσω των δεδομένων GLR CAMS (GLF και RF vs GLR)

Στην υποενότητα αυτή γίνεται η σύγκριση των GLF και των RF δεδομένων όζοντος CAMS με τα GLR CAMS, για να φανεί ποιο από τα δύο προγνωστικά δεδομένα είναι πιο κοντά στα reanalysis. Για το σκοπό αυτό, δημιουργείται το Σχήμα 3.29 το οποίο απεικονίζει τη χωρική κατανομή του όζοντος στην επιφάνεια (GLR-GLF-RF) ανά 24 ώρες (12 UTC) για κάθε μία ημέρα του καύσωνα καθώς και ένα εικοσιτετράωρο πριν και μετά από αυτόν. Η ώρα 12 UTC έχει επιλεγεί ως μία αντιπροσωπευτική ώρα για όλη την ημέρα καθώς τότε παρατηρούνται οι μέγιστες τιμές όζοντος, οι οποίες εμφανίζονται σε μονάδες ppb. Γενικότερα, η περιοχή που συγκρίνεται είναι η Ευρώπη-Βόρεια Αφρική, δηλαδή η μεγαλύτερη δυνατή κοινή περιοχή των τριών αυτών μοντέλων, εστιάζοντας ωστόσο στην περιοχή της Ελλάδας όπου και εκτυλίχθηκε το κύμα καύσωνα. Όσον αφορά τις υπόλοιπες περιοχές δεν εξετάζεται αν επικράτησαν και σε εκείνες τις περιοχές, τις συγκεκριμένες ημερομηνίες, ακραίες θερμές συνθήκες ή όχι.

Όπως γίνεται φανερό, την ημέρα πριν την έναρξη του καύσωνα τα δεδομένα GLR είναι πολύ κοντά με τα δεδομένα πρόγνωσης του όζοντος, με το RF μοντέλο να δίνει ελαφρώς μειωμένες τιμές συγκριτικά με τα δύο global μοντέλα. Οι τιμές του όζοντος (reanalysis) στην περιοχή της Ελλάδας στις 28/7 είναι περίπου 50 ppb με τις τιμές αυτές, σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, να επηρεάζουν αρνητικά τα φυτά (Bhatia et al., 2012). Οι παγκόσμιες προγνώσεις για την πρώτη ημέρα του καύσωνα είναι περίπου 60 ppb για την περιοχή μελέτης, με τα παγκόσμια δεδομένα πρόγνωσης, συγκριτικά με τα περιοχικά, να είναι πιο κοντά σε αυτά του global reanalysis. Αυτή η σχέση μεταξύ των GLF και GLR διατηρήθηκε καθ' όλη τη διάρκεια του καύσωνα, με τα παγκόσμια δεδομένα πρόγνωσης να είναι πιο κοντά στις υψηλές τιμές που δίνουν τα GLR για συγκεκριμένες περιοχές, σε αντίθεση με τα περιοχικά δεδομένα πρόγνωσης. Αυτό έχει να κάνει ίσως με το γεγονός ότι οι επαναλύσεις του CAMS παράγονται με επανεπεξεργασία δορυφορικών παρατηρήσεων, για μια προηγούμενη εκτεταμένη περίοδο, χρησιμοποιώντας το ίδιο σύστημα αφομοίωσης δεδομένων που

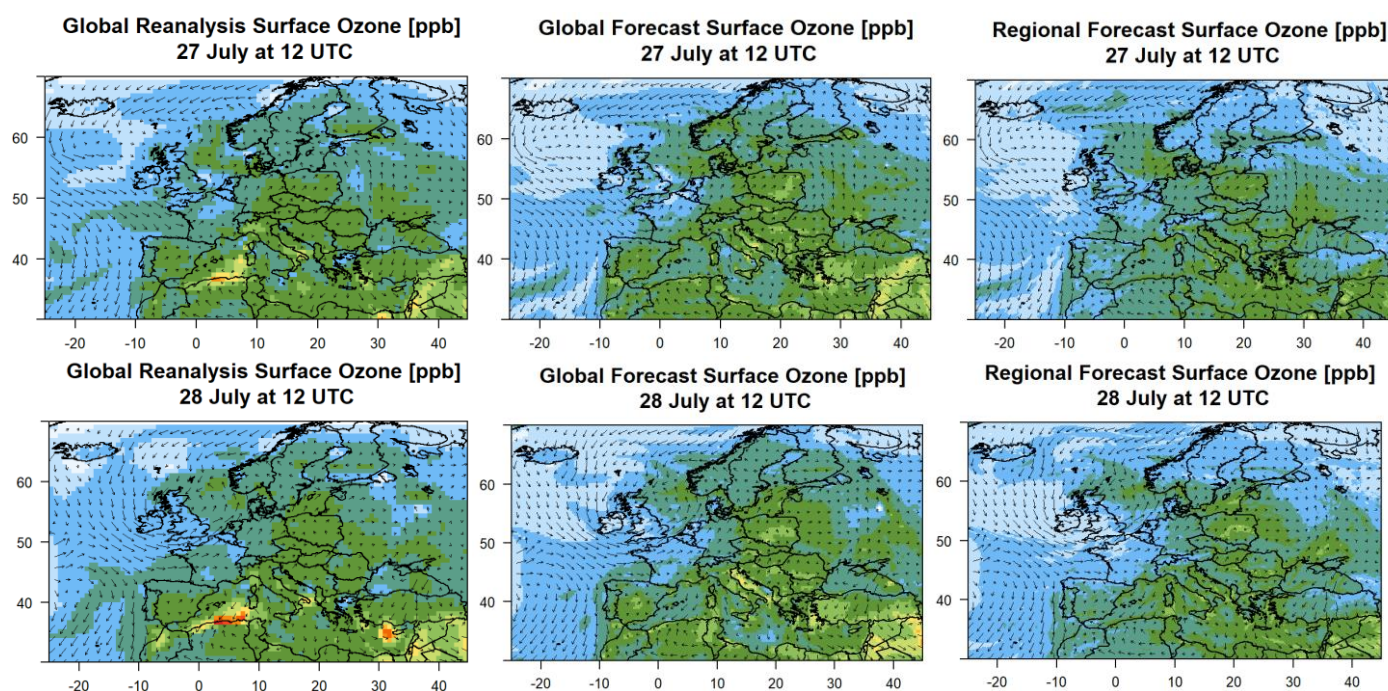
χρησιμοποιείται για τις παγκόσμιες προβλέψεις του CAMS (Copernicus, 2024). Αντιθέτως στο RF χρησιμοποιείται διαφορετική μέθοδο αφομοίωσης δεδομένων για κάθε ένα από 9 μοντέλα απ' τα οποία υπολογίζεται το τελικό προϊόν (ensemble) για την ενσωμάτωση αυτήν την φορά και επίγειων μετρήσεων.

Πιο συγκεκριμένα, στα GLR δεδομένα το όζον, κατά τη διάρκεια του καύσωνα στην Ελλάδα, αυξάνεται σε ορισμένες περιοχές σημαντικά, ξεπερνώντας τα 350 ppb. Ήδη από την πρώτη ημέρα, που η θερμή εισβολή επηρέασε την ελληνική περιοχή, το όζον αρχίζει να αυξάνεται σε δύο περιοχές στην ευρύτερη περιοχή μελέτης: στην περιοχή ανάμεσα στα ελληνικά νησιά και την Κύπρο (115 ppb) και στην Ιταλία (83 ppb). Στις 1 Αυγούστου του 2021, στο νοτιοανατολικό Αιγαίο καταγράφονται οι υψηλότερες τιμές όζοντος (176 ppb), που εμφανίστηκαν την περίοδο αυτή σε αυτήν την περιοχή. Τις επόμενες ημέρες και ενώ οι συγκεντρώσεις του όζοντος αρχίζουν να μειώνονται στις δύο περιοχές που προαναφέρθηκαν, στις 3 Αυγούστου οι τιμές του αρχίζουν να αυξάνονται και πάλι σημαντικά σε διάφορες περιοχές της Ελλάδας όπως τα Δωδεκάνησα, την Αττική, την Εύβοια αλλά και νότια της Πελοποννήσου. Αυτό μπορεί να γίνει περισσότερο εμφανές από τους χάρτες που δείχνουν το μέγιστο ημερήσιο όζον μόνο για την Ελλάδα (συμπληρωματικό υλικό). Στις 4 Αυγούστου στην ευρύτερη περιοχή της Βόρειας Εύβοιας οι συγκεντρώσεις του επιφανειακού όζοντος, σύμφωνα με το μοντέλο reanalysis, ξεπερνούν τα 340 ppb. Από την επόμενη ημέρα, στην Αττική-Εύβοια υπάρχει μείωση του όζοντος (220 ppb) όπως και στα Δωδεκάνησα, ενώ νότια της Πελοποννήσου υπάρχει μικρή αύξηση (126 ppb). Αυτό που είναι σημαντικό να διευκρινιστεί είναι ότι μετά την υποχώρηση της θερμής εισβολής και άρα το πέρας των ακραίων θερμοκρασιών στην επιφάνεια, το όζον στο μεγαλύτερο μέρος της κεντρικής και νότιας Ελλάδας βρίσκεται μεταξύ 100-160 ppb, δηλαδή παρουσιάζει μία αύξηση η οποία έχει μεγάλη χωρική έκταση. Αυτό μπορεί να οφείλεται σε καταστολή του όζοντος σε θερμοκρασίες άνω των 39 °C αλλά και στην μεταφορά του από την περιοχή της Εύβοιας και της κεντρικής Μακεδονίας προς τα νοτιοανατολικά (συμπληρωματικό υλικό). Μία πιθανή μεταφορά συμφωνεί με τους ανέμους (CAMS data) στα 10μέτρα όπου έχει επικαλυφθεί (overlay) πάνω στους ίδιους χάρτες.

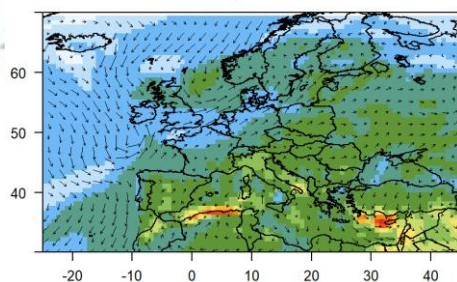
Όσον αφορά τα παγκόσμια δεδομένα προγνώσεων του όζοντος από το μοντέλο CAMS, φαίνεται σε πρώτη ανάγνωση το όζον να μην φτάνει αυτές τις ακραίες τιμές που πιάνει το GLR. Πιο συγκεκριμένα, κατά τη διάρκεια του καύσωνα στο GLF παρατηρείται σταδιακή αύξηση των συγκεντρώσεων του όζοντος, που επηρεάζει τη νοτιοανατολική Ευρώπη. Κυρίως οι περιοχές που φαίνεται να αυξάνεται αυτός ο ατμοσφαιρικός ρύπος, στην αρχή της επίδρασης της θερμής μεταφοράς, είναι οι περιοχές γύρω από την Αδριατική θάλασσα αλλά και τα Δωδεκάνησα, συμφωνώντας έτσι με το GLR μοντέλο. Από τις 31 Ιουλίου 2021 οι συγκεντρώσεις του μειώνονται στην Ιταλία, ενώ σε διάφορες περιοχές της Ελλάδας όπως τα Δωδεκάνησα και νότια της Αττικής γίνονται μεγαλύτερες. Επομένως, συγκρίνοντας τα GLR και GLF του όζοντος, γίνεται φανερό ότι οι περιοχές που επηρεάζονται περισσότερο, και στα δύο μοντέλα, αυτήν τη χρονική περίοδο είναι αρκετά κοντά (χωρικά) μεταξύ τους. Ωστόσο, η διαφορά έγκειται στις σημαντικές αποκλίσεις των τιμών του όζοντος, με το παγκόσμιο μοντέλο πρόγνωσης αρχικά να υποεκτιμά σημαντικά και έπειτα να υπερεκτιμά αισθητά την «πραγματικότητα» των reanalysis.

Πιο συγκεκριμένα, στη δυτική Μεσόγειο τα GLR δίνουν σημαντικά υψηλότερες συγκεντρώσεις για ορισμένες περιοχές (π.χ. Αλγερία) συγκριτικά με τα παγκόσμια προγνωστικά δεδομένα. Οι υπόλοιπες περιοχές στη δυτική Μεσόγειο βρίσκονται στα ίδια περίπου επίπεδα. Όσον αφορά την Ανατολική Μεσόγειο και ενώ φαίνεται να ισχύει το ίδιο, καθ' όλη τη διάρκεια του καύσωνα (εκτός των περιοχών γύρω από την Αδριατική θάλασσα), οι συγκεντρώσεις των προγνώσεων είναι εμφανώς μικρότερες μόνο μέχρι τις 30 Αυγούστου. Με μία πιο προσεκτική παρατήρηση των δεδομένων προκύπτει, ότι από τις 31 Αυγούστου μέχρι τις 4 Αυγούστου τα GLF δεδομένα δίνουν εξαιρετικά υψηλότερες τιμές σε τοπικό επίπεδο δηλαδή σε μικρότερη έκταση, το οποίο κυρίως αφορά την περιοχή των Δωδεκανήσων. Ένα ενδεικτικό παράδειγμα είναι, ότι στις 31/7 στο GLR τα Δωδεκάνησα αποκτούν μέγιστη τιμή 131 ppb και νότια της Αττικής 50 ppb, ενώ στο GLF στα Δωδεκάνησα καταγράφεται τιμή όζοντος που ξεπερνά τα 210 ppb, ενώ νότια της Αττικής οι συγκεντρώσεις φτάνουν τα 120 ppb. Αυτή η αύξηση των παγκόσμιων προγνώσεων του όζοντος συνεχίζεται, διατηρώντας τιμές υψηλότερες από των GLR μέχρι τις 4 Αυγούστου, όπου τα GLR ξεπερνούν και πάλι τις παγκόσμιες προγνώσεις. Αυτή είναι η χρονική περίοδος (4 και 5 Αυγούστου) όπου η Αττική και η Βόρεια Εύβοια ξεπερνούν τα 340 ppb σύμφωνα με το global reanalysis μοντέλο.

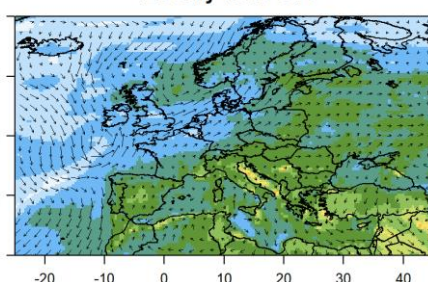
Όσον αφορά τις περιοχικές προγνώσεις του όζοντος από το μοντέλο CAMS, καθ' όλη τη διάρκεια του καύσωνα δεν παρουσιάζει υψηλές αυξήσεις για αυτόν τον ρύπο (>110 ppb), οι οποίες να έχουν μεγάλη χωρική κλίμακα. Συγκρίνοντας τα RF δεδομένα με τα GLR, συνεπάγεται ότι το RF υποεκτιμά τα reanalysis, στις περιοχές όπου αυτό εμφανίζει ακραίες συγκεντρώσεις όζοντος. Στις υπόλοιπες περιοχές όπου δεν συμβαίνει κάτι τέτοιο, τα RF δεδομένα βρίσκονται αρκετά κοντά στα GLR και τα GLF. Συνεπώς, μέχρι στιγμής βγαίνει το συμπέρασμα ότι τα παγκόσμια δεδομένα πρόγνωσης του όζοντος πιάνουν καλύτερα την πραγματικότητα αφού αυτά είναι πιο κοντά στα reanalysis. Δυστυχώς, δεν έχει υπάρξει κάποια αντίστοιχη μελέτη για κάποιο ακραίο επεισόδιο ώστε να συγκριθούν τα αποτελέσματα μας.



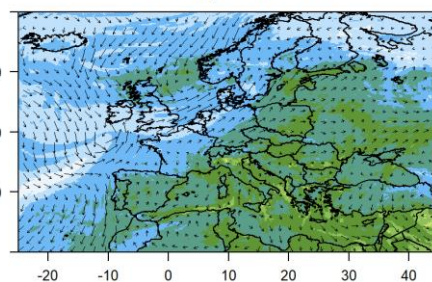
**Global Reanalysis Surface Ozone [ppb]
29 July at 12 UTC**



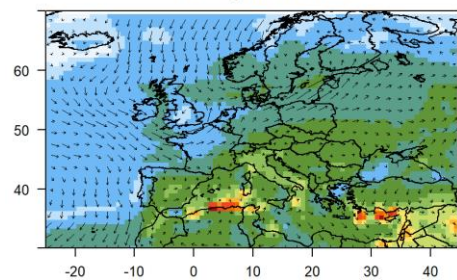
**Global Forecast Surface Ozone [ppb]
29 July at 12 UTC**



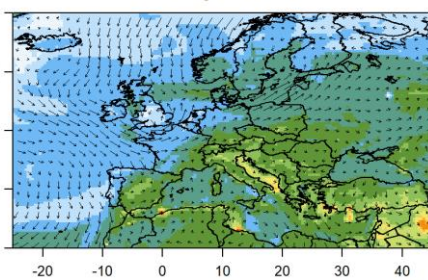
**Regional Forecast Surface Ozone [ppb]
29 July at 12 UTC**



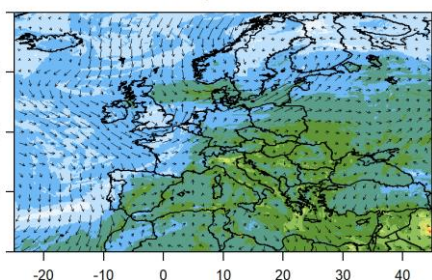
**Global Reanalysis Surface Ozone [ppb]
30 July at 12 UTC**



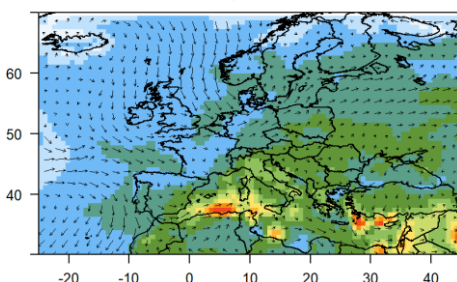
**Global Forecast Surface Ozone [ppb]
30 July at 12 UTC**



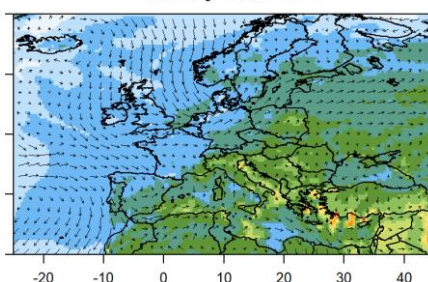
**Regional Forecast Surface Ozone [ppb]
30 July at 12 UTC**



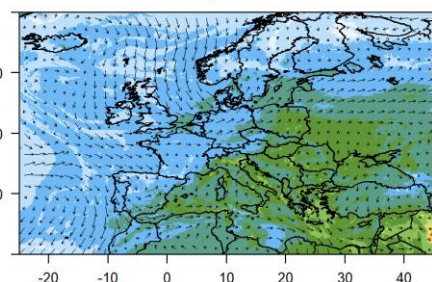
**Global Reanalysis Surface Ozone [ppb]
31 July at 12 UTC**



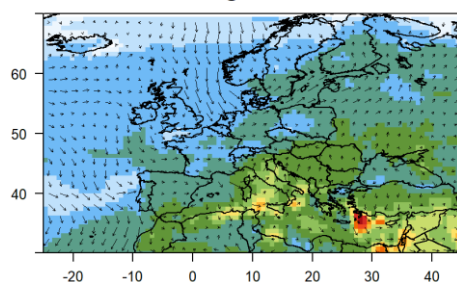
**Global Forecast Surface Ozone [ppb]
31 July at 12 UTC**



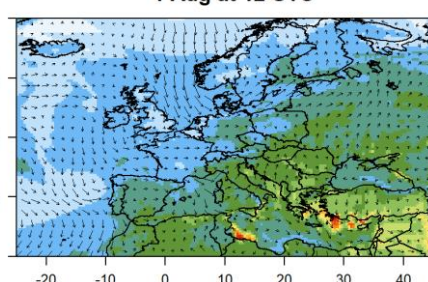
**Regional Forecast Surface Ozone [ppb]
31 July at 12 UTC**



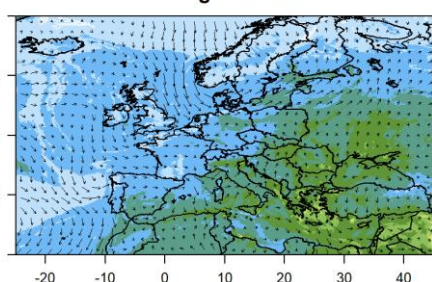
**Global Reanalysis Surface Ozone [ppb]
1 Aug at 12 UTC**



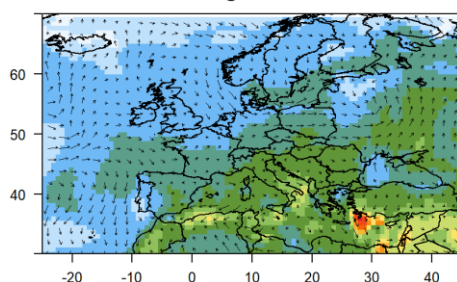
**Global Forecast Surface Ozone [ppb]
1 Aug at 12 UTC**



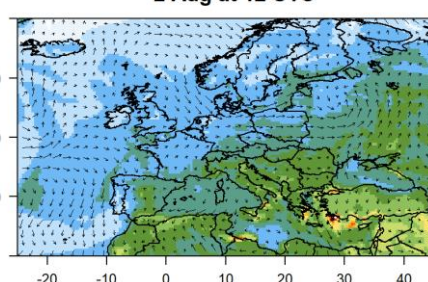
**Regional Forecast Surface Ozone [ppb]
1 Aug at 12 UTC**



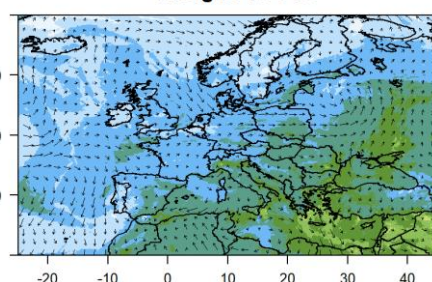
**Global Reanalysis Surface Ozone [ppb]
2 Aug at 12 UTC**

