



Πολυτεχνείο Κρήτης

Σχολή Χημικών Μηχανικών και Μηχανικών
Περιβάλλοντος

Πυρκαγιές και η συσχέτισή τους με μετεωρολογικούς παράγοντες σε παγκόσμια κλίμακα

Διπλωματική Εργασία
της
Αθηνάς-Ζαφειρίας Γκαγκαουδάκη

ΧΑΝΙΑ, ΙΟΥΝΙΟΣ, 2022

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για μη κερδοσκοπικό σκοπό, εκπαιδευτικού ή ερευνητικού χαρακτήρα, με την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για άλλη χρήση θα πρέπει να απευθύνονται προς το συγγραφέα. Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Πολυτεχνείου Κρήτης.

ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

Βουλγαράκης Απόστολος

Αναπληρωτής Καθηγητής Σχολής Χημικών Μηχανικών και Μηχανικών
Περιβάλλοντος του Πολυτεχνείου Κρήτης
(επιβλέπων)

Λαζαρίδης Μιχαήλ

Καθηγητής Σχολής Χημικών Μηχανικών και Μηχανικών Περιβάλλοντος του
Πολυτεχνείου Κρήτης

Γρυλλάκης Εμμανουήλ

Μεταδιδακτορικός Ερευνητής Σχολής Χημικών Μηχανικών και Μηχανικών
Περιβάλλοντος του Πολυτεχνείου Κρήτης

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η συγκεκριμένη διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια του προγράμματος προπτυχιακών σπουδών του τμήματος Χημικών Μηχανικών και Μηχανικών Περιβάλλοντος του Πολυτεχνείου Κρήτης και συγκεκριμένα στο Εργαστήριο Ατμοσφαιρικού Περιβάλλοντος και Κλιματικής Αλλαγής.

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον Επιβλέπων της διπλωματικής μου εργασίας κύριο Βουλγαράκη Απόστολο, για την τεράστια εμπιστοσύνη που μου έδειξε από την αρχή της συνεργασίας μας και για την πολύτιμη συμβολή του στην ακαδημαϊκή, επαγγελματική και προσωπική μου εξέλιξη. Ήταν τεράστια τιμή να δουλέψω στο εργαστήριο του και να γνωρίσω τον κόσμο της έρευνας, της αναζήτησης, της ανταλλαγής γνώσεων και ιδεών μέσα από την υπέροχη ομάδα που έχει. Η φράση «σκέφτεσαι έξω από το κουτί» θα με συντροφεύει σε όλη μου την ζωή καθώς κατάλαβα ότι ακόμα και η σκέψη που οδηγεί σε αδιέξοδο είναι σημαντικό που έγινε γιατί οδηγεί σε έναν καινούργιο δρόμο. Ένα ακόμη μεγάλο ευχαριστώ για τον κύριο Γρυλλάκη Μανώλη για την πολύτιμη βοήθειά που μου προσέφερε καθ' όλη την διάρκεια της εκπόνησης της εργασίας μου. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κύριο Παπαδόπουλο Αθανάσιο, τον κύριο Σειραδάκη Κωσταντίνο και τον κύριο Ροβιθάκη Αναστάσιο για την άψογη συνεργασία και τις γνώσεις που απέκτησα δίπλα τους όλους αυτούς τους μήνες. Ένα ευχαριστώ από καρδιάς στον κύριο Λαζαρίδη Μιχάλη για την πολύτιμη παρουσία του στην παρουσίαση της εργασίας μου και τον χρόνο που διέθεσε για την αξιολόγησή της.

Το μεγαλύτερο ευχαριστώ το οφείλω στην γιαγιά μου Αθηνά και τον παππού μου Γιάννη που με ανέθρεψαν σωστά και με πολύ αγάπη παρά τις δυσκολίες. Μου δώσανε σπουδαίες αρχές, οξύνανε το μυαλό και ανέπτυξαν το πνεύμα μου για να μπορέσω σήμερα να είμαι περήφανη για τον εαυτό μου και να πορεύομαι σε αυτόν τον κόσμο με σεβασμό, ταπεινότητα και όνειρα.

Τέλος, θέλω να ευχαριστήσω εμένα που δεν εγκατέλειψα, που προσπάθησα, που εργάστηκα σκληρά και που παρά τα σκαμπανεβάσματα στάθηκα στο ύψος των περιστάσεων και ολοκλήρωσα αυτό το πολυετές ταξίδι. Μέσα από αυτό γνώρισα τον εαυτό μου, συνάντησα ανθρώπους που με ενέπνευσαν, που με εμπιστεύτηκαν και με στήριξαν. Έζησα και διαχειρίστηκα καταστάσεις μόνη μου παίρνοντας την ευθύνη για τον εαυτό μου. Όλα αυτά είναι ο πολύτιμος θησαυρός μου, που μου δίνει δύναμη και πίστη στον εαυτό μου και στην ζωή.

Αυτός ο κύκλος έκλεισε με την παρουσίαση της διπλωματικής μου εργασίας και ευχαριστώ όσους ήταν παρόντες, φυσικά και πνευματικά, σε αυτή την τόσο σημαντική για εμένα στιγμή.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Οι πυρκαγιές αποτελούν αναπόσπαστο μέρος της φύσης διαδραματίζοντας βασικό ρόλο στην διαμόρφωση των οικοσυστημάτων. Ωστόσο όταν το φαινόμενο αυτό παίρνει ανεξέλεγκτες διαστάσεις οι συνέπειες μπορεί να είναι καταστροφικές για το φυσικό περιβάλλον, την ανθρώπινη υγεία και την οικονομία. Οι μετεωρολογικές συνθήκες αναγνωρίζονται ως βασικοί παράγοντες που καθορίζουν την δραστηριότητα και την εξάπλωση των πυρκαγιών. Για τον λόγο αυτό δημιουργήθηκε η ανάγκη για την ανάπτυξη ενός δείκτη καιρού πυρκαγιάς ο οποίος εξαρτάται αποκλειστικά από τις καιρικές συνθήκες. Ένας από τους πιο ευρέως χρησιμοποιούμενους είναι ο Καναδικός Δείκτης Καιρού Πυρκαγιάς (Fire Weather Index - FWI).

Η παρούσα μελέτη αποσκοπεί στην καλύτερη κατανόηση της επίδρασης των κλιματικών συνθηκών στις πυρκαγιές. Με γνώμονα αυτό, διερευνήθηκαν οι συσχετίσεις μεταξύ της καμένης έκτασης (Burned Area - BA) και του FWI βάσει παρατήρησης, σε παγκόσμια κλίμακα. Εν συνεχεία αξιολογήθηκε το πόσο καλή είναι η συσχέτιση του BA και των επιμέρους μετεωρολογικών παραγόντων από τις οποίες υπολογίζεται ο FWI, δηλαδή την υγρασία, τη βροχόπτωση, τη ταχύτητα του ανέμου και τη θερμοκρασία. Τέλος, ερευνήθηκε η σχέση που υπάρχει ανάμεσα στο BA και δύο από τα πιο σημαντικά μετεωρολογικά μοτίβα που επηρεάζουν το παγκόσμιο κλίμα, την Κύμανση του Βορείου Ατλαντικού (North Atlantic Oscillation - NAO) και την Αρκτική Ταλάντωση (Arctic Oscillation - AO). Αυτό πραγματοποιήθηκε μέσω της συσχέτισης του BA και των κλιματικών δεικτών που υπολογίζουν τα φαινόμενα αυτά.

Τα αποτελέσματα αποκαλύπτουν ότι ο δείκτης FWI συσχετίζεται αρκετά καλά με το BA στις περισσότερες περιοχές του πλανήτη, με ισχυρότερες συσχετίσεις στις τροπικές και υποτροπικές περιοχές. Από την ανάλυση της συσχέτισης των επιμέρους κλιματικών μεταβλητών και του BA αφαιρώντας την εποχικότητα, η θερμοκρασία και η υγρασία φαίνεται να είναι οι παράγοντες που επηρεάζουν περισσότερο την καμένη έκταση. Όσον αφορά τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις συσχετίσεις του BA και των δεικτών NAO και AO δείχνουν ότι δεν υπάρχει ισχυρή σχέση μεταξύ τους.

ABSTRACT

Fires are an integral part of nature, playing a crucial role in shaping ecosystems, but when this phenomenon gets out of control, the consequences can be devastating for the natural environment, human health and economy. Meteorological conditions are recognized as key factors determining the activity and spread of fires. Therefore, the need was identified in order to develop a fire weather index that is solely dependent on weather conditions. One of the most widely used weather indexes, is the Canadian Fire Weather Index (FWI).

This study aims to better understand the effect of climate conditions on wildfires. Considering that, the correlation between Burned Area (BA) and observation- based FWI was investigated on a global scale. Subsequently, the correlation between BA and the individual meteorological variables from which FWI is estimated, namely, relative humidity, precipitation, wind speed and temperature, was assessed. Finally, the relationship between the BA and two of the most important meteorological patterns affecting the global climate, the North Atlantic Oscillation (NAO) and the Arctic Oscillation (AO), was investigated. This was done by correlating the BA with the climate indicators that account for these phenomena.

The results reveal that the FWI correlates well with BA in most regions of the world, with stronger correlations in tropical and subtropical regions. From the analysis of the correlation between individual climate variables and BA by removing the following attributes of seasonality, temperature and humidity, appear to be the factors that influence the most the burned area. Regarding the results obtained from the correlations between BA and the NAO and AO indicators show that there is no strong relationship between them.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ.....	- 3 -
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	- 4 -
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ.....	- 8 -
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ.....	- 8 -
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	- 10 -
1.1. Γενικά Στοιχεία	- 10 -
1.2. Στόχος.....	- 15 -
2. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ	- 16 -
2.1. Κλιματικές- Μετεωρολογικές Συνθήκες.....	- 16 -
2.1.1 Υγρασία	- 17 -
2.1.2 Θερμοκρασία.....	- 17 -
2.1.3 Βροχόπτωση	- 18 -
2.1.4 Ταχύτητα ανέμου	- 18 -
2.2. Δείκτες Μετεωρολογικής Διακύμανσης	- 19 -
2.2.1 Κύμανση του Βορείου Ατλαντικού (North Atlantic Oscillation - NAO)	- 19 -
2.2.2 Αρκτική Ταλάντωση (Arctic Oscillation - AO)	- 22 -
2.3. Καναδικός Δείκτης Καιρού Πυρκαγιάς – (Fire Weather Index) FWI.....	- 23 -
3. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ.....	- 26 -
Εισαγωγή.....	- 26 -
3.1. Πηγές και συγκέντρωση δεδομένων	- 26 -
3.2. Επεξεργασία Δεδομένων με χρήση Matlab	- 28 -
3.2.1 Δισδιάστατος Συντελεστής Συσχέτισης	- 29 -
3.2.2 Μέθοδος Θηκογράμματος (Boxplot)	- 30 -
3.3 Μεθοδολογία που ακολουθήθηκε	- 31 -
3.3.1 Ομαδοποίηση δεδομένων σε κοινή χωρική κλίμακα.....	- 31 -
3.3.2 Λογάριθμος της καμένης έκτασης.....	- 31 -
3.3.3 Αφαίρεση των μηδενικών από το ΒΑ	- 31 -
3.3.4 Μέσες τιμές δεικτών.....	- 31 -
3.3.5. Αφαίρεση εποχικότητας	- 32 -
3.3.6. Χρονικό βήμα υστέρησης (lag).....	- 33 -
3.3.7 Κατώφλια τιμή (Threshold)	- 33 -
3.4 Διάγραμμα ροής	- 34 -
4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	- 35 -
4.1 Καμένη έκταση και FWI	- 35 -
4.2 Συσχέτιση του ΒΑ και των μετεωρολογικών παραγόντων	- 40 -
4.3 Συσχέτιση των ανωμαλιών του ΒΑ και των μετεωρολογικών παραγόντων	- 44 -
4.4 Συσχέτιση του ΒΑ και του δείκτη ΑΟ	- 45 -

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ.....	- 47 -
6. ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ.....	- 48 -
7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	- 49 -
8. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....	- 52 -

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1: Βασικά στοιχεία του MATLAB	- 28 -
---	--------

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1: Το τρίγωνο της φωτιάς (fria, 2022).....	- 11 -
Εικόνα 2: Έρπουσα πυρκαγιά (Lundeberg, 2022).....	- 12 -
Εικόνα 3: Επικόρυφη πυρκαγιά (Wikimedia Commons, 2022)	- 12 -
Εικόνα 4: Αρνητική και Θετική φάση της Κύμανσης του Βορείου Ατλαντικού (Lindsey & Dahlaman, 2022)	- 20 -
Εικόνα 5: Συσχέτιση μεταξύ των μοτίβων του δείκτη NAO με την επιφανειακή θερμοκρασία (a) και την βροχόπτωση (b) (North Atlantic Oscillation, 2022)	- 21 -
Εικόνα 6: Θετική φάση του AO (a) και Αρνητική φάση του AO (b) (Research Gate, 2022) -	23 -
Εικόνα 7: Σχηματική αναπαράσταση του υπολογισμού του FWI (Research Gate , 2022) -	24 -
Εικόνα 8: Παράδειγμα εικόνας παγκόσμιας περιήγησης για ενεργές πυρκαγιές Collection-6 Aqua MODIS για τις 28 Δεκεμβρίου 2002 με όλες τις ημερήσιες υπερβάσεις. Τα εικονοστοιχεία φωτιάς εμφανίζονται με κόκκινο χρώμα, τα εικονοστοιχεία σύννεφων εμφανίζονται με ανοιχτό χρώμα μπλε, και οι περιοχές χωρίς δεδομένα εμφανίζονται με λευκό χρώμα. Η εικόνα περιήγησης είναι ευγενική προσφορά του LDOPE (Giglio, Schroeder, Hall, & Justice, 2020)	- 27 -
Εικόνα 9: Ένα παράδειγμα box-and-whisker plot των δεδομένων (Box plot, 2022).....	- 30 -
Εικόνα 10: Διάγραμμα ροής δεδομένων.....	- 34 -
Εικόνα 11: Ετήσια μέση τιμή BA (α) και ετήσια μέση τιμή FWI (β).....	- 35 -
Εικόνα 12: Μέση τιμή του BA για τις εποχές ΔΙΦ, ΜΑΜ, ΙΙΑ και ΣΟΝ	- 36 -
Εικόνα 13: Μέση τιμή του FWI για τις εποχές ΔΙΦ, ΜΑΜ, ΙΙΑ και ΣΟΝ	- 37 -
Εικόνα 14: Παγκόσμιος χάρτης όπου παρουσιάζεται η συσχέτιση ανάμεσα στις μέσες τιμές του BA και του FWI.	- 38 -
Εικόνα 15: Παγκόσμιος χάρτης όπου παρουσιάζεται η συσχέτιση ανάμεσα στην μέση τιμή του BA και την μέση τιμή του FWI για τις εποχές ΔΙΦ, ΜΑΜ, ΙΙΑ και ΣΟΝ.....	- 39 -
Εικόνα 16: Παγκόσμιος χάρτης όπου παρουσιάζεται η συσχέτιση BA και της βροχόπτωσης, της υγρασίας, της θερμοκρασίας και της ταχύτητας του ανέμου.....	- 40 -
Εικόνα 17: Θηκογράμματα με την συσχέτιση του BA και των τεσσάρων μετεωρολογικών παραμέτρων στην περιοχή της Μεσογείου, της Αφρικής, της Νοτιοανατολικής Ασίας, της Αυστραλίας, της Νότιας Αμερικής και σε ολόκληρη την Τροπική ζώνη.	- 42 -
Εικόνα 18: Χάρτες συσχετίσεων των ανωμαλιών της καμένης έκτασης και της βροχόπτωσης (α), της υγρασίας (β), της θερμοκρασίας (γ) και της ταχύτητας του ανέμου (δ).	- 44 -
Εικόνα 19: Παγκόσμιος χάρτης όπου παρουσιάζεται η συσχέτιση του BA και του AO.	- 45 -
Εικόνα 20: Θηκογράμματα που παρουσιάζουν την συσχέτιση του BA και του AO στην Ευρώπη και στις υποπεριοχές της, με χρονική υστέρηση για διάστημα ενός έως έξι μηνών....	- 46 -

Εικόνα 21: Παγκόσμιος χάρτης με την συσχέτιση ανάμεσα στο ΒΑ και τον δείκτη ΝΑΟ...	- 52 -
Εικόνα 22: Παγκόσμιος χάρτης με την συσχέτιση του ΒΑ και του ΑΟ με χρονική υστέρηση για διάστημα ενός μηνός και κατώφλιες τιμές. Η εικόνα (α) έχει μικρότερη κατώφλια τιμή από την εικόνα (β).	- 52 -
Εικόνα 23: Θηκογράμματα που παρουσιάζουν την συσχέτιση του ΒΑ και του ΑΟ στην Ευρώπη και στις υποπεριοχές της, με χρονική υστέρηση για διάστημα ενός έως έξι μηνών...	- 53 -

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1. Γενικά Στοιχεία

Οι πυρκαγιές είναι ένα φυσικό, επαναλαμβανόμενο φαινόμενο (Bowman, 2009) μείζονος σημασίας και διακρίνεται για τον εξέχοντα ρόλο που έχει στην διαμόρφωση των δασών και τη σύσταση των οικοσυστημάτων (Bond, Woodward, & Midgley, 2005). Ο όρος πυρκαγιά χρησιμοποιείται για οποιοδήποτε είδος ανεξέλεγκτης φωτιάς που δημιουργείται επί κάποιου είδους καύσιμης ύλης και μπορεί να έχει καταστροφικές επιπτώσεις. Οι δασικές πυρκαγιές που προκύπτουν από φυσικούς παράγοντες είναι ιδιαίτερα σημαντικές για την διαμόρφωση της βιοποικιλότητας, τη δόμηση των φυτικών κοινοτήτων και τη λειτουργία του οικοσυστήματος (Dlamini, 2010). Αποτελούν αναπόσπαστο μέρος πολλών επίγειων βιωμάτων και διαδραματίζουν τον κύριο ρόλο διαταραχής των οικοσυστημάτων που εκτείνονται από τη βόρεια ζώνη έως τις τροπικές σαβάνες και τις περιοχές του Ισημερινού (Koutsias, et al., 2013). Τα τελευταία χρόνια, λόγω της αυξημένης συχνότητας εμφάνισης περιστατικών πυρκαγιάς, τις καμένες εκτάσεις γης καθώς και την προσφάτως αναφερόμενη διάρκεια της «περιόδου πυρκαγιάς» (fire season), έχει ενταθεί η περιβαλλοντική συνείδηση καθιστώντας έτσι τις δασικές πυρκαγιές ως ένα από τα κύρια περιβαλλοντικά ζητήματα που αντιμετωπίζει η επιστημονική κοινότητα. Οι επιπτώσεις των πυρκαγιών είναι μεγάλες και ορατές στον άνθρωπο, στο κλίμα και στο φυσικό περιβάλλον. Οι πυρκαγιές προκύπτουν κυρίως από την αλληλεπίδραση του κλίματος με την τοπογραφία, τα τοπικά μικροπεριβάλλοντα σε μικρότερες χωρικές και τις χρονικές κλίμακες και τις αλλαγές χρήσης γης. Η ανθρώπινη παρέμβαση μπορεί επίσης να αποτελέσει σημαντικό παράγοντα στην εμφάνιση πυρκαγιών (Dlamini, 2010) (TNAU Agritech Portal, 2022). Η φωτιά είναι αποτέλεσμα της καύσης, μια χημική διεργασία για την οποία απαιτείται η συνύπαρξη τριών θεμελιωδών στοιχείων κατάλληλα συνδυασμένων μεταξύ τους, συνοδευόμενη από μεγάλη έκλυση θερμότητας και έντονη φωταύγεια. Το πρώτο στοιχείο είναι η καύσιμη ύλη, δηλαδή οποιοδήποτε υλικό καίγεται κατά την διάρκεια της πυρκαγιάς όπως τα δέντρα, τα χόρτα και τα νεκρά φύλλα που υπάρχουν στο έδαφος. Το δεύτερο στοιχείο που χρειάζεται μία πυρκαγιά για να αναπτυχθεί είναι το οξυγόνο, το οποίο υπάρχει σε αφθονία στην ατμόσφαιρα. Το τρίτο στοιχείο είναι η θερμοκρασία, καθώς για να καεί ένα υλικό πρέπει να φτάσει σε θερμοκρασία ανάφλεξης. Τα τρία αυτά στοιχεία παρουσιάζονται συχνά ως πλευρές ενός τριγώνου που είναι γνωστό ως «το τρίγωνο της φωτιάς». Όπως το τρίγωνο σταματάει να υφίσταται όταν αφαιρεθεί μία του πλευρά, το ίδιο συμβαίνει με την πυρκαγιά όταν αφαιρεθεί ένας από τους τρεις αυτούς παράγοντες (fria, 2022). Για την οπτικοποίηση των τριών βασικών στοιχείων που αποτελούν τους κύριους παράγοντες πρόκλησης μίας πυρκαγιάς χρησιμοποιείται το μοντέλο του «τριγώνου φωτιάς» (fire triangle) (Engel, 2020), το οποίο αποτυπώνεται στην Εικόνα 1.



Εικόνα 1: Το τρίγωνο της φωτιάς (fria, 2022)

Οι δασικές πυρκαγιές είναι δυνατόν να επιφέρουν ριζικές αλλαγές στα δάση καθώς μπορούν να προκαλέσουν εκτεταμένες καταστροφές στο δασικό οικοσύστημα σε πολύ σύντομο χρονικό διάστημα. Για αυτό το λόγο κρίνονται ως ο μεγαλύτερος κίνδυνος έναντι της διατήρησης και της παραγωγικότητας των δασών. Οι δασικές πυρκαγιές μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ανάλογα με τον τρόπο εξάπλωσής τους σε τρεις επιμέρους κατηγορίες (DeBano, Neary, & Ffolliott, 1998):

- τις πυρκαγιές εδάφους ή υπόγειες
- τις πυρκαγιές επιφάνειας ή έρπουσες και
- τις πυρκαγιές κόμης ή επικόρυφες.

Οι υπόγειες πυρκαγιές αποτελούν σπάνιο είδος πυρκαγιάς που εμφανίζεται περισσότερο στις βόρειες χώρες. Είναι ιδιαίτερα επικίνδυνες καθώς μπορεί να μην γίνουν γρήγορα αντιληπτές με αποτέλεσμα την μεγάλη εξάπλωσή τους και την καταστροφή των ριζικών συστημάτων δέντρων και φυτών. Συνήθως καίγεται η οργανική ύλη που έχει συγκεντρωθεί στην επιφάνεια του εδάφους ή κάτω από αυτό, η οποία βρίσκεται συνήθως στο στάδιο της αποσύνθεσης. Η παροχή οξυγόνου σε τέτοιου είδους πυρκαγιά είναι πολύ μικρή. Χαρακτηρίζεται από την βραδεία εξάπλωσή της και την μικρή ή και καθόλου παραγωγή καπνού.

Οι έρπουσες πυρκαγιές, είναι οι πιο συνηθισμένες. Σε αυτές καίγεται η νεκρή ύλη που βρίσκεται στο έδαφος, όπως φύλλα, ξερά κλαδιά, βελόνες αλλά και ζωντανή βλάστηση που αναπτύσσεται πάνω στο έδαφος όπως χόρτα και θάμνοι. Στο είδος αυτό, οι κορυφές των δέντρων δεν καίγονται είτε λόγω των συνθηκών είτε επειδή η πυρκαγιά δημιουργείται σε θαμνώδη ή χορτολιβαδική περιοχή. Χαρακτηρίζονται από την δημιουργία μεγάλης φλόγας και την γρήγορη εξάπλωση καθώς τροφοδοτούνται με άφθονο οξυγόνο, αέρα και καύσιμη ύλη. Ανάλογα με τις επικρατούσες καιρικές συνθήκες και την καύσιμη ύλη τα χαρακτηριστικά αυτού του είδους της πυρκαγιάς μπορεί ποικίλουν.