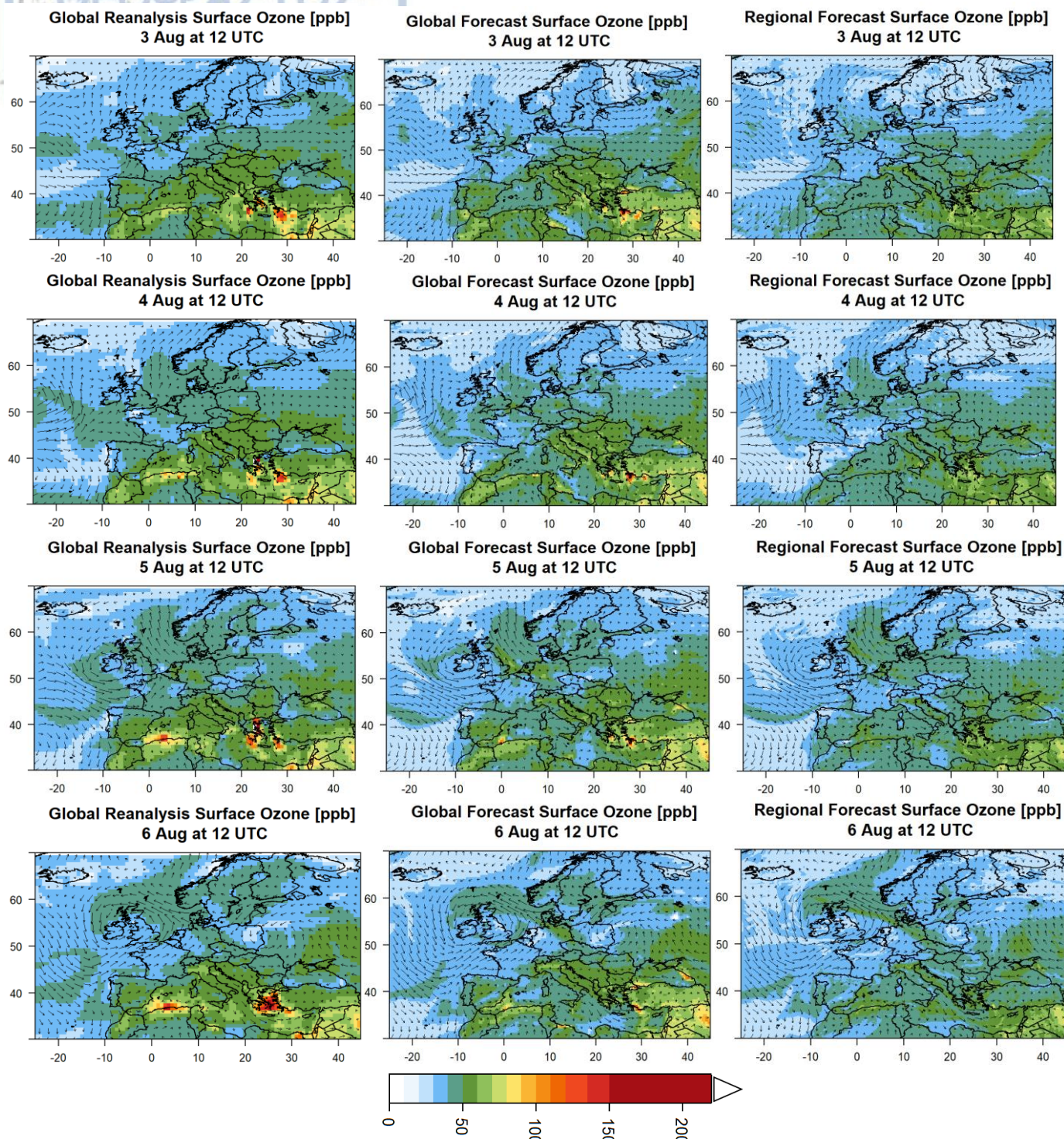


**Global Forecast Surface Ozone [ppb]
2 Aug at 12 UTC**



**Regional Forecast Surface Ozone [ppb]
2 Aug at 12 UTC**





Σχήμα 3.29: Χωρική κατανομή του επιφανειακού όζοντος σύμφωνα με το μοντέλο *global reanalysis CAMS* (1^η στήλη), *global forecast CAMS* (2^η στήλη) και το *regional forecast CAMS* (3^η στήλη) (ppb, χρωματική κλίμακα), καθώς και ο οριζόντιος άνεμος (U,V) (m/s, μαύρα βέλη) στα 10m (Data: *global reanalysis CAMS*) για τις ημέρες 27 Ιουλίου έως 6 Αυγούστου 2021.

Αυτές οι ακραίες συγκεντρώσεις όζοντος, που καταγράφονται στο παγκόσμιο μοντέλο επανάλυσης, δημιουργούν ερωτηματικά για την αξιοπιστία των δεδομένων στις συγκεκριμένες περιοχές και εγείρουν αμφιβολίες κατά πόσο είναι αποδεκτή η αξιολόγηση των προγνωστικών δεδομένων, κατά τη διάρκεια ενός καύσωνα, μέσω της σύγκρισης τους με τα GLR δεδομένα. Η χρονική στιγμή των ακραίων συγκεντρώσεων όζοντος στην περιοχή

της βόρειας Εύβοιας (4/8) ταυτίζεται χρονικά με τις πυρκαγιές που υπήρχαν σε αυτήν την περιοχή, με τις 3 και 4 Αυγούστου να είναι οι ημέρες που κάηκαν οι περισσότερες εκτάσεις. Γνωρίζοντας τη σχέση που υπάρχει μεταξύ της καύσης βιομάζας και του σχηματισμού όζοντος, διερευνήθηκε η ύπαρξη σταθμού ο οποίος μετράει την μεταβολή του επιφανειακού όζοντος και ανήκει στην Περιφέρεια ή το Δήμο που υπάγεται αυτή η περιοχή, για να διερευνηθεί κατά πόσο τα GLR βρίσκονται κοντά στην πραγματικότητα (επίγειες παρατηρήσεις). Ωστόσο, δεν βρέθηκε ένας τέτοιος σταθμός με αποτέλεσμα να επιτευχθεί ο έλεγχος της εγκυρότητας των GLR μέσω των παρατηρήσεων των τεσσάρων σταθμών που έχουν χρησιμοποιηθεί μέχρι τώρα. Θα πρέπει μάλιστα να διευκρινιστεί ότι αυτοί οι σταθμοί δεν βρίσκονται κοντά στην περιοχή με τις ακραίες μετρήσεις.

Πίνακας 3.1: Στατιστικές μετρήσεις για το επιφανειακό όζον για τέσσερις ελληνικούς σταθμούς. Περίοδος σύγκρισης: 15/7/2021-15/8/2021, Μέγεθος δείγματος σύγκρισης: 768 για κάθε σταθμό εκτός του Θησείου που είχε 510. Συντελεστής συσχέτισης (cc), μέσο σφάλμα (MBE), μέσο απόλυτο σφάλμα (MAE), ρίζα του μέσου τετραγωνικού σφάλματος (RMSE) και τροποποιημένη κανονικοποιημένη μέση απόκλιση (MNMB)

Station	CAMS Global Reanalysis				
	cc	MBE (ppb)	MAE (ppb)	RMSE (ppb)	MNMB
Thissio	0.17	-3.2	15.7	20.2	0.06
Finokalia	0.35	-22.9	23	24.8	-0.49
Malakopi	0.11	2.9	14.4	17.6	0.22
Eptapyrgio	0.03	-7.6	13.9	16.7	-0.16

Χρησιμοποιώντας το συντελεστή συσχέτισης (cc), το μέσο σφάλμα (MBE), το μέσο απόλυτο σφάλμα (MAE), την ρίζα του μέσου τετραγωνικού σφάλματος (RMSE) και την τροποποιημένη κανονικοποιημένη μέση απόκλιση (MNMB), διερευνάται η αξιοπιστία των δεδομένων αυτών (GLR) (Πίνακας 3.1). Ο συντελεστής συσχέτισης κυμαίνεται από 0.03 έως 0.35 για τους τέσσερις σταθμούς δείχνοντας με αυτόν τον τρόπο την πολύ αδύναμη και αδύναμη συσχέτιση μεταξύ των παρατηρήσεων και των παγκόσμιων δεδομένων επανάλυσης, που μπορεί να δικαιολογηθεί εν μέρει και από τη χαμηλή χωρική ανάλυση. Το RMSE, που εκφράζει την συνολική απόκλιση του μοντέλου από τις παρατηρήσεις, κυμαίνεται από 16.65 έως 24.8 ppb, ενώ το MNMB πέραν του σταθμού του Θησείου οι τιμές του κυμαίνονται από -0.49 (έντονη υποεκτίμηση) έως 0.22 (έντονη υπερεκτίμηση) φανερώνοντας έτσι την μη σταθερή και συνεπή απόδοση της επανάλυσης σε τοπικό επίπεδο.

Εξάγεται επομένως το συμπέρασμα ότι τα GLR δεδομένα επιφανειακού όζοντος, λόγω της περιορισμένης συσχέτισης τους με δεδομένα επίγειων παρατηρήσεων σε σταθμούς, καθώς και λόγω της χαμηλής χωρικής τους ανάλυσης, έχουν περιορισμένη χρησιμότητα για την αξιολόγηση των προγνωστικών δεδομένων CAMS σε τοπικό επίπεδο. Ωστόσο, όπως επισημαίνει η κλιματολογική έρευνα των Wagner et al. (2021) χρησιμοποιώντας δορυφορικά δεδομένα για την αξιολόγηση, το παγκόσμιο σύστημα μοντέλου reanalysis CAMS παρέχει, ως επί το πλείστον, μία σταθερή και ακριβή αναπαράσταση της παγκόσμιας κατανομής των αντιδρώντων αερίων, όπως το όζον για την περίοδο 2003-2018. Ομοίως, οι Wang et al. (2020) δείχνουν ότι το CAMS reanalysis αναπαράγει με επιτυχία τις παγκόσμιες

παρατηρούμενες συγκεντρώσεις χημικών ειδών όπως το τροποσφαιρικό όζον για την περίοδο 2004-2016. Οι Katragkou et al. (2015) αξιολόγησαν το επιφανειακό όζον πάνω από την Ευρώπη των δεδομένων MACC reanalysis (προϊόν ανάλογο αλλά πρότερο του CAMS reanalysis) συζητώντας τα θετικά αλλά και τα αδύνατα σημεία σε σύγκριση με τις επίγειες παρατηρήσεις. Όπως είναι γνωστό το επιφανειακό όζον έχει ποικίλους παράγοντες που επηρεάζουν τους χημικούς μηχανισμούς παραγωγής ή καταστροφής του. Εν τούτοις, κατά τη διάρκεια μίας μικρής περιόδου (ενός μηνός), η οποία μάλιστα περιέχει ένα πολύ ισχυρό φαινόμενο όπως είναι αυτό του καύσωνα, που επικρατούν ακραίες συνθήκες με παράγοντες που επιδρούν έντονα στο επιφανειακό όζον, ίσως είναι επίσης ένας λόγος που πρέπει να ληφθεί για την αξιολόγηση του CAMS reanalysis σε σχέση με τις επίγειες παρατηρήσεις σε τοπικό επίπεδο.

3.3.2 Μέσω δεδομένων παρατήρησης (GLF και RF vs observations)

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της προηγούμενης υποενότητας, κρίνεται απαραίτητη η αξιολόγηση των προγνωστικών δεδομένων, με τη βοήθεια μετρήσεων από σταθμούς μέτρησης ατμοσφαιρικής ρύπανσης (β' φάση αξιολόγησης). Οι σταθμοί που χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση αυτή είναι οι 4 επίγειοι σταθμοί που έχουν ήδη αναλυθεί σε προηγούμενη ενότητα. Αυτοί προσφέρουν αξιόπιστα δεδομένα παρατηρήσεων του όζοντος από την επιφάνεια και χρησιμοποιούνται αυτήν την φορά για την αξιολόγηση των δύο προγνωστικών μοντέλων, προκειμένου να φανεί ποιο έδωσε προγνώσεις πιο κοντά στα πραγματικά δεδομένα. Για να επιτευχθεί η σύγκριση των δεδομένων αυτών, όλα τα δεδομένα βρίσκονται σε κοινές μονάδες μέτρησης, δηλαδή οι συγκεντρώσεις του όζοντος σε μονάδες ppb, ενώ η μεταβλητή του χρόνου και για τις τρεις βάσεις δεδομένων βρίσκεται σε ώρες UTC. Ως πρώτο βήμα της αξιολόγησης είναι η δημιουργία χρονοσειρών που αποτυπώνουν τη χρονική εξέλιξη των παρατηρήσεων και των προγνώσεων του όζοντος για κάθε ένα από τους σταθμούς, ενώ στη συνέχεια δημιουργούνται χρονοσειρές οι οποίες δείχνουν την απόκλιση των προγνωστικών δεδομένων από τις παρατηρήσεις αυτές (απλό σφάλμα). Αυτές οι χρονοσειρές αφορούν έναν μήνα, δηλαδή από τις 15 Ιουλίου έως τις 15 Αυγούστου του 2021, στον οποίο συμπεριλαμβάνονται οι ημέρες του καύσωνα. Ωστόσο, θα πρέπει να διευκρινιστεί ότι τα δεδομένα που απεικονίζονται έχουν χρονικό βήμα 3 ώρες, δηλαδή για τις χρονικές στιγμές που υπάρχουν τιμές και για τις τρεις βάσεις δεδομένων, αφού τα παγκόσμια δεδομένα πρόγνωσης επιλύονται ανά 3 ώρες. Επομένως, η απόκλιση της ημερήσιας μεταβολής του παρατηρούμενου O_3 από το Σχήμα 3.28b οφείλεται στο διαφορετικό χρονικό βήμα (ανά 1 ώρα στο Σχήμα 3.28b) και γι' αυτόν το λόγο οι συγκεκριμένες χρονοσειρές χρησιμοποιούνται αποκλειστικά και μόνο για σύγκριση με τα GLF και RF δεδομένα.

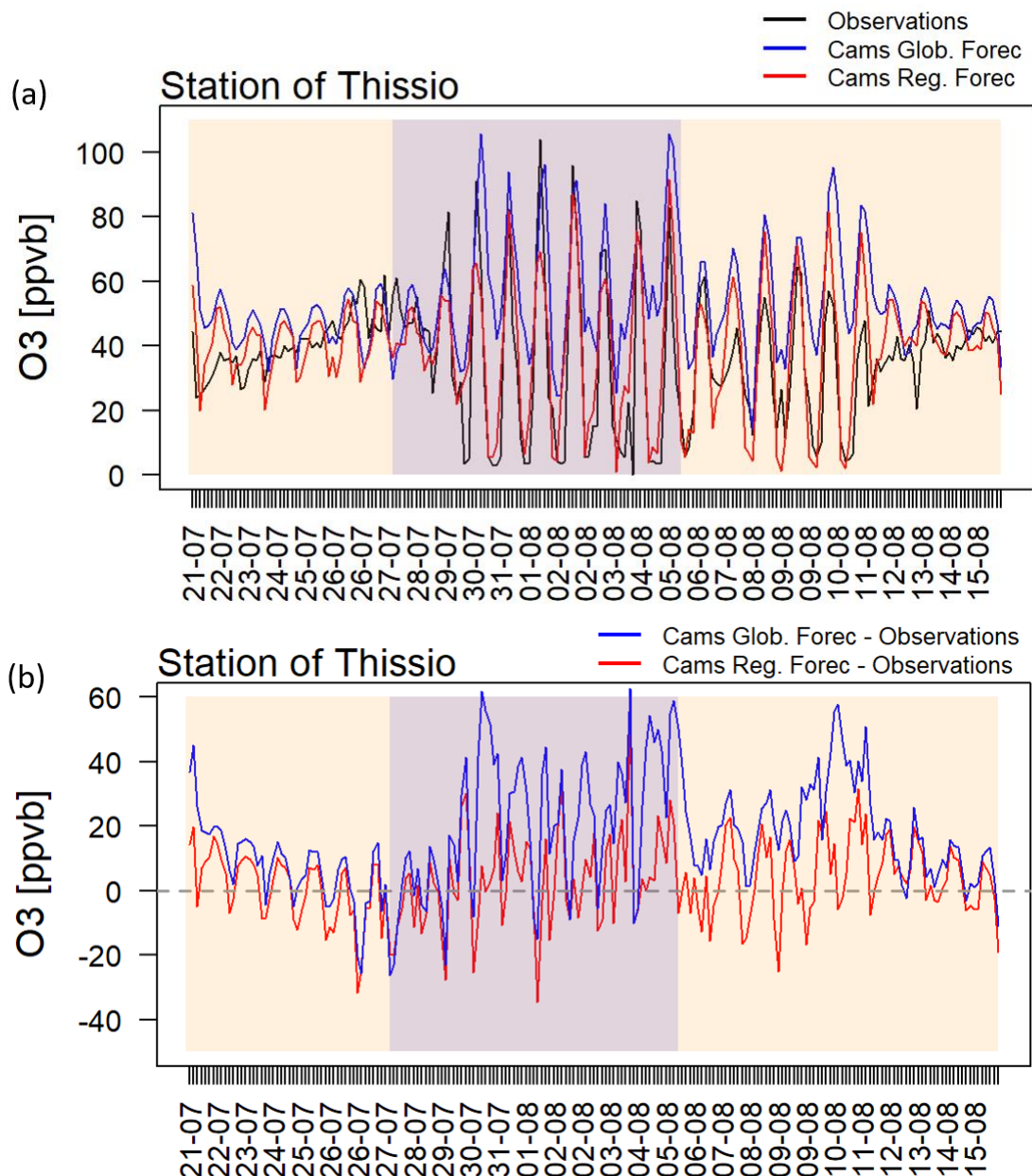
Αρχικά εξετάζεται ο σταθμός του Θησείου, στον οποίο το όζον φάνηκε να έχει επηρεαστεί σημαντικά (Σχήμα 3.28b). Στο Σχήμα 3.30a απεικονίζεται η χρονική εξέλιξη των παρατηρήσεων του όζοντος, καθώς και των GLF και των RF CAMS δεδομένων από τις 20/7 έως τις 15/8. Το χρονικό διάστημα 15/7 έως 20/7 δεν απεικονίζεται λόγω της έλλειψης επίγειων παρατηρήσεων για αυτόν το σταθμό. Σύμφωνα με τις χρονοσειρές, τη χρονική περίοδο πριν την επίδραση της θερμής εισβολής, τα παγκόσμια προγνωστικά δεδομένα

υπερεκτιμούν τις μέγιστες τιμές των παρατηρήσεων και είναι πιο κοντά στις ελάχιστες. Το Σχήμα 3.30b επιβεβαιώνει τα ευρήματα αυτά. Όσον αφορά το περιοχικό μοντέλο, αυτό και πάλι υπερεκτιμά τα μέγιστα των παρατηρήσεων, αλλά σε μικρότερο βαθμό από το GLF. Ωστόσο, η αντίθετη εικόνα φαίνεται να παρατηρείται από τα ημερήσια ελάχιστα, τα οποία υποεκτιμούνται από το περιοχικό μοντέλο αισθητά περισσότερο απ' ό τι το κάνει το παγκόσμιο μοντέλο πρόγνωσης. Το GLF μοντέλο εμφανίζει τις μεγαλύτερες υποεκτιμήσεις του στις 26, 27 και 30 Αυγούστου, δηλαδή τις ημέρες πριν την έναρξη του καύσωνα αλλά και μία ημέρα κατά τη διάρκεια του (Σχ. 3.30b). Οι τιμές τους φτάνουν τα -25 rrb. Το RF μοντέλο εμφανίζει τις μεγαλύτερες υποεκτιμήσεις του στις 26, 27, 29 και 30 Ιουλίου, καθώς και στις 2 και 9 Αυγούστου, με τις τιμές να είναι πολύ μεγαλύτερες (κατά απόλυτη τιμή) από αυτές που συνήθως παρατηρούνται σε αυτό (-15 rrb). Η ισχυρότερη υποεκτίμηση, η οποία είναι στις 2 Αυγούστου, φαίνεται να ξεπερνά το σφάλμα των -30 rrb. Γενικότερα, 4 από τις 6 υποεκτιμήσεις, που ξεπερνούν το σύνηθες όριο των -15 rrb, συμβαίνουν μέσα στην περίοδο των ακραίων θερμοκρασιών (κόκκινη σκιαγράφηση). Γενικότερα, και στα δύο μοντέλα οι μεγαλύτερες υποεκτιμήσεις γίνονται λίγο πριν την έναρξη του καύσωνα αλλά και τις πρώτες μέρες αυτού. Η αιτία των υποεκτιμήσεων των δύο μοντέλων έχει να κάνει με την αδυναμία του μοντέλου να πιάσει τα μέγιστα που καταγράφονται κάποια ημέρα.

Τη χρονική περίοδο που εξελίσσεται ο καύσωνας (κόκκινη σκιαγράφηση), εκτός των υποεκτιμήσεων, παρατηρείται η έναρξη ισχυρά θετικών σφαλμάτων με αυτά να εντοπίζονται από τις 29 Ιουλίου κι έπειτα. Πιο συγκεκριμένα, το GLF μοντέλο από τις 29 Ιουλίου κατά κύριο λόγο υπερεκτιμά τις πραγματικές μετρήσεις στο Θησείο, ενώ από τις 4 Αυγούστου και έπειτα (έως 13/8) δεν υποεκτιμά καμία χρονική στιγμή (Σχήμα 3.30b). Τα περισσότερα θετικά σφάλματα του GLF συναντώνται από τις 30 Ιουλίου έως τις 5 Αυγούστου με την πλειονότητά τους να κυμαίνεται από 20 έως 62 rrb. Το σφάλμα των 60 rrb προσεγγίζεται 4 φορές, με τις τρεις από αυτές να είναι την περίοδο της θερμής μεταφοράς (30/7, 3/8 και 5/8) και την τέταρτη να είναι στις 10/8/2021. Η αιτία των υπερεκτιμήσεων έχει να κάνει με την αδυναμία του GLF μοντέλου να πιάσει τα πολύ χαμηλά ελάχιστα των συγκεκριμένων ημερών, τα οποία όπως έχει επισημανθεί στο Σχήμα 3.26 οφείλονται στην έντονη παρουσία των NO_x. Με αυτόν τον τρόπο καταγράφεται η δυσκολία του global forecast CAMS να αναπαραστήσει την μεταβλητότητα ενός αστικού σταθμού κατά τη διάρκεια ενός καύσωνα. Παρ' όλα αυτά τις πρώτες ημέρες της θερμής μεταφοράς το GLF προσεγγίζει καλύτερα τα ημερήσια μέγιστα συγκριτικά με το RF. Όσον αφορά το περιοχικό μοντέλο αυτό υπερεκτιμά με την ίδια συχνότητα που υποεκτιμά, με εξαίρεση να αποτελεί το χρονικό διάστημα 2 έως 5 Αυγούστου που το RF μοντέλο κυρίως υπερεκτιμά (ή αλλιώς δεν προβαίνει σε σημαντικές υποεκτιμήσεις), αλλά σε μικρότερο βαθμό απ' ό τι το GLF. Η υπερεκτίμηση που κάνει είναι καθ' όλη τη διάρκεια του μήνα μέχρι 30 rrb, ενώ στις 3 Αυγούστου καταγράφεται ένα μέγιστο στα 50 rrb. Τέλος, αυτό που σίγουρα πρέπει να υπογραμμιστεί είναι ότι το RF προβλέπει εξαιρετικά καλά τις ελάχιστες και μέγιστες ημερήσιες συγκεντρώσεις του επιφανειακού όζοντος κατά τη διάρκεια της θερμής μεταφοράς.

Συγκρίνοντας τα δύο σχήματα (Σχ. 3.30a, Σχ. 3.30b), συμπεραίνεται ότι όσο το εύρος της ημερήσιας μεταβλητότητας του πραγματικού και του προγνωστικού όζοντος είναι μικρό, τα σφάλματα παραμένουν μικρά. Ωστόσο, όταν οι ημερήσιες μεταβολές αυξάνονται εμφανώς, όπως παρατηρούνται κατά τη διάρκεια της θερμής εισβολής, τότε τα σφάλματα πρόγνωσης των συγκεντρώσεων μεγαλώνουν. Όταν η θερμή μεταφορά σταμάτησε να επιδρά

στην Ελλάδα, μειώθηκε η ημερήσια μεταβλητότητα του όζοντος, κάνοντας τα σφάλματα μικρότερα. Βέβαια η λήξη του καύσωνα, όπως γίνεται φανερό, δεν συνεπάγεται την επαναφορά των συγκεντρώσεων του όζοντος άμεσα στα επίπεδα πριν από αυτόν. Το παγκόσμιο μοντέλο συνεχίζει να υπερεκτιμά, αυτήν τη φορά μόνιμα, αυτόν τον ατμοσφαιρικό ρύπο όπως και κατά βάση συνέβαινε καθ' όλη τη διάρκεια αυτού του ενός μήνα. Τέλος, όσον αφορά το περιοχικό μοντέλο τα σφάλματα την πρώτη ημέρα μετά τον καύσωνα επανήλθαν στα επίπεδα πριν από τον ερχομό του, ενώ στη συνέχεια αυξάνονται και πάλι παροδικά έως τις 13 Αυγούστου, χρονική στιγμή από την οποία πάλι τα σφάλματα γίνονται μικρότερα.

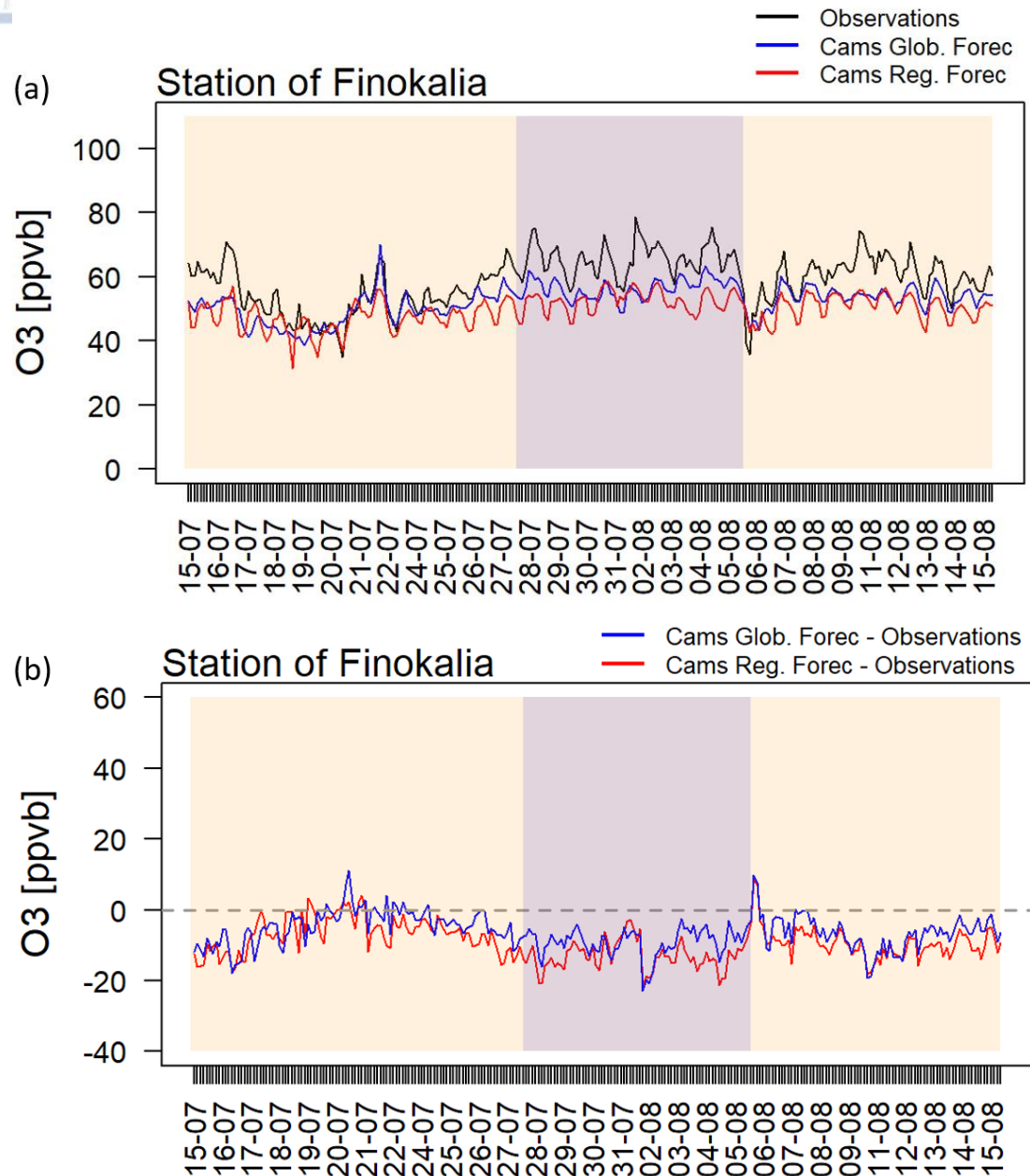


Σχήμα 3.30: Ημερήσια διακύμανση του επιφανειακού όζοντος (ppb) από τις 21/7 έως τις 15/8 για το σταθμό του Θησείου α) από το μοντέλο *global forecast CAMS* (μπλε γραμμή), το μοντέλο *regional forecast CAMS* (κόκκινη) και τις επίγειες παρατηρήσεις από το σταθμό (μαύρη γραμμή) β) τη διαφορά του *global forecast CAMS* μοντέλου από τις παρατηρήσεις (μπλε γραμμή) και τη διαφορά του *regional forecast CAMS* μοντέλου από τις παρατηρήσεις (κόκκινη γραμμή)

Ο επόμενος σταθμός που θα αναλυθεί είναι εκείνος της Φινοκαλιάς. Όπως φάνηκε και στο Σχήμα 3.28b, οι παρατηρήσεις του επιφανειακού όζοντος σε αυτόν παρουσιάζουν αυξημένες τιμές καθ' όλη τη διάρκεια του ενός μήνα, χωρίς έντονη ημερήσια μεταβλητότητα, με τις τιμές του όζοντος να κυμαίνονται ανάμεσα στα 40 με 80 ppb (Σχήμα 3.31a). Μία μικρή αύξηση της τάξης των 15 ppb καταγράφεται τη χρονική περίοδο που εξελίσσεται ο καύσωνας. Αυτήν την μικρή κατά τα άλλα αύξηση δεν φαίνεται να ακολουθούν τα δύο προγνωστικά μοντέλα, τα οποία συνεχίζουν να κυμαίνονται στα ίδια επίπεδα. Επομένως, καθώς πλησιάζουν οι ημέρες έναρξης της περιόδου των ακραίων θερμοκρασιών, τα απλά σφάλματα και των δύο προγνωστικών μοντέλων αυξάνονται, οδηγώντας σε μεγαλύτερες τιμές υποεκτίμησης των πραγματικών συγκεντρώσεων (Σχήμα 3.31b). Γενικότερα, φαίνεται ότι τα δύο προγνωστικά μοντέλα υποεκτιμούν το όζον στη συγκεκριμένη περιοχή καθ' όλη τη διάρκεια του ενός μήνα. Παράλληλα, κάτι το οποίο γίνεται ιδιαίτερα εμφανές στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι ότι το παγκόσμιο μοντέλο πλησιάζει περισσότερο τις πραγματικές μετρήσεις στην πλειονότητα των ημερών που αναλύονται. Επομένως εξάγεται το συμπέρασμα ότι σε αυτόν το σταθμό, ο οποίος χαρακτηρίζεται ως περιοχικού υποβάθρου, το παγκόσμιο μοντέλο πρόγνωσης CAMS προβλέπει ελαφρώς καλύτερα το επιφανειακό όζον. Ειδικότερα, από τις 21 Ιουλίου έως τις 15 Αυγούστου, τα GLF βρίσκονται σταθερά πάνω από τις υποεκτιμήσεις του RF, δηλαδή πιο κοντά στις παρατηρήσεις. Βέβαια πρέπει να υπογραμμιστεί ότι τα σφάλματα τους είναι πολύ κοντά μεταξύ τους, με την απόστασή τους να είναι της τάξης των 4 ppb. Κατά βάση τα μοντέλα υποεκτιμούν τις συγκεντρώσεις του όζοντος στη Φινοκαλιά έως 25 ppb (κατ' απόλυτη τιμή), με τις μεγαλύτερες υποεκτιμήσεις να συμβαίνουν την περίοδο της θερμής μεταφοράς (κόκκινη σκιαγραφημένη περιοχή). Η μεγαλύτερη υποεκτίμηση από το GLF σημειώνεται στις 2/8 με τιμή μεγαλύτερη των 25 ppb, ενώ την ίδια ημέρα παρουσιάζεται η μεγαλύτερη υποεκτίμηση του RF με ίδια τιμή. Ωστόσο το RF μοντέλο εμφανίζει άλλες τρεις τοπικά μέγιστες υποεκτιμήσεις με παρόμοιες τιμές στις 28/7, 4/8 και 11/8. Όπως γίνεται αντιληπτό η πλειοψηφία των μέγιστων υποεκτιμήσεων στα δύο προγνωστικά μοντέλα συμβαίνει κατά τη διάρκεια της θερμής εισβολής.

Ωστόσο πέραν των συνεχών υποεκτιμήσεων, το GLF μοντέλο κατά τη διάρκεια του συγκεκριμένου μήνα υπερεκτίμησε δύο φορές εμφανώς τα πραγματικά δεδομένα, πλην όμως με το θετικό σφάλμα να είναι και τις δύο φορές αρκετά μικρό (10 ppb). Οι ημέρες που εμφανίστηκε η υπερεκτίμηση αυτή ήταν 20/7 και 6/8, με τη δεύτερη να αποτελεί την ημέρα μετά τη λήξη του καύσωνα. Την ίδια ημέρα και το περιοχικό μοντέλο κατέγραψε την μεγαλύτερη του υπερεκτίμηση στον ίδιο βαθμό με το παγκόσμιο μοντέλο (10 ppb). Ο λόγος που φαίνεται να καταγράφεται αυτό το τοπικό μέγιστο, έχει να κάνει με την αδυναμία των δύο μοντέλων να πιάσουν τις χαμηλότερες συγκεντρώσεις εκείνης της ημέρας (Σχήμα 3.31a). Το ίδιο ακριβώς συνέβη και στην πρώτη υπερεκτίμηση του GLF. Όπως και στην περίπτωση του Θησείου, μετά τη λήξη του καύσωνα φαίνεται οι συγκεντρώσεις να μειώνονται τις δύο πρώτες ημέρες και άρα τα σφάλματα να μειώνονται και αυτά. Ωστόσο, στη συνέχεια επανέρχεται η αύξηση του όζοντος και άρα η αύξηση των σφαλμάτων, η οποία αρχίζει να υποχωρεί και πάλι από τις 13 Αυγούστου. Μία δεύτερη ομοιότητα με την περίπτωση του Θησείου είναι ότι, όταν αυξάνεται η ημερήσια μεταβλητότητά του όζοντος για πολλές διαδοχικές ημέρες, τότε τα σφάλματα γίνονται μεγαλύτερα. Στη Φινοκαλιά η ημερήσια διακύμανση δεν είναι τόσο έντονη όσο στο Θησείο, διότι αυτός αποτελεί έναν σταθμό

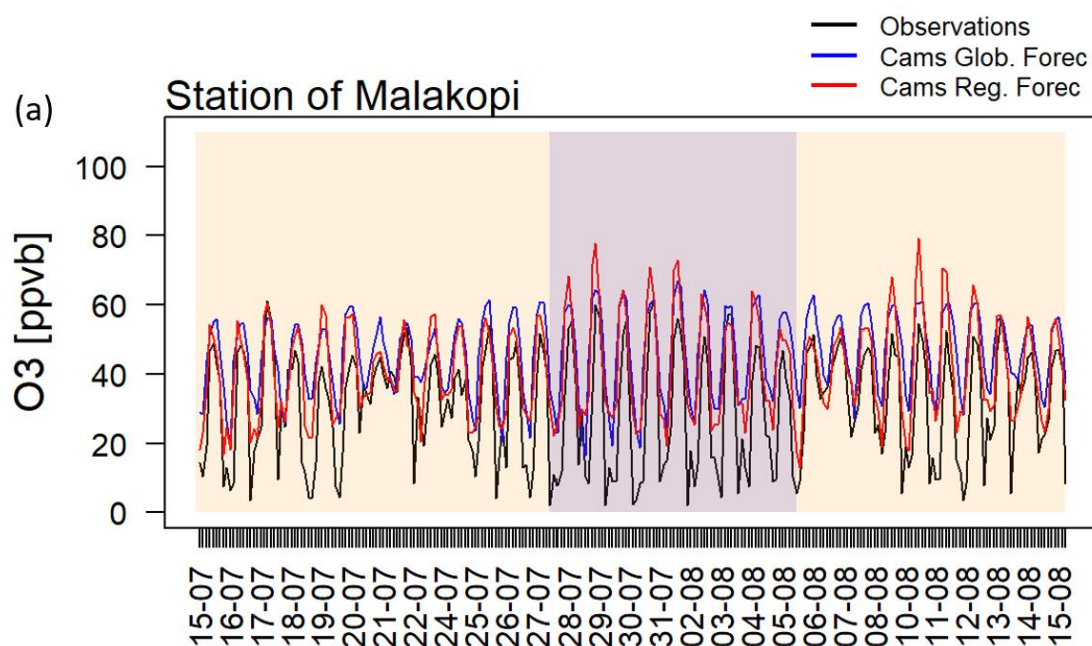
περιοχικού υποβάθρου αφού βρίσκεται μακριά από πηγές ρύπων, και αυτός ίσως είναι ο λόγος που τα σφάλματα σε αυτήν την περιοχή δεν είναι τόσο μεγάλα.

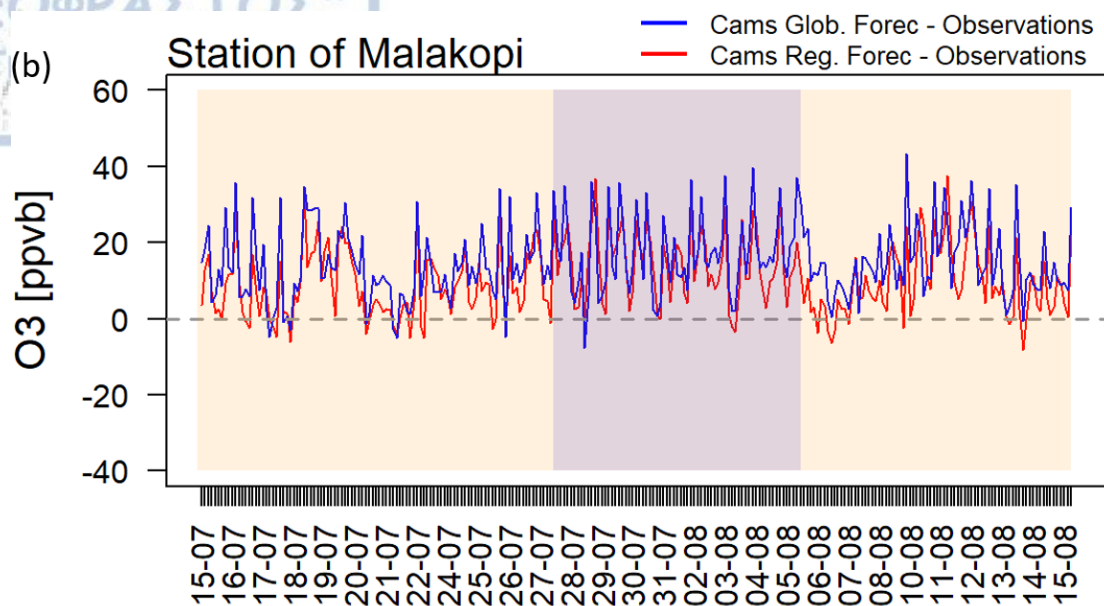


Σχήμα 3.31: Ημερήσια διακύμανση του επιφανειακού όζοντος (ppb) από τις 15/7 έως τις 15/8 για το σταθμό της Φινοκαλιάς, ομοίως με το Σχήμα 3.30.

Στη συνέχεια συγκρίνονται οι επίγειες παρατηρήσεις με τα προγνωστικά δεδομένα για την περιοχή της Μαλακοπής (Σχήμα 3.32). Καθ' όλη τη διάρκεια της χρονικής περιόδου του ενός μήνα (15/7-15/8), οι ημερήσιες διακυμάνσεις του όζοντος δεν είναι αμελητέες, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.32a. Εξάιρεση φαίνεται να αποτελούν τρεις χρονικές στιγμές (21/7, 24/7, 6/8) όπου η ημερήσια μεταβολή του είναι μικρή, με αυτές να αντιστοιχούν και πάλι σε μικρά σφάλματα των προγνωστικών μοντέλων (-10 έως +10 ppb) (Σχήμα 3.32b). Μέσω του απλού σφάλματος για τα δύο μοντέλα πρόγνωσης, γίνεται φανερό ότι σχεδόν καθ' όλη τη διάρκεια του ενός μήνα υπάρχει υπερεκτίμηση των παρατηρήσεων. Η υπερεκτίμηση

οφείλεται στην αδυναμία των μοντέλων να προσεγγίσουν τα ελάχιστα (υπερεκτίμηση ελαχίστων) ενώ παράλληλα υπερεκτιμούν και τα μέγιστα, δηλαδή τα προγνωστικά μοντέλα έδωσαν μεγαλύτερες συγκεντρώσεις όζοντος απ' ότι στην πραγματικότητα προέκυψαν (Σχήμα 3.32a). Η δυσκολία πρόγνωσης των ελαχίστων του σταθμού έχει να κάνει με τις εξαιρετικά χαμηλές τιμές όζοντος που σημειώθηκαν κατά τις βραδινές ώρες (Σχήμα 3.24) λόγω της παρουσίας των NO_x (σταθμός αστικού υποβάθρου). Όσον αφορά τα σφάλματα των παγκόσμιων δεδομένων αυτά φαίνεται να είναι μετατοπισμένα ακόμα πιο θετικά συγκριτικά με το περιοχικό μοντέλο. Έτσι συμπεραίνεται ότι το παγκόσμιο μοντέλο, συγκριτικά με το περιοχικό, υπερεκτιμά περισσότερο τις πραγματικές μετρήσεις του όζοντος σε αυτόν τον σταθμό. Τα θετικά σφάλματα για το GLF μοντέλο φτάνουν τα +40 ppb με μόνη εξαίρεση η 9/8 όπου ξεπέρασε αυτήν την τιμή (+45 ppb), ενώ οι μέγιστες συγκεντρώσεις που προέβλεψε προσεγγίζουν τα 60 ppb. Όσον αφορά το RF μοντέλο, αυτό κάνει σφάλματα κατά βάση μέχρι +25 ppb, ενώ οι μέγιστες προβλεπόμενες τιμές του φτάνουν τα 80 ppb. Οι μεγαλύτερες υπερεκτιμήσεις του περιοχικού μοντέλου εμφανίστηκαν στις 29/8 (36 ppb), δηλαδή κατά τη διάρκεια του καύσωνα και στις 11/8 (38 ppb). Ωστόσο υπάρχουν χρονικές στιγμές που τα σφάλματα των μοντέλων πέφτουν κάτω από το μηδέν και επομένως τότε τα μοντέλα υποεκτιμούν τις πραγματικές τιμές. Κάτι τέτοιο ωστόσο φαίνεται ότι δεν συμβαίνει συχνά, αλλά και όταν συμβαίνει η υποεκτίμηση δεν ξεπερνά τα 10 ppb. Κατά τη διάρκεια του καύσωνα τα δύο προγνωστικά μοντέλα υποεκτιμούν από μία φορά, με το GLF να κάνει υποεκτίμηση 10 ppb στις 28/7 και με αυτή να αποτελεί παράλληλα την μεγαλύτερη του υποεκτίμηση.

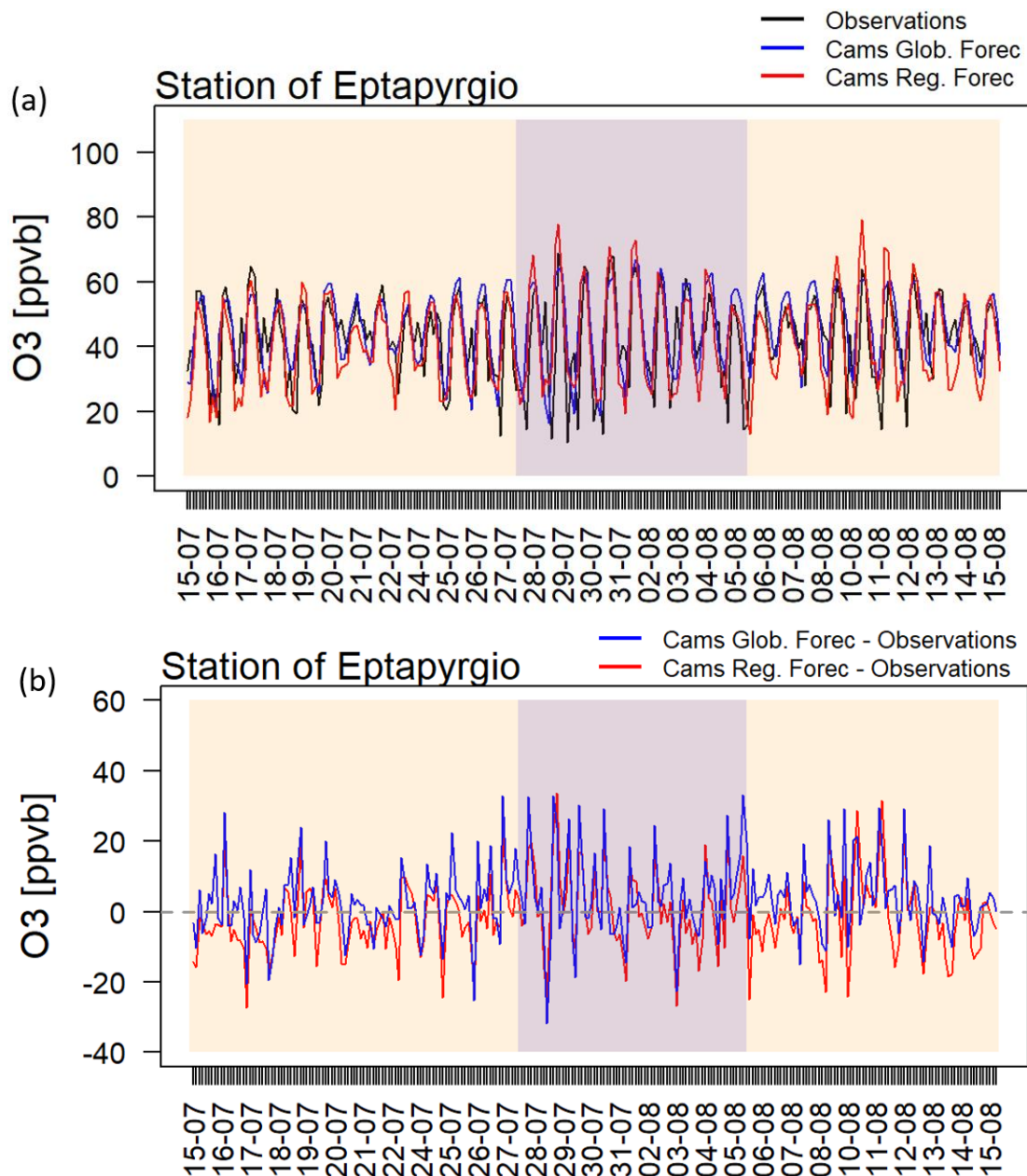




Σχήμα 3.32: Ημερήσια διακύμανση του επιφανειακού όζοντος (ppb) από τις 15/7 έως τις 15/8 για το σταθμό της Μαλακοπής, ομοίως με το Σχήμα 3.30.