Εικόνα 2: Έρπουσα πυρκαγιά (Lundeberg, 2022)

Οι επικόρυφες πυρκαγιές, είναι πάντα σοβαρά επικίνδυνες και δύσκολες στην αντιμετώπισή τους. Είναι αυτές στις οποίες καίγεται η κόμη των δέντρων και λαμβάνουν χώρα συνήθως σε μεγάλα και πυκνά δάση, όπου η φωτιά εξαπλώνεται ταχύτατα μεταπηδώντας από κόμη σε κόμη. Ανάλογα με τις καιρικές συνθήκες και το είδος της βλάστησης η πυρκαγιά κόμης μπορεί να μεταβληθεί σε πυρκαγιά επιφάνειας και το αντίστροφο.



Εικόνα 3: Επικόρυφη πυρκαγιά (Wikimedia Commons, 2022)

Τέλος, πρέπει να σημειωθεί ότι η παρουσία όλων των ειδών ταυτόχρονα είναι συνήθης, δημιουργώντας έναν πολύ επικίνδυνο συνδυασμό διαφορετικών μετώπων πυρκαγιών, από το υπόγειο έδαφος μέχρι τις κορυφές των δέντρων.

Η πυρκαγιά εξαπλώνεται όταν η θερμότητα της φλόγας μεταδίδεται σε μία νέα καύσιμη ύλη, φτάνοντας την σε σημείο ανάφλεξης. Η μετάδοση αυτή μπορεί να πραγματοποιηθεί με τρεις τρόπους.

- με επαφή, όπου μεταδίδεται η θερμότητα από ένα μόριο σε ένα άλλο με το οποίο βρίσκεται σε επαφή
- με επαγωγή, με τη μεταφορά και τη διάχυση των θερμών αερίων της καύσης
- με ακτινοβολία, μέσω ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων

Η ακτινοβολία χαρακτηρίζεται ως ο σημαντικότερος παράγοντας μεταφοράς της θερμότητας και κατά κύριο λόγο είναι αυτός που ευθύνεται για την εξάπλωση των πυρκαγιών (fria, 2022).

Όπως προαναφέρθηκε για την ύπαρξη πυρκαγιάς θα πρέπει να υπάρχουν τα τρία στοιχεία καύσιμη ύλη, οξυγόνο και θερμότητα. Στις δασικές περιοχές όπου η καύσιμη ύλη και το οξυγόνο βρίσκονται σε αφθονία, η ύπαρξη θερμότητας, από κάποια εξωτερική πηγή, η οποία προθερμαίνει την καύσιμη ύλη, θα οδηγήσει γρήγορα σε εκδήλωση πυρκαγιάς. Οι πηγές ανάφλεξης ποικίλουν και χωρίζονται σε δύο ευρύτερες κατηγορίες, τις φυσικές και τις ανθρωπογενείς (Bistinas, Harrison, Prentice, & Pereira, 2014). Στις φυσικές πηγές, οι οποίες επηρεάζονται άμεσα από την κλιματική αλλαγή, κατατάσσονται φαινόμενα όπως οι κεραυνοί, η ηφαιστιογενής δραστηριότητα και η αύξηση της θερμοκρασίας (Goldammer & De Ronde, 2004). Το μεγαλύτερο μέρος των πυρκαγιών οφείλεται στην ανθρώπινη δραστηριότητα έμμεσα και άμεσα. Οι σημαντικότερες ανθρωπογενείς αιτίες είναι η εγκληματικότητα, η αναψυχή, η αμέλεια και οι γεωργικές δραστηριότητες. Στο Βόρειο Ημισφαίριο έχει παρατηρηθεί πως η πλειονότητα των πυρκαγιών προκαλούνται από αμέλεια και από εμπρησμό ενώ στις τροπικές περιοχές προέρχεται από αλλαγή της χρήσης γης και την προετοιμασία για καινούργιες καλλιέργειες. Αξιοσημείωτο είναι επίσης το γεγονός ότι ενώ οι τροπικές σαβάνες αποτελούν ένα μικρό μέρος της συνολικής έκτασης της Γης, είναι και το μεγαλύτερο κομμάτι της επιφάνειας που καίγεται ετησίως σε παγκόσμιο επίπεδο. Ωστόσο η ένταση και η έκταση που θα πάρει μία φωτιά εξαρτάται περισσότερο από τις κλιματικές συνθήκες και την βλάστηση (Oliveras, Gracia, Moré, & Retana, 2009) που υπάρχουν στην περιοχή και όχι τόσο από την πηγή ανάφλεξης. Επίσης ρόλο στην εξέλιξη των πυρκαγιών διαδραματίζουν τα γεωγραφικά και τοπογραφικά χαρακτηριστικά της εκάστοτε περιοχής (Kushla & Ripple, 1997). Το είδος των δασών, η κλίση του εδάφους, το υψόμετρο καθώς και ο τρόπος που πραγματοποιείται η αναγέννηση του οικοσυστήματος είναι κάποια από τα χαρακτηριστικά που δημιουργούν ξεχωριστό τρόπο αντίδρασης στις πυρκαγιές για κάθε περιοχή.

Υπάρχουν περιοχές όπου οι πυρκαγιές είναι απαραίτητες για να υπάρξει περιβαλλοντική ισορροπία (Bond & Keeley, 2005). Αυτού του είδους οι φωτιές προκαλούνται φυσικά σε περιόδους ξηρασίας ή από κεραυνούς και αποτελούν αναπόσπαστο κομμάτι των φυσικών κύκλων. Αυτό συμβαίνει γιατί καθαρίζουν την παλιά βλάστηση ενώ ταυτόχρονα επιστρέφουν θρεπτικά συστατικά στο έδαφος, αναδημιουργούν δάση και βοηθούν στην διατήρηση της βιοποικιλότητας. Επίσης, καθαρίζοντας την επιφάνεια του εδάφους με μία μικρής κλίμακας φωτιά, μειώνεται η πιθανότητα μεγαλύτερων πυρκαγιών κατά τους θερμότερους μήνες. Η πραγματική καταστροφή συμβαίνει όταν η πυρκαγιά εξαπλώνεται με ταχείς ρυθμούς και καθίσταται αδύνατο να σταματήσει. Έτσι, παρόλο που επέρχεται φυσική αναγέννηση, δεν επαρκεί για να μπορέσει να επανέλθει το φυσικό περιβάλλον στην κατάσταση που ήταν πριν την πυρκαγιά. Τα αποτελέσματα είναι πλέον εμφανή στην πλειοψηφία του πληθυσμού καθώς οι αλλαγές που συμβαίνουν στο μικροκλίμα της περιοχής που πλήττεται οδηγούν στον περιορισμό της χλωρίδας και της πανίδας. Σημαντικές είναι και οι έμμεσες επιπτώσεις, που επιφέρουν στο περιβάλλον και στην κοινωνία οι πυρκαγιές καθώς είναι γεγονός ότι με την συρρίκνωση των δασικών εκτάσεων αυξάνεται ο πλημμυρικός κίνδυνος (Barro & Conard, 1991). Τα τελευταία χρόνια το ενδιαφέρον της επιστημονικής κοινότητας έχει στραφεί προς τη σύνδεση της συχνότητας

εμφάνισης πυρκαγιών με τις υφιστάμενες κλιματικές συνθήκες. Οι αυξημένες θερμοκρασίες, οι μεγάλες περίοδοι ξηρασίας ως απόρροια της έκλυσης αερίων του θερμοκηπίου στην ατμόσφαιρα έχουν εντείνει την εμφάνιση φαινομένων πυρκαγιάς και χρήζουν εκτενέστερης έρευνας (Flannigan, Stocks, & Wotton, 2000).

Η κλιματική αλλαγή, ως αποτέλεσμα της ανθρώπινης δραστηριότητας, επιδεινώνει το φαινόμενο των πυρκαγιών. Η σταδιακή αύξηση της θερμοκρασίας, η αύξηση της περιόδου ξηρασίας, καθώς και άλλα ακραία καιρικά φαινόμενα, κάνουν την εμφάνισή τους όλο και πιο συχνά οδηγώντας σε συχνότερες πυρκαγιές με μεγαλύτερη ένταση, οι οποίες αφήνουν πίσω μεγάλες καμένες εκτάσεις .

Η αλλαγή αυτή στους μετεωρολογικούς παράγοντες έχει άμεσο αντίκτυπο στη βλάστηση και κατ' επέκταση στις πυρκαγιές, αφού δημιουργείται περισσότερη και πιο ξηρή καύσιμη ύλη. Οι υψηλές θερμοκρασίες και η έλλειψη υγρασίας επιφέρουν μεγαλύτερη ευφλεκτότητα στα φυτά και τα δέντρα γεγονός που οδηγεί σε έντονη δραστηριότητα των πυρκαγιών (Bistinas, Harrison, Prentice, & Pereira, 2014).

Η επίδραση που έχουν οι πυρκαγιές στο ατμοσφαιρικό περιβάλλον είναι μεγάλη. Τα δάση και γενικότερα τα οικοσυστήματα δεσμεύουν μεγάλες ποσότητες άνθρακα ο οποίος κατά την διάρκεια μίας πυρκαγιάς απελευθερώνεται στην ατμόσφαιρα. Τα αέρια που εκπέμπονται είναι αέρια του θερμοκηπίου και αερολύματα τα οποία επιφέρουν σοβαρές επιπτώσεις στο παγκόσμιο κλίμα, την ποιότητα του αέρα, την βλάστηση και φυσικά την υγεία (Voulgarakis & Field, 2015). Οι εκπομπές αυτές μεταξύ άλλων προάγουν την αύξηση της θερμοκρασίας και σχετίζονται άμεσα με την κλιματική αλλαγή. Ωστόσο, συμβαίνει και το αντίστροφο, δηλαδή οι αλλαγές στο κλίμα επηρεάζουν έντονα τα καθεστώτα πυρκαγιάς. Ως αποτέλεσμα δημιουργείται ένας ανατροφοδοούμενος κύκλος με ιδιαίτερο ενδιαφέρον καθώς οι πυρκαγιές επηρεάζουν το παγκόσμιο κλίμα και το αντίστροφο. Αυτό συμβαίνει διότι οι πυρκαγιές αυξάνονται σε αριθμό και ένταση, όντας αποτέλεσμα της κλιματικής αλλαγής , περεταίρω ενισχύοντας τις ξηρές ακραίες καιρικές συνθήκες, την αύξηση της θερμοκρασίας και της υγρασίας, παράγοντες οι οποίοι είναι σημαντικοί για την δημιουργία πυρκαγιάς.

Οι επιπτώσεις των πυρκαγιών ποικίλουν και συναντώνται σε όλους τους τομείς της κοινωνίας με σημαντικότερη τις ζωές που χάνονται, ανθρώπων και ζώων (Rosenthal, Stover, & Haar, 2021).

Άμεσο αντίκτυπο υπάρχει και στον οικονομικό τομέα (Nielsen-Pincus, Moseley, & Gebert, 2013) καθώς οι πυρκαγιές σε κατοικημένες περιοχές συνοδεύονται συνήθως με την καταστροφή περιουσιών, υποδομών και καλλιεργειών (Salvati , et al., 2015). Πέρα από τις κοινωνικοοικονομικές επιπτώσεις υπάρχουν και οι οικολογικές επιπτώσεις καθώς οι πυρκαγιές έχουν αντίκτυπο στην βιοποικιλότητα και την ισορροπία των οικοσυστημάτων . Το μέγεθος των επιπτώσεων που επιφέρει η πυρκαγιά στα οικοσυστήματα δύναται να διαφέρει από περιοχή σε περιοχή, καθώς υπάρχουν πολλοί παράγοντες που λαμβάνονται υπόψη όπως τα τοπικά ιστορικά πυρκαγιάς, τα μοτίβα αναγέννησης και οι τοπογραφικοί περιορισμοί.

Η δραστηριότητα των πυρκαγιών συνδέεται στενά με τις καιρικές συνθήκες, την βλάστηση και τον ανθρώπινο παράγοντα (Flannigan M. D., 2009). Η ύπαρξη ενός μόνο παράγοντα στο περιβάλλον όπου εξελίσσεται μία πυρκαγιά δεν είναι αρκετός για να οδηγήσει την πυρκαγιά ώστε να πάρει μεγάλες διαστάσεις. Το πιο σύνηθες είναι αυτοί οι παράγοντες να υπάρχουν σε συνδυασμό και αλληλοεπιδρώντας ο ένας με τον άλλον να δημιουργούν ένα

διαρκώς μεταβαλλόμενο περιβάλλον που παίζει καθοριστικό ρόλο στην έναρξη και την εξάπλωση των πυρκαγιών (Flannigan M. D., 2009).

1.2. Στόχος

Η κατανόηση της σχέσης μεταξύ μετεωρολογικών μεταβλητών και πυρκαγιών από το πρόσφατο παρελθόν μπορεί να βοηθήσει στην αξιολόγηση του κινδύνου πυρκαγιών σε μελλοντικά κλιματικά σενάρια.

Για να μπορέσει να πραγματοποιηθεί η εκτίμηση της πιθανότητας αλλαγών στην μελλοντική δραστηριότητα πυρκαγιών και των πιθανών δυνατοτήτων μετριασμού και προσαρμογής είναι απαραίτητη η κατανόηση της σχέσης κλίματος-πυρκαγιάς. Απαραίτητη κρίνεται η ανάπτυξη εργαλείων εκτίμησης κινδύνου και πιθανών αλλαγών στην εκδήλωση πυρκαγιών λόγω της μελλοντικής αλλαγής του κλίματος.

Κύριο στόχο και σημαντικό αντικείμενο μελέτης της παρούσας εργασίας αποτελεί η κατανόηση των επιδράσεων των τεσσάρων πιο σημαντικών μετεωρολογικών παραγόντων στις πυρκαγιές, οι οποίοι είναι η βροχόπτωση, η ταχύτητα του ανέμου, η θερμοκρασία και η σχετική υγρασία. Επιπροσθέτως, γίνεται διερεύνηση της συσχέτισης του Καναδικού Δείκτη Καιρού Πυρκαγιάς (Fire Weather Index – FWI) και της καμένης έκτασης (Burned Area – BA). Τέλος θα αναζητηθεί η πιθανή σχέση που μπορεί να υπάρχει ανάμεσα στις πυρκαγιές και δύο σημαντικούς μετεωρολογικούς δείκτες, τον δείκτη της Κύμανσης του Βορείου Ατλαντικού και της Αρκτικής Ταλάντωσης, οι οποίοι θα αναλυθούν στο επόμενο κεφάλαιο.

Το μέγεθος της καμένης έκτασης (BA) είναι ιδιαίτερα χρήσιμη και εξαρτάται από της παρούσες αλλά και περασμένες κλιματικές συνθήκες. Το BA αποτυπώνει τις επιφάνειες που έχουν επηρεαστεί σημαντικά από φωτιά και παρουσιάζουν μεγάλες αλλαγές στην κάλυψη της βλάστησης και στην επιφάνεια του εδάφους σε παγκόσμια κλίμακα. Στην συγκεκριμένη μελέτη αξιολογήθηκε το πόσο καλή είναι η συσχέτιση που έχει ο FWI και οι τέσσερις περιβαλλοντικές μεταβλητές από τις οποίες υπολογίζεται, δηλαδή η υγρασία, η θερμοκρασία, η σχετική υγρασία, η βροχόπτωση και η ταχύτητα του ανέμου με το BA βάσει παρατήρησης σε παγκόσμια κλίμακα. Η σε βάθος κατανόηση των σχέσεων αυτών και οι πληροφορίες που προκύπτουν από αυτήν την μελέτη θα μπορέσουν να συμβάλουν στην διερεύνηση κρίσιμων ερωτημάτων σχετικά με το πως η κλιματική αλλαγή μπορεί να επηρεάσει την παγκόσμια κατανομή της πυρκαγιάς (Krawchuk, Moritz, Parisien, Van Dorn, & Hayhoe, 2009).

2. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

2.1. Κλιματικές- Μετεωρολογικές Συνθήκες

Η κλιματική αλλαγή παίζει θεμελιώδη ρόλο στην διαμόρφωση τόσο των επικρατουσών όσο και των και επερχόμενων κλιματολογικών συνθηκών. Επιπλέον η κλιματική αλλαγή συμβάλει σημαντικά στη συχνότητα εκδήλωσης φυσικών καταστροφών όπως οι πυρκαγιές οι οποίες εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τους κλιματικούς παράγοντες.

Οι αλλαγές που σχετίζονται με το κλίμα όπως είναι η συνεχώς αυξανόμενη θερμοκρασία, η αλλαγή των μοτίβων βροχής και χιονιού και οι αλλαγές στις φυτικές κοινότητες, αυξάνουν σημαντικά την πιθανότητα οι πυρκαγιές να ξεκινούν όλο και πιο συχνά και να χαρακτηρίζονται από υψηλότερη επικινδυνότητα και μεγαλύτερη διάρκεια σε σύγκριση με αντίστοιχα φαινόμενα του παρελθόντος. Η ελάττωση των βροχοπτώσεων και κατ' επέκταση η μείωση της υγρασίας στην ατμόσφαιρα και στην καύσιμη ύλη, σε συνδυασμό την αύξηση της θερμοκρασίας δημιουργεί τεράστιες ποσότητες εύφλεκτου καυσίμου το οποίο με την παραμικρή πηγή ανάφλεξης θα δημιουργήσει πυρκαγιές γρήγορης μετάδοσης και μεγάλης έντασης οι οποίες θα είναι δύσκολα διαχειρίσιμες. Η εξέλιξη μίας πυρκαγιάς εξαρτάται απόλυτα από τους μετεωρολογικούς παράγοντες καθώς οι καιρικές συνθήκες αποτελούν τον πλέον μεταβλητό παράγοντα ο οποίος συμβάλλει στην διαμόρφωση της συμπεριφοράς των δασικών πυρκαγιών. Επιπροσθέτως, η κλιματική αλλαγή επηρεάζει σημαντικά την ευφλεκτότητα της βλάστησης η οποία με την σειρά της επιδρά στην δραστηριότητα των πυρκαγιών (Pechony & Shindell, 2009). Η αλλαγή του κλίματος επιδεινώνει αυτούς τους κλιματικούς παράγοντες δημιουργώντας τις ιδανικές συνθήκες για έκκληση και την διάδοση ενός γεγονότος φωτιάς.

Αναλυτικότερα, οι βασικότεροι εκ των μετεωρολογικών παραγόντων που σχετίζονται έντονα με τα φαινόμενα φωτιάς είναι:

- Η ατμοσφαιρική υγρασία
- Η θερμοκρασία
- Η βροχόπτωση
- Η ταχύτητα ανέμου

Η επίδραση των παραγόντων αυτών είναι τόσο σημαντική που κρίνεται απαραίτητη η κατανόηση του μηχανισμού με τον οποίο επηρεάζουν πριν, κατά την διάρκεια αλλά και μετά ένα περιστατικό πυρκαγιάς. Εξίσου σημαντικοί παράγοντες στην μεταβλητότητα των πυρκαγιών με τις καιρικές συνθήκες που επικρατούν την περίοδο πυρκαγιάς, είναι η θερμοκρασία και οι βροχοπτώσεις των προηγούμενων μηνών και ετών, καθορίζουν την ένταση και την συχνότητα των πυρκαγιών σε διαφορετικό βαθμό σε όλους τους τύπους οικοσυστημάτων. Ιδιαίτερα ισχυρές παρατηρούνται οι επιδράσεις κατά την περίοδο του χειμώνα και της άνοιξης, όταν η υγρασία περιορίζει την ανάπτυξη και την προετοιμασία της λεπτής καύσιμης ύλης πριν την περίοδο πυρκαγιάς. Κατά συνέπεια, κάτω από μεταβαλλόμενες καιρικές συνθήκες, τα οικοσυστήματα θα διαμορφώσουν διαφορετικό τρόπο ανάπτυξης της βλάστησής τους επηρεαζόμενες από την αύξηση της θερμοκρασίας και τις μεταβολές της βροχόπτωσης φέροντας ως αποτέλεσμα μεγάλες διαφορές στους τύπους και τα φορτία καύσιμης ύλης (Kitzberger, Falk, Westerling, & Swetnam, 2017). Αυτό μπορεί να σημαίνει πως η αύξηση της θερμοκρασίας σε συνδυασμό με τις ξηρές συνθήκες πιθανώς να αυξήσει την καμένη έκταση σε περιοχές όπου υπάρχει άφθονη βλάστηση όμως οι ίδιες συνθήκες μειώνουν και την ανάπτυξη των φυτών με συνέπεια την μείωση της παραγωγής εύφλεκτης ύλης και άρα μείωση της καμένης έκτασης.

2.1.1 Υγρασία

Η υγρασία αποτελεί έναν παράγοντα με εξέχοντα ρόλο στην εμφάνιση αλλά και στη συμπεριφορά της πυρκαγιάς. Παρουσιάζεται με δύο τρόπους οι οποίοι έχουν τα ίδια χαρακτηριστικά, ο ένας είναι εντός της καύσιμης ύλης και ο άλλος είναι στην ατμόσφαιρα. Η αύξηση της υγρασίας της βιομάζας δημιουργεί τεράστια αλλαγή στα χαρακτηριστικά καύσης τους. Όταν η ποσότητα του νερού στην καύσιμη ύλη είναι μεγάλη, υπάρχουν πιο υγρές συνθήκες, ο κίνδυνος ανάφλεξης μειώνεται, ενώ όταν είναι μικρή, υπάρχουν δηλαδή ξηρές συνθήκες, ο κίνδυνος πυρκαγιάς αυξάνεται σημαντικά. Η υγρασία που υπάρχει στην καύσιμη ύλη μπορεί να καθυστερήσει σημαντικά μία πυρκαγιά καθώς απαιτείται πρώτα μεγάλο ποσό ενέργειας ώστε να γίνει η θέρμανση και η εξάτμιση του νερού και στην συνέχεια να επέλθει η ανάφλεξη του υλικού. Έτσι, η περιεκτικότητα σε υγρασία του καυσίμου έχει τεράστιο αντίκτυπο στο ρυθμό εξάπλωσης της πυρκαγιάς, όσο μεγαλύτερη είναι η τόσο περισσότερο χρόνο χρειάζεται η πυρκαγιά για να εξαπλωθεί. Ωστόσο, η σχετική υγρασία που υπάρχει στην ατμόσφαιρα, έχει μεγάλη σπουδαιότητα καθώς μεταβάλλεται συνεχώς κατά την διάρκεια της ημέρας και επηρεάζει την υγρασία της καύσιμης ύλης. Είναι αυτή η μεταβολή που καθιστά τον συγκεκριμένο παράγοντα ιδιαίτερα σημαντικό για κατανόηση και μελέτη σε σχέση με την εξέλιξη και την συμπεριφορά της πυρκαγιάς.

Η σχετική υγρασία είναι ο λόγος της ποσότητας των υδρατμών που υπάρχουν στην ατμόσφαιρα σε μία δεδομένη τιμή θερμοκρασίας και πίεσης σε σχέση με την μέγιστη ποσότητα των υδρατμών την οποία ο αέρας είναι ικανός να κρατήσει στις ίδιες συνθήκες. Όσο αυξάνεται η θερμοκρασία της ατμόσφαιρας τόσο αυξάνεται και η ικανότητα του αέρα να συγκρατεί υγρασία, επομένως η σχετική υγρασία μειώνεται. Υπάρχει συνεπώς σύνδεση μεταξύ της θερμοκρασίας και της υγρασίας κατά την διάρκεια της ημέρας. Τις μεσημεριανές ώρες, που η θερμοκρασία έχει την μέγιστη τιμή της, η σχετική υγρασία έχει την ελάχιστη, ενώ το αντίθετο συμβαίνει τις πρωινές ώρες, πριν την ανατολή του ηλίου, όπου η θερμοκρασία έχει τη χαμηλότερη τιμή της και η σχετική υγρασία την μέγιστη τιμή. Αυτή η μεταβολή επηρεάζει περισσότερο την καύσιμη ύλη με μικρή διάμετρο καθώς είναι πιο εύκολο να απορροφήσουν υγρασία ή να στεγνώσουν.