Τέλος, ένας σταθμός ο οποίος βρίσκεται πολύ κοντά στη Μαλακοπή, είναι ο σταθμός του Επταπύργιου. Αυτός ο σταθμός, όπως η Μαλακοπή, αποτελεί έναν σταθμό αστικού υποβάθρου της περιοχής της Θεσσαλονίκης και το σημείο πλέγματος που επιλέχθηκε, ως το κοντινότερο για να τον αντιπροσωπεύσει, είναι το ίδιο με τον σταθμό της Μαλακοπής. Όπως παρατηρήθηκε και στους τρεις προηγούμενους σταθμούς, που κατέγραψαν τις επίγειες συγκεντρώσεις όζοντος, έτσι και σε αυτήν την περίπτωση όταν οι ημερήσιες μεταβολές του όζοντος δεν είναι σημαντικές, τότε αυτές οι χρονικές στιγμές αντιστοιχούν σε μικρότερα σφάλματα. Γενικότερα, καθ' όλη τη διάρκεια του ενός μήνα και τα δύο προγνωστικά μοντέλα καταγράφουν πλήθος σημαντικών υπερεκτιμήσεων και υποεκτιμήσεων. Οι υποεκτιμήσεις μάλιστα φτάνουν τα επίπεδα του σφάλματος στο Θησείο (περίπου 30 ppb), όπου το όζον είχε επηρεαστεί σημαντικά. Ωστόσο, σε αυτήν την περίπτωση η μεγαλύτερη υποεκτίμηση γίνεται από το παγκόσμιο και όχι από το περιοχικό μοντέλο. Η πλειονότητα των ισχυρών υποεκτιμήσεων του παγκόσμιου μοντέλου εμφανίζεται κατά τη διάρκεια του καύσωνα, με τη μεγαλύτερη να καταγράφεται στις 28 Αυγούστου με σφάλμα -34 ppb. Παρ' όλα αυτά κατά πλειοψηφία το παγκόσμιο μοντέλο κυρίως υπερεκτιμά, πράγμα το οποίο δεν φαίνεται να αλλάζει κατά τη διάρκεια του καύσωνα, ενώ το περιοχικό μοντέλο τις πρώτες ημέρες του καύσωνα κυρίως υπερεκτιμά τις πραγματικές μετρήσεις και στα δεύτερα μισά του δεν φαίνεται να υπάρχει κάποια προτίμηση ανάμεσα στα θετικά και τα αρνητικά σφάλματα. Συμπεραίνεται λοιπόν ότι για το σταθμό του Επταπύργιου δεν μπορεί να εξαχθεί συμπέρασμα ποιο από τα δύο μοντέλα προβλέπει το επίγειο όζον καλύτερα. Επιπλέον, παρ' όλες τις αποκλίσεις των προγνώσεων, εκείνο που γίνεται αντιληπτό είναι ότι στο Επταπύργιο τα ελάχιστα και μέγιστα των παρατηρήσεων προσεγγίζονται πολύ καλά από τα ελάχιστα και τα μέγιστα που προβλέπονται από το παγκόσμιο και το περιοχικό προγνωστικό σύστημα μοντέλων CAMS (Σχήμα 3.33a). Επομένως, συγκρίνοντας και τις χρονοσειρές των μέσων σφαλμάτων των δύο σταθμών αστικού υποβάθρου που μελετώνται, φαίνεται οι δύο σταθμοί να παρουσιάζουν μία διαφορετική εικόνα μεταξύ τους. Ωστόσο εκτός των διαφορών που αναλύονται εντοπίζεται και μία ομοιότητα σε αυτούς τους δύο σταθμούς. Η ομοιότητα αυτή

έγκειται στο γεγονός ότι τα ελάχιστα του επιφανειακού όζοντος προβλέπονται καλύτερα τις πρώτες ημέρες του καύσωνα από το global forecast CAMS, ενώ από τις 31/7/2021 και μέχρι την λήξη του καύσωνα προσεγγίζονται καλύτερα από το regional forecast CAMS. Η ομοιότητα τους αυτή ίσως έχει να κάνει με το γεγονός ότι και οι δύο σταθμοί χαρακτηρίζονται ως αστικού υποβάθρου.



Σχήμα 3.33: Ημερήσια διακύμανση του επιφανειακού όζοντος (ppb) από τις 15/7 έως τις 15/8 για το σταθμό του Επταπυργίου, ομοίως με το Σχήμα 3.30.

Πίνακας 3.2: Στατιστικές συγκρίσεις για την πρόγνωση του επιφανειακού όζοντος από το παγκόσμιο και το περιοχικό μοντέλο πρόγνωσης CAMS για τους τέσσερις σταθμούς της Ελλάδας που μελετήθηκαν. Περίοδος σύγκρισης: 15/7/2021-15/8/2021, Μέγεθος δείγματος σύγκρισης: α)Global: 256 για κάθε σταθμό εκτός του Θησείου που είχε 170 β)Regional: 768 για κάθε σταθμό εκτός του Θησείου που είχε 510. Συντελεστής συσχέτισης (cc), μέσο σφάλμα (MBE), μέσο απόλυτο σφάλμα (MAE), ρίζα του μέσου τετραγωνικού σφάλματος (RMSE) και τροποποιημένη κανονικοποιημένη μέση απόκλιση (MNMB)

Station	CAMS Global Forecast					CAMS Regional Forecast				
	cc	MBE (ppb)	MAE (ppb)	RMSE (ppb)	MNMB	cc	MBE (ppb)	MAE (ppb)	RMSE (ppb)	MNMB
Thissio	0.52	16.98	19.59	24.70	0.47	0.78	2.76	10.28	12.96	0.09
Finokalia	0.81	-6.41	6.86	8.14	-0.11	0.80	-9.28	9.52	10.62	-0.17
Malakopi	0.79	14.83	15.03	17.90	0.50	0.82	10.57	11.38	14.37	0.43
Eptapyrgio	0.62	3.25	7.96	11.10	0.09	0.69	-1.41	8.28	10.72	-0.03

Τα ευρήματα των αποτελεσμάτων, μέσω των χρονοσειρών που μόλις αναλύθηκαν, επιβεβαιώνονται και μέσω του Πίνακα 3.2. Ο Πίνακας 3.2 δείχνει τα στατιστικά σφάλματα του παγκόσμιου και του περιοχικού μοντέλου CAMS, για τους τέσσερις ίδιους σταθμούς, με αυτά να αφορούν και πάλι τη χρονική περίοδο 15 Ιουλίου έως 15 Αυγούστου 2021. Σύμφωνα με το Σχήμα 3.30a και τον Πίνακα 3.2 η πρόγνωση του όζοντος στο Θησείο είναι καλύτερη μέσω του περιοχικού μοντέλου CAMS. Αυτό έχει να κάνει με την περίοδο του καύσωνα αλλά και την χρονική περίοδο που ακολούθησε, όπου τα σφάλματα του RF ήταν εμφανώς μικρότερα από εκείνα του GLF (Σχήμα 3.30b). Επιπλέον, τα δύο μοντέλα κυρίως υπερεκτιμούν τις συγκεντρώσεις του όζοντος στην περιοχή αυτή (Πίνακα 3.2), καθώς όσον αφορά το περιοχικό μοντέλο δεν υπήρχε μία ξεκάθαρη εικόνα από την ανάλυση των χρονοσειρών. Εν συνεχεία, ο Πίνακας 3.2 επιβεβαιώνει ότι τα δύο προγνωστικά μοντέλα υποεκτιμούν το όζον στην περιοχή της Φινοκαλιάς και στη Μαλακοπή ότι υπερεκτιμούν (Σχ 3.31b, Σχ 3.32b). Στη Μαλακοπή το περιοχικό μοντέλο εκτιμά καλύτερα τις συγκεντρώσεις του όζοντος, ανεξάρτητα τη χρονική περίοδο που γίνεται η πρόγνωση μέσα σε αυτόν τον μήνα (Σχήμα 3.32a, Πίνακας 3.2). Ωστόσο στη Φινοκαλιά το όζον προβλέπεται καλύτερα από το παγκόσμιο μοντέλο (εξαιρώντας το RMSE), ανεξάρτητα και πάλι από τη χρονική περίοδο που μελετάται, με τα σφάλματα όμως του περιοχικού μοντέλου να μην είναι πολύ μεγαλύτερα από του GLF (Σχήμα 3.31a, Πίνακας 3.2). Τέλος, η περιοχή του Επταπυργίου είναι εκείνη η περιοχή η οποία παρουσιάζει τη λιγότερο ξεκάθαρη εικόνα στον υπολογισμό των σφαλμάτων μέσω των χρονοσειρών. Αυτό οφείλεται στη χαμηλότερη τιμή του συντελεστή συσχέτισης που υπάρχει ανάμεσα στα προγνωστικά και τα παρατηρησιακά δεδομένα συγκριτικά με τους υπόλοιπους σταθμούς. Επομένως, με τη βοήθεια του Πίνακα 3.2 διαπιστώνεται ότι η βέλτιστη πρόγνωση του όζοντος σε αυτόν το σταθμό γίνεται από το περιοχικό μοντέλο CAMS, λόγω των μικρότερων σφαλμάτων που κάνει, με αυτό να εμφανίζει μία μικρή υποεκτίμηση.

Πιο αναλυτικά, όσον αφορά το παγκόσμιο μοντέλο πρόγνωσης CAMS εμφανίζει συσχετίσεις μεταξύ του 0.52 και 0.81. Ο σταθμός του Θησείου καταγράφει τη μικρότερη συσχέτιση μεταξύ των τεσσάρων σταθμών με τιμή 0.52, δείχνοντας έτσι μία μέση συσχέτιση μεταξύ των παγκόσμιων προγνώσεων και των παρατηρήσεων. Ο σταθμός του Επταπύργιου και της Μαλακοπής εμφανίζουν ισχυρή συσχέτιση, ενώ ο σταθμός της Φινοκαλιάς δείχνει

πολύ ισχυρή συσχέτιση μεταξύ των GLF και των επίγειων παρατηρήσεων. Ωστόσο, η Φινοκαλιά είναι ο μοναδικός σταθμός που το περιοχικό μοντέλο πρόγνωσης CAMS παρουσιάζει μικρότερη συσχέτιση (0,8) συγκριτικά με το παγκόσμιο (0,81), αν και αυτές είναι πολύ κοντά. Παρ' όλα αυτά η συσχέτιση στο RF είναι και πάλι πολύ ισχυρή, με αυτήν ωστόσο να τη ξεπερνά η Μαλακοπή η οποία παρουσιάζει την υψηλότερη συσχέτιση συγκριτικά με τους υπόλοιπους σταθμούς με τιμή 0.82. Η περιοχή του Θησείου και του Επταπυργίου εμφανίζουν υψηλή συσχέτιση στο RF με τιμή 0.78 και 0.69 αντίστοιχα. Όπως γίνεται αντιληπτό σε όλες τις περιπτώσεις οι συσχετίσεις είναι θετικές εννοώντας μία σχέση αναλογίας, δηλαδή μία αύξηση των παρατηρήσεων συνεπάγεται και αύξηση των συγκεντρώσεων του εκάστοτε προγνωστικού μοντέλου.

Στη συνέχεια υπολογίστηκε η ρίζα του μέσου τετραγωνικού σφάλματος (RMSE), η οποία βρέθηκε ότι είναι κατά βάση μεγαλύτερη στο GLF μοντέλο με το εύρος των τιμών της σε αυτό να είναι 8.14 έως 24.7 rrb. Πιο αναλυτικά, η μεγαλύτερη συνολική απόκλιση που υπολογίζεται μεταξύ των εκτιμώμενων και των πραγματικών τιμών επιφανειακού όζοντος αφορά το σταθμό του Θησείου (24.7 rrb). Αντίστοιχα, για το συγκεκριμένο σταθμό το περιοχικό μοντέλο δίνει τιμή σφάλματος 12.96 rrb, δηλαδή αισθητά μικρότερο σφάλμα συγκριτικά με το GLF μοντέλο. Αμέσως μικρότερη τιμή RMSE από το Θησείο, όσον αφορά τα GLF δεδομένα, έχει η Μαλακοπή, ενώ με πολύ χαμηλότερες τιμές εμφανίζεται το Επταπύργιο και η Φινοκαλιά με σφάλμα 11.10 rrb και 8.14 rrb αντίστοιχα. Η Φινοκαλιά, όπως ήταν αναμενόμενο από τα έως τώρα αποτελέσματα (Σχήμα 3.31), είναι η μοναδική περιοχή που καταγράφει μικρότερο RMSE στο παγκόσμιο μοντέλο συγκριτικά με το περιοχικό, με τη διαφορά τους όμως να περιορίζεται στα 2.5 rrb. Γενικότερα, η στατιστική παράμετρος RMSE αποκαλύπτει κατά πλειοψηφία μικρότερες αποκλίσεις από τις παρατηρήσεις για το περιοχικό μοντέλο πρόγνωσης, οι οποίες κυμαίνονται από 10.62 έως 14.37 rrb.

Ακολούθως υπολογίζεται το MAE, το οποίο όπως αναμένεται εμφανίζει κοντινές τιμές με το RMSE (Πίνακα 3.2). Όπως αναγράφεται και στη βιβλιογραφία, το MAE είναι λιγότερο ευαίσθητο σε μεγάλα σφάλματα πρόγνωσης από το RMSE και επομένως οι τιμές που παρουσιάζει είναι λίγο μικρότερες. Πιο συγκεκριμένα, για το GLF μοντέλο οι τιμές του MAE κυμαίνονται μεταξύ των 6.86 και 19.59 rrb. Η αύξουσα σειρά που σημειώνεται από τους σταθμούς είναι η ίδια σειρά με αυτήν που ακολουθούν στη στατιστική παράμετρο RMSE. Στο RF μοντέλο οι τιμές του MAE έχουν εύρος 8.28 με 11.38 rrb, με τη σειρά των σταθμών όμως αυτήν τη φορά να διατηρείται ίδια με το συντελεστή RMSE μόνο για τους δύο σταθμούς με τα υψηλότερα σφάλματα.

Στη συνέχεια υπολογίζεται το μέσο σφάλμα (MBE) για τα δύο προγνωστικά μοντέλα για τον ατμοσφαιρικό ρύπο του όζοντος. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του Πίνακα 3.2, το GLF μοντέλο εκφράζει κατά βάση μία συστηματική υπερπρόγνωση των παρατηρήσεων, η οποία είναι πιο ενισχυμένη στους σταθμούς του Θησείου και της Μαλακοπής με τιμές 16.98 και 14.83 rrb αντίστοιχα. Τα θετικά συστηματικά σφάλματα καταγράφονται για τους σταθμούς του Θησείου, της Μαλακοπής και του Επταπυργίου, ενώ ο μοναδικός σταθμός που παρουσιάζει συστηματική υποπρόγνωση (-6.41 rrb) είναι η Φινοκαλιά. Ομοίως, στη Φινοκαλιά το RF μοντέλο υποεκτιμά συστηματικά τις πραγματικές τιμές του επιφανειακού όζοντος. Μάλιστα, αυτός ο σταθμός δίνει την πιο έντονη συστηματική υποεκτίμηση (-9.28 rrb), συγκριτικά με την περιοχή του Επταπυργίου, που και πάλι το RF υποεκτιμά αλλά αυτή

τη φορά με όχι έντονο τρόπο (-1.41 ppb). Οι υπόλοιποι σταθμοί που εξετάζονται υπερεκτιμούνται από το RF μοντέλο με ασθενή ένταση στο Θησείο (2.76 ppb) και αρκετά έντονα στη Μαλακοπή.

Οι υποεκτιμήσεις και οι υπερεκτιμήσεις που κάνουν τα δύο μοντέλα στους εκάστοτε σταθμούς επαληθεύονται και από το δείκτη στατιστικού σφάλματος MNMB. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η περιοχή της Μαλακοπής, όπου συγκριτικά με τους υπόλοιπους σταθμούς που μελετώνται, το μοντέλο RF υπερεκτιμά δίνοντας ταυτόχρονα εξαιρετικά μεγάλα σφάλματα (0.43=43%), σε αντίθεση με τους άλλους τρεις σταθμούς που κυμαίνονται από -0.17 έως 0.09. Όσον αφορά το μοντέλο GLF αυτό παρουσιάζει τιμές μεγαλύτερες του 9% κατ' απόλυτη τιμή και για τους τέσσερις σταθμούς, δείχνοντας έτσι μη σταθερή και συνεπή απόδοση των παγκόσμιων προγνώσεων κατά τη διάρκεια του ενός μηνά (15/7 έως 15/8).

3.3.3 Λόγοι δημιουργίας σφαλμάτων στα προγνωστικά μοντέλα

Πίνακας 3.3: Στατιστικές συγκρίσεις για την πρόγνωση του επιφανειακού όζοντος από το παγκόσμιο και το περιοχικό μοντέλο πρόγνωσης CAMS για τρεις χρονικές περιόδους (περίοδος σύγκρισης): *During* (28/7 έως 5/8), *Before* (15/7 έως 27/7), *After* (6/8 έως 15/8). Μέγεθος δείγματος σύγκρισης: α) *Global*: *Before*: 344, *During*: 288, *After*: 320 β) *Regional*: *Before*: 1089, *During*: 864, *After*: 960. Συντελεστής συσχέτισης (cc), μέσο σφάλμα (MBE), μέσο απόλυτο σφάλμα (MAE), ρίζα του μέσου τετραγωνικού σφάλματος (RMSE) και τροποποιημένη κανονικοποιημένη μέση απόκλιση (MNMB)

Periods of heatwave	CAMS Global Forecast					CAMS Regional Forecast				
	cc	MBE (ppb)	MAE (ppb)	RMSE (ppb)	MNMB	cc	MBE (ppb)	MAE (ppb)	RMSE (ppb)	MNMB
Before	0.60	4.10	9.16	12.22	0.15	0.70	-0.18	8.21	10.36	0.05
During	0.62	8.54	15.51	20.29	0.32	0.80	1.69	12.23	14.74	0.18
After	0.53	7.81	12.11	16.06	0.23	0.72	0.46	9.67	11.85	0.03

Υπάρχουν, όπως γίνεται φανερό, ορισμένοι περιορισμοί στην ικανότητα των μοντέλων να αναπαραστήσουν με ακρίβεια το επιφανειακό όζον. Αρχικά, ένας βασικός λόγος είναι η ελλιπής κατανόηση των χημικών και μεταφορικών διαδικασιών, καθώς και του τρόπου ενσωμάτωσης αυτών στα μοντέλα (Parrish et al., 2014; Brown-Steiner et al., 2015). Πιο συγκεκριμένα, οι φυσικές και οι χημικές διεργασίες αναπαρίστανται στα μοντέλα μέσω παραμετροποιήσεων, οι οποίες παρέχουν υποθέσεις και προσεγγίσεις και επομένως προκαλούν σφάλματα στις προγνώσεις. Επιπρόσθετα, το όζον μπορεί να επηρεαστεί και από άλλους ρύπους στην ατμόσφαιρα, αφού είναι ένας δευτερεύον ρύπος, όπως και από διάφορους μετεωρολογικούς παράγοντες. Επομένως, η απουσία γνώσης του ακριβή τρόπου συσχέτισης του ρύπου του όζοντος με αυτούς, καθώς και τα πιθανά προγνωστικά λάθη σε εκείνους, οδηγούν στη μεταφορά των σφαλμάτων και στις προγνώσεις του όζοντος, όπως έχει φανεί και στην εργασία των Baertsch- Ritter et al. (2004). Συνεπώς, σε μία περίοδο ακραίων συνθηκών που οι ακριβείς συσχετίσεις μεταξύ του όζοντος και των υπολοίπων παραγόντων είναι άγνωστες, προκαλούν εξ αυτού του λόγου περαιτέρω αύξηση των σφαλμάτων. Αυτό γίνεται ιδιαίτερα εμφανές από τον Πίνακα 3.3 όπου και στα δύο

προγνωστικά μοντέλα, τα σφάλματα της πρόγνωσης του επιφανειακού O_3 κατά τη διάρκεια του καύσωνα είναι σημαντικά μεγαλύτερα, συγκριτικά με τις άλλες δύο κοντινές περιόδους.

Εκτός από τα σφάλματα που προκύπτουν από τις απλοποιημένες προγνωστικές εξισώσεις σε σχέση την πραγματικότητα, προκαλούνται επιπλέον σφάλματα στα προγνωστικά δεδομένα κατά την επίλυση αυτών των εξισώσεων, λόγω του ότι αυτές λύνονται με αριθμητικές μεθόδους, δηλαδή προσεγγιστικά. Μερικά από αυτά τα σφάλματα είναι τα σφάλματα στρογγυλοποίησης και αποκοπής. Το σφάλμα αποκοπής προκύπτει διότι οι συνεχείς συναρτήσεις που μελετώνται αναπαρίστανται από ένα πεπερασμένο πλήθος σημειακών τιμών. Σφάλματα στρογγυλοποίησης είναι η διαφορά ανάμεσα στην υπολογιστική στρογγυλοποίηση ενός αριθμού και στην πραγματική του τιμή.

Επιπλέον, σφάλματα δύναται να υπάρξουν ακόμα και στα δεδομένα που εισάγονται στα μοντέλα. Αυτά τα σφάλματα μπορεί να προκύψουν από τον παρατηρητή και από τα όργανα μέτρησης. Οι αποκλίσεις αυτές είναι εξίσου σημαντικές διότι τα δεδομένα αυτά χρησιμοποιούνται ως αρχικές συνθήκες στα μοντέλα. Με αυτόν τον τρόπο τα δεδομένα επανάλυσης δεν διορθώνονται σωστά εξαιτίας αυτών των σφαλμάτων, ενώ για τις προγνώσεις δε χρησιμοποιούνται σωστές παρατηρήσεις με επακόλουθο τη δημιουργία εσφαλμένων προγνώσεων. Τα σφάλματα που εισάγονται μέσω των αρχικών συνθηκών ίσως είναι και ο βασικός λόγος της χωρικής συσχέτισης των ακραίων σφαλμάτων που παρατηρήθηκαν μεταξύ των δύο παγκόσμιων μοντέλων επανάλυσης και πρόγνωσης (Σχήμα 3.29). Επιπλέον, μία περίπτωση τέτοιου σφάλματος φαίνεται να είναι και τα σφάλματα του παγκόσμιου μοντέλου επανάλυσης, το οποίο στις 4 Αυγούστου παρουσίασε ακραία υψηλές συγκεντρώσεις όζοντος στην ευρύτερη περιοχή της Βόρειας Εύβοιας, αλλά και σε άλλες περιοχές της Ελλάδας κατά τη διάρκεια του καύσωνα του 2021. Τα ίδια σφάλματα φαίνεται να αντιμετώπισε και το παγκόσμιο προγνωστικό μοντέλο CAMS, στο οποίο ωστόσο πέραν των εσφαλμένων παρατηρήσεων που μπορεί να εισήχθησαν, το γεγονός ότι για την έκδοση μιας νεότερης πρόγνωσης χρησιμοποιείται και η προηγούμενη της, έχει ως αποτέλεσμα να μεταφέρεται και σε εκείνη ένα τέτοιο πιθανό σφάλμα, διαιωνίζοντας το λάθος αυτό. Επομένως, μία πρόγνωση με πολλά σφάλματα επηρεάζει κατ' επέκταση και την επόμενη της πρόγνωση. Γενικότερα, είναι κατανοητό ότι στις περιοχές που υπάρχουν καλύτερης ποιότητας δεδομένα, το μοντέλο δίνει καλύτερες προγνώσεις.

Εξ ορισμού το περιοχικό μοντέλο τροφοδοτείται με πλευρικές οριακές συνθήκες, δηλαδή με προγνωστικά δεδομένα από το παγκόσμιο μοντέλο πρόγνωσης, το οποίο όμως περιέχει επιπλέον λάθη λόγω της χαμηλής χωρικής του ανάλυσης. Παρ' όλα αυτά, τα λάθη που εκχωρούνται από το παγκόσμιο μοντέλο πρόγνωσης στο περιοχικό, εντοπίζονται κυρίως στα όρια με το παγκόσμιο μοντέλο, και γι' αυτό το λόγο επιλέγονται οι οριακές συνθήκες να μπαίνουν όσο πιο μακριά γίνεται από την περιοχή που μελετάται. Στην παρούσα εργασία η περιοχή μελέτης βρίσκεται μακριά από τα πλευρικά όρια, επομένως τα σφάλματα που εμφανίστηκαν δεν αποδίδονται σε αυτήν την αιτία. Ωστόσο η διαφορά που υπάρχει μεταξύ των περιοχικών προγνώσεων του όζοντος και των έντονων σφαλμάτων του παγκόσμιου προγνωστικού μοντέλου, με το RF να προσομοιώνει κατά πλειοψηφία καλύτερα τις παρατηρήσεις O_3 (Πίνακας 3.2) ανεξάρτητα τη χρονική περίοδο (Πίνακας 3.3), έχει να κάνει με την καλύτερη χωρική ανάλυση του περιοχικού μοντέλου καθώς και την αφομοίωση επίγειων παρατηρήσεων πέραν των δορυφορικών. Επιπλέον, τα διαφορετικά

συστήματα αφομοίωσης που χρησιμοποιούν τα δύο μοντέλα αποτελούν και αυτά μία πιθανή εξήγηση για τα αποτελέσματα που προκύπτουν. Όσο αυξάνεται η χωρική διακριτοποίηση ενός μοντέλου τόσο αναλύεται καλύτερα ένα φαινόμενο, πόσο μάλλον όταν μιλάμε για χημικές διεργασίες οι οποίες έχουν πολύ μικρή κλίμακα. Εν τούτοις, η καταγραφή διεργασιών μικρότερης κλίμακας από την ανάλυση του μοντέλου και υψηλότερης χωρικής ανάλυσης (refined) εκπομπών, έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία σφαλμάτων ακόμα και στο περιοχικό μοντέλο λόγω της ανεπαρκούς οριζόντιας ανάλυσης που απαιτείται για την πρόγνωση του όζοντος (Pfister et al., 2014). Ιδιαίτερο ενδιαφέρον έχουν παράλληλα οι πολύ χαμηλές συσχετίσεις (cc) του global reanalysis CAMS με τις παρατηρήσεις όταν συγκρίνονται με τις αντίστοιχες συσχετίσεις του global forecast CAMS, με αυτό ίσως να έχει να κάνει και πάλι με τη χαμηλότερη χωρική διακριτοποίηση του global reanalysis CAMS (χρησιμοποιούν την ίδια μέθοδο αφομοίωσης δεδομένων: δορυφορικά το GLF και επίγειες παρατηρήσεις το GLR).

Εν κατακλείδι, πρέπει να γίνει κατανοητό ότι τα σφάλματα των προγνώσεων του O_3 που προκύπτουν σε μία περιοχή είναι ένας συνδυασμός των σφαλμάτων που αναλύονται στην παρούσα υποενότητα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα το RF να μην εμφανίζει πάντοτε τα μικρότερα σφάλματα συγκριτικά με το παγκόσμιο μοντέλο (Σχήμα 3.31b, Πίνακας 3.2), αλλά ούτε να εμφανίζει ίδιο μέγεθος σφαλμάτων από περιοχή σε περιοχή ή ακόμα και στην ίδια περιοχή. Στην παρούσα έρευνα, θεωρώντας ότι τα υπολογιστικά σφάλματα συμβαίνουν και στα δύο μοντέλα με τον ίδιο ρυθμό, τα σφάλματα που φαίνεται να έχουν περισσότερη σημασία στο τελικό προϊόν του μοντέλου είναι η χωρική διακριτοποίηση του μοντέλου αλλά και η ελλιπής γνώση των φυσικών και χημικών διαδικασιών, ιδιαίτερα κατά τη διάρκεια έντονων φαινομένων όπως αυτό του καύσωνα, που η πολυπλοκότητα των διαδικασιών εντείνεται (Πίνακας 3.3, Σχήμα 3.30b). Αυτή είναι η αιτία της δυσκολίας των μοντέλων να προσομοιώσουν κάθε τοποθεσία με ακρίβεια, ιδιαίτερα εκείνων που βρίσκονται κοντά σε πηγές εκπομπών ή με άλλες ισχυρές τοπικές επιρροές στο όζον (Σχήμα 3.30b).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 – Συμπεράσματα

Η Κλιματική Αλλαγή και επομένως η αύξηση της έντασης, της συχνότητας και της διάρκειας των καυσώνων, επηρεάζει αρνητικά την ποιότητα του αέρα, προκαλώντας τελικά αρνητικές επιπτώσεις στους ζώντες οργανισμούς και εντείνει τις αιτίες πρόωρης θνησιμότητας. Τα κύματα καύσωνα δημιουργούν ευνοϊκές μετεωρολογικές συνθήκες, όπως υψηλή θερμοκρασία, έντονη ηλιακή ακτινοβολία και χαμηλή ταχύτητα ανέμου, οι οποίες ενισχύουν την ικανότητα της ατμόσφαιρας να σχηματίσει τροποσφαιρικό όζον. Επομένως, οι δυσμενείς επιπτώσεις του O_3 κάνουν επιτακτική την ανάγκη ελέγχου των συγκεντρώσεων του. Η παρούσα εργασία στοχεύει στην αξιολόγηση των προγνώσεων του ρύπου του επιφανειακού όζοντος από το παγκόσμιο και το περιοχικό προγνωστικό σύστημα μοντέλων CAMS κατά τη διάρκεια ενός καύσωνα. Πιο συγκεκριμένα, επιχειρείται μία σύγκριση των παγκόσμιων (GLF) και περιοχικών (RF) προγνωστικών δεδομένων με απώτερο σκοπό τη συνεισφορά της εργασίας αυτής στη βελτιστοποίηση των προγνώσεων του επιφανειακού O_3 από το CAMS.

Αρχικά, μελετάται η θερμή εισβολή, που πραγματοποιήθηκε στις 28 Ιουλίου του 2021 στην περιοχή της Ελλάδας διάρκειας 9 ημερών και αποδεικνύεται ότι αυτή εμφανίζει τα συνθήκη χαρακτηριστικά με την πλειοψηφία των καυσώνων που συναντώνται στην περιοχή της Ανατολικής Μεσογείου. Πιο αναλυτικά, στην ισοβαρική επιφάνεια των 850 hPa εντοπίζεται η μεταφορά θερμών αερίων μαζών από την Αφρική, ενώ η αντικυκλωνική ροή που εμφανίστηκε στα 500 και 850 hPa προκάλεσε την καθοδική κίνηση των αερίων μαζών προς τα χαμηλότερα στρώματα καθώς και αδιαβατική θέρμανση. Μάλιστα η αργή διάδοση της κορυφογραμμής των υψών στα 500 hPa πάνω από τον Ελλαδικό χώρο φαίνεται να είναι η αιτία της μεγάλης διάρκειας του καύσωνα αυτού. Άλλος ένας παράγοντας, που προκάλεσε έντονες καθοδικές κινήσεις (1 έως 5/8) και που ενίσχυσε τις θερμοκρασίες της επιφάνειας, ήταν η μετατόπιση του υποτροπικού αεροχειμάρρου προς τα βόρεια συγκριτικά με την κλιματολογική του θέση (37° B). Επομένως, οι συνοπτικές συνθήκες που επικράτησαν οδήγησαν σε θερμή οριζόντια μεταφορά και καθοδικές κινήσεις στην ατμόσφαιρα, μεταφέροντας ξηρό αέρα στην επιφάνεια και μικρά ποσά όζοντος. Τα επιφανειακά θερμοκρασιακά αποτελέσματα που προέκυψαν από την συνοπτική κατάσταση που αναλύεται, κατέταξαν σύμφωνα με την EMY τον καύσωνα αυτό ως τον ισχυρότερο σε ένταση (44.9°C) αλλά και σε διάρκεια καύσωνα της Ελλάδας, καταγράφοντας παράλληλα κατά τη διάρκεια του (3/8) τις μεγαλύτερες τιμές ελαχίστων θερμοκρασιών που είχαν παρατηρηθεί έως τότε ($31,6^\circ\text{C}$).

Με τη βοήθεια επίγειων παρατηρήσεων από τέσσερις σταθμούς μέτρησης ατμοσφαιρικής ρύπανσης στην περιοχή της Ελλάδας, φαίνεται το επιφανειακό όζον να μην αυξάνεται ακραία την περίοδο της θερμής εισβολής, όπως συνέβη στην περίπτωση του καύσωνα του 2003 στην Γαλλία (200 ppb) (Fiala, 2003). Ανάμεσα στους τέσσερις σταθμούς που μελετώνται: της Μαλακοπής, του Επταπυργίου και της Φινοκαλιάς, το Θησείο είναι ο σταθμός που επηρεάστηκε περισσότερο φτάνοντας τα 104 ppb, ξεπερνώντας το κατώφλι ενημέρωσης του κοινού. Παράλληλα ιδιαίτερο ενδιαφέρον έχουν οι πολύ χαμηλές τιμές όζοντος, σε σχέση με μία μέση τιμή προηγούμενων ετών, που καταγράφηκαν κατά τις βραδινές ώρες του καύσωνα στους σταθμούς αστικού υποβάθρου (Μαλακοπή, Επταπύργιο)

και αστικός (Θησείο), με τα αποτελέσματα αυτά όμως να έρχονται σε συμφωνία με ήδη υπάρχουσες έρευνες (Pyrgou et. al., 2018) και να αποδίδονται στην παρουσία των NO_x . Επιπλέον, οι πολύ υψηλές συγκεντρώσεις επιφανειακού όζοντος που καταγράφηκαν κατά τις μεσημεριανές ώρες στο Θησείο οφείλονται στο γεγονός ότι το Θησείο αποτελεί έναν αστικό σταθμό και επομένως οι συγκεντρώσεις των NO_x είναι πολύ μεγαλύτερες συγκριτικά με τους άλλους σταθμούς. Η Φινοκαλιά ως σταθμός περιοχικού υποβάθρου εμφάνισε την μικρότερη ημερήσια διακύμανση στο όζον με τις τιμές της να κυμαίνονται 55-78.6 ppb ενώ, την ημέρα που καταγράφηκε η μέγιστη τιμή (1/8/2021), κατά τις βραδινές ώρες οι συγκεντρώσεις του όζοντος ήταν οι μικρότερες των ημερών αυτών. Όσον αφορά τα δεδομένα επιφανειακού όζοντος από το παγκόσμιο σύστημα επανάλυσης CAMS έδειξαν αδύναμη συσχέτιση σε σύγκριση με δεδομένα επίγειων παρατηρήσεων σε σταθμούς, η οποία οφείλεται εν μέρει στη χαμηλή χωρική τους ανάλυση. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τα δεδομένα GLR να έχουν περιορισμένη χρησιμότητα για την ανάλυση του επιφανειακού όζοντος, ιδιαίτερα για μία περίοδο ακραίων θερμοκρασιών, καθώς επίσης και για την αξιολόγηση των προγνωστικών δεδομένων CAMS σε τοπικό επίπεδο. Ωστόσο, το παραπάνω συμπέρασμα για να επιβεβαιωθεί ή να απορριφθεί είναι αναγκαίο να διεξαχθούν μελέτες και για άλλα ακραία επεισόδια καύσωνα. Παρ' όλα αυτά το παγκόσμιο σύστημα επανάλυσης CAMS δίνει χρήσιμα συμπεράσματα, στο βαθμό που μπορεί σύμφωνα με τη χωρική διακριτοποίηση που έχει, αφού αναπαριστά αρκετά καλά χωρικά την επίδραση στα επίπεδα όζοντος (τα μοτίβα του GLR και του GLF ταιριάζουν χωρικά, ίσως λόγω της ίδιας μεθόδου αφομοίωσης που χρησιμοποιούν: 4D-Var), αλλά έχει τοπικά κάποιες τιμές που είναι εξαιρετικά υψηλές και χρήζουν περαιτέρω διερεύνησης. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον έχουν οι πολύ χαμηλές συσχετίσεις του global reanalysis CAMS συγκριτικά με το global forecast CAMS, οι οποίες ίσως οφείλονται και πάλι στην μικρότερη χωρική ανάλυση του global reanalysis (αφού χρησιμοποιούν την ίδια μέθοδο αφομοίωσης δεδομένων 4D-Var: το GLF αφομοιώνει δορυφορικά δεδομένα και το GLR επίγειες παρατηρήσεις). (Πίνακας 3.1, Πίνακας 3.2).

Επομένως σύμφωνα με τα παραπάνω, το global reanalysis CAMS είναι χρήσιμο χωρικά αλλά δεν μπορεί να αναπαραστήσει σε τοπικό επίπεδο τη μεταβλητότητα του επιφανειακού όζοντος. Γι' αυτόν τον λόγο για την αξιολόγηση του προγνωστικού συστήματος μοντέλων CAMS πραγματοποιείται μία δεύτερη φάση αξιολόγησης, η οποία γίνεται μέσω των επίγειων παρατηρήσεων των τεσσάρων σταθμών. Σύμφωνα με την αξιολόγηση, γίνεται αντιληπτό μέσω κατάλληλων χρονοσειρών ότι όσο η ημερήσια μεταβολή του όζοντος αυξάνεται σε έναν σταθμό, τόσο αυξάνεται η δυσκολία πρόγνωσης του όζοντος από τα δύο προγνωστικά μοντέλα. Επιπλέον, σύμφωνα με τις χρονοσειρές και τις στατιστικές αναλύσεις, στους τρεις από τους τέσσερις σταθμούς (Θησείο, Μαλακοπή, Επταπύργιο) το RF είναι το μοντέλο που δίνει την πιο έγκυρη πρόγνωση για το επιφανειακό όζον. Όσον αφορά το Θησείο, ο οποίος είναι ένας αστικός σταθμός, το regional forecast CAMS προσεγγίζει καλά τα μέγιστα και τα ελάχιστα που προκύπτουν λόγω των NO_x . Αντιθέτως το global forecast CAMS δείχνει την αδυναμία του να αναπαραστήσει τη μεταβλητότητα ενός αστικού σταθμού κατά τη διάρκεια ενός καύσωνα καθώς δεν πιάνει τα χαμηλά, αν και προβλέπει τις πρώτες ημέρες του καύσωνα καλύτερα τα μέγιστα του O_3 συγκριτικά με το RF. Όσον αφορά τους δύο σταθμούς αστικού υποβάθρου (Μαλακοπή και Επταπύργιο), αυτοί εμφανίζουν ένα κοινό χαρακτηριστικό. Τις πρώτες ημέρες του καύσωνα

το global forecast CAMS είναι το μοντέλο που προσεγγίζει καλύτερα τα ελάχιστα, ενώ από τις 31/7/2021 κι έπειτα το regional forecast CAMS τα προβλέπει καλύτερα. Γενικά στο Επταπύργιο προσεγγίζονται πολύ καλά τα μέγιστα και τα ελάχιστα των επίγειων παρατηρήσεων από τα GLF και RF, ενώ για το σταθμό της Μαλακοπής υπάρχει μία μεγαλύτερη δυσκολία να προσεγγιστούν από τα δύο προγνωστικά μοντέλα. Ο τέταρτος σταθμός που μελετάται (Φινοκαλιά) δείχνει ότι το GLF -ως μία εξαίρεση- προβλέπει καλύτερα το O_3 , έχοντας ωστόσο μικρή απόκλιση από το RF. Αυτό οφείλεται στην ιδιότητα του σταθμού να βρίσκεται μακριά από πηγές ρύπανσης (σταθμός περιοχικού υποβάθρου). Γενικά, το regional forecast CAMS φαίνεται ότι κάνει πολύ καλές προγνώσεις και για τους τέσσερις σταθμούς που μελετώνται, συμπεριλαμβανομένου του σταθμού της Φινοκαλιάς. Σύμφωνα με τις χρονοσειρές, η Φινοκαλιά επιπλέον είναι ο μοναδικός σταθμός στον οποίον υποεκτιμάται το όζον και από τα δύο μοντέλα σε μόνιμη βάση, ενώ σύμφωνα με τα στατιστικά σφάλματα το Επταπύργιο είναι ο μοναδικός σταθμός που τα δύο προγνωστικά μοντέλα δεν συμφωνούν ως προς την υποεκτίμηση ή την υπερεκτίμηση.

Συγκρίνοντας τα σφάλματα της περιόδου πριν και κατά τη διάρκεια του καύσωνα, φάνηκε ότι η αύξηση που προέκυψε ανάμεσα στις δύο περιόδους ήταν πολύ μεγαλύτερη για το παγκόσμιο μοντέλο. Αυτό δείχνει ότι η χωρική διακριτοποίηση ενός μοντέλου είναι ένας από τους βασικούς λόγους εκδήλωσης σφαλμάτων σε ένα μοντέλο. Η ύψιστη σημασία της χωρικής ανάλυσης επιβεβαιώνεται από τα στατιστικά σφάλματα, τα οποία ήταν κατά βάση μικρότερα στο περιοχικό μοντέλο για όλους τους σταθμούς (Πίνακας 3.2), με αυτό να συνεχίζει να ισχύει και ανεξάρτητα τη χρονική περίοδο μελέτης (Πίνακας 3.3). Τα μικρότερα σφάλματα στο RF έχουν ίσως να κάνουν ταυτόχρονα με το γεγονός ότι το RF αφομοιώνει επίγειες παρατηρήσεις πέραν των δορυφορικών, αν και δεν είναι γνωστό ότι αυτές εμπεριέχουν παρατηρήσεις και από ελληνικούς σταθμούς. Παράλληλα, το διαφορετικό σύστημα αφομοίωσης που χρησιμοποιούν τα δύο μοντέλα αποτελεί και εκείνο μία πιθανή εξήγηση για τα εξαχθέντα αποτελέσματα. Επιπλέον, κατά τη διάρκεια του καύσωνα τα σφάλματα της πρόγνωσης του επιφανειακού O_3 έγιναν σημαντικά μεγαλύτερα και για τα δύο μοντέλα, συγκριτικά με τις άλλες δύο κοντινές περιόδους, φανερώνοντας έτσι το σημαντικό ρόλο της γνώσης των φυσικών και χημικών διαδικασιών ιδιαίτερα σε περιόδους ακραίων συνθηκών. Ωστόσο είναι αναγκαίο να διευκρινιστεί ότι αυτά τα δύο είδη σφαλμάτων συνδέονται μεταξύ τους και επομένως μία πιθανή βελτίωση της χωρικής ανάλυσης του μοντέλου θα επέφερε επιπλέον γνώσεις των φυσικών και χημικών διεργασιών μικρότερης κλίμακας. Τέλος, σημαντική επίδραση στο τελικό προγνωστικό προϊόν, συνδυαστικά με τα υπόλοιπα σφάλματα, φαίνεται να έχουν επιπρόσθετα τα σφάλματα που δύναται να εισαχθούν μέσω των αρχικών συνθηκών στα μοντέλα.

Εν κατακλείδι, στην παρούσα εργασία πραγματοποιείται ανάλυση του φαινομένου του καύσωνα που έλαβε χώρα στις 28 Ιουλίου 2021 στην ευρύτερη περιοχή της Ελλάδας, καθώς επίσης διερευνώνται τα επίπεδα του επιφανειακού όζοντος την περίοδο αυτή. Η εν συνεχεία αξιολόγηση των προγνωστικών δεδομένων του επιφανειακού όζοντος από το παγκόσμιο και περιοχικό προγνωστικό σύστημα μοντέλων CAMS, αλλά και των δεδομένων παγκόσμιας επανάλυσης CAMS, έχει ως σκοπό τη βελτιστοποίηση των προγνώσεων από το σύστημα μοντέλων CAMS, ώστε να διασφαλιστεί η υγεία των πολιτών από το ρύπο του όζοντος στο μέλλον.