Σημαντικός παράγοντας για την μεταβολή της υγρασίας μεγαλύτερου μεγέθους ύλης, είναι ο χρόνο παραμονής του νερού σε αυτή. Όσο περισσότερο χρόνο έρθει σε επαφή με την υγρασία, τόσο περισσότερη θα μπορέσει να απορροφήσει και άρα θα χρειαστεί πολύ περισσότερο χρόνο για να στεγνώσει.

2.1.2 Θερμοκρασία

Η θερμοκρασία του αέρα είναι σημαντική διότι επηρεάζει την θερμότητα που πρέπει να λάβει η καύσιμη ύλη για να αναφλεγεί καθώς επίσης και την σχετική υγρασία του αέρα. Σε υψηλές θερμοκρασίες αέρα μειώνεται η υγρασία στα καύσιμα υλικά και αυτά ξεραίνονται έχοντας ως αποτέλεσμα την αύξηση της εφεκτικότητάς τους. Μελέτες έχουν δείξει πως σε υψηλές θερμοκρασίες οι πυρκαγιές είναι πολύ πιο επικίνδυνες και έχουν γρήγορη ταχύτητα μετάδοσής καθώς επίσης μπορεί να οδηγήσουν σε επιμήκυνση της περιόδου πυρκαγιάς (Westerling, Hidalgo, Cayan, & Swetnam, 2006). Η θερμοκρασία μεταβάλλεται κατά την διάρκεια της ημέρας, συνήθως λαμβάνοντας την μέγιστη τιμή της νωρίς το απόγευμα, ενώ στην διάρκεια του έτους λαμβάνει τις μέγιστες τιμές της το καλοκαίρι, σε περιοχές μεσαίων και υψηλών γεωγραφικών πλατών.

2.1.3 Βροχόπτωση

Η βροχόπτωση είναι ένα στοιχείο του καιρού που συντελεί στην μείωση του κινδύνου έναρξης πυρκαγιάς και δυσκολεύει την εξάπλωσή της. Μέσω της υγρής κατακρήμνισης μεταφέρονται οι υδρατμοί που υπάρχουν από την ατμόσφαιρα στο έδαφος, αυξάνοντας κατά αυτόν τον τρόπο την υγρασία των καυσίμων. Ουσιαστικά οι βροχοπτώσεις διαμορφώνουν τα καθεστώτα πυρκαγιάς όχι μόνο μέσω της ποσότητας νερού που παρέχουν αλλά και μέσω της συχνότητας και της κατανομής τους (Chen, et al., 2014). Η χρονική διάρκεια και η ένταση της βροχόπτωσης επιδρά διαφορετικά στην υγρασία του εδάφους. Όταν πραγματοποιείται βροχόπτωση μεγάλης έντασης, το έδαφος, δεν μπορεί να απορροφήσει αυτήν την μεγάλη ποσότητα νερού στο μικρό χρονικό διάστημα που πέφτει και έτσι το νερό καταλήγει να απορρέει σε ποτάμια και θάλασσες. Αντιθέτως, όταν η βροχόπτωση είναι μικρής έντασης, το νερό μπορεί να διαποτίσει καλά το υπόστρωμα και η καύσιμη ύλη να απορροφήσει όλους τους υδρατμούς και την υγρασία. Στον αντίποδα, όταν έντονες βροχοπτώσεις λαμβάνουν χώρα τους χειμερινούς και τους ανοιξιάτικους μήνες, συνήθως, παρατηρείται ανάπτυξη της βλάστησης. Αυτό με την σειρά του οδηγεί στη δημιουργία περισσότερης καύσιμης ύλης και βιομάζας. Ως αποτέλεσμα προκύπτει η αύξηση του κινδύνου για εκτεταμένες πυρκαγιές κατά την διάρκεια της θερινής περιόδου, όπου τα δάση είναι πιο επιρρεπή στην ανάφλεξη (Andela & Van Der Werf, 2014).

2.1.4 Ταχύτητα ανέμου

Συμπεριλαμβάνεται στους πιο κρίσιμους παράγοντες για τη συμπεριφορά της πυρκαγιάς, ιδιαίτερα όταν πρόκειται για επικόρυφη πυρκαγιά. Οι άνεμοι απομακρύνουν την υγρασία από την περιοχή με αποτέλεσμα την αφυδάτωση της καύσιμης ύλης. Κατά την διάρκεια μίας πυρκαγιάς ο άνεμος παρέχει μεγάλες ποσότητες οξυγόνου στο σύστημα οι οποίες βοηθάνε στην αύξηση της έντασης και την ταχύτητα διάδοσής της. Σε μεγάλες ταχύτητες ανέμου οι φλόγες αποκτούν μεγάλη κλίση προς τα εμπρός με αποτέλεσμα να κινούνται με μεγάλη ταχύτητα και να είναι πιο εύκολο να μεταφερθούν προς την πλησιέστερη καύσιμη ύλη. Με αυτόν τον τρόπο αυξάνεται σημαντικά η μεταφορά της θερμότητας μέσω επαγωγής, δηλαδή με την μεταφορά και τη διάχυση θερμών αερίων της καύσης. Έτσι, μικρά κενά χωρίς καύσιμη ύλη που πιθανώς να υπάρχουν στο δάσος προσπερνιούνται με ευκολία, η ταχύτητα διάδοσης της φωτιάς πολλαπλασιάζεται με τις φλόγες να μεγαλώνουν και καινούργια καύσιμη ύλη συνεχώς να αναφλέγεται. Ένα εξίσου επικίνδυνο χαρακτηριστικό της ταχύτητας του ανέμου εκτός από την μεταφορά θερμότητας είναι η μεταφορά αναμένων τεμαχιδίων καύσιμης ύλης, όπως φύλλα, κουκουνάρια και πολλά άλλα σε μεγάλες αποστάσεις μπροστά από το μέτωπο της φωτιάς.

2.2. Δείκτες Μετεωρολογικής Διακύμανσης

Στον πλανήτη υπάρχουν ομόλογα ζεύγη περιοχών, που απέχουν μεγάλη χιλιομετρική απόσταση μεταξύ τους, και παρουσιάζουν ταυτόχρονες διακυμάνσεις των ατμοσφαιρικών τους πιέσεων που συσχετίζονται μεταξύ τους. Σε αυτές τις περιπτώσεις όταν η μία περιοχή εμφανίζει την μέγιστη τιμή της ατμοσφαιρικής της πίεσης τότε η άλλη περιοχή ζεύγους της παρουσιάζει την ελάχιστη τιμή της. Οι ταυτόχρονες αυτές αλλαγές του κλίματος, συχνά με αντίθετο πρόσημο, σε περιοχές απομακρυσμένες μεταξύ τους, ονομάζονται τηλεσυνδέσεις (Trenbert, et al., 1998). Επιτυγχάνονται μέσω μεταφοράς αέριων και θαλάσσιων μαζών, υγρασίας και θερμότητας από μία περιοχή σε μία άλλη, επηρεάζοντας τις καιρικές συνθήκες των περιοχών αυτών αλλά και γειτονικών τους. Η ύπαρξη τηλεσυνδέσεων επιτρέπει την μελέτη και την πρόβλεψη της φυσικής μεταβλητότητας και συνδέει περιοχές οι οποίες αν και δεν φαίνεται να έχουν κάποια σχέση μεταξύ τους, στην πραγματικότητα είναι καιρικά δίπολα και παρουσιάζουν συγκεκριμένες συσχετίσεις. Τα μοτίβα τηλεσύνδεσης θεωρούνται δείκτες ορισμένων συνθηκών ατμοσφαιρικής κυκλοφορίας. Οι σημαντικότεροι δείκτες εξ αυτών είναι:

- η Νότια ταλάντωση Ελ Νίνιο (El Nino Southern Oscillation- ENSO),
- η Κύμανση του Βορείου Ατλαντικού (North Atlantic Oscillation- NAO) και
- η Αρκτική ταλάντωση (Arctic oscillation- AO).

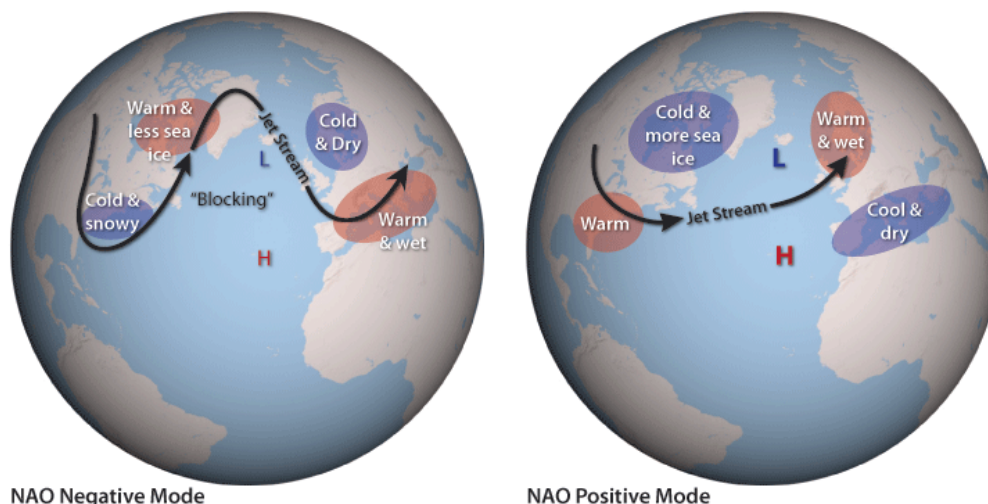
Στην παρούσα εργασία θα επικεντρωθούμε στους δείκτες NAO και AO.

Οι κλιματικοί δείκτες δημιουργήθηκαν για την παρατήρηση της κατάστασης του κλιματικού συστήματος και των αλλαγών που συμβαίνουν σε αυτό μέσα από υπολογίσιμες τιμές. Ουσιαστικά οι δείκτες αυτοί έχουν μεγάλη σημασία για την κατανόηση της παγκόσμιας κλιματικής μεταβλητότητας. Η εσωτερική δύναμη των ωκεανών και της ατμόσφαιρας αποτελεί έναν σημαντικό παράγοντα που καθορίζει το κλίμα της Γης και η μεταβλητότητά του επηρεάζεται από τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ των στοιχείων του συστήματος αυτού. Για την διευκόλυνση της διερεύνησης αυτής της μεταβλητότητας έχουν αναπτυχθεί μαθηματικές μέθοδοι από τις οποίες προκύπτουν τα κλιματικά πρότυπα. Ο κάθε δείκτης υπολογίζεται από μία εξίσωση που περιλαμβάνει μετρήσιμες παραμέτρους οι οποίες επηρεάζουν τις ιδιότητες του κλίματος γνωστές ως κλιματικά στοιχεία, όπως είναι η πίεση του αέρα, η θερμοκρασία, η βροχόπτωση, θερμοκρασία της επιφάνειας της θάλασσας. Ο κάθε δείκτης επηρεάζεται από ορισμένες από τις παραπάνω παραμέτρους επομένως παρουσιάζει μόνο κάποιες όψεις του κλίματος. Ευνόητο λοιπόν είναι ότι έχουν αναπτυχθεί πολλοί διαφορετικοί κλιματικοί δείκτες.

2.2.1 Κύμανση του Βορείου Ατλαντικού (North Atlantic Oscillation - NAO)

Ένας από τους πρώτους κλιματικούς δείκτες που αναπτύχθηκαν, πριν από περίπου εκατό χρόνια, είναι η βορειοατλαντική ταλάντωση. Είναι ένα από τα πιο γνωστά μετεωρολογικά μοτίβα (φαινόμενο τηλεσύνδεσης) και το κυρίαρχο ημι-περιοδικό φαινόμενο του Ατλαντικού το οποίο διαπραγματεύεται την διαφορά των κανονικοποιημένων μέσων χειμερινών ανωμαλιών της ατμοσφαιρικής πίεσης του αέρα στο επίπεδο της θάλασσας ανάμεσα σε περιοχές υψηλής πίεσης με κέντρο τα νησιά Αζόρες γνωστό και ως βαρομετρικό υψηλό των Αζόρων, δυτικά της Πορτογαλίας, και τις περιοχές με χαμηλή πίεση στην Ισλανδία γνωστό και ως Ισλανδικό χαμηλό (Hurrell, 1995). Αποτελεί το πιο εμφανές μοτίβο κλιματικής μεταβλητότητας στα μεσαία και υψηλά βόρεια γεωγραφικά πλάτη και το πρότυπο της ατμοσφαιρικής κυκλοφορίας που περιγράφει έχει ισχυρότερο αντίκτυπο στο

κλίμα της Ευρώπης, της Γροιλανδίας και της βορειοανατολικής Αμερικής. Ο τρόπος εκδήλωσής του είναι η κύμανση της θέσης και της έντασης των δύο συστημάτων διαφοράς της ατμοσφαιρικής πίεσης στην επιφάνεια της θάλασσας του διπόλου Ισλανδικό χαμηλό-Υποτροπικού των Αζόρων από έτος σε έτος (Barnston & Livezey, 1987). Η κύμανση εμφανίζεται καθ' όλη την διάρκεια του έτους με την έντασή της να διαφοροποιείται και να παρουσιάζει την μεγαλύτερή ένταση κυρίως τους χειμερινούς μήνες. Η κύμανση του βορείου ατλαντικού έχει δύο φάσεις την θετική και την αρνητική. Υπάρχει μεγάλη διαφοροποίηση στην ύπαρξη διαστημάτων όπου κυριαρχεί η μία φάση έναντι της άλλης. Έτσι προκύπτει και η δυσκολία πρόβλεψης του συγκεκριμένου δείκτη καθώς η πρόβλεψη δεν είναι εφικτή περισσότερο από μία με δύο εβδομάδες προτού εμφανιστεί.



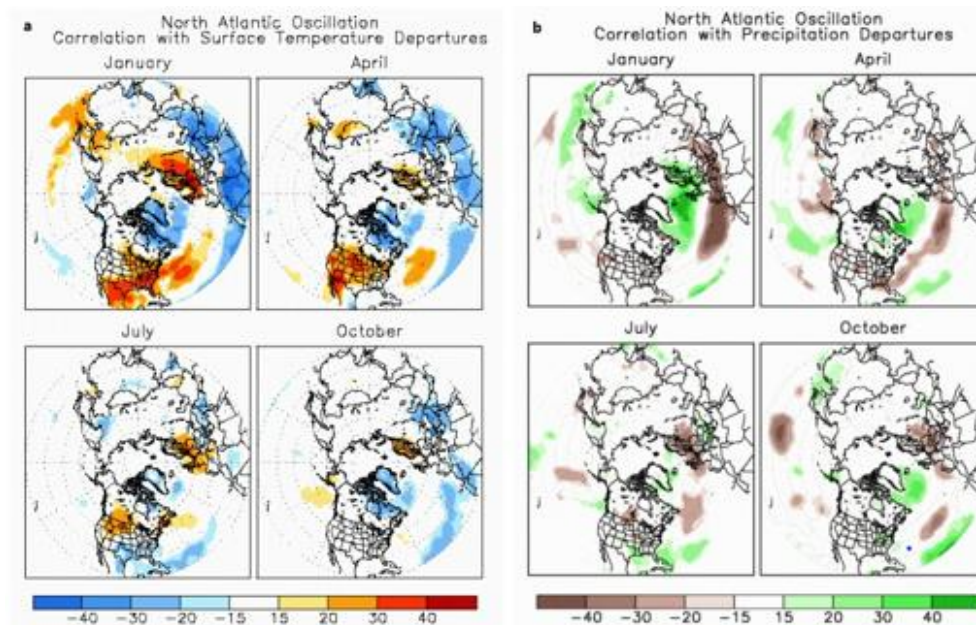
Εικόνα 4: Αρνητική και Θετική φάση της Κύμανσης του Βορείου Ατλαντικού (Lindsey & Dahlaman, 2022)

Κατά τη **θετική φάση** του NAO ο υποτροπικός των Αζορών με τις υψηλές πιέσεις είναι πιο ισχυρός και το Ισλανδικό χαμηλό είναι βαθύτερο από το συνηθισμένο. Κατά την διάρκεια των θετικών φάσεων του NAO, η αυξημένη διαφορά πίεσης μεταξύ των δύο περιοχών έχει ως αποτέλεσμα την ενίσχυση των δυτικών ανέμων πάνω από τον Ατλαντικό. Οι δυτικοί αυτοί άνεμοι σε συνδυασμό με την θέση του αεροχειμάρρου (jet stream), έχουν ως αποτέλεσμα την δημιουργία συχνότερων και εντονότερων καταιγίδων με βορειοανατολική κατεύθυνση, προς τον Βόρειο Ατλαντικό. Κατά συνέπεια, η βόρεια Ευρώπη βιώνει αυξημένες καταιγίδες και βροχοπτώσεις, καθώς και θερμότερες του μέσου όρου θερμοκρασίες οι οποίες συνδέονται με τις θερμές αέριες μάζες που φθάνουν από χαμηλότερα γεωγραφικά πλάτη. Το αντίθετο συμβαίνει στην Νότια Ευρώπη όπου υπάρχουν μειωμένες βροχοπτώσεις και καταιγίδες. Έτσι με την θετική φάση του NAO, παρουσιάζονται πιο βροχεροί και ήπιοι χειμώνες στην Βόρεια Ευρώπη και στις βορειοανατολικές ακτές των ΗΠΑ. Ταυτόχρονα, πιο ψυχροί, με λιγότερες και ηπιότερες καταιγίδες, είναι οι χειμώνες στην Νότια Ευρώπη και τη Μεσόγειο ενώ και οι περιοχές στον βορειοανατολικό Καναδά και τη δυτική Γροιλανδία είναι επιρρεπείς σε χαμηλότερες θερμοκρασίες με αύξηση του θαλάσσιου πάγου. Υπάρχουν σημαντικές ενδείξεις πως λόγω της κλιματικής αλλαγής η εμφάνιση των θετικών φάσεων του NAO θα είναι συχνότερη (Rafferty, 2022).

Κατά την **αρνητική φάση** του NAO, το υψηλό των Αζορών είναι πιο ασθενές, δηλαδή η πίεση είναι μικρότερη από ότι συνήθως, και το Ισλανδικό χαμηλό είναι πιο ρηχό, δηλαδή η πίεση είναι μεγαλύτερη από ότι συνήθως. Ως αποτέλεσμα προκύπτει μικρή διαφορά πίεσης μεταξύ Ισλανδίας και Αζόρων. Η χαμηλή αυτή διαφορά οδηγεί σε εξασθένηση των δυτικών

ανέμων πάνω από τον Ατλαντικό, επιτρέποντας στον κρύο Αρκτικό αέρα να κατέβει πιο νότια, μεταφέροντας ψυχρές και ξηρές συνθήκες στην βορειοανατολική Αμερική και την Βόρεια Ευρώπη. Ο αεροχείμαρος σχηματίζει ένα τόξο πάνω από τον βόρειο Ατλαντικό ωκεανό ο οποίος αφού περάσει την περιοχή με χαμηλής πίεσης πάνω από την Ισλανδία, κατευθύνεται προς την Νότια Ευρώπη διοχετεύοντας την με υγρασία και θερμό αέρα. Εν κατακλείδι κατά τους χειμώνες που διέπονται από τον αρνητικό τρόπο λειτουργίας του NAO, επικρατούν ξηρές και ψυχρές συνθήκες στην κεντρική και Βόρεια Ευρώπη και τις βορειοανατολικές ΗΠΑ με μειωμένες καταιγίδες και βροχοπτώσεις. Αντίθετα, στην Νότια Ευρώπη, σε ολόκληρη την περιοχή της Μεσογείου καθώς και της βόρειας Αφρικής, οι χειμώνες είναι ήπιοι και με αυξημένες βροχοπτώσεις. Επίσης ήπιοι και πιο υγροί είναι οι χειμώνες στην Γροιλανδία και τον Βόρειο Καναδά ενώ παρατηρείται μείωση του θαλάσσιου πάγου.

Στην εικόνα που ακολουθεί παρουσιάζεται στα αριστερά (α) τέσσερις χάρτες όπου ο κάθε ένας δείχνει την συσχέτιση μεταξύ του δείκτη NAO για τον μήνα που αναγράφεται και των μηνιαίων αποκλίσεων της επιφανειακής θερμοκρασίας για κάθε τρείς μήνες με κέντρο τον μήνα ενδιαφέροντος, για παράδειγμα ο χάρτης που αναγράφει Ιανουάριος αφορά το τρίμηνο Δεκέμβριος-Ιανουάριος-Φεβρουάριος. Αντίστοιχα οι τέσσερις χάρτες στα δεξιά (b) απεικονίζουν την συσχέτιση του δείκτη NAO και των βροχοπτώσεων με τον ίδιο ακριβώς τρόπο. Τα δεδομένα αφορούν την περίοδο 1950-2000.



Εικόνα 5: Συσχέτιση μεταξύ των μοτίβων του δείκτη NAO με την επιφανειακή θερμοκρασία (α) και την βροχόπτωση (b) (North Atlantic Oscillation, 2022)

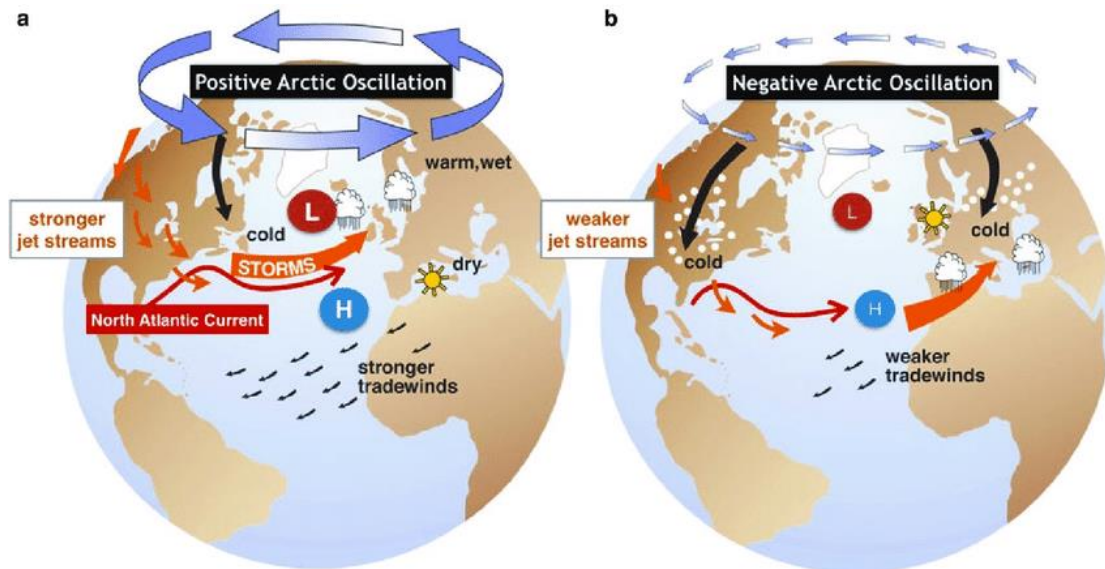
Η ταλάντωση του Βόρειου Ατλαντικού πολλές φορές συσχετίζεται έντονα με την Αρκτική Ταλάντωση (ΑΟ), η οποία θα αναλυθεί παρακάτω. Οι ερευνητές εξετάζουν αν τα δύο αυτά φαινόμενα είναι ξεχωριστά ή αν στην πραγματικότητα η ταλάντωση του Βόρειου Ατλαντικού είναι απλώς το Ατλαντικό μισό της Αρκτικής Ταλάντωσης (Lindsey & Dahlaman, 2022).