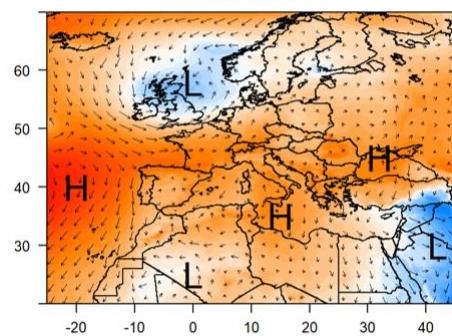
Συμπληρωματικό υλικό

Winds [m/s] at 10m & Mean Sea Level Pressure [hPa]

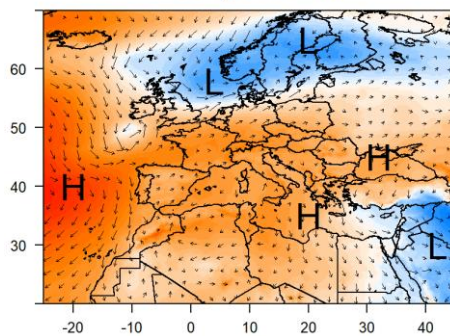
28 July at 12 UTC

29 July at 12 UTC

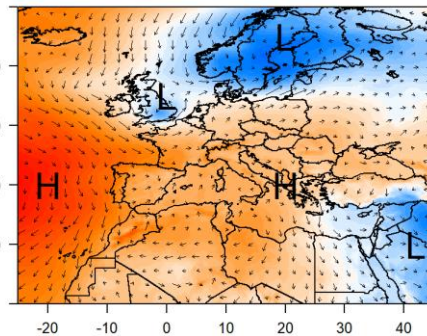
30 July at 12 UTC



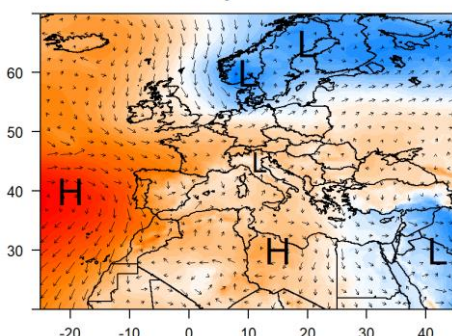
31 July at 12 UTC



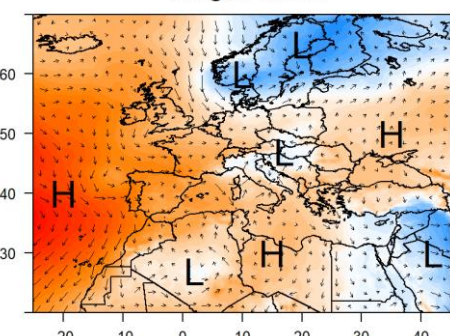
1 Aug at 12 UTC



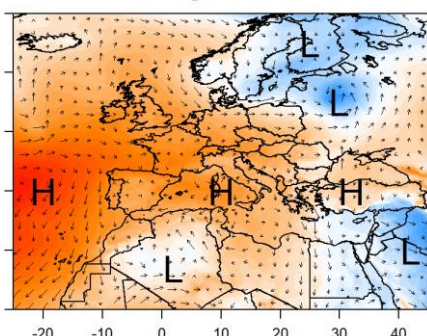
2 Aug at 12 UTC



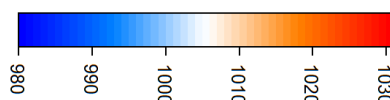
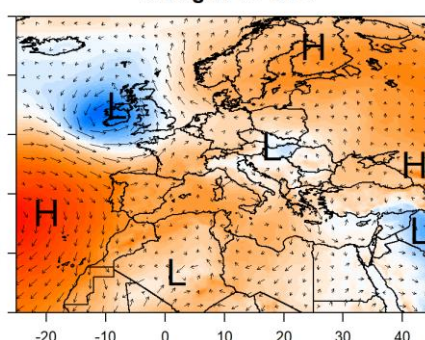
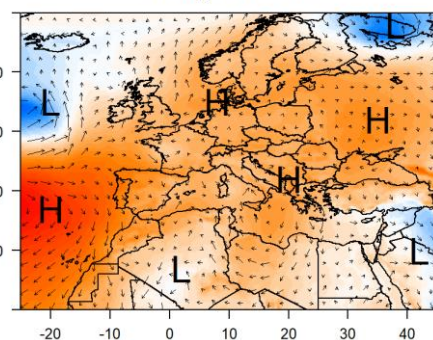
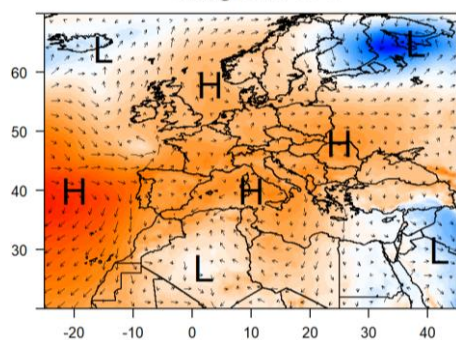
3 Aug at 12 UTC



4 Aug at 12 UTC

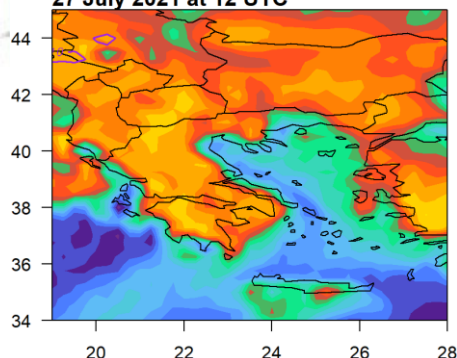


5 Aug at 12 UTC

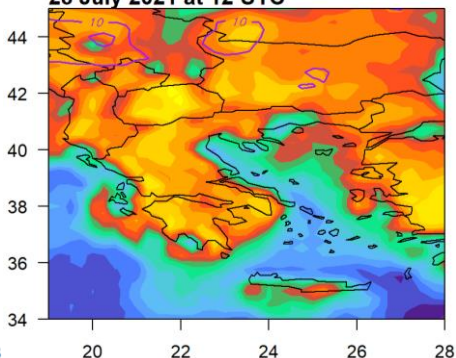


Relative Humidity [%] at 1000 hPa &
Temp Anomalies at 2m [°C]

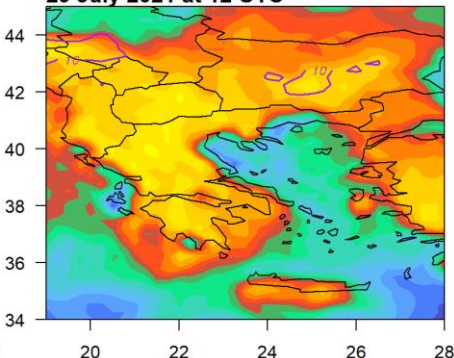
27 July 2021 at 12 UTC



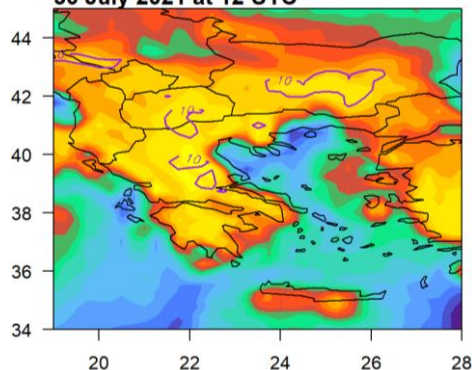
28 July 2021 at 12 UTC



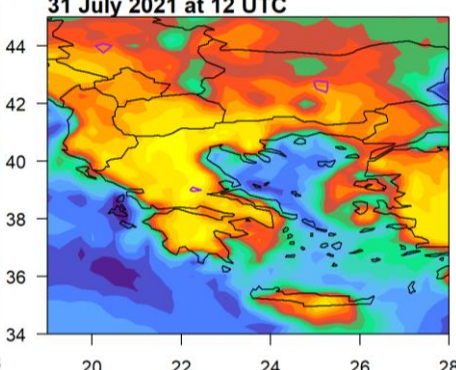
29 July 2021 at 12 UTC



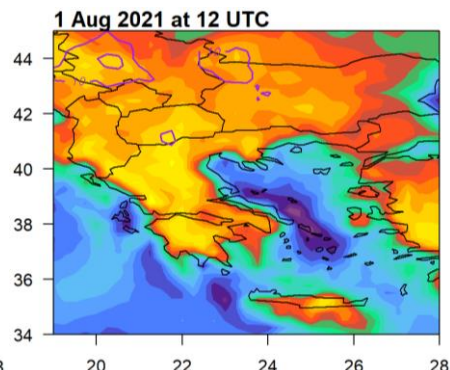
30 July 2021 at 12 UTC



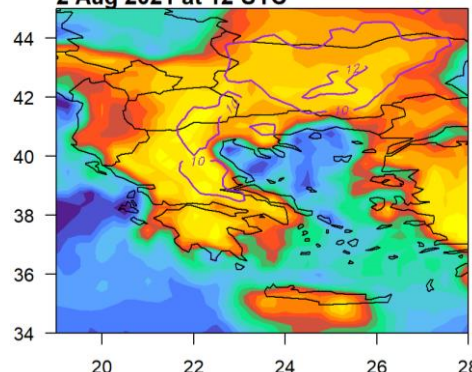
31 July 2021 at 12 UTC



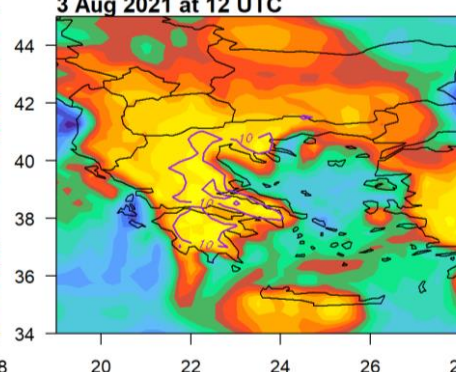
1 Aug 2021 at 12 UTC



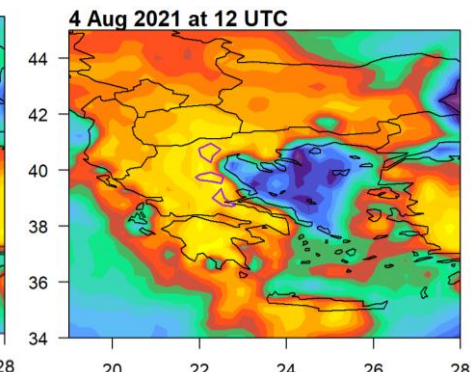
2 Aug 2021 at 12 UTC



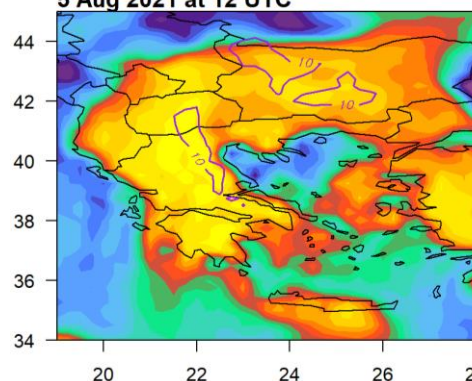
3 Aug 2021 at 12 UTC



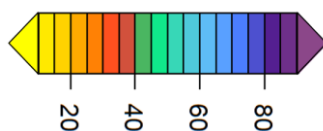
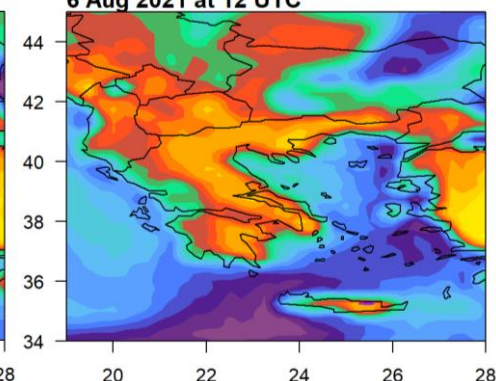
4 Aug 2021 at 12 UTC

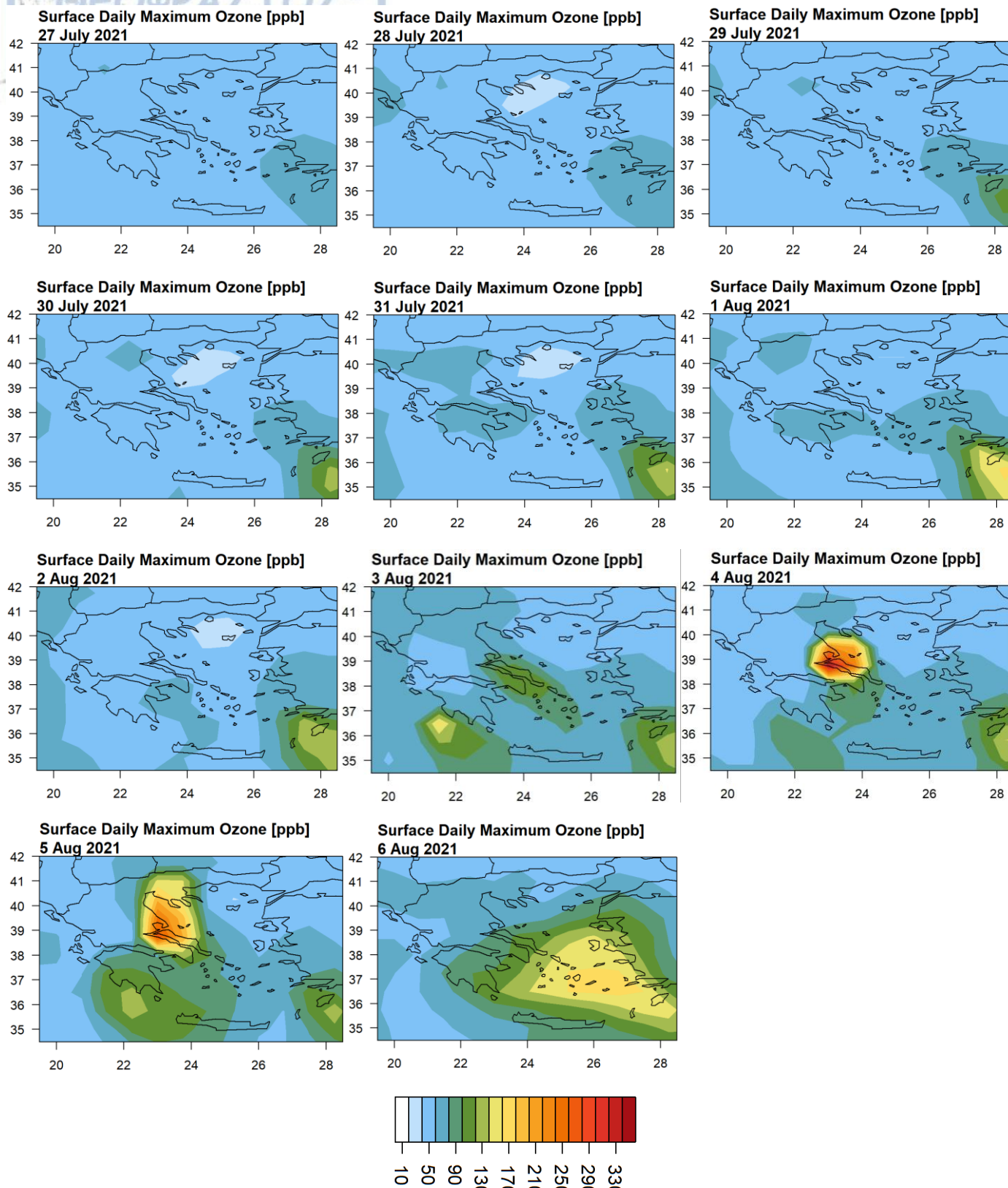


5 Aug 2021 at 12 UTC

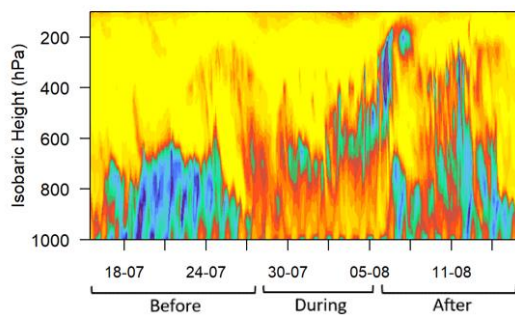


6 Aug 2021 at 12 UTC

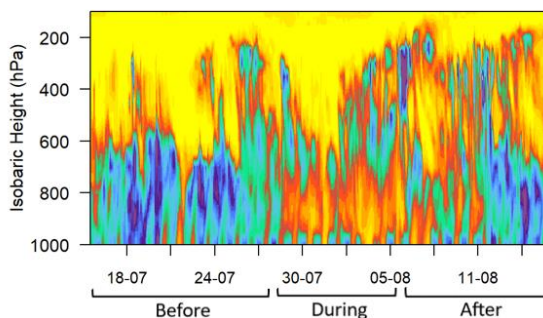




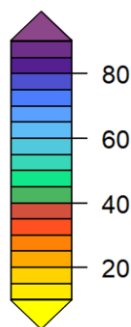
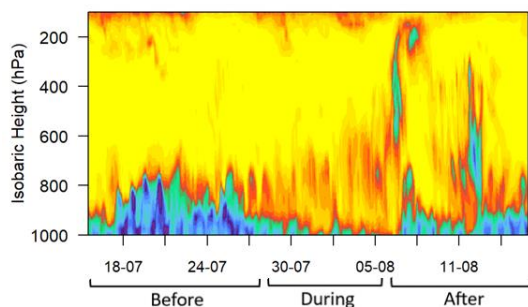
Relative Humidity [%] 15/7/2021-15/8/2021
Station of Thiseio



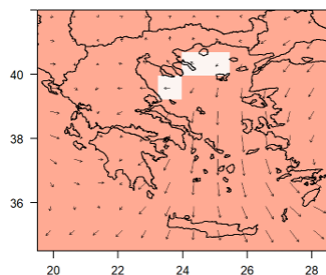
Relative Humidity [%] 15/7/2021-15/8/2021
Station of Eptapyrgio



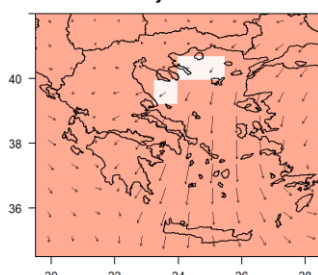
Relative Humidity [%] 15/7/2021-15/8/2021
Station of Finokalia



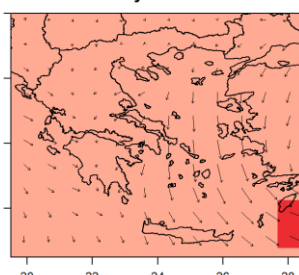
Thresholds of Surface Ozone [ppb]
& Winds [m/s] at 10m
27 July at 12 UTC



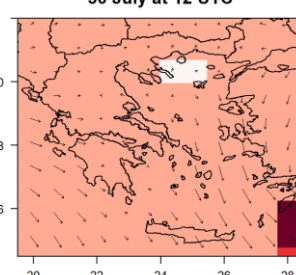
28 July at 12 UTC



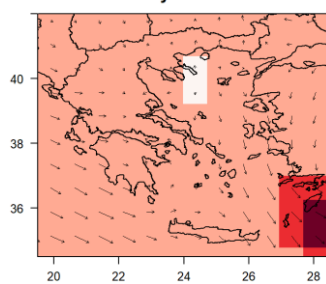
29 July at 12 UTC



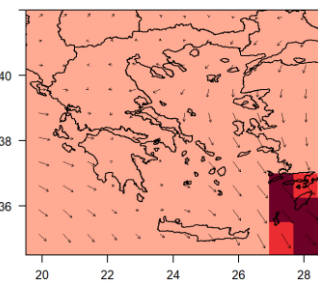
30 July at 12 UTC



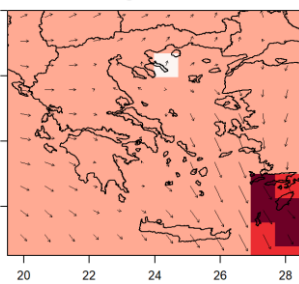
31 July at 12 UTC



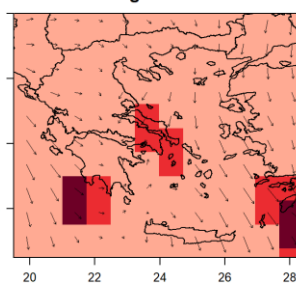
1 Aug at 12 UTC



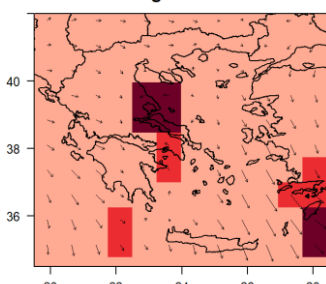
2 Aug at 12 UTC



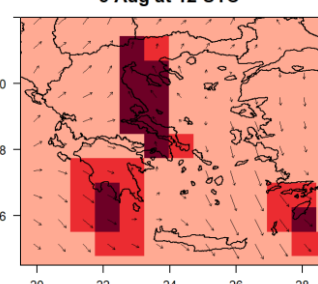
3 Aug at 12 UTC



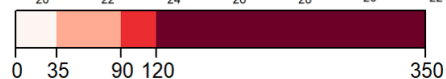
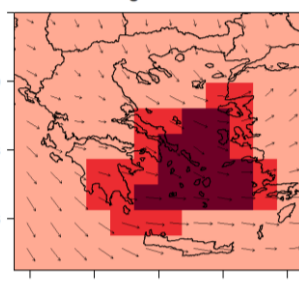
4 Aug at 12 UTC



5 Aug at 12 UTC



6 Aug at 12 UTC



ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Ainsworth, E.A., Yendrek, C.R., Sitch, S., Collins, W.J., Emberson, L.D., 2012. The effects of tropospheric ozone on net primary productivity and implications for climate change. *Annu. Rev. Plant Biol.* 63, 637–661.
- Akritidis, D., Pozzer, A., Zanis, P., Tyrllis, E., Škerlak, B., Sprenger, M., and Lelieveld, J.: On the role of tropopause folds in summertime tropospheric ozone over the eastern Mediterranean and the Middle East, *Atmos. Chem. Phys.*, 16, 14025–14039, <https://doi.org/10.5194/acp-16-14025-2016>, 2016.
- Allegrini, J., Dorer, V., Carmeliet, J., 2012. Analysis of convective heat transfer at building façades in street canyons and its influence on the predictions of space cooling demand in buildings. *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* 104-106, 464-473.
- Anderson, G.B.; Bell, M.L. Heat waves in the united states: Mortality risk during heat waves and effect modification by heat wave characteristics in 43 U.S. Communities. *Environ. Health Perspect.* 2011, 119, 210–218.
- Ashmore, M.R., 2005. Assessing the future global impacts of ozone on vegetation. *Plant Cell Environ.* 28, 949–964.
- Baertsch-Ritter, N., Keller, J., Dommen, J., and Prevot, A. S. H.: Effects of various meteorological conditions and spatial emission resolutions on the ozone concentration and ROG/NOx limitation in the Milan area (I), *Atmos. Chem. Phys.*, 4, 423–438, doi:10.5194/acp-4-423-2004, 2004.
- Balafoutis, C., Makrogiannis, T., 2001. Analysis of a heat wave phenomenon over Greece and its implications for tourism and recreation. In: Matzarakis, A. and de Freitas, C.R. (Eds), *Proceedings of the First International Workshop on Climate, Tourism and Recreation. Report of a Workshop, Halkidiki, Greece*, pp. 113–121.
- Balafoutis, C.h., Makrogiannis, T., 2000. A contribution to the study of the heat wave phenomenon over Greece in August 1999. 3rd conference of applied climatology , tools for the environment and man of year 2000, ECAC, Session 5, Urban, Heat and Tourism, 16–20 October, Piza, Italy.
- Baniyounes, A.M., Liu, G., Rasul, M.G., Khan, M.M.K., 2012. Analysis of solar desiccant cooling system for an institutional building in subtropical Queensland, Australia. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 16 (8), 423-6431.
- Barring L, Mattsso J O and Lindqvist S 1985 Canyon Geometry, street temperatures and urban heat island in Malmo, Sweden; *J. Climatol.* 5 433–444
- Bernard, S.M., Samet, J.M., Grambsch, A., Ebi, K.L., Romieu, I., 2001. The potential impacts of climate variability and change on air pollution-related health effects in the United States. *Environ. Health Perspect.* 109 (Suppl. 2), 199–209.
- Bhatia, A., Tomer, R., Kumar, V., Singh, S., Pathak, H., 2012. Impact of tropospheric ozone on crop growth and productivity—a review. *J. Sci. Ind. Res.* 71, 97–112.
- Bianchini, F., Hewage, K., 2012. How “green” are the green roofs? Lifecycle analysis of green roof materials. *Build. Environ.* 48, 57-65.