2.2.2 Αρκτική Ταλάντωση (Arctic Oscillation - AO)

Ο δείκτης της Αρκτικής Ταλάντωσης είναι ένας κλιματικός δείκτης που παρακολουθεί την κατάσταση της ατμοσφαιρικής κυκλοφορίας πάνω από την Αρκτική. Το κλιματικό αυτό φαινόμενο περιγράφει τις διαφορές της ατμοσφαιρικής πίεσης στο ημισφαίριο μεταξύ της Αρκτικής και των μεσαίων γεωγραφικών πλατών τόσο του βόρειου Ειρηνικού όσο και του βόρειου Ατλαντικού. Ο ΑΟ φαίνεται να συνδέεται με παγκόσμια καιρικά φαινόμενα και συνεπώς λειτουργεί ως ένα καλός δείκτης πρόβλεψής τους. Το συγκεκριμένο κλιματικό πρότυπο χαρακτηρίζεται από ανέμους που κυκλοφορούν αριστερόστροφα πάνω από τον Βόρειο Ημισφαίριο και παρουσιάζει μεγαλύτερη επίδραση στην διάρκεια του χειμερινού κλίματος στην Αρκτική. Αποτελείται από δύο φάσεις μία θετική και μία αρνητική (Patterns in Arctic Weather and Climate, 2020).

Όταν ο δείκτης βρίσκεται στην **θετική φάση**, παρουσιάζει θετικές τιμές, τότε οι ισχυροί άνεμοι που κυκλοφορούν γύρω από το βόρειο πόλο, ενεργούν περιορίζοντας τον ψυχρό αέρα στις πολικές περιοχές εμποδίζοντάς τον από το να κινηθεί νοτιότερα. Αυτό συμβαίνει διότι η επιφανειακή πίεση του βόρειου πόλου είναι χαμηλότερη ενώ η πίεση στις περιοχές των μέσων πλατών είναι υψηλότερη, από ότι συνήθως. Με αυτές τις συνθήκες ο αεροχείμαρρος (jet stream) είναι πιο βόρεια από το κανονικό και κατευθύνει τις καταιγίδες βορειότερα από τις συνηθισμένες τους διαδρομές. Φυσάει δυνατά και σταθερά από τα δυτικά προς τα ανατολικά, παγιδεύοντας τον αρκτικό αέρα στην περιοχή του βόρειου πόλου. Σε αυτή την κατάσταση της ατμόσφαιρας παρατηρούνται ξηρότερες συνθήκες από ότι συνήθως στα μεσαία γεωγραφικά πλάτη της Ευρώπης, της Σιβηρίας, της Αμερικής και της Ανατολικής Ασίας. Παράλληλα στα μεγάλα πλάτη, σε χώρες όπως η Αλάσκα, η Σκανδιναβία και η Σκωτία, λαμβάνουν χώρα έντονες καταιγίδες.

Όταν ο δείκτης βρίσκεται στην **αρνητική φάση** και παρουσιάζει αρνητικές τιμές, τότε οι άνεμοι που κυκλοφορούν γύρω από τον βόρειο πόλο εξασθενούν, ελευθερώνοντας ψυχρές αρκτικές αέριες μάζες προς τα μεσαία γεωγραφικά πλάτη. Αυτό συμβαίνει διότι η ατμοσφαιρική πίεση στην περιοχή πάνω από την Αρκτική είναι υψηλότερη και στις περιοχές πάνω από τα μέσα γεωγραφικά πλάτη είναι χαμηλότερη του συνηθισμένου. Έτσι το jet stream μετατοπίζεται νοτιότερα και δημιουργούνται συνθήκες που επιτρέπουν την διάχυση του ψυχρού πολικού αέρα προς τα νότια. Κατά την αρνητική φάση επικρατεί ψυχρός χειμώνας στην Αμερική και περίοδος λειψυδρίας στις περιοχές της βόρειας Ευρώπης με χαμηλές θερμοκρασίες ενώ σημειώνεται αύξηση των καταιγίδων στα μεσαία γεωγραφικά πλάτη.

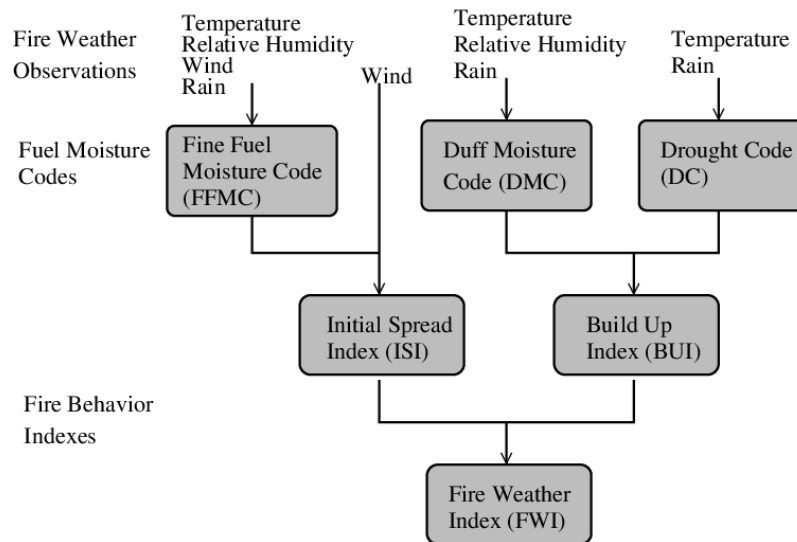


Εικόνα 6: Θετική φάση του AO (a) και Αρνητική φάση του AO (b) (Research Gate, 2022)

2.3. Καναδικός Δείκτης Καιρού Πυρκαγιάς – (Fire Weather Index) FWI

Ο δείκτης καιρού πυρκαγιάς είναι ευρέως χρησιμοποιούμενος δείκτης για την εκτίμηση του κινδύνου πυρκαγιάς σε ένα γενικευμένο τύπο καύσιμης ύλης (Wagner V. , 1974). Ο FWI βασίζεται αποκλειστικά σε μετεωρολογικούς παράγοντες αγνοώντας άλλα χαρακτηριστικά που θα μπορούσαν να οδηγήσουν στην εξάπλωση της πυρκαγιάς όπως είναι τα γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά της εκάστοτε περιοχής, το είδος της βλάστησης που υπάρχει εκεί, η τοπογραφία και η χρήση γης.

Ο δείκτης FWI αποτελείται από έξι επιμέρους δείκτες και για τον υπολογισμό τους λαμβάνονται υπόψη καθημερινές μετρήσεις της ατμοσφαιρικής θερμοκρασίας, της υγρασίας, της 24ωρης βροχόπτωσης και της ταχύτητας του ανέμου. Στην Εικόνα 7 παρουσιάζονται σχηματικά οι δείκτες και οι μετεωρολογικές μεταβλητές με τις οποίες υπολογίζεται ο καθένας καθώς και η μέθοδος που ακολουθείται μέχρι να γίνει ο τελικός υπολογισμός του FWI.



Εικόνα 7: Σχηματική αναπαράσταση του υπολογισμού του FWI (Research Gate , 2022)

Οι τρεις πρώτοι υπό-δείκτες αφορούν την υγρασία διαφορετικών κατηγοριών καύσιμης ύλης. Ουσιαστικά υποδεικνύουν την περιεκτικότητα σε υγρασία στα υπολείμματα των φυτών και άλλων καυσίμων (FFMC), την περιεκτικότητα σε υγρασία στα χαλαρά συμπιεσμένα οργανικά στρώματα μετρίου βάθους (DMC) και τη περιεχόμενη υγρασία στα πιο βαθιά και συμπαγή οργανικά στρώματα (DC). Οι τρεις επόμενοι δείκτες αφορούν τη συμπεριφορά της πυρκαγιάς και αναπαράγουν τον αναμενόμενο ρυθμό εξάπλωσης της πυρκαγιάς (ISI) , την συνολική ποσότητα καυσίμου που είναι διαθέσιμο για καύση (BUI) και την ένταση της πυρκαγιάς (FWI).

Πιο συγκεκριμένα, ο πρώτος δείκτης της σχετικής υγρασίας, ο δείκτης υγρασίας λεπτών καυσίμων (FFMC), είναι μία αριθμητική βαθμολογία της υγρασίας των φυτών, των χόρτων και άλλων λεπτών καυσίμων, όπως βελόνες και λεπτά κλαδιά. Θεωρείται δείκτης της σχετικής ευκολίας ανάφλεξης και της ευφλεκτότητας της λεπτής καύσιμης ύλης.

Ο δεύτερος, ο δείκτης υγρασίας του χούμου (DMC), είναι μια αριθμητική αξιολόγηση της περιεκτικότητας σε υγρασία των χαλαρά συμπιεσμένων οργανικών στρωμάτων μετρίου βάθους. Η υγρασία των καυσίμων DMC, όπως φαίνεται και στην εικόνα 5, επηρεάζεται από την θερμοκρασία , την σχετική υγρασία και την βροχή αλλά δεν επηρεάζεται από την ταχύτητα του ανέμου καθώς τα καύσιμα αυτά βρίσκονται κάτω από την επιφάνεια του εδάφους.

Ο τελευταίος δείκτης της σχετικής υγρασίας είναι ο δείκτης ξηρασίας (DC). Ο δείκτης αυτός είναι μια αριθμητική αξιολόγηση της περιεχόμενης υγρασίας των βαθιών συμπαγών οργανικών στρωμάτων. Επηρεάζεται μόνο από την βροχόπτωση και την θερμοκρασία και αποτελεί πολύ σημαντικό δείκτη αφού ουσιαστικά αναδεικνύει τις εποχιακές επιδράσεις της ξηρασίας στην καύσιμη ύλη των δασών.

Σε ότι αφορά στους δύο ενδιάμεσους δείκτες συμπεριφοράς πυρκαγιάς, ο δείκτης αρχικής εξάπλωσης (ISI) συνδυάζει την ταχύτητα του ανέμου και τον FFMC και αποτελεί αριθμητική αξιολόγηση του αναμενόμενου ρυθμού εξάπλωσης πυρκαγιάς, ενώ ο δείκτης συγκέντρωσης καυσίμου (BUI) υποδεικνύει την συνολική ποσότητα καυσίμου που είναι διαθέσιμη για καύση και προκύπτει ως συνδυασμός των δεικτών DMC και DC με μεγαλύτερη επιρροή να έχει από τον DMC.

Τέλος, ο δείκτης FWI συνδυάζει τους δείκτες ISI και BUI για να αναπαραστήσει την ένταση μίας πυρκαγιάς που εξαπλώνεται ως ρυθμό παραγωγής ενέργειας ανά μονάδα μήκους του μετώπου της πυρκαγιάς (Wagner V. C., 1987).

Ο FWI είναι ειδικά βαθμονομημένο για να περιγράφει τη συμπεριφορά της πυρκαγιάς σε ένα τυποποιημένο τύπο καύσιμης ύλης που είναι αντιπροσωπευτικός των πεύκων jack pine και lodgepole pine, τα οποία βρίσκονται στα δάση του Καναδά. Μπορεί, ωστόσο, να εφαρμοστεί σε οποιοδήποτε μέρος του κόσμου παρέχοντας αξιόπιστες πληροφορίες, καθώς οι παράμετροι που χρησιμοποιεί είναι αντικειμενικές.

3. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Εισαγωγή

Στην παρούσα Ενότητα, αναλύεται η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε τόσο για το σχεδιασμό όσο και για την υλοποίηση της διπλωματικής εργασίας. Ακολούθως περιγράφονται με σαφή τρόπο τα βήματα που πραγματοποιήθηκαν, στη συλλογή δεδομένων, καθώς και στις μεθόδους και τα προγράμματα που χρησιμοποιήθηκαν για την κατάλληλη επεξεργασία τους.

Στόχος ήταν να μελετηθεί και να κατανοηθεί η σχέση που έχουν οι μετεωρολογικοί παράγοντες (βροχόπτωση, υγρασία, θερμοκρασία, ταχύτητα του ανέμου) και οι κλιματικοί δείκτες (NAO, AO) με την πυρική περίοδο, μέσα από τα αποτελέσματα.

Αρχικά λήφθηκαν τα μηνιαία δεδομένα της καμένης έκτασης (BA) και του FWI. Από αυτά τα δεδομένα υπολογίστηκαν οι μέσες τιμές και δημιουργήθηκαν οι ετήσιοι και εποχικοί παγκόσμιοι χάρτες. Στην συνέχεια εφαρμόστηκε η μέθοδος της συσχέτισης ανάμεσα στις δύο αυτές μεταβλητές, η οποία παρουσιάζεται επίσης σε ετήσιους και εποχικούς χάρτες.

Έπειτα, πραγματοποιήθηκε η συσχέτιση των μηνιαίων δεδομένων των μετεωρολογικών παραγόντων, βροχόπτωση, ταχύτητα του ανέμου, υγρασία και θερμοκρασία με το BA. Για την συγκεκριμένη συσχέτιση αφαιρέθηκαν οι μηδενικές τιμές από τα δεδομένα και λογαριθμήθηκαν. Η συσχέτιση αυτή έγινε με χρονικό βήμα υστέρησης έως έξι μηνών και τα αποτελέσματα που προέκυψαν εμφανίζονται με την μορφή θηκογραμμάτων και παγκόσμιων ετήσιων χαρτών. Μία ακόμα μελέτη που έγινε για την συσχέτιση μεταξύ του BA και των μετεωρολογικών παραγόντων αφορά την αφαίρεση της εποχικότητας από τα δεδομένα και των δύο μεταβλητών. Προκύπτουν έτσι παγκόσμιοι χάρτες της συσχέτισης της ανωμαλίας του BA με τον κάθε ένα μετεωρολογικό παράγοντα.

Τέλος, για την συσχέτιση του BA με τα μηνιαία δεδομένα των κλιματικών δεικτών NAO και AO αφαιρέθηκαν τα μηδενικά από τα δεδομένα, λογαριθμήθηκαν και εφαρμόστηκαν διάφορες κατώφλιες τιμές. Όπως και στην περίπτωση της συσχέτισης του BA με τους μετεωρολογικούς παράγοντες, έτσι και αυτή η συσχέτιση πραγματοποιήθηκε με χρονικό βήμα υστέρησης από έναν έως έξι μήνες. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται με μορφή θηκογραμμάτων και παγκόσμιων ετήσιων χαρτών.

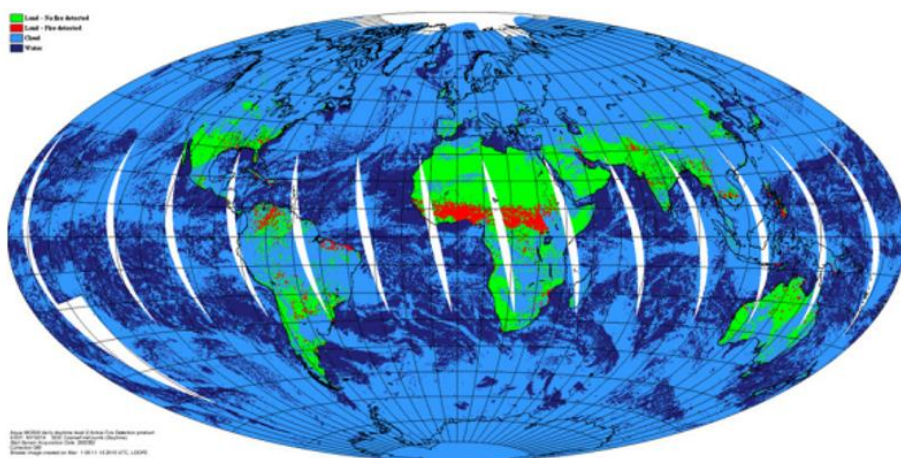
Περισσότερες πληροφορίες για την ανάλυση της κάθε μεθόδου και τον σκοπό της δίνονται στις ακόλουθες παραγράφους.

3.1. Πηγές και συγκέντρωση δεδομένων

Τα μηνιαία δεδομένα της καμένης έκτασης (BA) για την περίοδο 2001-2019 προέρχονται από το MODIS Global Land Cover Product (MCD64A1) (Giglio, The Collection 6 MODIS burned area mapping algorithm and product, 2018) και αποτελούν το κεντρικό σημείο της μελέτης.

Το MODIS (Moderate resolution imaging spectroradiometer- Φασματοραδιόμετρο απεικόνισης μέτριας ανάλυσης) είναι ένα όργανο πάνω σε ένα δορυφορικό σύστημα το οποίο διαθέτει 36 φασματικές ζώνες και ανάλυση 250-1000 μέτρων και μέση περίοδο επαναφοράς 2 ημέρες (Cao, 2019). Ο σκοπός για τον οποίο έχει αναπτυχθεί είναι η παρακολούθηση και καταγραφή παγκόσμιων συνόλων δεδομένων για την ξηρά, τους ωκεανούς και την ατμόσφαιρα, όπως τη χιονοκάλυψη, την εμφάνιση πυρκαγιών, την

θερμοκρασία στην επιφάνεια των ωκεανών, την υγρασία της ατμόσφαιρας, τα αερολύματα και πολλά άλλα. Τα στοιχεία αυτά είναι ιδιαίτερα σημαντικά για την επιστημονική έρευνα που ως στόχο έχει την πρόληψη των περιβαλλοντικών αλλαγών και των επιπτώσεών τους (Justice, 1998). Η υψηλή ραδιομετρική ευαισθησία του οργάνου σε συνδυασμό με την τεράστια κάλυψή του καθιστά εφικτή την παρακολούθηση διάφορων δραστηριοτήτων όπως οι ενεργές πυρκαγιές, οι αλλαγές στη χρήση γης και η ηφαιστειακή δραστηριότητα. Ο αλγόριθμος ανίχνευσης πυρκαγιών που χρησιμοποιεί το MODIS λειτουργεί μέσω της σύγκρισης της θερμοκρασίας με τα γειτονικά εικονοστοιχεία και μπορεί να προσδιορίζει τη σοβαρότητα και την έκταση της πυρκαγιάς. Όταν εντοπιστεί διαφορά πάνω από ένα συγκεκριμένο όριο τότε επιβεβαιώνεται το «θερμό σημείο» ως ενεργή πυρκαγιά. Ωστόσο, εξαιτίας της αδρής χωρικής ανάλυσης του αισθητήρα, ο εντοπισμός πυρκαγιών οι οποίες είναι πολύ μικρές δεν είναι εφικτός. Μέσω του προϊόντος δεδομένων καμένης έκτασης MCD64A1 παρέχονται πληροφορίες για την καμένη έκταση και την ποιότητα ανά εικονοστοιχείο. Είναι γεγονός πως οι καμένες περιοχές χαρακτηρίζονται από συγκεντρώσεις ξυλάνθρακα και τέφρας, από καταστροφή της βλάστησης και μεταβολή της δομής της βλάστησης (Roy, Giglio, Kendall, & Justice, 1999). Εκμεταλλευόμενος αυτές τις φασματικές, χρονικές και διαρθρωτικές αλλαγές ο αλγόριθμος μπορεί να χαρτογραφήσει τις καμένες περιοχές (Burned Area Products, n.d.). Η προσέγγιση χαρτογράφησης της καμένης έκτασης MCD64A1 χρησιμοποιεί εικόνες ημερήσιας επιφανειακής ανάκλασης, εικονικής ευκρίνειας 500 μ. MODIS, σε συνδυασμό με παρατηρήσεις ενεργών πυρκαγιών, εικονικής ευκρίνειας 1χλμ MODIS (MCD64A1v006, 2022).



Εικόνα 8: Παράδειγμα εικόνας παγκόσμιας περιήγησης για ενεργές πυρκαγιές Collection-6 Aqua MODIS για τις 28 Δεκεμβρίου 2002 με όλες τις ημερήσιες υπερβάσεις. Τα εικονοστοιχεία φωτιάς εμφανίζονται με κόκκινο χρώμα, τα εικονοστοιχεία σύννεφων εμφανίζονται με ανοιχτό χρώμα μπλε, και οι περιοχές χωρίς δεδομένα εμφανίζονται με λευκό χρώμα. Η εικόνα περιήγησης είναι ευγενική προσφορά του LDOPE (Giglio, Schroeder, Hall, & Justice, 2020)

Οι μετεωρολογικές συνθήκες αποτελούν έναν από τους πιο βασικούς παράγοντες της δραστηριότητας και εξάπλωσης της πυρκαγιάς. Για τον λόγο αυτό κρίθηκε απαραίτητο να δημιουργηθούν δείκτες με στόχο την εκτίμηση του κινδύνου πυρκαγιάς οι οποίοι εξαρτώνται αποκλειστικά από τις καιρικές συνθήκες. Ο δείκτης κινδύνου που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία, και ο πιο ευρέως χρησιμοποιούμενος, είναι ο FWI. Οι κλιματικές συνθήκες και πιο συγκεκριμένα από η υγρασία, η θερμοκρασία, η βροχόπτωση και την ταχύτητα του ανέμου αποτελούν την βάση για τον υπολογισμό του FWI.

Τα κλιματικά δεδομένα ελήφθησαν από την Παγκόσμια βάση δεδομένων για τον καιρό των πυρκαγιών (GFWED) (Field, 2020). Το GFWED παρέχει ημερήσια και μηνιαία δεδομένα του FWI που έχουν υπολογιστεί από την επανάλυση MERRA2 (Gelaro, 2017), τα οποία

παρέχονται σε πλέγμα $0,625^\circ \times 0,5^\circ$. Το MERRA2 είναι η πιο πρόσφατη ατμοσφαιρική ανάλυση της σύγχρονης δορυφορικής εποχής. Οι κλιματικές μεταβλητές αναφέρονται στις μεσημεριανές τιμές καθώς τις μεσημεριανές ώρες λαμβάνονται οι τιμές για τον υπολογισμό του FWI.

Οι αναλύσεις εμπειρικών δεδομένων με βάση τη στατιστική είναι εφικτές χάρη στην πλούσια παγκόσμια βάση δεδομένων για τις πυρκαγιές και τον καιρό (GFWED) αφού περιέχει αρχεία πολλών ετών για διάφορες μετεωρολογικές μεταβλητές που επηρεάζουν την πιθανότητα πυρκαγιάς (Field, 2020).

Επιπλέον, χρησιμοποιήθηκαν στοιχεία που αφορούν τους μετεωρολογικούς δείκτες AO και NAO, τα οποία λήφθηκαν από τον ιστότοπο¹ του Κέντρου Κλιματικής Πρόβλεψης (Climate Prediction Center, CPC) της NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration). Τα δεδομένα αφορούν επίσης μηνιαίες διακυμάνσεις σε παγκόσμια κλίμακα για το χρονικό διάστημα Ιανουάριος 2001 -Δεκέμβριος 2019.

3.2. Επεξεργασία Δεδομένων με χρήση Matlab

Η Matlab (MATrix LABoratory – εργαστήριο πινάκων) είναι ένα σύγχρονο ολοκληρωμένο μαθηματικό λογισμικό εργαλείο που προσφέρει ένα διαδραστικό προγραμματιστικό περιβάλλον και βρίσκει εφαρμογή σε ένα μεγάλο εύρος δραστηριοτήτων στις φυσικές και μαθηματικές επιστήμες. Η λειτουργία της βασίζεται στην χρήση πινάκων και είναι ειδικά σχεδιασμένο για την οπτικοποίηση δεδομένων με δυνατότητες αριθμητικών υπολογισμών και προγραμματισμού. Μέσα στην μεγάλη ποικιλία λειτουργιών που περιλαμβάνονται στο πρόγραμμα συγκαταλέγονται μεταξύ άλλων η δυνατότητα δημιουργίας γραφικών απεικονίσεων και παραστάσεων, η υλοποίηση αλγορίθμων, η δημιουργία γραφικών διεπαφών και η συνεργασία και διαλειτουργικότητα με άλλα προγράμματα σε διαφορετικές γλώσσες προγραμματισμού. Στις σύγχρονες εκδοχές της η Matlab περιλαμβάνει εργαλείοθκες που επιτρέπουν συμβολικούς υπολογισμούς. Τα βασικά στοιχεία του προγράμματος της MATLAB, καθώς και μία σύντομη περιγραφή της χρήσης του παρατίθενται στον ακόλουθο πίνακα.

Πίνακας 1: Βασικά στοιχεία του MATLAB

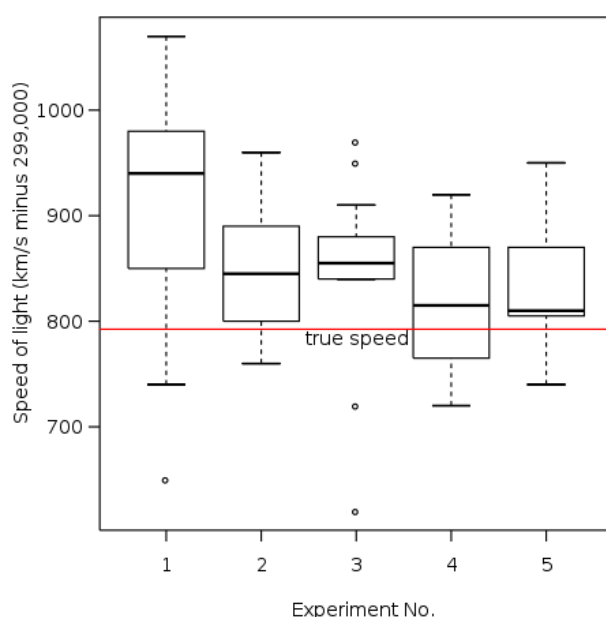
Βασικά Στοιχεία		Πεδίο Εφαρμογής- Χρήση
Περιβάλλον Ανάπτυξης		Περιλαμβάνει τα παράθυρα Εντολών (Command Window), το Ιστορικό Εντολών (Command History) και το χώρο εργασίας (Workspace) καθώς και σχετικά εργαλεία για την αποσφαλμάτωση, την ανάλυση κώδικα και την πλοήγηση στο σύστημα αρχείων. Υπάρχει επίσης και ο editor του Matlab, όπου είναι το παράθυρο στο οποίο γίνεται η συγγραφή του κώδικα.
Βιβλιοθήκη Συναρτήσεων	Μαθηματικών	Περιλαμβάνει το σύνολο των διαθέσιμων αριθμητικών συναρτήσεων για την σύνταξη των απαραίτητων κωδίκων

¹ <https://psl.noaa.gov/data/climateindices/list/>

Τέλος όταν δεν παρατηρείται κάποια σχέση μεταξύ των δύο τότε είναι ασυσχέτιστα και ο συντελεστής παίρνει τιμές κοντά στο 0.

3.2.2 Μέθοδος Θηκογράμματος (Boxplot)

Η τεχνική του θηκογράμματος ανήκει στις μεθόδους διερευνητικής ανάλυσης και είναι ένας συνδυασμός γραφικών και αριθμητικών μεθόδων ανάλυσης με στόχο να συνοψίσει, να συνδυάσει και να συμπυκνώσει σημαντικές πληροφορίες της κατανομής ώστε να είναι πιο εύκολη η διεξαγωγή συμπερασμάτων. Το θηκογράμμα είναι γνωστό και ως διάγραμμα των πέντε διότι είναι ένας γραφικός τρόπος που παρουσιάζει συνοπτικά τα πέντε κυριότερα χαρακτηριστικά της κατανομής ενός δείγματος τα οποία είναι η ελάχιστη και η μέγιστη τιμή, το πρώτο και το τέταρτο τεταρτημόριο και η διάμεσος.



Εικόνα 9: Ένα παράδειγμα box-and-whisker plot των δεδομένων (Box plot, 2022)

Πρόκειται για γραφική παράσταση που περιλαμβάνει ένα ορθογώνιο με την κάτω βάση να είναι το πρώτο τεταρτημόριο και την πάνω βάση να είναι το τρίτο τεταρτημόριο και μέσα τοποθετείται η διάμεσος. Η διάμεσος, η οποία είναι το δεύτερο τεταρτημόριο, παριστάνεται από ένα οριζόντιο ευθύγραμμο τμήμα μέσα στο ορθογώνιο και δείχνει το σημείο που βρίσκεται το 50% των τιμών. Έξω από το κουτί συνεχίζονται δύο γραμμές σαν φράχτες (whiskers) ένα από την πάνω και ένα από την κάτω μεριά οι οποίες δηλώνουν τα όρια των ακραίων τιμών, δηλαδή την μέγιστη και την ελάχιστη τιμή. Οι τιμές που είναι πέρα από τους whiskers σημειώνονται στο γράφημα ως μεμονωμένα σημεία με το σύμβολο «ο» και είναι ακραίες (extreme). Οι αποστάσεις που υπάρχουν μεταξύ των διαφόρων τμημάτων του boxplot δηλώνουν τον βαθμό διασποράς και την ασυμμετρία στα δεδομένα. Τα θηκογράμματα μπορούν να σχεδιαστούν εκτός από οριζόντια και κάθετα.

Για να γίνει αποδεκτό ότι η κατανομή της μεταβλητής είναι κανονική θα πρέπει η διάμεσος να μην πλησιάζει πολύ κοντά στα δύο άκρα του ορθογωνίου, διότι αυτό θα σήμαινε μη συμμετρική κατανομή, το εύρος των τιμών να μην διαφέρει σημαντικά, δηλαδή τα μήκη των δύο whiskers να είναι σχεδόν ίσα και να μην υπάρχουν πολλές ακραίες τιμές.

3.3 Μεθοδολογία που ακολουθήθηκε

3.3.1 Ομαδοποίηση δεδομένων σε κοινή χωρική κλίμακα

Έχοντας λάβει τις πληροφορίες της καμένης έκτασης (εφεξής BA), των τεσσάρων μετεωρολογικών παραγόντων, της βροχόπτωσης (prc), της υγρασίας (rhs), της θερμοκρασίας (tas), της ταχύτητας του ανέμου (wds) και του δείκτη FWI από τις βάσεις δεδομένων, ακολούθησε η χωροχρονική ομαδοποίηση των δεδομένων. Η διαδικασία αυτή αφορά τον επαναπροσδιορισμό όλων των δεδομένων ώστε να μπουν σε κοινή χωρική και χρονική κλίμακα και να είναι έτοιμα για επεξεργασία. Για το άθροισμα των μηνιαίων τιμών του BA ακολουθήθηκε η τακτική του πλησιέστερου γείτονα ενώ για της κλιματικές παραμέτρους και τον FWI βρέθηκε η μέση τιμή σε κλίμακα $1^{\circ} \times 1^{\circ}$, όπου αποτελεί την χωρική κλίμακα των δεδομένων.

3.3.2 Λογάριθμος της καμένης έκτασης

Στην ανάλυση χρησιμοποιείται ο λογάριθμος του BA, είναι μία κοινή πρακτική που ακολουθείται καθώς έχει παρατηρηθεί ότι συσχετίζεται καλά με τις κλιματικές μεταβλητές σε εποχιακή αλλά και διαχρονική κλίμακα, με γραμμικό τρόπο (Zubkova, 2021) (Grillakis, et al., 2022).

3.3.3 Αφαίρεση των μηδενικών από το BA

Έχοντας κατά νου ότι στα δεδομένα που έχουν ληφθεί για το BA θα περιλαμβάνουν και μηδενικές τιμές αποφασίστηκε να γίνει απομάκρυνση τους από τα δεδομένα ούτως ώστε να μπορεί να μελετηθεί η σχέση μόνο των σημείων που έχουν καμένη έκταση με τους δείκτες και τις μετεωρολογικές μεταβλητές. Ουσιαστικά δηλαδή, αναλύονται μόνο οι περιπτώσεις που υπάρχει πυρκαγιά και τον τρόπο με τον οποίο ο FWI, οι δείκτες και οι κλιματικοί παράγοντες συσχετίζονται με αυτήν. Αυτό είναι επιθυμητό διότι αποφεύγεται ο θόρυβος των δεδομένων και μπορεί να γίνει καλύτερη διάκριση και κατανόηση της πραγματικής επίδρασης κάθε δείκτη στις πυρκαγιές.

3.3.4. Μέσες τιμές δεικτών

Τα πρώτα δεδομένα που λήφθηκαν και επεξεργάστηκαν ήταν αυτά του BA που αποτελούν την βάση της ανάλυσης. Αρχικά χρειάστηκε να γίνει μία πρώτη αξιολόγηση των πληροφοριών που είχαμε για το BA να παρατηρηθεί που είναι πιο έντονο και ποιες περιοχές του πλανήτη έχουν καταγραφεί με περισσότερες πυρκαγιές. Έτσι, δημιουργήθηκε ένας χάρτης με το ετήσιο μέσο όρο του συνολικού BA σε παγκόσμια κλίμακα. Από τα αποτελέσματα οι πληροφορίες που μπορούσαν να ληφθούν ήταν λίγες καθώς ένας σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει τις πυρκαγιές είναι η εποχικότητα. Κρίθηκε απαραίτητο να φτιαχτούν νέοι χάρτες της μέσης τιμής του BA αυτή τη φορά για κάθε εποχή ξεχωριστά. Με αυτόν τον τρόπο προκύπτουν πιο αναλυτικά αποτελέσματα και καθίσταται εμφανής η σχέση της κάθε εποχής καθώς και των ιδιαίτερων κλιματικών χαρακτηριστικών

της, με το BA σε παγκόσμιο επίπεδο. Ως εκ τούτου υπολογίστηκε το μέσο όρο του BA αυτή τη φορά ανά εποχή.

Η ίδια μεθοδολογία έλαβε χώρα και για τον δείκτη FWI όπου αποτελεί ένα εξίσου σημαντικό κομμάτι της έρευνας. Ο FWI όπως έχει προαναφερθεί είναι ένας δείκτης κινδύνου πυρκαγιάς ο οποίος εξαρτάται αποκλειστικά από τις καιρικές συνθήκες. Υπολογίζοντας το ετήσιο και εποχιακό μέσο όρο του FWI μπόρεσε να γίνει σύγκριση με τα πραγματικά γεγονότα φωτιάς που προέκυψαν από τους χάρτες του BA σε παγκόσμιο επίπεδο.

3.3.5. Αφαίρεση εποχικότητας

Ένα ακόμα σημείο που ερευνήθηκε είναι η συσχέτιση του BA και των μετεωρολογικών παραγόντων ενώ έχει αφαιρεθεί η εποχικότητα από τα δεδομένα. Για να βρεθεί η ανωμαλία του BA αρχικά υπολογίστηκε ο λογάριθμος του και στην συνέχεια η μέση τιμή του ανά μήνα για τα 19 χρόνια που είναι το χρονικό διάστημα μελέτης. Αφού βρέθηκε το μέσο όρο του κάθε μήνα, αφαιρέθηκε αυτή η τιμή από τον αντίστοιχο μήνα κάθε έτους, και έτσι προέκυψε η ανωμαλία του εκάστοτε μήνα. Για να γίνει καλύτερη κατανόηση θα δοθεί το παράδειγμα του Ιανουαρίου. Υπολογίστηκε η μέση τιμή όλων των Ιανουαρίων για 19 χρόνια. Ακολουθώντας αυτή η τιμή αφαιρέθηκε από κάθε Γενάρη του κάθε έτους ούτως ώστε να μείνει η ανωμαλία του Ιανουαρίου. Η ίδια διαδικασία πραγματοποιήθηκε και για τις μετεωρολογικές μεταβλητές.

Η κανονικοποιημένη ανωμαλία του κάθε μήνα, εκτιμάται για τον λογάριθμο με βάση το 10 του BA καθώς και της κάθε μετεωρολογικής μεταβλητής (εξισώσεις (1) και (2)):

$$BAA_{m,y} = \log_{10}(BA_{m,y}) - \log_{10}\left(\frac{\sum BA_m}{n_m}\right), \quad (1)$$

$$XA_{m,y} = X_{m,y} - \left(\frac{\sum X_m}{n_m}\right), \quad (2)$$

όπου BAA είναι η ανωμαλία του BA, m είναι ο ημερολογιακός μήνας και y το έτος, X είναι κάθε κλιματική μεταβλητή, n είναι ο αριθμός τους ενώ το XA είναι η εκτιμώμενη ανωμαλία τους.

Στην συνέχεια εφαρμόστηκε η μέθοδος της συσχέτισης των ανωμαλιών του BA και του κάθε κλιματικού παράγοντα ξεχωριστά. Αξίζει να σημειωθεί ότι τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την συγκεκριμένη συσχέτιση είναι περισσότερο αντιπροσωπευτικά της σχέσης των πυρκαγιών με τις μετεωρολογικές μεταβλητές. Αυτό συμβαίνει διότι η εποχικότητα συνοδεύεται και από άλλους παράγοντες που επηρεάζουν τις πυρκαγιές, έτσι με την αφαίρεσή της από τα δεδομένα επιτυγχάνεται μία πιο καθαρή απεικόνιση της σχέσης του κάθε κλιματικού παράγοντα και της καμένης έκτασης. Η μελέτη των ανωμαλιών είναι ιδιαίτερα σημαντική καθώς είναι πολύ δύσκολη στην πρόβλεψή της, σε αντίθεση με τον εποχιακό κύκλο του οποίου η πρόβλεψη είναι πιο εύκολη.

3.3.6. Χρονικό βήμα υστέρησης (lag)

Ο χρόνος υστέρησης αναφέρεται στο χρονικό κενό που υπάρχει μεταξύ δύο διαδικασιών. Ουσιαστικά στην συγκεκριμένη εργασία, ορίζει την χρονική διαφορά ανάμεσα στην εμφάνιση ενός κλιματικού παράγοντα και την εμφάνιση καμένης έκτασης.

Γεγονός αποτελεί ότι οι κλιματικές συνθήκες που επικρατούν στον παρόντα χρόνο επηρεάζουν το πλήθος και την ένταση πυρκαγιών στο μέλλον. Η σχέση που έχουν οι περιβαλλοντικοί παράγοντες, όπως η βροχόπτωση και η υγρασία του χειμώνα με τις πυρκαγιές που πραγματοποιούνται το καλοκαίρι και το φθινόπωρο είναι σημείο ιδιαίτερου ενδιαφέροντος και χρήζει μελέτης καθώς θεωρείται σημαντική για την καλύτερη κατανόηση του μηχανισμού των πυρκαγιών. Βέβαια αν και η συσχέτιση τους θεωρείται δεδομένο ο βαθμός που υπάρχει είναι κάτι που βρίσκεται σε πρώιμα στάδια διερεύνησης από την επιστημονική κοινότητα. Για τον λόγο αυτό, πραγματοποιήθηκαν συσχετίσεις του κάθε μετεωρολογικού παράγοντα με την καμένη γη σε πολλά διαφορετικά χρονικά διαστήματα. Η συσχέτιση ξεκίνησε με την ταυτόχρονη ύπαρξη των δύο μεταβλητών και στην συνέχεια ακολούθησε η συσχέτιση του κλιματικού παράγοντα και της καμένης έκτασης ανά μήνα μέχρι και έξι μήνες μετά. Κρίθηκε ότι χρονική υστέρηση μεγαλύτερη των έξι μηνών δεν έχει νόημα καθώς η επίδραση των κλιματικών παραγόντων στις πυρκαγιές που εμφανίζονται μετά από έξι μήνες είναι αρκετά μικρή. Η ανάλυση αυτή πραγματοποιήθηκε σε παγκόσμια κλίμακα και από τα αποτελέσματα που προέκυψαν αποφασίστηκε να γίνει μία πιο ειδική ανάλυση στις περιοχές που προέκυψαν υψηλές συσχετίσεις. Η συσχέτιση που προέκυψε μεταξύ του κάθε παράγοντα ξεχωριστά και του ΒΑ σε 7 διαφορετικές χρονικές στιγμές, ανά μήνα, απεικονίζεται με την μορφή θηκογράμματος.

Η ίδια ακριβώς διαδικασία ακολουθήθηκε και για την συσχέτιση μεταξύ των κλιματικών δεικτών ΝΑΟ και ΑΟ και των μελλοντικών περιστατικών πυρκαγιάς. Είναι γνωστός ο τρόπος με τον οποίο τα κλιματικά φαινόμενα επηρεάζουν το παγκόσμιο κλίμα και κατ' επέκταση τις μετεωρολογικές παραμέτρους. Έχοντας αυτό κατά νου, υπήρξε η ιδέα για το αν μπορεί να προκύψει κάποιο συμπέρασμα για την καμένη έκταση του μέλλοντος από την έντονη παρουσία ενός φυσικού φαινομένου στο παρόν. Η διερεύνηση της ύπαρξης κάποιου είδους συσχέτισης ανάμεσα στα κλιματικά φαινόμενα και το ΒΑ, είτε την ίδια στιγμή είτε σε βάθος χρόνου, θα μπορούσε να αποτελέσει πολύτιμο εργαλείο για την πρόβλεψη των πυρκαγιών. Αυτό προκύπτει από το ότι μεγάλα κλιματικά φαινόμενα όπως ο ΑΟ και ο ΝΑΟ μπορούν να προβλεφθούν πιο εύκολα από τις πυρκαγιές. Δεδομένου ότι οι συγκεκριμένοι δείκτες έχουν ιδιαίτερη επίδραση στο κλίμα της Ευρώπης, ακολούθησε μία σε βάθος διερεύνηση για την συσχέτιση των δεικτών με την καμένη έκταση της συγκεκριμένης περιοχής. Δημιουργήθηκε μία σειρά από θηκογράμματα όπου παρουσιάζουν την συσχέτιση ανάμεσα στην καμένη έκταση της Ευρώπης και τους κλιματικούς δείκτες ΝΑΟ και ΑΟ με χρονικό βήμα υστέρησης μέχρι έξι μήνες. Στην συνέχεια η Ευρώπη χωρίστηκε σε έξι τμήματα σε βόρεια Ευρώπη, βορειοανατολική, βορειοδυτική, νότια, νοτιοανατολική και νοτιοδυτική και έγινε η αντίστοιχη συσχέτιση για το κάθε τμήμα ξεχωριστά η οποία απεικονίστηκε επίσης σε θηκογράμματα.

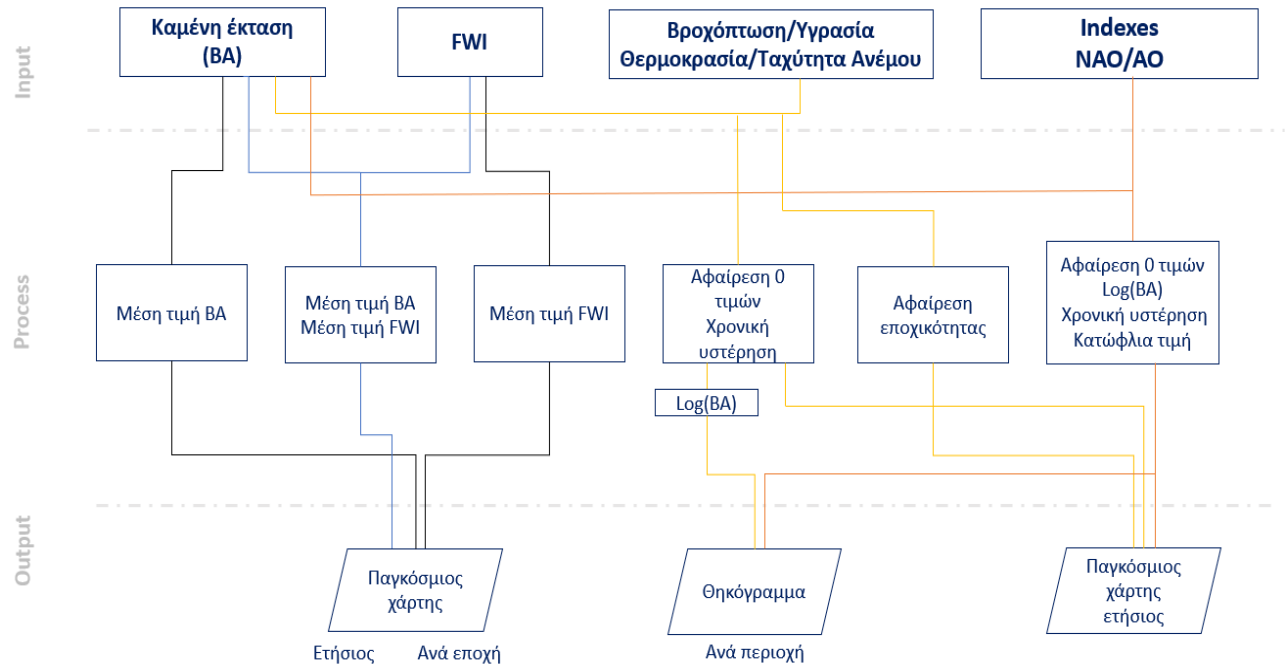
3.3.7 Κατώφλια τιμή (Threshold)

Κατά την συσχέτιση των δεικτών ΝΑΟ και ΑΟ και του ΒΑ δοκιμάστηκαν διάφορες κατώφλιες τιμές διότι ήταν πιθανό να χάνεται κάποια συσχέτιση στον θόρυβο των δεδομένων. Η επιρροή άλλων κλιματικών φαινομένων θα μπορούσε να είναι τέτοια ώστε να χάνετε η πραγματική συσχέτιση των δεικτών και του ΒΑ. Δημιουργήθηκε επίσης η ιδέα ότι μπορεί υπάρχει συσχέτιση των δεικτών μόνο με μεγάλες φωτιές. Για τους λόγους που

προαναφέρθηκαν έγινε διερεύνηση της σχέσης των ισχυρών ΝΑΟ και ΑΟ με το ΒΑ με σκοπό να παρατηρηθεί το αν σε υψηλές τιμές των δεικτών έχουμε και μεγαλύτερη τιμή του ΒΑ.

3.4 Διάγραμμα ροής

Για την καλύτερη κατανόηση της μεθοδολογίας που ακολουθήθηκε στην παρούσα μελέτη παρουσιάζεται στην Εικόνα 10. ένα διάγραμμα ροής των δεδομένων.

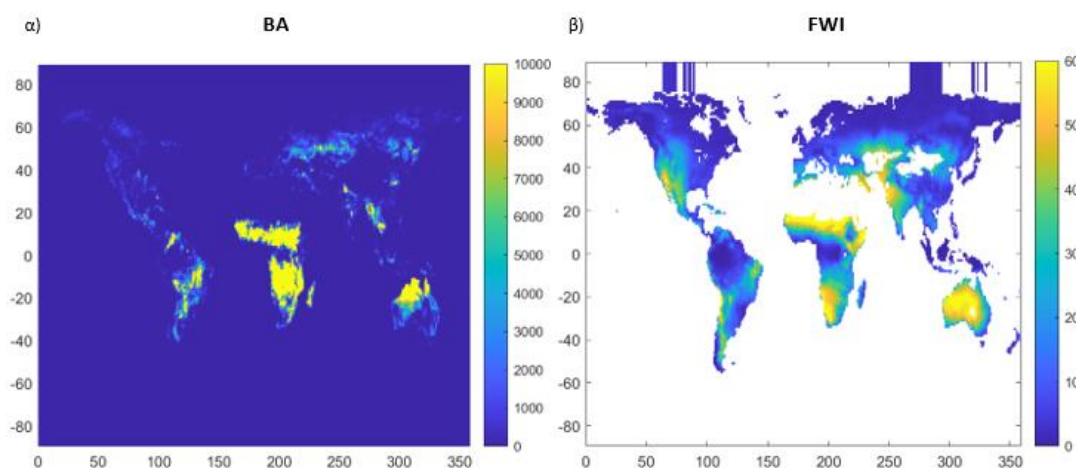


Εικόνα 10: Διάγραμμα ροής δεδομένων

4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

4.1 Καμένη έκταση και FWI

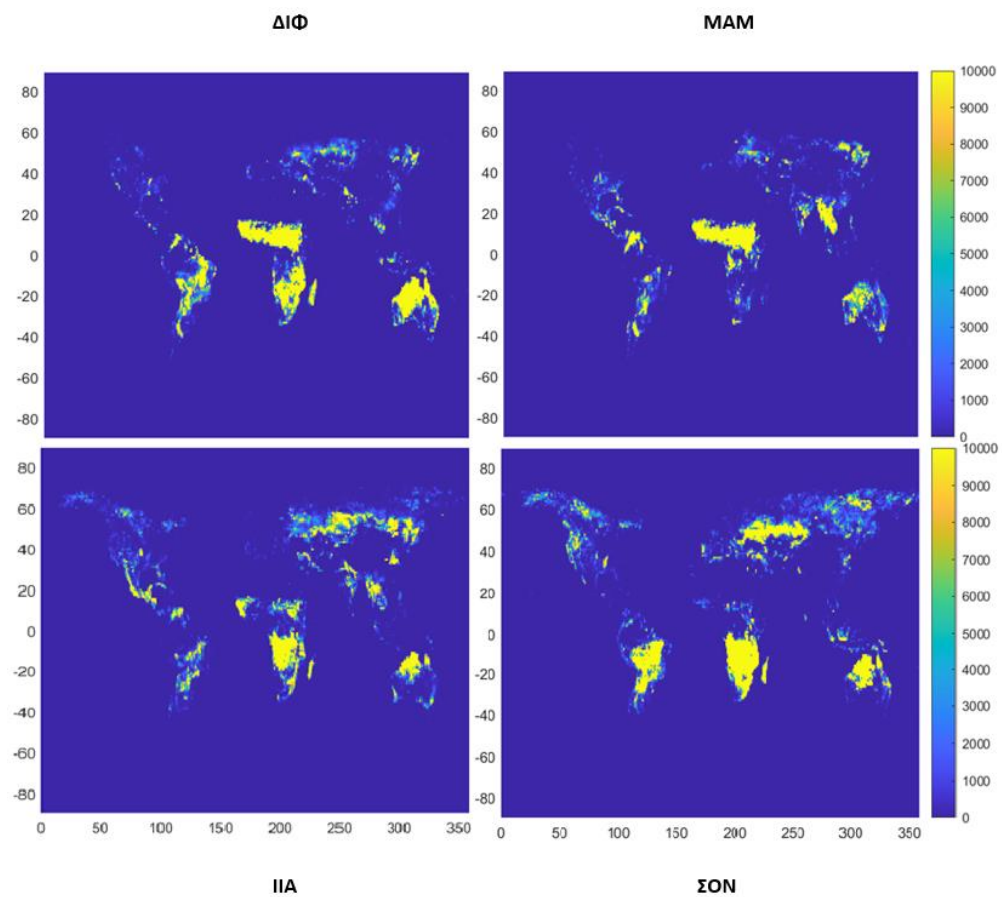
Στην Εικόνα 9 παρουσιάζεται η μέση τιμή του BA σε παγκόσμια κλίμακα (α) και η μέση τιμή του FWI σε παγκόσμια κλίμακα (β).