Bieli, M., Pfahl, S. and Wernli, H. (2015) A Lagrangian investigation of hot and cold temperature extremes in Europe. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 141, 98–108

Bloomer B J, Stehr J W, Piety C A, Salawitch R J and Dickerson R R 2009 Observed relationships of ozone air pollution with temperature and emissions *Geophys. Res. Lett.* 36 L09803

Bobb, J.F., Dominici, F., Peng, R.D., 2011. A Bayesian model averaging approach for estimating the relative risk of mortality associated with heat waves in 105 U.S. cities. *Biometrics* 67 (4), 1605-1616.

Boer, M.M.; Nolan, R.H.; Resco De Dios, V.; Clarke, H.; Price, O.F.; Bradstock, R.A. Changing weather extremes call for early warning of potential for catastrophic fire. *Earth's Future* 2017, 5, 1196–1202.

BoM, 2011. Heatwaves. Bureau of Meteorology, Commonwealth of Australia viewed 27th October 2013. <http://www.bom.gov.au/wa/sevwx/perth/heatwaves.shtml>.

Boyer, J. S. 1995. Biochemical and biophysical aspects of waterdeficits and the predisposition to disease. *Annu. Rev.Phytopathol.* 33:251–274

Bradstock, R.A. A biogeographic model of fire regimes in Australia: Current and future implications. *Glob. Ecol. Biogeogr.* 2010, 19, 145–158.

Brikas, D., Karacostas, T., Pennas, P. et al. The role of the subtropical jet stream during heat wave events over north-central Greece. *Meteorol. Atmos. Phys.* 94, 219–233 (2006). <https://doi.org/10.1007/s00703-006-0190-y>

Brodribb, T. J., and H. Cochard. 2009. Hydraulic failure defines the recovery and point of death. *Plant Physiol.* 149:575–584

Brown-Steiner B, Hess P G and Lin M Y 2015 On the capabilities and limitations of GCM simulations of summertime regional air quality: a diagnostic analysis of ozone and temperature simulations in the US using CESM CAM-Chem Atmos. Environ. 101 134–48

Camalier L, Cox W and Dolwick P 2007 The effects of meteorology on ozone in urban areas and their use in assessing ozone trends Atmos. Environ. 41 7127–37

Carlson, T.N. (1994) *Mid-latitude Weather Systems*, (p. 507). New York: Routledge.

Cassou, C., L. Terray, and A. S. Phillips (2005), Tropical Atlantic influence on European heat waves, *J. Clim.*, 18, 2805–2811

Chameides, W., Walker, J.C., 1973. A photochemical theory of tropospheric ozone. *J. Geophys. Res.* 78 (36), 8751–8760.

Chapman, S., 1930. *A Theory of Upper-Atmospheric Ozone*: Edward Stanford.

Chen, Y., Li, Y., 2017. An inter-comparison of three heat wave types in China during 1961–2010: observed basic features and linear trends. *Sci. Rep.* 7, 45619.

Chuwah C et al 2015 Global impacts of surface ozone changes on crop yields and land use Atmos. Environ. 106 11–23

Clark T L and Karl T R 1982 Application of prognostic meteorological variables to forecasts of daily maximum one-hour ozone concentrations in the northeastern United States; *J. Appl. Meteorol.* 21 1662–1671.

Colette, A., Andersson, C., Baklanov, A., Bessagnet, B., Brandt, J., Christensen, J.H., Doherty, R., Engardt, M., Geels, C., Giannakopoulos, C., Hedegaard, G.B., Katragkou, E., Langner, J., Lei, H., Manders, A., Melas, D., Meleux, F., Rouil, L., Sofiev, M., Soares, J., Stevenson, D.S., Tombrou-Tzella, M., Varotsos, K.V., Young, P., 2015. Is the ozone climate penalty robust in Europe? *Environ. Res. Lett.* 10 (8), 084015

Constable JVH, Guenther AB, Schimel DS, Monson RK (1999) Modelling changes in VOC emission in response to climate change in the continental United States. *Glob Chang Biol* 5:791–806

Cristofanelli, P., Bonasoni, P., Tositti, L., Bonafe, U., Calzolari, F., Evangelisti, F., Sandrini, S., and Stohl, A.: A 6-year analysis of stratospheric intrusions and their influence on ozone at Mt. Cimone (2165 m above sea level), *J. Geophys. Res.-Atmos.*, 111, D03306, <https://doi.org/10.1029/2005JD006553>, 2006.

Crutzen, P. J.: Photochemical reactions initiated by and influencing ozone in unpolluted tropospheric air, *Tellus*, 26, 47–57, 1974.

Crutzen, P., 1973. A discussion of the chemistry of some minor constituents in the stratosphere and troposphere. *Pure Appl. Geophys.* 106 (1), 1385–1399.

Cusack, L., de Crespigny, C., Athanasos, P., 2011. Heatwaves and their impact on people with alcohol, drug and mental health conditions: a discussion paper on clinical practice considerations. *J. Adv. Nurs.* 67 (4), 915-922.

Danielsen, E. F.: Stratospheric-tropospheric exchange based on radioactivity, ozone and potential vorticity, *J. Atmos. Sci.*, 25, 502– 518, 1968.

Davies, T. D., Kelly, P. M., Low, P. S., and Pierce, C. E.: Surface ozone concentrations in Europe: links with regional-scale atmospheric circulation, *J. Geophys. Res.*, 97(9), 819–832, 1992.

Dawson, J. P., Adams, P. J., and Pandis, S. N.: Sensitivity of ozone to summertime climate in the eastern USA: A modeling case study, *Atmos. Environ.*, 41, 1494–1511, 2007.

Della-Marta, P. M., Luterbacher, J., von Weissenfluh, H., Xoplaki, E., Brunnet, M., and Wanner, H.: Summer heat waves over western Europe 1880-2003, their relationship to large-scale forcings and predictability, *Clim. Dynam.*, 29, 251–275, 2007.

Depietri, Y., Renaud, F.G., Kallis, G., 2012. Heat waves and floods in urban areas: a policy-oriented review of ecosystem services. *Sustain. Sci.* 7 (1), 95-107.

Dimitriadou, S., Nikolakopoulos, K.G. Development of the Statistical Errors Raster Toolbox with Six Automated Models for Raster Analysis in GIS Environments. *Remote Sens.* 2022, 14, 5446.

Ding, A.J., Fu, C.B., Yang, X.Q., Sun, J.N., Zheng, L.F., Xie, Y.N., et al., 2013. Ozone and fine particle in the western Yangtze River Delta: an overview of 1 yr data at the SORPES station. *Atmos. Chem. Phys.* 13, 5813–5830

D'Ippoliti, D., Michelozzi, P., Marino, C., de'Donato, F., Menne, B., Katsouyanni, K., Kirchmayer, U., Analitis, A., Medina-Ramon, M., Paldy, A., Atkinson, R., Kovats, S., Bisanti, L., Schneider, A., Lefranc, A., Iniguez, C., Perucci, C., 2010. The impact of heat waves on mortality in 9 European cities: results from the EuroHEAT project. *Environ. Health* 9 (1), 37.

Duan, H., J. S. Amthor, R. A. Duursma, A. P. O'Grady, B. Choat, and D. T. Tissue. 2013. Carbon dynamics of eucalypt seedlings exposed to progressive drought in elevated [CO₂] and elevated temperature. *Tree Physiol.* 33:779–792

Efthimiou, N.; Alexandris, S.; Karavitis, C.; Mamassis, N. Comparative analysis of reference evapotranspiration estimation between various methods and the FAO56 Penman—Monteith procedure. *Eur. J. Water Qual.* 2013, 42, 19–34.

Eltahir EAB. 1998. A soil moisture rainfall feedback mechanism 1. Theory and observations. *Water Resources Research* 34: 765–776.

Emberson, L., Ashmore, M., Simpson, D., Tuovinen, J.-P., and Cambridge, H.: Modelling and mapping ozone deposition in Europe, *Water Air Soil Pollut.*, 130, 577–582, 2001.

Eyring V, Lamarque J-F and Hess P 2013 Overview of IGAC/SPARC chemistry-climate model initiative (CCMI) community simulations in support of upcoming ozone and climate assessments Tech. rep., SPARC Newsletter 40 48–66

Fiala, Jaroslav, 2003. Air Pollution by Ozone in Europe in Summer 2003 - Overview of Exceedances of EC Ozone Threshold Values During the Summer Season April–August 2003 and Comparisons with Previous Years. European Environment Agency Copenhagen.

Fischer E M and Schar C 2010 Consistent geographical patterns of " changes in high-impact European heat-waves *Nat. Geosci.* 3 398–403

Fischer, E. M., Seneviratne, S. I., Lüthi, D., and Schär, C.: Contribution of land-atmosphere coupling to recent European summer heat waves, *Geophys. Res. Lett.*, 34, L06707, <https://doi.org/10.1029/2006GL029068>, 2007a.

Fischer, E.M. , S.I. Seneviratne, P.L. Vidale, et al. Soil moisture–atmosphere interactions during the 2003 European summer heat wave *J. Clim.*, 20 (20) (2007b), pp. 5081-5099

Fishman J and Crutzen P 1978 The origin of ozone in the troposphere; *Nature* 274 855–858

Fishman, J., Solomon, S., and Crutzen, P. J.: Observational and theoretical evidence in support of a significant in-situ photochemical source of tropospheric ozone, *Tellus*, 31, 432–446, 1979.

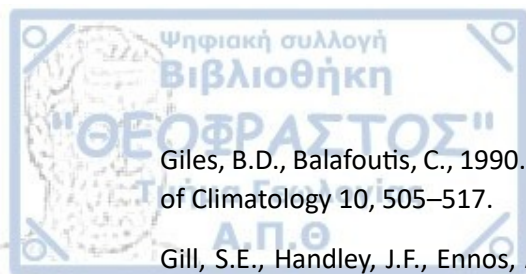
Fouillet, A., Rey, G., Laurent, F., Pavillon, G., Bellec, S., Guihenneuc-Jouyau, C., et al., 2006. Excess mortality related to the August 2003 heat wave in France. *Int. Arch. Occup. Environ. Health* 80, 16–24.

Founda D, Katavoutas G, Pierros F, Mihalopoulos N (2022) Centennial changes in heat waves characteristics in Athens (Greece) from multiple definitions based on climatic and bioclimatic indices. *Glob Planet Change* 212:103807.

Founda, D., Santamouris, M., 2017. Synergies between Urban Heat Island and Heat Waves in Athens (Greece) during an extremely hot summer (2012). *Sci. Rep.* 7, 10973. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-11407-6>.

Fuentes JD, Lerdau M, Atkinson R, Baldocchi D, Bottenheim JW, Ciccioli P, Lamb B, Geron C, Gu L, Guenther A, Sharkey TD, Stockwell W (2000) Biogenic hydrocarbons in the atmospheric boundary layer: a review. *Bull Am Meteorol Soc* 81:1537–1575

Gasparrini, A. and Armstrong, B., 2011, The impact of heat waves on mortality, *Epidemiology*. 22(1): 68-73. doi:10.1097/EDE.0b013e3181fdcd99



Giles, B.D., Balafoutis, C., 1990. The Greek heat waves on 1987 and 1988. *International Journal of Climatology* 10, 505–517.

Gill, S.E., Handley, J.F., Ennos, A.R., Pauleit, S., 2007. Adapting cities for climate change: the role of the green infrastructure. *Built Environ.* 33 (1), 115-133.

Gouldsbrough, L., Hossaini, R., Eastoe, E., Young, P.J., 2022. A Temperature Dependent Extreme Value Analysis of UK Surface Ozone, 1980 - 2019. *Atmos. Environ.* 273.

Granger, K., Berechree, M., 2009. Research Reports e Severe Weather. CHAPTER 10: HEAT WAVE RISKS. Geoscience, Australia

Grewe V 2007 Impact of climate variability on tropospheric ozone; *Sci. Total Environ.* 374 167–181.

Guerreiro, C. B. B., Foltescu, V., and de Leeuw, F.: Air quality status and trends in Europe, *Atmos. Environ.*, 98, 376–384, <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.09.017>, 2014

Guicherit, R., van Dop, H., 1977. Photochemical production of ozone in Western Europe (1971–1975) and its relation to meteorology. *Atmospheric Environment* 11 (2), 145–155.

Gupta, S., Carmichael, C., Simpson, C., Clarke, M.J., Allen, C., Gao, Y., Chan, E.Y.Y., Murray, V., 2012. Electric fans for reducing adverse health impacts in heatwaves. *Cochrane Libr.* 7, 1-20.

Hemon, D., and E. Jouglu (2004), *Surmortalité liée à la canicule d'août 2003* (in French), report, 76 pp., L'Inst. Natl. de la Santé et de la Rech. Médicale, Paris.

Hoell, A., Funk, C., Zinke, J., & Harrison, L. (2017). Modulation of the Southern Africa precipitation response to the El Niño Southern Oscillation by the subtropical Indian Ocean Dipole. *Climate Dynamics*, 48(7), 2529–2540.

Holton, J. R., Haynes, P. H., McIntyre, M. E., Douglass, A. R., Rood, R. B., and Pfister, L.: Stratosphere-troposphere exchange, *Rev. Geophys.*, 33, 403–439, 1995.

Hulley, G.C., Dousset, B., Kahn, B.H., 2020. Rising trends in heatwave metrics across Southern California. *Earth's Future* 8. <https://doi.org/10.1029/2020EF001480> e2020EF001480.

Im, U., Markakis, K., Poupkou, A., Melas, D., Unal, A., Gerasopoulos, E., et al., 2011. The impact of temperature changes on summer time ozone and its precursors in the Eastern Mediterranean. *Atmos. Chem. Phys. Discuss.* 11, 3847–3864

Jaén, C., Udina, M., Bech, J., Analysis of two heat wave driven ozone episodes in Barcelona and surrounding region: Meteorological and photochemical modeling, *Atmospheric Environment* 246 (2021) 118037, <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.118037>

Josseran, L., Fouillet, A., Caillere, N., Brun-Ney, D., Illef, D., Brucker, G., Medeiros, H., Astagneau, P. Assessment of a syndromic surveillance system based on morbidity data: Results from the oscur network during a heat wave. *PLoS One*. 2010 doi: 10.1371/journal.pone.0011984.

Kalkstein, L.S., Greene, J.S., Mills, D.M., Perrin, A.D., Samenow, J.P., Cohen, J.C., 2008. Analog European Heat Waves for U.S. cities to analyze impacts on heat-related mortality. *BAMS* 75–85. <https://doi.org/10.1175/BAMS-89-1-75>. Jan 2008

Kambezidis, H.D. 3.02—The Solar Resource. In *Comprehensive Renewable Energy*; Sayigh, A., Ed.; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 2012; pp. 27–84.

Katragkou E., P. Zanis, A. Tsikerdekis, J. Kapsomenakis, D. Melas, H. Eskes, J. Flemming, V. Huijnen, A. Inness, M.G. Schultz, O. Stein, C.S. Zerefos, Evaluation of near surface ozone over Europe from the MACC reanalysis, *Geosci. Model Dev.*, 8, 2299-2314, doi:10.5194/gmd-8-2299-2015, 2015.

Katragkou, E., Zanis, P., Kioutsioukis, I., Tegoulas, I., Melas, D., Krüger, B.C., et al., 2011. Future climate change impacts on summer surface ozone from regional climate-air quality simulations over Europe. *J. Geophys. Res.-Atmos.* 116, D22307.

Kettlewell, P. S., Stephenson, D. B., Atkinson, M. D., and Hollins, P. D.: Summer rainfall and wheat grain quality: relationships with the North Atlantic Oscillation, *Weather*, 58, 155–164, 2003.

Kotroni, V., Lagouvardos, K., Lalas, D., 2001. The effect of the island of Crete on the Etesian winds over the Aegean Sea. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 127, 1917–1937

Krug, A.; Fenner, D.; Holtmann, A.; Scherer, D. Occurrence and Coupling of Heat and Ozone Events and Their Relation to Mortality Rates in Berlin, Germany, between 2000 and 2014. *Atmosphere* 2019, 10, 348. <https://doi.org/10.3390/atmos10060348>

Kubilay, N., Nickovic, S., Moulin, C., Dulac, F., 2000. An illustration of the transport of mineral dust onto the eastern Mediterranean. *Atmospheric Environment* 34, 1293–1303.

Kunkel, K. E., S. S. Changnon, B. Reike, and R. W. Arritt, 1996: The July 1995 heat wave in the Midwest: A climatic perspective and critical weather factors. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 77, 1507–1518.

Kurz, W. A., C. C. Dymond, G. Stinson, G. J. Rampley, E. T. Neilson, A. L. Carroll, et al. 2008. Mountain pine beetle and forest carbon feedback to climate change. *Nature* 452:987–990.

Kushnir, Y., Seager, R., Ting, M., Naik, N., & Nakamura, J. (2010). Mechanisms of Tropical Atlantic SST influence on North American precipitation variability. *Journal of Climate*, 23(21), 5610–5628

Kyselý, J., 2004. Mortality and displaced mortality during heat waves in the Czech Republic. *Int. J. Biometeorol.* 49, 91–97. <https://doi.org/10.1007/s00484-004-0218-2>.

Lee, H., Kim, E. K., Kang, S. W., Kim, J. H., Hwang, H. J., & Kim, T. I. (2013). Effects of ozone exposure on the ocular surface. *Free Radical Biology and Medicine*, 63, 78–89. <https://doi.org/10.1016/j.freeradbiomed.2013.05.006>

Lee, J. D., Lewis, A. C., Monks, P. S., Jacob, M., Hamilton, J. F., Hopkins, J. R., Watson, N. M., Saxton, J. E., Ennis, C., Carpenter, L. J., Carslaw, N., Fleming, Z., Bandy, B. J., Oram, D. E., Penkett, S. A., Slemr, J., Norton, E., Rickard, A. R., Whalley, L. K., Heard, D. E., Bloss, W. J., Gravestock, T., Smit, S. C., Stanton, J., Pilling, M. J., and Jenkin, M. E.: Ozone photochemistry and elevated isoprene during the UK heatwave of August 2003, *Atmospheric Environment*, 40, 7598–7613, 2006.

Leisner, C.P., Ainsworth, E.A., 2011. Quantifying the effects of ozone on plant reproductive growth and development. *Glob. Chang. Biol.* 18, 606–616.

Lelieveld, J. and Dentener, F. J.: What controls tropospheric ozone?, *J. Geophys. Res.-Atmos.*, 105, 3531–3551, 2000.

Levanic, T., M. Cater, and N. G. McDowell. 2011. Associations between growth, wood anatomy, carbon isotope discrimination and mortality in a *Quercus robur* forest. *Tree Physiol.* 31:298–308.

Levy B and Patz J 2015 *Climate Change and Public Health* (New York: Oxford University Press) p 368

Lewis, A. C., Lee, J. D., & Carpenter, L. J. (2004). Outdoor air pollution: The effects of ozone. *The Lancet*, 364(9435), 663. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(04\)16888-8](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(04)16888-8)

Lhotka, O. & Kyselý, J. (2022) The 2021 European heat wave in the context of past major heat waves. *Earth, Planets and Space*, 9, 1–12. <https://doi.org/10.1029/2022EA002567>

Li, K., Jacob, D. J., Liao, H., Zhu, J., Viral Shah, L., Shen, K. H., ... Zhai, S. (2019). A two-pollutant strategy for improving ozone and particulate air quality in China. *Nature Geoscience*, 12(11), 906–910. <https://doi.org/10.1038/s41561-019-0464-x>

Liu, L., Talbot, R., Lan, X., 2015. Influence of climate change and meteorological factors on Houston's air pollution: ozone a case study. *Atmosphere* 6, 623–640.

Logan, J. A.: Tropospheric ozone: Seasonal behavior, trends, and anthropogenic influence, *J. Geophys. Res.-Atmos.*, 90, 10463–10482, 1985.

Logothetis I., S. Dafka, K. Tourpali, S. Misios, P. Zanis, E. Xoplaki, J. Luterbacher, E. Papagianoulis. The southeast Asian Monsoon and ENSO impact on the summer atmospheric circulation of East Mediterranean during 20th century based on ERA-20C and CMIPS simulations, *International Journal of Climatology*, 1-16, <https://doi.org/10.1002/joc.7510>, 2022

Lombardozzi D, Levis S, Bonan G, Hess P G and Sparks J P 2015 The influence of chronic ozone exposure on global carbon and water cycles *J. Clim.* 28 292–305

Lombardozzi D, Sparks J P and Bonan G 2013 Integrating O₃ influences on terrestrial processes: Photosynthetic and stomatal response data available for regional and global modeling *Biogeosciences* 10 6815–31

Marécal, V., Peuch, V.-H., Andersson, C., Andersson, S., Arteta, J., Beekmann, M., Benedictow, A., Bergström, R., Bessagnet, B., Cansado, A., Chéroux, F., Colette, A., Coman, A., Curier, R. L., Denier van der Gon, et al.: A regional air quality forecasting system over Europe: the MACC-II daily ensemble production, *Geosci. Model Dev.*, 8, 2777–2813, 2015.

Matzarakis, A., Nastos, P.T., 2011. Human-biometeorological assessment of heat waves in Athens. *Theor. Appl. Climatol.* 105 (1e2), 99-106.

Mavromatis, T.; Georgoulas, A.K.; Akritidis, D.; Melas, D.; Zanis, P. Spatiotemporal Evolution of Seasonal Crop-Specific Climatic Indices under Climate Change in Greece Based on EURO-CORDEX RCM Simulations. *Sustainability* **2022**, 14, 17048

McCarthy, M., Armstrong, L., Armstrong, N., 2019. A new heatwave definition for the UK. *Weather* 74 (11), 382–387. <https://doi.org/10.1002/wea.3629>.

McDonald R I, Green P, Balk D, Fekete B M, Revenga C, Todd M and Montgomery M 2011 Urban growth, climate change, and freshwater availability *Proc. Natl Acad. Sci. USA* 108 6312–7

Melas, D., Ziomas, I., Klemm, O., Zerefos, C.S., 1998. Flow dynamics in Athens area under moderate large-scale winds. *Atmos. Environ.* 32, 2209–2222.