Εικόνα 11: Ετήσια μέση τιμή BA (α) και ετήσια μέση τιμή FWI (β)

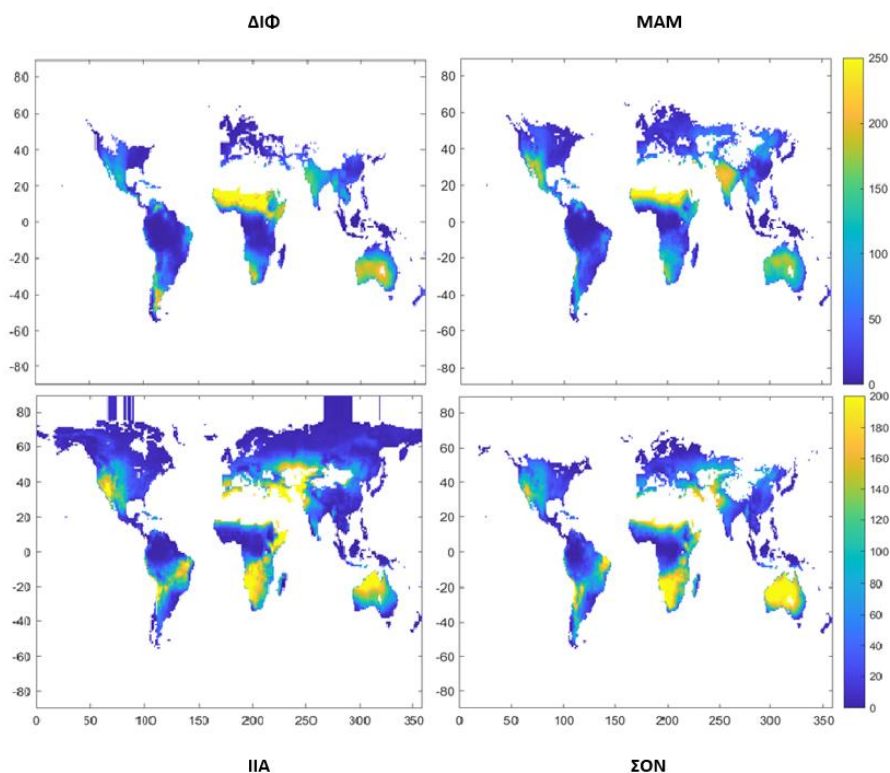
Από την εικόνα 11.α προκύπτει πως ιδιαίτερα μεγάλες καμένες εκτάσεις από πυρκαγιές εμφανίζονται στην μεγαλύτερη έκταση της Αφρικής, στην Αυστραλία και την Νότια Αμερική ενώ πιο ασθενείς πυρκαγιές εμφανίζονται στην Ισημερινή Ασία και την Σιβηρία. Από την εικόνα 11.β ο FWI παρουσιάζει έντονο κίνδυνο πυρκαγιάς στην Αυστραλία, την βόρεια και την Νότια Αφρική, την ανατολική κεντρική Αμερική και την Ευρασία.

Στην συνέχεια, εξετάστηκε ο μέσος όρος του BA και του FWI ανά εποχή. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στην Εικόνα 12. Στην πάνω σειρά παρουσιάζεται από αριστερά προς τα δεξιά η μέση τιμή του BA για τον Δεκέμβριο-Ιανουάριο-Φεβρουάριο (εφεξής ΔΙΦ), για τον Μάρτιο-Απρίλιο-Μάιο (εφεξής ΜΑΜ), για τον Ιούνιο-Ιούλιο-Αύγουστο (εφεξής ΙΙΑ) και για τον Σεπτέμβριο-Οκτώβριο- Νοέμβριο (εφεξής ΣΟΝ). Από κάτω η μέση τιμή του FWI με την ίδια σειρά.



Εικόνα 12: Μέση τιμή του ΒΑ για τις εποχές ΔΙΦ, ΜΑΜ, ΙΙΑ και ΣΟΝ

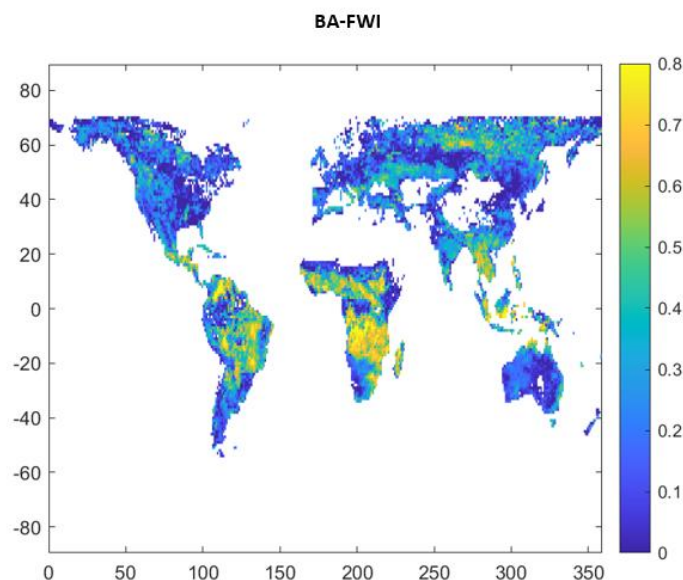
Παρατηρώντας τους χάρτες του ΒΑ προκύπτει το συμπέρασμα ότι την εποχή ΔΙΦ πλήττεται από πυρκαγιές ένα μεγάλο κομμάτι του Νότιου Ημισφαίριου του πλανήτη και πιο συγκεκριμένα η Αφρική, η Αυστραλία και η Νότια Αμερική καθώς και στο Βόρειο η Σιβηρία. Όσο αναφορά την εποχή ΜΑΜ φαίνεται μικρή μείωση στις πυρκαγιές σε σχέση με την προηγούμενη εποχή, ωστόσο υπάρχουν μεγάλες καμένες εκτάσεις στην βόρεια Αφρική, την Νοτιοανατολική Ασία και την Αυστραλία ενώ σποραδικά εμφανίζεται ΒΑ στην κεντρική και Νότια Αμερικής καθώς και στην Σιβηρία. Στο σχήμα όπου παρουσιάζεται η εποχή ΙΙΑ φαίνεται πως οι πυρκαγιές πληθαίνουν σε αριθμό και έκταση αφού εμφανίζεται ισχυρό ΒΑ στην Αφρική, την βόρεια Αυστραλία, την Ασία, την Ευρώπη, την Σιβηρία, την Νοτιοανατολική Αμερική. Τέλος για την εποχή ΣΟΝ, αξίζει να σημειωθεί πως οι πυρκαγιές πληθαίνουν στα βόρεια γεωγραφικά πλάτη δηλαδή στην Ευρώπη, την Σιβηρία και την υπερβόρεια Αμερική ενώ έχουν μετατοπιστεί πιο νότια οι πυρκαγιές στην Αφρική, την Νότια Αμερική και Αυστραλία.



Εικόνα 13: Μέση τιμή του FWI για τις εποχές ΔΙΦ, ΜΑΜ, ΙΙΑ και ΣΟΝ

Οι χάρτες του FWI παρουσιάζουν μία παρόμοια εικόνα των καμένων εκτάσεων με αυτή που έδειξαν και οι χάρτες του BA, με εξαίρεση την περιοχή της Νότιας Αμερικής όπου τόσο την εποχή ΔΙΦ όσο και την εποχή ΣΟΝ εμφανίζονται λιγότερες καμένες εκτάσεις.

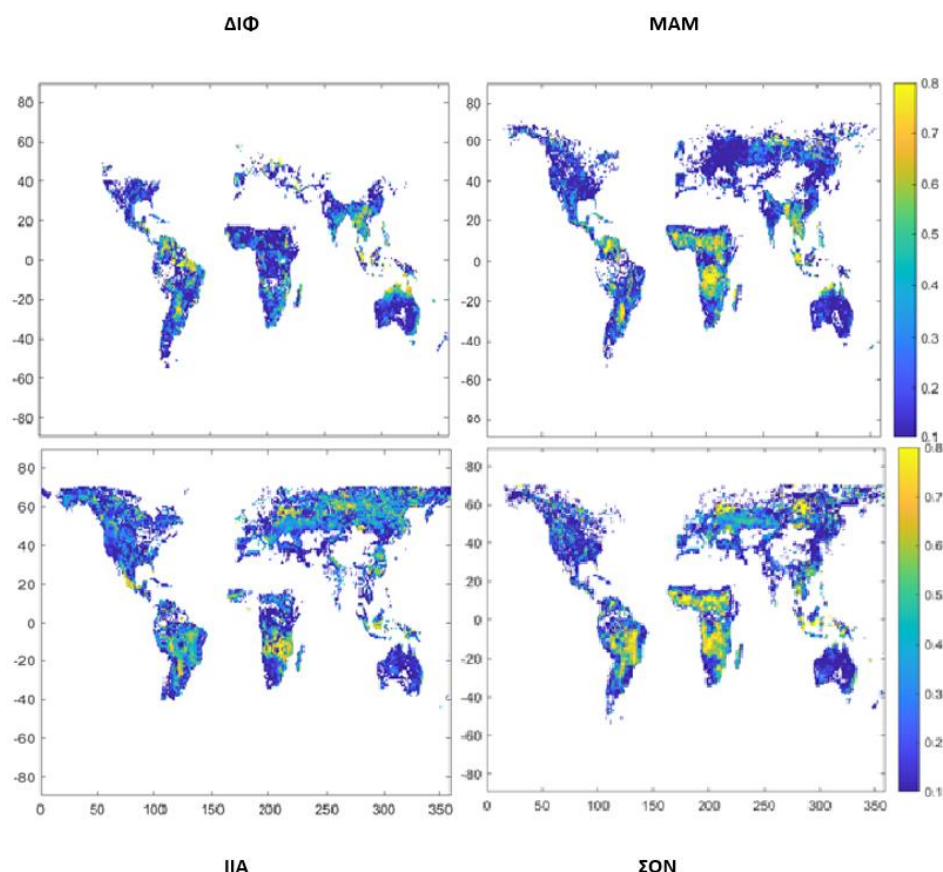
Στην συνέχεια υπολογίστηκε η συσχέτιση ανάμεσα στο BA και τον FWI, χρησιμοποιώντας τα δεδομένα ανά εποχή. Στην πρώτη προσπάθεια συσχέτισης τους, η κλίμακα της συσχέτισης περιλάμβανε τιμές από -0,8 έως 0,8 ωστόσο παρατηρήθηκε πως υπάρχει η τάση προς την θετική συσχέτιση τους και για αυτό ακολούθησε δεύτερη με κλίμακα το 0 έως το 0.8 η οποία και παρουσιάζεται στην εικόνα που ακολουθεί.



Εικόνα 14: Παγκόσμιος χάρτης όπου παρουσιάζεται η συσχέτιση ανάμεσα στις μέσες τιμές του BA και του FWI.

Από την Εικόνα 14 προκύπτουν αρκετές περιοχές του πλανήτη με υψηλή συσχέτιση ανάμεσα στις ετήσιες μέσες τιμές του BA και τις μέσες τιμές του FWI, οι οποίες εμφανίζονται με κίτρινο χρώμα. Η συσχέτιση είναι ισχυρά θετική στην Αφρική, την κεντρική και Νότια Αμερική, την Ισημερινή Ασία, την Ευρασία και την Σιβηρία. Παρατηρείται ωστόσο πως ενώ στους χάρτες 11,12 και 13 είχαν παρουσιαστεί καμένες εκτάσεις στην Αυστραλία στην Εικόνα 14 δεν παρουσιάζεται μεγάλη συσχέτιση μεταξύ των δύο δεικτών. Αυτό σημαίνει πως ο δείκτης FWI δεν έχει πολύ καλή ικανότητα πρόβλεψης καμένης έκτασης στην Αυστραλία. Ενδεχομένως συνθήκες όπως η χρήση γης και ο διαφορετικός τύπος βλάστησης να εμποδίζουν την ορθή του απόδοση.

Εν συνεχεία έγινε η συσχέτιση ανάμεσα στο BA και τον δείκτη FWI ανά εποχή. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στην ακόλουθη εικόνα.

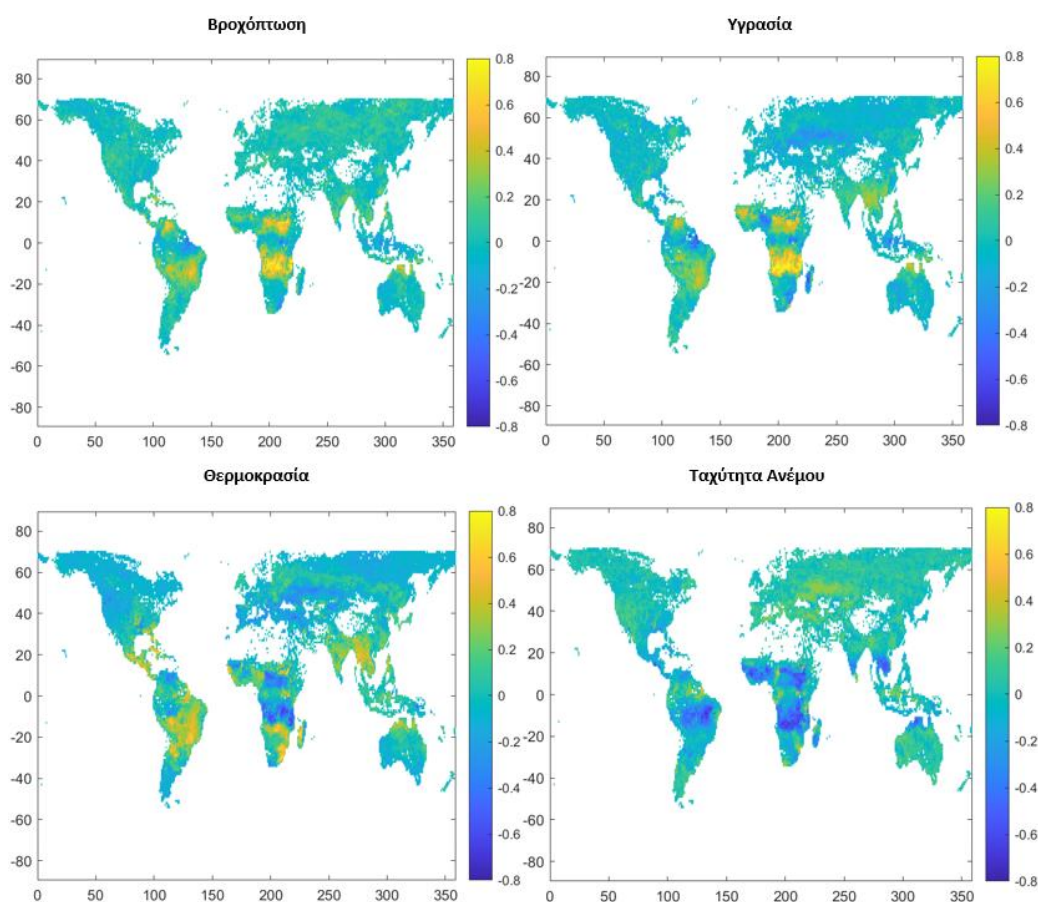


Εικόνα 15: Παγκόσμιος χάρτης όπου παρουσιάζεται η συσχέτιση ανάμεσα στην μέση τιμή του BA και την μέση τιμή του FWI για τις εποχές ΔΙΦ, ΜΑΜ, ΙΙΑ και ΣΟΝ

Από τα αποτελέσματα προκύπτει ότι κατά τους μήνες ΔΙΦ υπάρχει μία πιο έντονη συσχέτιση μεταξύ του BA και του FWI, στο τμήμα της βόρειας Αυστραλίας, της κεντρικής και Νότιας Αμερικής και την Νοτιοανατολική Ασία. Στο επόμενο τρίμηνο, ΜΑΜ, φαίνεται πως η συσχέτιση στην Αφρική γίνεται πιο ισχυρή ειδικά στο κεντρικό και βόρειο κομμάτι της, ισχυροποιούνται και οι ήδη υπάρχουσες συσχετίσεις στην κεντρική και Νότια Αμερική και την Νοτιοανατολική Ασία ενώ φαίνεται να υπάρχουν συσχετίσεις και στην Σιβηρία. Για την εποχή ΙΙΑ η συσχέτιση του BA και του FWI είναι εμφανής στο μεγαλύτερο μέρος της Σιβηρίας, στην Ευρασία, την Νοτιοανατολική Ασία, την κεντρική Αφρική και σε ένα μεγάλο τμήμα της Αμερικής με εντονότερη παρουσία στην Βραζιλία. Η συσχέτιση φτάνει στην κορύφωσή της το τρίμηνο ΣΟΝ καθώς με κίτρινο χρώμα βάφονται αρκετές περιοχές του χάρτη. Πιο συγκεκριμένα ισχυρή συσχέτιση έχει η Νότια Αμερική, η Αφρική, η Ευρασία και η Ευρώπη.

4.2 Συσχέτιση του BA και των μετεωρολογικών παραγόντων

Στην συνέχεια επεκτείνεται η ανάλυση συσχέτισης για την μελέτη της επίδρασης των κλιματικών μεταβλητών στο BA. Είναι δεδομένο πως αυτοί οι παράγοντες συσχετίζονται με το FWI, αφού συνυπολογίζονται στην εξίσωση του υπολογισμού του, οπότε είναι περιττή η ανάλυση ως προς FWI. Η συσχέτιση έγινε ανάμεσα στο BA και τον κάθε μετεωρολογικό παράγοντα ξεχωριστά. Παρουσιάζονται με την σειρά οι χάρτες της συσχέτισης του BA με την βροχόπτωση (prc) , την σχετική υγρασία (rhs) , την θερμοκρασία (tas) και την ταχύτητα ανέμου (wds) ενώ εμφανίζονται την ίδια χρονική στιγμή.



Εικόνα 16: Παγκόσμιος χάρτης όπου παρουσιάζεται η συσχέτιση BA και της βροχόπτωσης, της υγρασίας, της θερμοκρασίας και της ταχύτητας του ανέμου

Παρατηρούνται ισχυρές συσχετίσεις σε συγκεκριμένες περιοχές όπως είναι η κεντρική και βόρεια Αφρική που έχει θετική συσχέτιση με την βροχόπτωση και την υγρασία ενώ παρουσιάζει αρνητική συσχέτιση με την θερμοκρασία και την ταχύτητα του ανέμου.

Η βροχόπτωση φαίνεται να έχει ισχυρή συσχέτιση με τις πυρκαγιές στην περιοχή της Αφρικής, της Νότιας Αμερικής, της κεντρικής και νοτιοανατολικής Ασίας. Η σχέση που εμφανίζεται ωστόσο δεν πρέπει οφείλεται στην άμεση επιρροή της βροχόπτωσης στις πυρκαγιές. Μία πιθανή εξήγηση είναι ότι η συσχέτιση μπορεί να συνδέεται με άλλους παράγοντες που εμφανίζονται συνδυαστικά με τις βροχοπτώσεις, όπως είναι οι κεραυνοί, οι οποίοι μπορούν να προκαλέσουν περιστατικά πυρκαγιάς (Price & Rind, 1994).

Όσο αναφορά την υγρασία, παρουσιάζει επίσης θετική συσχέτιση στις ίδιες περιοχές με την βροχόπτωση και πιθανώς να οφείλεται στους ίδιους λόγους. Οι πολλές βροχοπτώσεις

συνήθως συμβαίνουν ταυτόχρονα με μεγάλα ποσοστά υγρασίας. Ωστόσο στα μεσαία και βόρεια γεωγραφικά πλάτη όπως και στην νοτιοανατολική Ασία και αρκετά τμήματα της Αφρικής και της Νότιας Αμερικής παρατηρείται αρνητική συσχέτιση. Αυτό αποτελεί ένα πιο αναμενόμενο αποτέλεσμα καθώς όταν υπάρχει έντονη υγρασία στην ατμόσφαιρα δεν είναι εύκολη η ανάφλεξη και η εξάπλωση μίας πυρκαγιάς.

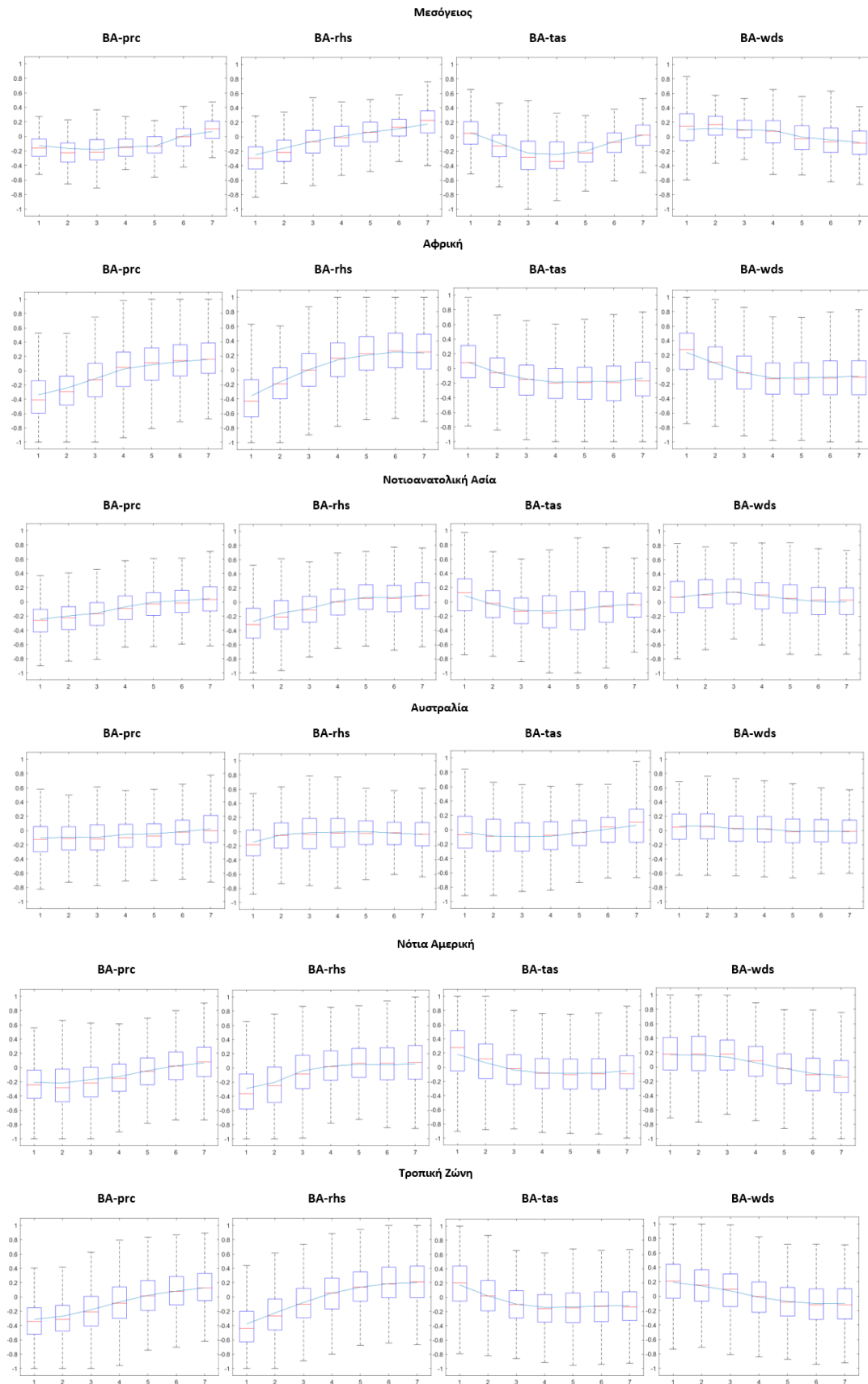
Η συσχέτιση του BA και της θερμοκρασίας είναι θετική κυρίως στις τροπικές και υποτροπικές περιοχές και σε ένα τμήμα της Ευρασίας. Πράγματι, οι υψηλές θερμοκρασίες οδηγούν σε ξηρές συνθήκες οι οποίες αυξάνουν την ευφλεκτότητα της καύσιμης ύλης και είναι πιο εύκολο να ξεσπάσουν πυρκαγιές. Ωστόσο στην κεντρική Αφρική και την κεντρική Ασία παρατηρείται έντονη αρνητική συσχέτιση.

Τέλος η συσχέτιση του BA και της ταχύτητας του ανέμου είναι θετική στην υπερβόρεια Αμερική, την Σιβηρία και την Ευρασία. Μάλιστα, σε αυτές τις περιοχές, φαίνεται να είναι ο παράγοντας που υπερισχύει στην επίδραση που έχει στις πυρκαγιές. Σε τμήματα της Νότιας Αμερικής, της κεντρικής Αφρικής και της νοτιοανατολικής Ασίας εμφανίζονται έντονες αρνητικές συσχετίσεις, γεγονός που πιθανώς να οφείλεται στην σύνδεση της ταχύτητας του ανέμου με τις βροχοπτώσεις.

Οι περιοχές που παρουσιάζουν μεγαλύτερο ενδιαφέρον για περισσότερη μελέτη, έτσι όπως προκύπτει από τους προηγούμενους χάρτες είναι η Μεσόγειος, η Νότια Αμερική, η Αφρική, η Νοτιοανατολική Κίνα, η Αυστραλία καθώς και στο σύνολό της η τροπική ζώνη. Οι περιοχές αυτές θα μελετηθούν ξεχωριστά με σκοπό την αναζήτηση πιο λεπτομερών αποτελεσμάτων σχετικά με την επίδραση των κλιματικών παραγόντων στο BA τους.

Στα πλαίσια της προσπάθειας για κατανόηση του τρόπου με τον οποίο οι παράγοντες του κλίματος επηρεάζουν τις μελλοντικές πυρκαγιές, ξεκίνησε παράλληλα και η αναζήτηση συσχετίσεων των συγκεκριμένων παραγόντων με το BA σε μελλοντικό χρόνο από την εμφάνισή τους. Αυτό σημαίνει ότι, πέρα από την συσχέτιση των μεταβλητών με την BA όταν συμβαίνουν ταυτόχρονα, αναζητήθηκε και η συσχέτισή τους με την BA με χρονική υστέρηση έως έξι μήνες.

Παρακάτω θα παρουσιαστούν τα θηκογράμματα που απεικονίζουν την συσχέτιση του μη μηδενικού και λογαριθμισμένου BA με τους κλιματικούς παράγοντες που μελετάμε στις πέντε προαναφερθείσες περιοχές και την τροπική ζώνη.



Εικόνα 17: Θηκογράμματα με την συσχέτιση του BA και των τεσσάρων μετεωρολογικών παραμέτρων στην περιοχή της Μεσογείου, της Αφρικής, της Νοτιοανατολικής Ασίας, της Αυστραλίας, της Νότιας Αμερικής και σε ολόκληρη την Τροπική ζώνη.

Από την Εικόνα 17 προκύπτουν αρκετές πληροφορίες. Όσο αναφορά την βροχόπτωση σε όλες τις περιοχές που μελετήθηκαν χαρακτηριστική είναι η παρουσία αρνητικής συσχέτισής με την καμένη έκταση, για την ταυτόχρονη παρουσία των δύο δεικτών. Ένα επίσης κοινό χαρακτηριστικό όλων των περιοχών είναι ότι όσο μελετάμε την σχέση της βροχόπτωσης με μελλοντικό BA ανά μήνα, η συσχέτιση όλο και αυξάνεται με κορύφωση τους έξι μήνες, όπου παίρνει την μέγιστη θετική τιμή της. Η αλλαγή αυτή μπορεί να εξηγηθεί με την συμβολή της βροχόπτωσης στην ανάπτυξη της βλάστησης κατά τους επόμενους μήνες. Η ύπαρξη αυξημένης βλάστησης τους θερινούς μήνες όπου οι συνθήκες είναι πιο ξηρές μπορεί να οδηγήσει σε μεγάλη δραστηριότητα πυρκαγιών καθώς υπάρχει μεγάλη ποσότητα καύσιμης ύλης. Το παράδειγμα με την μεγαλύτερη αλλαγής της συσχέτισης μέσα σε έξι μήνες είναι η περιοχή της Αφρικής και η Τροπική ζώνη. Την ίδια στιγμή η αρνητική συσχέτιση είναι αρκετά ισχυρή στο εύρος 0,2-0,6 ενώ μετά από έξι μήνες έχει αντικατασταθεί από έντονη θετική συσχέτιση, παρουσιάζοντας την ισχυρότερη θετική συσχέτιση από όλες τις άλλες περιοχές σε βάθος χρόνου.

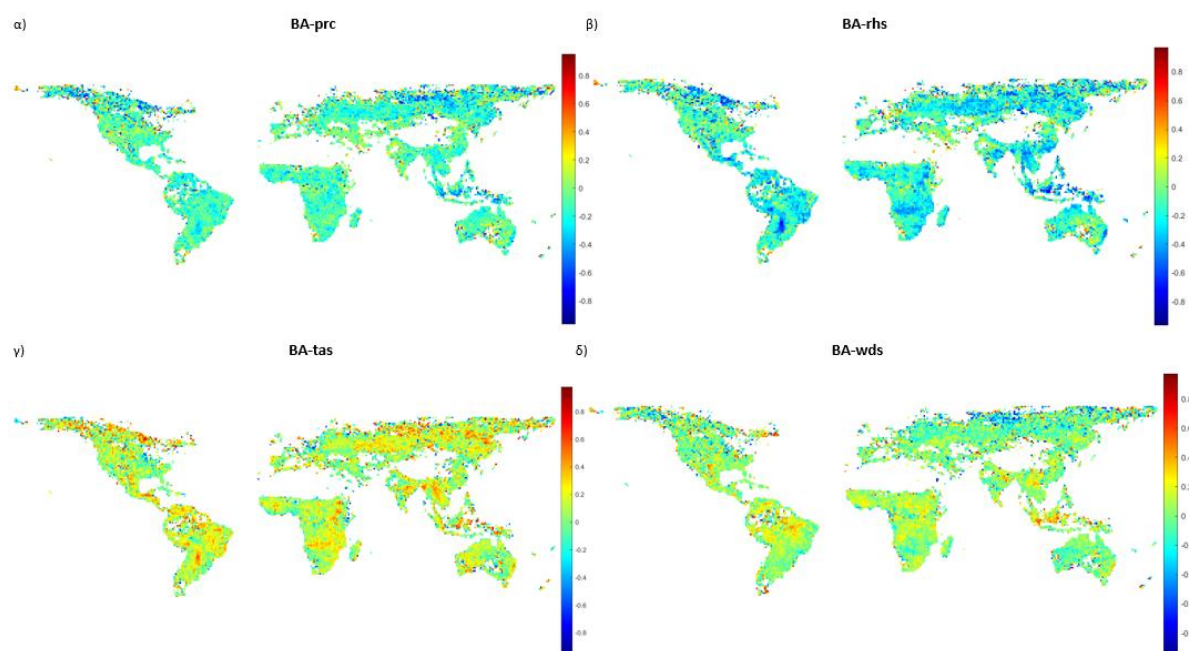
Αναφορικά με την υγρασία προκύπτει το συμπέρασμα ότι επηρεάζει δραστικά το BA. Αυτό αποτυπώνεται στα αποτελέσματα των θηκογραμμάτων καθώς υπάρχει αρνητική ισχυρή συσχέτιση του BA και της υγρασίας την ίδια χρονική στιγμή, για όλες τις περιοχές που μελετήθηκαν. Αυτό σημαίνει πως όταν τα επίπεδα της υγρασίας είναι πολύ υψηλά δεν υπάρχουν έντονα φαινόμενα πυρκαγιών. Η περιοχή της Νότια Αμερικής, της Αφρικής και ολόκληρη η τροπική ζώνη παρουσιάζουν την μεγαλύτερη αρνητική συσχέτιση. Αξιοσημείωτο είναι ωστόσο ότι σε βάθος χρόνου, η συσχέτιση αυτή μεταβάλλεται ανοδικά και φτάνει να παίρνει θετικές τιμές. Μία πιθανή ερμηνεία είναι, όπως στην περίπτωση των βροχοπτώσεων, η θετική επίδραση που έχουν τα υψηλά ποσοστά υγρασίας στην ανάπτυξη της βλάστησης και άρα σε υψηλά φορτία καύσιμης ύλης τις περιόδους πυρκαγιών (Kuhn-Régnier, et al., 2021). Στην τροπική ζώνη και συγκεκριμένα στην Νοτιοανατολική Κίνα, την Αφρική και την Μεσόγειο παρουσιάζεται αρκετά θετική η συσχέτιση της υγρασίας με μελλοντικό BA.

Σε σχέση με την θερμοκρασία, το αποτέλεσμα της θετικής συσχέτισης που προκύπτει στην τροπική ζώνη και στην Νότια Αμερική, είναι το αναμενόμενο. Προκύπτει ωστόσο ένα αξιόλογο μοτίβο το οποίο επαναλαμβάνεται σε όλες τις περιοχές με πιο έντονη εμφάνιση στην Μεσόγειο. Παρουσιάζεται μία καμπύλη καθώς μελετάμε το BA σε βάθος χρόνου. Πιο συγκεκριμένα, τρεις μήνες μετά από την εμφάνιση υψηλών θερμοκρασιών προκύπτει αρνητική συσχέτιση με το BA. Αυτό θα μπορούσε να εξηγηθεί καθώς η ύπαρξη υψηλών θερμοκρασιών συνήθως συνοδεύεται από μειωμένες βροχοπτώσεις και υγρασία. Όλα αυτά σε συνδυασμό, έχουν ως αποτέλεσμα μειωμένη ανάπτυξη της βλάστησης και επομένως λιγότερη παραγωγή καύσιμης ύλης.

Η ταχύτητα του ανέμου είναι ένας παράγοντας που επηρεάζει τα καθεστώτα πυρκαγιών την στιγμή που συμβαίνουν και όχι σε μελλοντικό χρόνο. Αυτό προκύπτει και από τα αποτελέσματα καθώς όλες οι περιοχές, με εξαίρεση την Αυστραλία, παρουσιάζουν θετική συσχέτιση με πιο έντονη στις περιοχές της Νότιας Αμερικής, της Αφρικής και της Τροπικής ζώνης η συσχέτιση είναι θετική. Επίσης προκύπτει ότι η συσχέτιση σε βάθος χρόνου ελαττώνεται ώσπου να γίνει σχεδόν μηδενική. Η ταχύτητα του ανέμου φαίνεται να μην σχετίζεται σημαντικά με το BA στην περιοχή της Αυστραλίας.

4.3 Συσχέτιση των ανωμαλιών του BA και των μετεωρολογικών παραγόντων

Στο σημείο αυτό αφαιρέθηκε η εποχικότητα από της κλιματικές μεταβλητές και το BA και δημιουργήθηκαν καινούργιοι χάρτες που δείχνουν την συσχέτιση των ανωμαλιών τους. Με την αφαίρεση της εποχικότητας προκύπτουν πιο καθαρά αποτελέσματα για την σχέση μεταξύ του BA και των μετεωρολογικών παραγόντων. Όπως θα παρουσιαστεί παρακάτω φαίνεται καθαρά η θετική συσχέτιση που έχει η θερμοκρασία και η ταχύτητα του ανέμου στις πυρκαγιές σε αντίθεση με την σχετική υγρασία και την βροχόπτωση που παρουσιάζει έντονη αρνητική συσχέτιση.



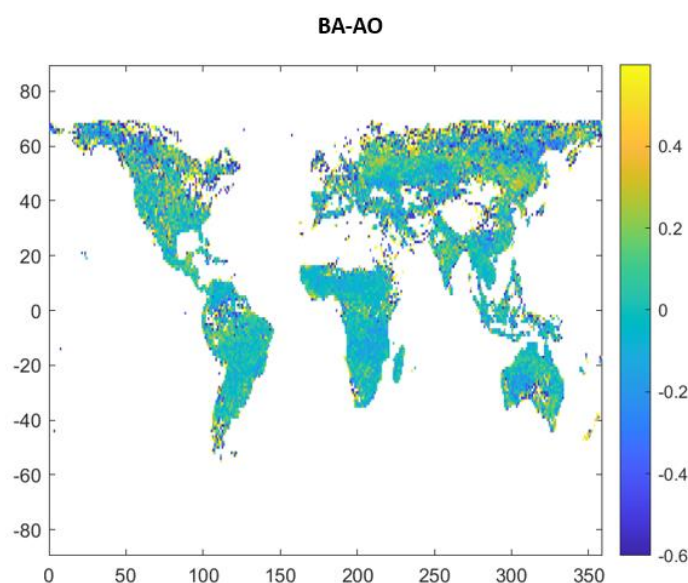
Εικόνα 18: Χάρτες συσχετίσεων των ανωμαλιών της καμένης έκτασης και της βροχόπτωσης (α), της υγρασίας (β), της θερμοκρασίας (γ) και της ταχύτητας του ανέμου (δ).

Οι ανωμαλίες της θερμοκρασίας και της ταχύτητας του ανέμου φαίνεται να έχουν ιδιαίτερες επιδράσεις στα καθεστώτα πυρκαγιών σχεδόν σε παγκόσμια κλίμακα. Ιδιαίτερη είναι η συσχέτιση της θερμοκρασίας με την καμένη έκταση στα βόρεια γεωγραφικά πλάτη, την Βορειοανατολική Αφρική και την Ισημερινή Ασία. Οι ανωμαλίες της βροχόπτωσης έχουν αρνητική συσχέτιση με την καμένη έκταση, κυρίως στην μεγαλύτερη έκταση της Σιβηρίας, την Ισημερινή Ασία και την υπερβόρεια Αμερική. Η ισχυρή αρνητική συσχέτιση της υγρασίας με το BA στην μεγαλύτερη έκταση του χάρτη υποδεικνύει ότι αποτελεί έναν πολύ δραστικό παράγοντα επιρροής για τις πυρκαγιές.

4.4 Συσχέτιση του BA και του δείκτη AO

Λαμβάνοντας υπόψη ότι περιβαλλοντικά φαινόμενα επηρεάζουν το παγκόσμιο κλίμα και άρα τις μετεωρολογικές συνθήκες, χρησιμοποιήθηκαν οι δείκτες του NAO και του AO με στόχο την αναζήτηση συσχέτισης τους με το BA. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν για τους δύο δείκτες δεν διέφεραν και πολύ μεταξύ τους. Στην συνέχεια θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα της συσχέτισης του BA και του δείκτη AO ενώ τα αποτελέσματα του NAO θα βρίσκονται στο παράρτημα. Το φαινόμενο του AO πολλές φορές συσχετίζεται με αυτό του NAO και μάλιστα εξετάζεται αν πρόκειται για ένα φαινόμενο όπου το NAO είναι το Αρκτικό του κομμάτι (Lindsey & Dahlaman, 2022).

Πρώτα από όλα έγινε η συσχέτιση του μη μηδενικού και λογαριθμισμένου BA και του AO σε παγκόσμια κλίμακα. Το αποτέλεσμα φαίνεται στην Εικόνα 19.

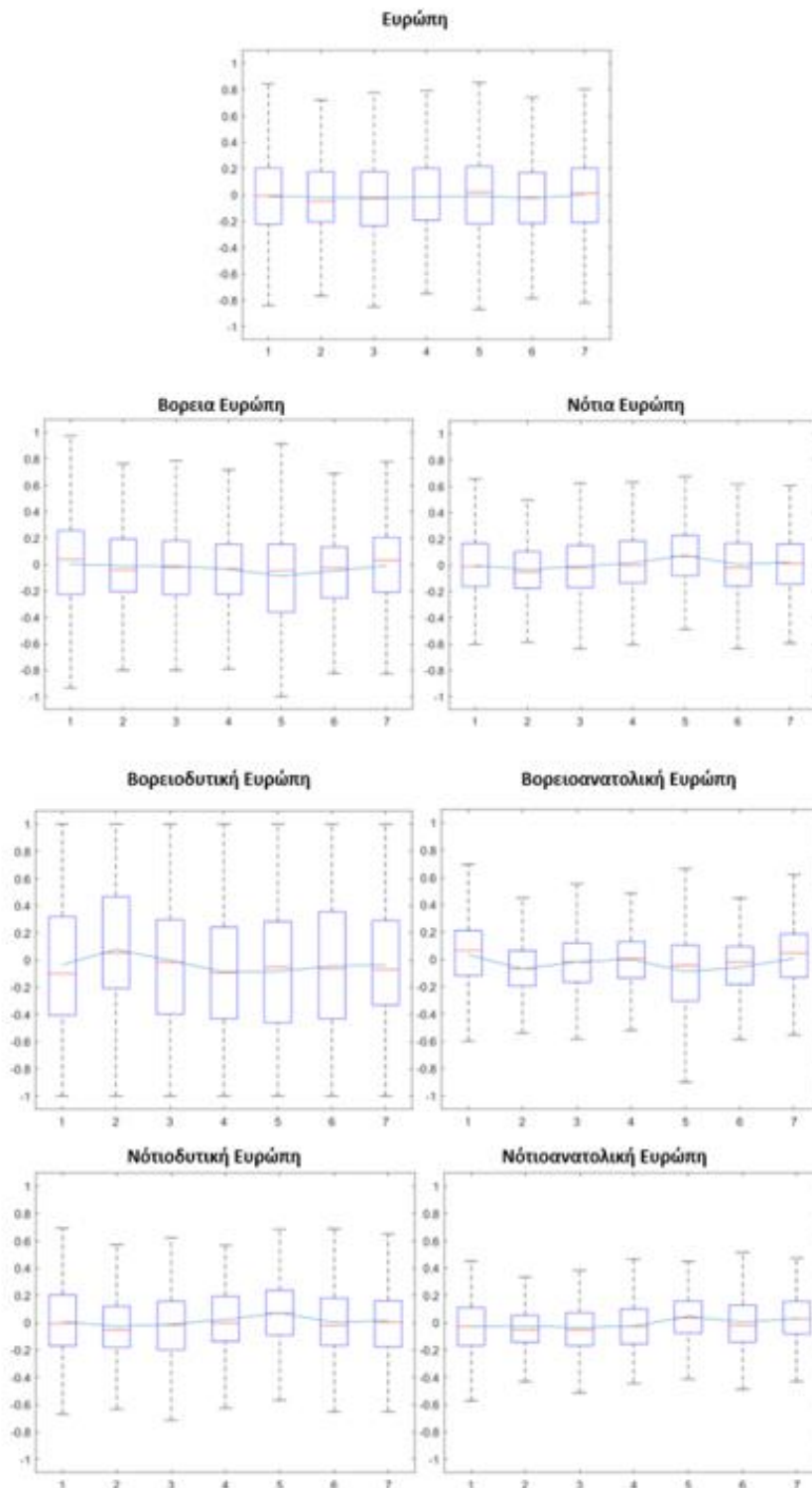


Εικόνα 19: Παγκόσμιος χάρτης όπου παρουσιάζεται η συσχέτιση του BA και του AO.

Οι περιοχές εκτός των τροπικών και υποτροπικών περιοχών είναι που παρουσιάζουν ισχυρή συσχέτιση με τον AO. Το αποτέλεσμα αυτό είναι αναμενόμενο καθώς όταν υπάρχουν υψηλές τιμές του AO παρατηρούνται έντονες βροχοπτώσεις στα βόρεια γεωγραφικά πλάτη δημιουργώντας υγρές συνθήκες που δυσκολεύουν την ύπαρξη πυρκαγιών.

Σε αυτό το σημείο πραγματοποιήθηκε η ίδια συσχέτιση με την δοκιμή της χρονικής υστέρησης για διάστημα ενός έως έξι μηνών με σκοπό την διερεύνηση της επίδρασης του AO σε μελλοντικό BA. Επίσης δοκιμάστηκαν διάφορες κατώφλιες τιμές με την σκέψη ότι ο AO ίσως να επηρεάζει μόνο τις μεγάλες πυρκαγιές. Τα αποτελέσματα δεν εμφάνιζαν ιδιαίτερες συσχετίσεις και καθώς δεν προέκυψαν καινούργια συμπεράσματα δεν κρίθηκε απαραίτητη η παρουσίαση των εν λόγο χαρτών. Ένα παράδειγμα θα παρατεθεί στο παράρτημα.

Στην εικόνα που ακολουθεί παρουσιάζονται τα θηκογράμματα της συσχέτισης του μη μηδενικού και λογαριθμισμένου BA και του AO για την Ευρώπη και τις επιμέρους υποπεριοχές της.



Εικόνα 20: Θηκογράμματα που παρουσιάζουν την συσχέτιση του BA και του AO στην Ευρώπη και στις υποπεριοχές της, με χρονική υστέρηση για διάστημα ενός έως έξι μηνών.

Όπως φαίνεται από την Εικόνα 20 δεν παρατηρείται κάποιο μοτίβο για την συσχέτιση των δύο δεικτών ούτε όταν υπάρχει η ταυτόχρονη παρουσία τους ούτε όταν ο AO προηγείται του BA. Με βάση τα παραπάνω αποτελέσματα προκύπτει ότι πιθανών ο AO δεν έχει κάποια έντονη συσχέτιση με το BA στην περιοχή της Ευρώπης.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Η παρούσα εργασία επικεντρώνεται στην διερεύνηση της συσχέτισης ανάμεσα στο BA και τους κύριους μετεωρολογικούς παράγοντες, τον δείκτη FWI και δύο βασικά κλιματικά φαινόμενα, τον AO και τον NAO, βάσει παρατηρήσεων.

Τα άνωθεν αποτελέσματα αποκαλύπτουν ότι ο δείκτης του FWI σχετίζονται αρκετά καλά με το BA στις περισσότερες περιοχές του πλανήτη. Οι μεγαλύτερες θετικές συσχετίσεις ανάμεσα στο BA και τον FWI παρατηρούνται στις τροπικές και υποτροπικές περιοχές και πιο συγκεκριμένα στην Αφρική, στην κεντρική και Νότια Αμερική και την νοτιοανατολική Ασία. Στο Βόρειο Ημισφαίριο παρατηρείται καλή συσχέτιση στην Ευρασία, αλλά σε μικρότερο βαθμό. Ωστόσο στην περιοχή της Αυστραλίας, ο δείκτης του FWI φαίνεται να μην έχει πολύ καλή απόδοση καθώς ούτε οι μετεωρολογικοί παράγοντες παρουσιάζουν ιδιαίτερα ισχυρή συσχέτιση με το BA.