Meleux, F., Solmon, F., and Giorgi, F.: Increase in summer European ozone amounts due to climate change, *Atmos. Environ.*, 41(35), 7577–7587, 2007.

Metaxas, D.A., Kallos, G., 1980. Heat waves from a synoptic point of view. *Riv. Di Meteor. Aeronaut.* IL 2–2, 107–119

Mills G, Buse A, Gimeno B, Bermejo V, Holland M et al, A synthesis of AOT40-based response functions and critical levels of ozone for agricultural and horticultural crops, *Atmos Environ*, 41 (2007) 2630-2643

Miralles, D., Gentile, P., Seneviratne, S., Teuling, A., 2018, Land–atmospheric feedbacks during droughts and heatwaves: state of the science and current challenges, *Annals of the New York Academy of Sciences* 1436, 19–35, doi: 10.1111/nyas.13912

Miralles, D., Teuling, A., van Heerwaarden, C. et al. Mega-heatwave temperatures due to combined soil desiccation and atmospheric heat accumulation. *Nature Geosci* 7, 345–349 (2014). <https://doi.org/10.1038/ngeo2141>

Mitropoulos, D.; Pytharoulis, I.; Zanis, P.; Anagnostopoulou, C. Synoptic Analysis and Subseasonal Predictability of an Early Heatwave in the Eastern Mediterranean. *Atmosphere* 2024, 15, 442. <https://doi.org/10.3390/atmos15040442>

Molfino, N. A., & Wright, S. C. (1991). Effect of low concentrations of ozone on inhaled allergen responses in asthmatic subjects. *The Lancet*, 338(8761), 199–203. [https://doi.org/10.1016/0140-6736\(91\)90346-Q](https://doi.org/10.1016/0140-6736(91)90346-Q)

Monks, P. S.: A review of the observations and origins of the spring ozone maximum, *Atmos. Environ.*, 34, 3545–3561, 2000.

Monks, P. S.: Gas-phase radical chemistry in the troposphere, *Chem. Soc. Rev.*, 34, 376–395, 2005.

Nagashima, T., Sudo, K., Akimoto, H., Kurokawa, J., Ohara, T., 2017. Long-term change in the source contribution to surface ozone over Japan. *Atmos. Chem. Phys.* 17, 8231–8246. <https://doi.org/10.5194/acp-17-8231-2017>.

Narumi, D., Kondo, A., Shimoda, Y., 2009. The effect of the increase in urban temperature on the concentration of photochemical oxidants. *Atmos. Environ.* 43, 2348–2359. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2009.01.028>.

Nayha, S., Rintamaki, H., Donaldson, G., Hassi, J., Jousilahti, P., Laatikainen, T., Jaakkola, J.J.K., Ikaheimo, T.M., 2014. Heat-related thermal sensation, comfort and symptoms in a northern population: the National FINRISK 2007 study. *Eur. J. Pub. Health* 24 (4), 620–626. <https://doi.org/10.1093/eurpub/ckt159>. August 2014.

Nickols, D. and Varas, A. J. 1992. Ozonation. Pp. 197-258 in: *Disinfection alternatives for safe drinking water*. Bryant, E.A., Fulton, G. P., and Budd, G. C. Van Nostrand Reinhold, New York.

NWS (National Weather Service) 1994. Excessive heat watch, warning and advisory heat index criteria. *Regional Operations Manual Letter*, E-5-94, Eastern Region, NWS, Bohemia, NY, 3pp.

Oltmans SJ, Levy H II (1994) Surface ozone measurements from a global network. *Atmospheric Environment*, 28, 9–24

Ordóñez, C., Brunner, D., Staehelin, J., Hadjinicolaou, P., Pyle, J., Jonas, M., Wernli, H., and Prévôt, A.: Strong influence of lowermost stratospheric ozone on lower tropospheric background ozone changes over Europe, *Geophys. Res. Lett.*, 34, L07805, <https://doi.org/10.1029/2006GL029113>, 2007.

Panwar, N.L., Kaushik, S.C., Kothari, S., 2011. Role of renewable energy sources in environmental protection: a review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 15 (3), 1513-1524.

Parrish D D et al 2014 Long-term changes in lower tropospheric baseline ozone concentrations: comparing chemistry-climate models and observations at northern midlatitudes *J. Geophys. Res. Atmos.* 119 5719–36

Pascal, M., Wagner, V., Le Tertre, A., Laaidi, K., Honore, C., Benichou, F., Beaudeau, P., 2013. Definition of temperature thresholds: the example of the French heat wave warning system. *Int. J. Biometeorol.* 57 (1), 21-29.

Patz, J.A., Campbell-Lendrum, D., Holloway, T., Foley, J.A., 2005. Impact of regional climate change on human health. *Nature* 438, 310–317.

Pezza, A.B., van Rensch, P., Cai, W., 2012. Severe heat waves in Southern Australia: synoptic climatology and large scale connections. *Clim. Dyn.* 38 (1-2), 209-224.

Pfister G et al 2014 Projections of future summertime ozone over the US *J. Geophys. Res.* 119 5559–82

Porritt, S., Shao, L., Cropper, P., Goodier, C., 2011. Adapting dwellings for heat waves. *Sustain. Cities Soc.* 1 (2), 81-90.

Porritt, S.M., Cropper, P.C., Shao, L., Goodier, C.I., 2012. Ranking of interventions to reduce dwelling overheating during heat waves. *Energy Build.* 55, 16-27.

Power, S. B., Casey, T., Folland, C., Colman, A., & Mehta, V. (1999). Inter-decadal modulation of the impact of ENSO on Australia. *Climate Dynamics*, 15(5), 319–324

Prezerakos, N.G., 1989. A contribution to the study of the extreme heat wave over the South Balkans in July 1987. *Meteorol. Atmos. Phys.* 41, 261–271.

Pu, X., Wang, T.J., Huang, X., Melas, D., Zanis, P., Papanastasiou, D.K., Poupkou, A., 2017, *Science of the Total Environment* 603–604, 807–816, ISSN 0048-9697, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.03.056>.

Pyrgou, A., Hadjinicolaou, P., Santamouris, M. (2018) Enhanced near-surface ozone under heatwave conditions in a Mediterranean island, *Scientific REPOrTS*, 8:9191, DOI:10.1038/s41598-018-27590-z

Querol, X.; Alastuey, A.; Reche, C.; Orto, A.; Pallares, M.; Reina, F.; Dieguez, J.; Mantilla, E.; Escudero, M.; Alonso, L.; et al. On the origin of the highest ozone episodes in Spain. *Sci. Total Environ.* 2016, 572, 379–389.

Racherla, P.N., Adams, P.J., 2006. Sensitivity of global tropospheric ozone and fine particulate matter concentrations to climate change. *J. Geophys. Res.: Atmos.* 111 (D24).

Ragettli, M., Vicedo-Cabrero, A.M., Schindler, C., Röösli, M., 2017. Exploring the association between heat and mortality in Switzerland between 1995 and 2013. *Environ. Res.* 158, 703–709. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2017.07.021>

Rasilla, D., Allende, F., Martilli, A., Fern´andez, F., 2019. Heat waves and human wellbeing in Madrid (Spain). *Atmosphere* 10, 288. <https://doi.org/10.3390/atmos10050288>

Reddy, P.J., Pfister, G.G., 2016. Meteorological factors contributing to the interannual variability of midsummer surface ozone in Colorado, Utah, and other western U.S. states. *J. Geophys. Res.-Atmos.* 121, 2434–2456

RIZQULLAH, Rifqi; SIREGAR, Johannes Kristian. The Determinant of Financial Performance Based on Good Corporate Governance and Company Size in the Basic Industrial and Chemical Sectors 2015-2019. In: *First International Conference on Science, Technology, Engineering and Industrial Revolution (ICSTEIR 2020)*. Atlantis Press, 2021. p. 105-111.

Robinson, P.J., 2001. On the definition of a heat wave. *Journal of Applied Meteorology* 40, 762–775.

Rodwell, M. J. and Hoskins, B. J.: Monsoons and the dynamics of deserts, *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 122, 1385–1404, 1996.

Rodwell, M. J. and Hoskins, B. J.: Subtropical anticyclones and summer monsoons, *J. Climate*, 14, 3192–3211, 2001.

Roelofs, G.-J. and Lelieveld, J.: Model study of the influence of cross-tropopause O₃ transports on tropospheric O₃ levels, *Tellus B*, 49, 38–55, 1997.

Rosenzweig, C., Solecki, W.D., Parshall, L., Chopping, M., Pope, G., Goldberg, R., 2005. Characterizing the urban heat island in current and future climates in New Jersey. *Glob. Environ. Change Part B Environ. Hazards* 6 (1), 51-62.

Royal Society (2008) Ground-level ozone in the 21st century: future trends, impacts and policy implications. *Science Policy Report 15/08* London, October.

Rübelke, D., Voge, S., 2013. Short-term distributional consequences of climate change impacts on the power sector: who gains and who loses? *Clim. Change* 116 (2), 191-206.

Santamouris, M., 2014. Cooling the cities: a review of reflective and green roof mitigation technologies to fight heat island and improve comfort in urban environments. *Sol. Energy* 103, 682-703.

Sartor, F., Snacken, R., Demuth, C., Walckiers, D., 1995. Temperature, ambient ozone levels, and mortality during summer, 1994, in Belgium. *Environ. Res.* 70, 105–113.

Schär, C., and G. Jendritzky (2004), Hot news from summer 2003, *Nature*, 432, 559–560

Schar, C., Vidale, P.L., Luqthi, D., Frei, C., Haberli, C., Liniger, M., Appenzeller, C., 2004. The role of increasing temperature variability in European summer heat waves. *Nature* 427, 332–336.

Schnell, J.L.; Prather, M.J. Co-occurrence of extremes in surface ozone, particulate matter, and temperature over eastern North America. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 2017, 114, 2854–2859.

Seinfeld, J. and Pandis, S. (1998): From Air Pollution to Climate Change, *Atmospheric Chemistry and Physics* 19, 958–960.

Shimoda, Y., 2003. Adaptation measures for climate change and the urban heat island in Japan's built environment. *Build. Res. Inf.* 31 (3e4), 222-230.

Simpson, D., Emberson, L., Ashmore, M., and Tuovinen, J.: A comparison of two different approaches for mapping potential ozone damage to vegetation. A model study, *Environ. Pollut.*, 146, 715–725, doi:10.1016/j.envpol.2006.04.013, 2007b.

Sitch S, Cox P M, Collins W J and Huntingford C 2007 Indirect radiative forcing of climate change through ozone effects on the land-carbon sink *Nature* 448 791–4

Smith, C., Lawson, N., 2012. Identifying extreme event climate thresholds for Greater Manchester, UK: examining the past to prepare for the future. *Meteorol. Appl.* 19 (1), 26-35.

Solberg, S., Coddeville, P., Forster, C., Ø. Hov, Y., Orsolini, K., & Uhse, K. (2005). European surface ozone in the extreme summer 2003. *Atmospheric Chemistry & Physics Discussions*, 5, 9003–9038.

Solberg, S., Hov, Ø., Søvde, A., Isaksen, I. S. A., Coddeville, P., De Backer, H., Forster, C., Orsolini, Y., and Uhse, K.: European surface ozone in the extreme summer 2003, *J. Geophys. Res.*, 113, D07307, doi:10.1029/2007JD009098, 2008.

Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K., Tignor, M., and Miller, H. L.: IPCC, Climate change 2007: the physical science basis. Contribution of working group I to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change, 2007.

Sousa, S.I.V., Alvim-Ferraz, M.C.M., Martins, F.G., 2013. Health effects of ozone focusing on childhood asthma: what is now known – a review from an epidemiological point of view. *Chemosphere* 90, 2051–2058.

Spalding, D. H. 1968. Effects of ozone atmospheres on spoilage of fruits and vegetables after harvest. Agricultural Research Service USDA Marketing Research Report No. 801.

Spanaki, A., Tsoutsos, T., Kolokotsa, D., 2011. On the selection and design of the proper roof pond variant for passive cooling purposes. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 15 (8), 3523-3533.

Sperry, J. S., U. G. Hacke, R. Oren, and J. P. Comstock. 2002. Water deficits and hydraulic limits to leaf water supply. *Plant, Cell Environ.* 25:251–263

Steiner, A.L., Finlayson-Pitts, B.J., 2010. Observed suppression of ozone formation at extremely high temperatures due to chemical and biophysical feedbacks. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 107, 19685–19690.

Stevenson, D., Doherty, R., Sanderson, M., Johnson, C., Collins, B., Derwent, D., 2005. Impacts of climate change and variability on tropospheric ozone and its precursors. *Faraday Discuss.* 130, 41–57.

Stevenson, D.S., Young, P.J., Naik, V., Lamarque, J.F., 2013. Tropospheric ozone changes, radiative forcing and attribution to emissions in the Atmospheric Chemistry and Climate Model Inter-comparison Project (ACCMIP). *Atmos. Chem. Phys.* 12, 3063–3085

Strengers, Y., 2012. Peak electricity demand and social practice theories: reframing the role of change agents in the energy sector. *Energy Policy* 44, 226-234.

Szopa, S., Naik, V., Adhikary, B., Artaxo, P., Bernsten, T., Collins, W. D., ... & Zanis, P. (2021). Short-Lived Climate Forcers (Chapter 6), <https://doi.org/10.1017/9781009157896.008> Published online by Cambridge University Press

Tagaris, E., Liao, K.J., Delucia, A.J., Deck, L., Amar, P., Russell, A.G., 2009. Potential impact of climate change on air pollution-related human health effects. *Environ. Sci. Technol.* 43, 4979–4988.

Tai, A.P.K., Martin, M.V., Heald, C.L., 2014. Threat to future global food security from climate change and ozone air pollution. *Nat. Clim. Chang.* 4, 817–821.

Tan, J., Zheng, Y., Xu, T., Guo, C., Li, L., Song, G., Zhen, X., Yuan, D., Kalkstein, A.J., Li, F., Chen, H., 2010. The urban heat island and its impact on heat waves and human health in Shanghai. The urban heat island and its impact on heat waves and human health in Shanghai. *Int. J. Biometeorol.* 54 (1), 75-84.

Taylor, C.M., Lebel, T., 1998. Observational evidence of persistent convective-scale rainfall patterns. *Mon. Weather Rev.* 126, 1597–1607.

Tenhunen JD, Catarino FM, Lange OL, Oechel WC (1987) Plant responses to stress. Functional Analysis in Mediterranean Environments. In: NATO ASI Series, Series G: Ecological Sciences, vol. 15, pp. 305–327.

Thouret, V., Cammas, J.-P., Sauvage, B., Athier, G., Zbinden, R., Nédélec, P., Simon, P., and Karcher, F.: Tropopause referenced ozone climatology and inter-annual variability (1994–2003) from the MOZAIC programme, *Atmos. Chem. Phys.*, 6, 1033–1051, doi:10.5194/acp-6-1033-2006, 2006

Tomczyk, A.M.; Bednorz, E. Heat waves in Central Europe and their circulation conditions. *Int. J. Climatol.* 2016, 36, 770–782.

Tong, S., Wang, X.Y., Barnett, A.G., 2010. Assessment of heat-related health impacts in Brisbane, Australia: comparison of different heatwave definitions. *PLoS One* 5 (8), e12155. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0012155>.

Tremeac, B., Bousquet, P., de Munck, C., Pigeon, G., Masson, V., Marchadier, C., Merchat, M., Poeuf, P., Meunier, F., 2012. Influence of air conditioning management on heat island in Paris air street temperatures. *Appl. Energy* 95, 102-110.

Turnock ST et al 2020 Historical and future changes in air pollutants from CMIP6 models *Atmos. Chem. Phys.* 20 14547-791

Tyrlis, E., Škerlak, B., Sprenger, M., Wernli, H., Zittis, G., and Lelieveld, J.: On the linkage between the Asian summer monsoon and tropopause fold activity over the eastern Mediterranean and the Middle East, *J. Geophys. Res.-Atmos.*, 119, 3202–3221, 2014.

Val Martin M, Heald C L, Lamarque J-F, Tilmes S, Emmons L K and Schichtel B A 2015 How emissions, climate, and land use change will impact mid-century air quality over the United States: a focus on effects at national parks *Atmos. Chem. Phys.* 15 2805–23

Van Vuuren D P et al 2011 The representative concentration pathways: an overview *Clim. Change* 109 5–31

Vandentorren, S., F. Suzan, S. Medina, M. Pascal, A. Maulpoix, J. C. Cohen, and M. Ledrans (2004), Mortality in 13 French cities during the August 2003 heat wave, *Am. J. Public Health*, 94(9), 1518–1520

Vautard, R., Beekmann, M., Desplat, J., Hodzic, A., Morel, S., 2007. Air quality in Europe during the summer of 2003 as a prototype of air quality in a warmer climate. *C R Geoscience* 339, 747–763.

Vautard, R., Honore, C., Beekmann, M., and Rouil, L.: Simulation of ozone during the August 2003 heat wave and emission control scenarios, *Atmos. Environ.*, 39, 2957–2967, 2005.

Vautard, R., Yiou, P., D'Andrea, F., de Noblet, N., Viovy, N., Cassou, C., Polcher, J., Ciais, P., Kageyama, M., and Fan, Y.: Summertime European heat and drought waves forced by wintertime Mediterranean rainfall deficit, *Geophys. Res. Lett.*, 34, L07711, doi:10.1029/2006GL028001, 2007.

Wagner, A, Bennouna, Y, Blechschmidt, A-M, Brasseur, G, Chabrilat, S, Christophe, Y, Errera, Q, Eskes, H, Flemming, J, Hansen, KM, Inness, A, Kapsomenakis, J, Langerock, B, Richter, A, Sudarchikova, N, Thouret, V, Zerefos, C. 2021. Comprehensive evaluation of the Copernicus Atmosphere Monitoring Service (CAMS) reanalysis against independent observations: Reactive gases. *Elementa: Science of the Anthropocene* 9(1).

Walcek C J and Yuan H H 1999 Calculated influence of temperature-related factors on ozone formation rates in the lower troposphere; *J. Appl. Meteorol.* 34 1056–1069.

Wang, G., Dolman, A. J., and Alessandri, A.: A summer climate regime over Europe modulated by the North Atlantic Oscillation, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 15, 57–64, <https://doi.org/10.5194/hess-15-57-2011>, 2011.

Wang, T., Xue, L., Brimblecombe, P., Lam, Y. F., Li, L., & Zhang, L. (2017). Ozone pollution in China: A review of concentrations, meteorological influences, chemical precursors, and effects. *Science of the Total Environment*, 575, 1582-1596.

Wang, Y., Ma, Y.-F., Eskes, H., Inness, A., Flemming, J., and Brasseur, GP: Evaluation of the CAMS global atmospheric trace gas reanalysis 2003–2016 aircraft campaign observations, *Atmos. Chem. Phys.*, 20, 4493–4521, <https://doi.org/10.5194/acp-20-4493-2020>, 2020.

Williams, D., Elghali, L., Wheeler, R., France, C., 2012a. Climate change influence on building lifecycle greenhouse gas emissions: case study of a UK mixed-use development. *Energy Build.* 48, 112-126.

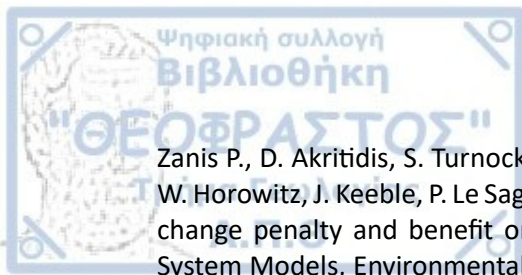
Williams, S., Nitschke, M., Weinstein, P., Pisaniello, D.L., Parton, K.A., Bi, P., 2012b. The impact of summer temperatures and heatwaves on mortality and morbidity in Perth, Australia 1994e2008. *Environ. Int.* 40, 33-38.

Wu S et al 2008 Effects of 2000–2050 global change on ozone air quality in the United States *J. Geophys. Res.* 113 D06302

Yan, Y., Lin, J., and He, C.: Ozone trends over the United States at different times of day, *Atmos. Chem. Phys.*, 18, 1185–1202, <https://doi.org/10.5194/acp-18-1185-2018>, 2018.

Yau, Y.H., Hasbi, S., 2013. A review of climate change impacts on commercial buildings and their technical services in the tropics. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 18, 430-441.

Yu, J., Ouyang, Q., Zhu, Y., Shen, H., Cao, G., Cui, W., 2012. A comparison of the thermal adaptability of people accustomed to air-conditioned environments and naturally ventilated environments. *Indoor Air* 22 (2), 110-118.



Zanis P., D. Akritidis, S. Turnock, V. Naik, S. Szopa, A. K. Georgoulas, S. E. Bauer, M. Deushi, L. W. Horowitz, J. Keeble, P. Le Sager, F. M. O'Connor, N. Oshima, K. Tsigaridis, T. van Noije, Climate change penalty and benefit on surface ozone: A global perspective based on CMIP6 Earth System Models, *Environmental Research Letters*, 17, 024014, <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac4a34>, 2022

Zanis, P., Hadjinicolaou, P., Pozzer, A., Tyrllis, E., Dafka, S., Mihalopoulos, N., and Lelieveld, J.: Summertime free-tropospheric ozone pool over the eastern Mediterranean/Middle East, *Atmos. Chem. Phys.*, 14, 115–132, <https://doi.org/10.5194/acp-14-115-2014>, 2014.

Zschenderlein P, Fink AH, Pfahl S, Wernli H., Processes determining heat waves across different European climates. *QJRMeteorolSoc.* 2019;145:2973–2989. <https://doi.org/10.1002/qj.3599>

Ελληνική Βιβλιογραφία και επιπλέον πηγές

Σπύρου, Κ. (2000, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης (ΑΠΘ)), Συνοπτική και δυναμική μελέτη του φαινομένου του καύσωνα στον ευρύτερο ελλαδικό χώρο

Ζιακόπουλος, Δ., Φραγκούλη, Π. Β., 2015. Το Εγχειρίδιο του Μετεωρολόγου-Προγνώστη

Πυθαρούλης Ι., Σημειώσεις μαθήματος Συνοπτική Μετεωρολογία, 2021.

Ζάνης Π., Σημειώσεις μαθήματος Ατμοσφαιρική Ρύπανση, 2021.

Μαυρομμάτης Θ., Σημειώσεις μαθήματος Αγρομετεωρολογία, 2021.

Αναγνωστοπούλου Χ., Σημειώσεις μαθήματος Δυναμικής Φυσική και Κλιματολογία, 2021.

Πυθαρούλης Ι., Σημειώσεις μαθήματος Αριθμητική Πρόγνωση Καιρού, 2021.

Κατράγκου Ε., Σημειώσεις μαθήματος Κλιματικά Μοντέλα, 2021.

<https://www.ccacoalition.org/en/slcp/tropospheric-ozone>

http://www.emy.gr/emyl/pdf/heatwave_2021.pdf

<https://www.copernicus.eu/en/about-copernicus/copernicus-detail>
confluence.ecmwf.int