Από την ανάλυση των επιμέρους κλιματικών μεταβλητών σε παγκόσμιο επίπεδο διαπιστώνεται ότι στην Ευρασία ο πιο δραστικός παράγοντας στο BA είναι η ταχύτητα του ανέμου. Ωστόσο, με την αφαίρεση της εποχικότητας μπορεί να γίνει καλύτερη παρατήρηση της πραγματικής σχέσης και επίδρασής τους στο BA. Η ανωμαλία του BA φαίνεται να παρουσιάζει καλύτερη σύνδεση με τις ανωμαλίες της θερμοκρασίας και της υγρασίας από ότι με την βροχόπτωση και την ταχύτητα του ανέμου. Συνεπώς, η ανωμαλία της θερμοκρασίας και της υγρασίας θα μπορούσαν να λειτουργήσουν ως καλοί δείκτες της ανωμαλίας του BA. Τα αποτελέσματα αυτά φαίνεται να συμφωνούν με εκείνα του (Grillakis, et al., 2022).

Παρόμοιο αποτέλεσμα προκύπτει και από την μελέτη της συσχέτισης των μετεωρολογικών παραγόντων και του BA στις επιμέρους περιοχές. Προέκυψε ότι τόσο η θερμοκρασία όσο και η υγρασία είναι οι παράγοντες με την μεγαλύτερη επιρροή στο BA. Από αυτή την ανάλυση παρατηρείται επίσης ότι η περιοχή της Αφρικής, της Νότιας Αμερικής και της νοτιοανατολικής Ασίας επηρεάζονται θετικά από τον άνεμο και αρνητικά από την βροχόπτωση, περισσότερο από τις υπόλοιπες περιοχές. Αυτό πιθανώς να οφείλεται στην επίδραση άλλων ισχυρών φαινομένων όπως του ENSO. Ενδιαφέρουσα επίσης κρίνεται η εμφάνιση κοινού μοτίβου σε όλες τις περιοχές για την συσχέτιση της θερμοκρασίας και του BA σε βάθος χρόνου.

Τέλος η συσχέτιση ανάμεσα στο BA και τους δείκτες NAO και AO σε παγκόσμιο επίπεδο, δεν οδήγησε σε σημαντικές διαπιστώσεις. Ωστόσο ούτε η ανάλυση που έγινε σε συγκεκριμένες περιοχές, την Ευρώπη και τις υποπεριοχές της και τη Σιβηρία, οδήγησε σε κάποιο αξιοσημείωτο συμπέρασμα. Φαίνεται πως οι κλιματικοί αυτοί δείκτες πιθανώς δεν επηρεάζουν άμεσα το BA και δεν μπορεί να οριστεί κάποια σχέση μεταξύ τους.

6. ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ

Προκειμένου να υπάρξει μια ολοκληρωμένη εικόνα θα ήταν θεμιτό να πραγματοποιηθούν οι ακόλουθες προτάσεις.

Η συσχέτιση του BA με τον δείκτη της Νότιας Κύμανσης SOI θα μπορούσε να δώσει σημαντικά ευρήματα ειδικά στην περιοχή της Νότιας Αμερικής και της Νοτιοανατολικής Ασίας. Ο δείκτης SOI αναφέρεται στην Νότια Ταλάντωση El Nino (ENSO, El Nino – Southern Oscillation), η οποία είναι ένα σημαντικό φαινόμενο μεταξύ ωκεανού και ατμόσφαιρας και συμβάλει στην παγκόσμια κλιματική μεταβλητότητα. Κατά τις τελευταίες δεκαετίες παρατηρείται μία τάση προς πιο ακραία και συχνά φαινόμενα El Nino (Alencar, Nepstad, & Diaz, 2006) γεγονός που θα μπορούσε να προκαλέσει αύξηση των πυρκαγιών τόσο στις περιοχές της Ν. Αμερικής και της Νοτιοανατολικής Ασίας όσο και σε παγκόσμια κλίμακα.

Από τα αποτελέσματα της παρούσας μελέτης προέκυψε ένα μοτίβο ανάμεσα στην θερμοκρασία και το BA με χρονική υστέρηση. Το συγκεκριμένο μοτίβο παρατηρείται σε όλες τις περιοχές που αναλύθηκαν και δίνει το έναυσμα για περαιτέρω μελέτη.

Ένας παράγοντας που παίζει σημαντικό ρόλο στην δημιουργία και την εξάπλωση των πυρκαγιών είναι η βλάστηση και πιο συγκεκριμένα η υγρασία μέσα σε αυτή και στο έδαφος. Η ανάπτυξη και η εφεκτικότητα της βλάστησης εξαρτώνται σημαντικά από την εδαφική υγρασία. Τα χαμηλά ποσοστά υγρασία στο έδαφος συνεπάγονται με εύφλεκτη καύσιμη ύλη και το αντίθετο. Θα είχε ενδιαφέρον να συσχετιστεί το BA με την εδαφική υγρασία ταυτόχρονα αλλά και με χρονική καθυστέρηση.

Τα καθεστώς πυρκαγιάς επηρεάζονται, εκτός των άλλων και από τις αλλαγές στη χρήση γης (Heyerdahl & Alvarado, 2003) όπως η συγκομιδή ξυλεία, η διάνοιξη δρόμων και η γεωργία (Morton, et al., 2008). Αυτό καθιστά τις χρήσεις γης σημαντικές παραμέτρους ώστε να λαμβάνονται υπόψη όταν πραγματοποιούνται οι συσχετίσεις, καθώς μπορεί το αποτέλεσμα να οδηγήσει σε πιο αναλυτική και επεξηγηματική ερμηνεία.

Ένα πεδίο που χρίζει διερεύνησης είναι το αν υπάρχει επίδραση των πυρκαγιών στις μελλοντικές καιρικές συνθήκες, ειδικά στο σύντομο μέλλον. Για να μελετηθεί αυτό θα μπορούσε να γίνει συσχέτιση του BA και των μελλοντικών μετεωρολογικών παραγόντων.

Όσο αναφορά τα δεδομένα καλό είναι να πραγματοποιηθούν παρόμοιες συσχετίσεις με αυτές της παρούσας εργασίας αλλά με διαφορετικό σετ δεδομένων τόσο κλιματικών παραγόντων και FWI όσο και BA.

Συνήθως οι πυρκαγιές επηρεάζονται από περισσότερους από έναν παράγοντες. Λαμβάνοντας υπόψη αυτό θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί η μέθοδος της Πολλαπλής Γραμμικής Παλινδρόμησης (Multiple linear regression) ώστε να εξεταστεί η σχέση του BA με περισσότερες από μία μεταβλητές κάθε φορά.

7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

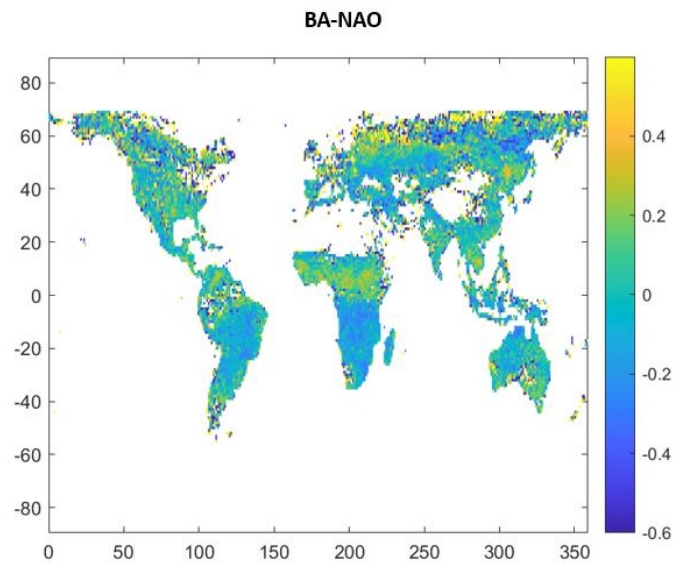
- Alencar, A., Nepstad, D., & Diaz, M. (2006). Forest Understory Fire in the Brazilian Amazon in ENSO and Non-ENSO Years: Area Burned and Committed Carbon Emissions. *Earth Interact*, 1-17.
- Andela, N., & Van Der Werf, G. (2014). Recent trends in African fires driven by cropland expansion and El Nino to La Nina transition. *Nature Climate Change*, 4(9): 791-795.
- Barnston, A., & Livezey, R. (1987). Classification, Seasonality and Persistence of Low-Frequency Atmospheric Circulation Patterns. *Monthly Weather Review*.
- Barro, S., & Conard, S. (1991). Fire effects on California chaparral systems: an overview. *Environment International*, 135-149.
- Bistinas, I., Harrison, S., Prentice, I., & Pereira, J. (2014). Causal relationships versus emergent patterns in the global controls of fire frequency. *Biogeosciences*.
- Bond, W., & Keeley, J. (2005). Fire as a global 'herbivore': the ecology and evolution of flammable ecosystems. *TRENDS in Ecology and Evolution*.
- Bond, W., Woodward, F., & Midgley, G. (2005). The global distribution of ecosystems in a world without fire. *New Phytol*.
- Bowman, D. M. (2009). Fire in the Earth System. *Science*.
- Box plot. (2022, May 13). Ανάκτηση από Wikipedia: https://en.wikipedia.org/wiki/Box_plot
- Burned Area Products. (χ.χ.). Ανάκτηση από MODIS ACTIVE FIRE AND BURNED AREA PRODUCTS: <https://modis-fire.umd.edu/ba.html>
- Cao, Z. (2019). Chapter 9 - Assessment methods for air pollution exposure. In X. Z. Lixin Li (Editor), *Spatiotemporal Analysis of Air Pollution and Its Application in Public Health* (pp. 197-206). Elsevier.
- Chen, F., Niu, S., Tong, X., Zhao, J., Sun, Y., & He, T. (2014). The Impact of Precipitation Regimes on Forest Fires in Yunnan Province, Southwest China. *The Scientific World Journal*.
- DeBano, L., Neary, D., & Ffolliott, P. (1998, May 12). *Fire effects on ecosystems*. Canada: John Wiley & Sons. Ανάκτηση από Wikipedia: <https://en.wikipedia.org/wiki/Wildfire>
- Dlamini, W. (2010). *Natural and Anthropogenic Disasters*. Springer, Dordrecht.
- Engel, R. (2020, Jule 23). *What is a fire triangle*. Ανάκτηση από Fire Rescue 1: <https://www.firerescue1.com/fire-products/education/articles/what-is-a-fire-triangle-4HSY7X5xagWZR5KQ/>
- Field, R. (2020). Evaluation of Global Fire Weather Database reanalysis and short-term forecast products. *Natural Hazards and Earth System Sciences*.
- Flannigan, M. D. (2009). Implications of changing climate for global wildland fire. *International Journal of Wildland Fire*.
- Flannigan, M., Stocks, B., & Wotton, B. (2000). Climate change and forest fires. *The Science of the Total Environment*, 262(3): 221-230.
- fria. (2022, May 15). Ανάκτηση από Παράγοντες που επηρεάζουν την συμπεριφορά των δασικών πυρκαγιών: <http://www.fria.gr/mmfria/index.php?id=100&catid=38&lan=GR&tl=CATEGORYID>
- Gelaro, R. (2017). The Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications, Version 2 (MERRA-2). *Journal of Climate*.
- Giglio, L. (2018). The Collection 6 MODIS burned area mapping algorithm and product. *Remote Sensing of Environment*.
- Giglio, L., Schroeder, W., Hall, J., & Justice, C. (2020). *MODIS Collection 6 Active Fire Product User's Guide Revision V*. Nasa.
- Goldammer, J., & De Ronde, C. (2004). *Wildland Fire Handbook of Sub-Saharan Africa*. Global Fire Monitoring Center.

- Grillakis, M., Voulgarakis, A., Rovithakis, A., Seiradakis, K., Koutroulis, A., Field, R., . . . Lazaridis, M. (2022). Climate drivers of global wildfire burned area. *Environmental Research Letters*.
- Heyerdahl, E., & Alvarado, E. (2003). Influence of Climate and Land Use on Historical Surface Fires in Pine-Oak Forests, Sierra Madre Occidental, Mexico. Στο T. T. Veblen, *Fire and Climatic Change in Temperate Ecosystems of the Western Americas* (σσ. 196-217).
- Hurrell, J. (1995). Decadal Trends in the North Atlantic Oscillation. *SCIENCE*.
- Justice, C. (1998). The Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS): land remote sensing for global change research. *IEEE*.
- Kitzberger, T., Falk, D., Westerling, A., & Swetnam, T. (2017). Direct and indirect climate controls predict heterogeneous early-mid 21st century wildfire burned area across western and boreal North America. *PLOS ONE*.
- Koutsias, N., Xanthopoulos, G., Founda, D., Xystrakis, F., Nioti, F., Pleniou, M., . . . Arianoutsou, M. (2013). On the relationships between forest fires and weatherconditions in Greece from long-term national observations (1894–2010). *International Journal of Wildland Fire*.
- Krawchuk, M., Moritz, M., Parisien, M.-A., Van Dorn, J., & Hayhoe, K. (2009). Global Pyrogeography: the Current and Future Distribution of Wildfire. *PLOS ONE*.
- Kuhn-Régnier, A., Voulgarakis, A., Nowack, P., Forkel, M., Prentice, I., & Harrison, S. (2021). The importance of antecedent vegetation and drought conditions as global drivers of burnt area. *Biogeosciences*.
- Kushla, J., & Ripple, W. (1997). The role of terrain in a fire mosaic of a temperate coniferous forest. *Forest Ecology and Management*, 97-107.
- Lindsey, R., & Dahlanan, L. (2022, May 12). *Climate Variability: North Atlantic Oscillation*. Ανάκτηση από Climate.gov: <https://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/climate-variability-north-atlantic-oscillation>
- Lundeberg, S. (2022, May 12). *Oregon State scientists collaborate on road map for adapting dry forests to new fire regimes*. Ανάκτηση από Oregon State University: <https://today.oregonstate.edu/news/oregon-state-scientists-collaborate-road-map-adapting-dry-forests-new-fire-regimes>
- MCD64A1v006. (2022, 5 19). Ανάκτηση από NASA LP DAAC: <https://lpdaac.usgs.gov/products/mcd64a1v006/>
- Morton, D. C., Defries, R. S., Randerson, J. T., Giglio, L., Schroeder, W., & Van Der Werf, G. R. (2008). Agricultural intensification increases deforestation fire activity in Amazonia. *Global Change Biology*.
- Nielsen-Pincus, M., Moseley, C., & Gebert, K. (2013). Job Growth and Loss Across Sectors and Time in the Western US: The Impact of Large Wildfires. *Forest Policy and Economics*.
- North Atlantic Oscillation*. (2022, May 12). Ανάκτηση από Climate Prediction Center: <https://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/teledoc/nao.shtml>
- Oliveras, I., Gracia, M., Moré, G., & Retana, J. (2009). Factors influencing the pattern of fire severities in a large wildfire under extreme meteorological conditions in the Mediterranean basin. *International Journal of Wildland Fire*.
- Patterns in Arctic Weather and Climate*. (2020, May 4). Retrieved from National Snow & Ice Data Center : https://nsidc.org/cryosphere/arctic-meteorology/weather_climate_patterns.html
- Pechony, O., & Shindell, D. (2009). Fire parameterization on a global scale. *JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH*.
- Price, C., & Rind, D. (1994). The Impact of a 2 × CO₂ Climate on Lightning-Caused Fires. *Journal of Climate*, 1484-1494.
- Rafferty, J. P. (2022, May 19). *North Atlantic Oscillation*. Retrieved from britannica: <https://www.britannica.com/science/North-Atlantic-Oscillation>

- Research Gate* . (2022, May 13). Ανάκτηση από
https://www.researchgate.net/figure/Structure-of-the-Fire-Weather-Index-FWI-System_fig3_220419284
- Research Gate*. (2022, May 13). Ανάκτηση από
https://www.researchgate.net/figure/Schematic-of-the-Arctic-Oscillation-and-its-effects-adapted-from-AMAP-2012-with_fig2_327309091
- Rosenthal, A., Stover, E., & Haar, R. (2021). Health and social impacts of California wildfires and the deficiencies in current recovery resources: An exploratory qualitative study of systems-level issues. *PLOS ONE*.
- Roy, D., Giglio, L., Kendall, J., & Justice, C. (1999). A multitemporal active-fire based burn scar detection algorithm. *International Journal of Remote Sensing*.
- Salvati , L., Ferrara , A., Mancino, G., Kelly , C., Chianucci , F., & Corona , P. (2015). A multidimensional statistical framework to explore seasonal profile, severity and land-use preferences of wildfires in a Mediterranean country. *International Forestry Review*, 17: 485-497.
- TNAU Agritech Portal*. (2022, May 12). Retrieved from Forest fire and its management:
https://agritech.tnau.ac.in/forestry/forest_fire_index.html
- Trenbert, K., Branstator, G., Karoly, D., Kumar, A., Lau, N.-C., & Ropelewski , C. (1998). Progress during TOGA in understanding and modeling global teleconnections associated with tropical sea surface temperatures. *Journal of Geophysical research*.
- Voulgarakis, A., & Field, R. D. (2015). Fire Influences on Atmospheric Composition, Air Quality and Climate. *Current Pollution Reports*.
- Wagner, V. (1974). *STRUCTURE OF THE CANADIAN*. Ottawa: Canadian Forestry Service.
- Wagner, V. C. (1987). Development and Structure of the Canadian Forest FireWeather Index System.
- Westerling, A., Hidalgo, H., Cayan, D., & Swetnam, T. (2006). Warming and Earlier Spring Increase. *Science*.
- Wikimedia Commons*. (2022, May 12). Ανάκτηση από Crown fire.jpg:
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Crown_fire.jpg
- Zubkova, M. (2021). Conflict and Climate: Drivers of Fire Activity in Syria in the Twenty-First Century. *Earth Interactions*.

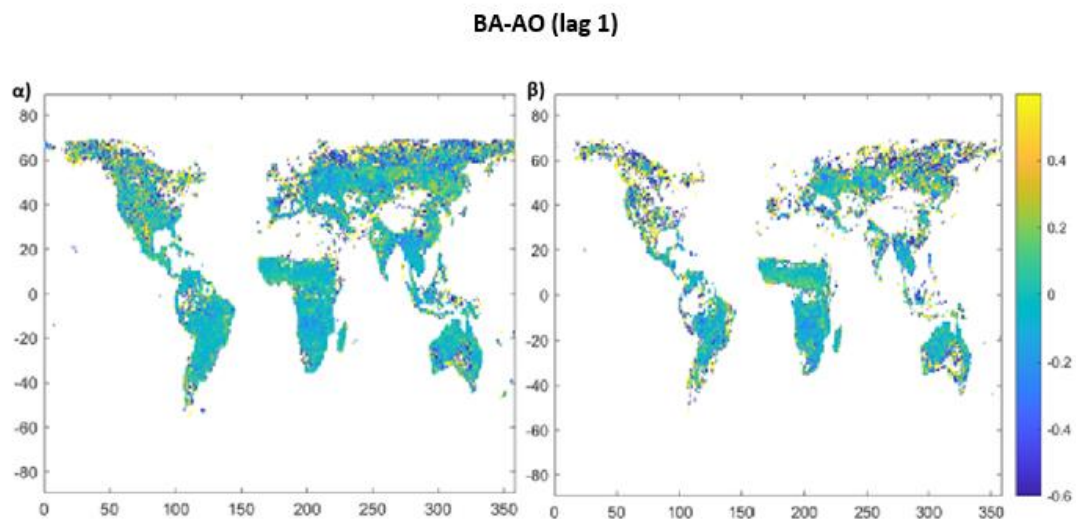
8. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Στον ακόλουθο χάρτη παρουσιάζεται η συσχέτιση των δεικτών BA και NAO.



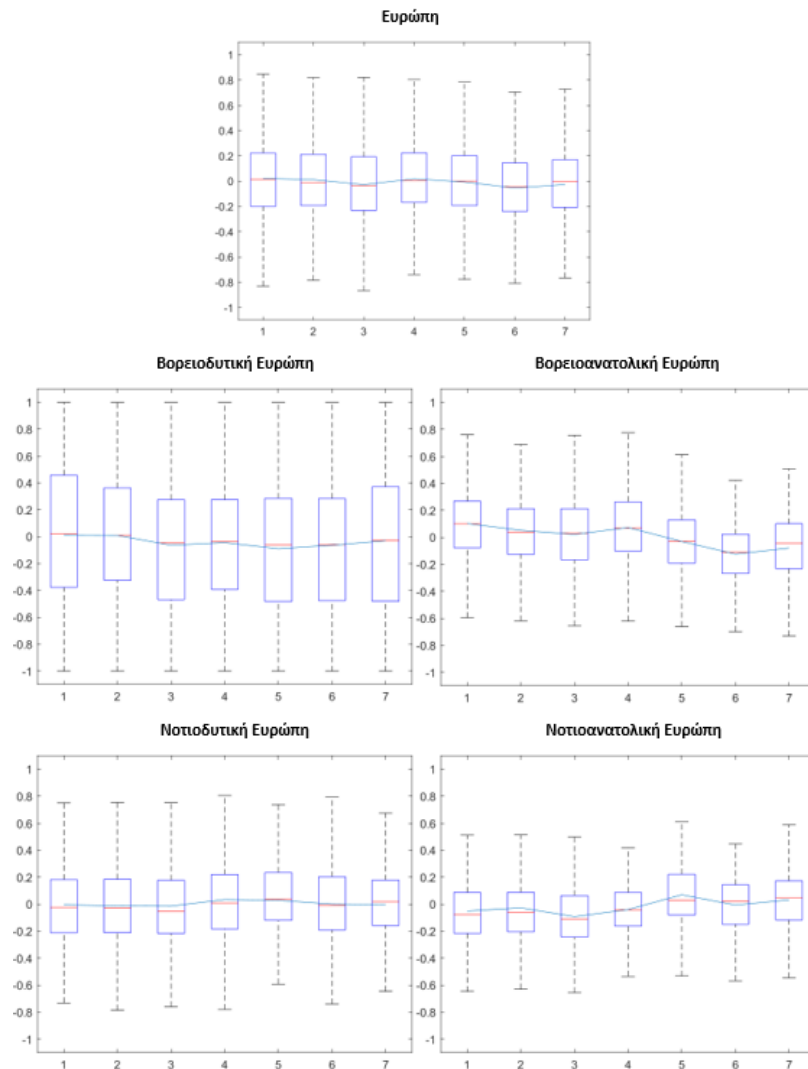
Εικόνα 21: Παγκόσμιος χάρτης με την συσχέτιση ανάμεσα στο BA και τον δείκτη NAO.

Παρακάτω παρουσιάζεται ένα παράδειγμα για την συσχέτιση του BA και του AO με χρονικό βήμα υστέρησης ενός μήνα και δύο διαφορετικές κατώφλιες τιμές. Παρόμοια αποτελέσματα προέκυψαν και για διαφορετικά lag που μελετήθηκαν.



Εικόνα 22: Παγκόσμιος χάρτης με την συσχέτιση του BA και του AO με χρονική υστέρηση για διάστημα ενός μηνός και κατώφλιες τιμές. Η εικόνα (α) έχει μικρότερη κατώφλια τιμή από την εικόνα (β).

Στην εικόνα 23. φαίνονται τα θηκογράμματα που έχουν προκύψει από τη συσχέτισης του μη μηδενικού και λογαριθμισμένου ΒΑ και του ΑΟ για την Ευρώπη και τις επιμέρους υποπεριοχές της.



Εικόνα 23: Θηκογράμματα που παρουσιάζουν την συσχέτιση του ΒΑ και του ΑΟ στην Ευρώπη και στις υποπεριοχές της, με χρονική υστέρηση για διάστημα ενός έως έξι μηνών.