



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Συσχέτιση καμένων εκτάσεων από πυρκαγιές με τον
δείκτη Οπτικού Βάθους Αιωρούμενων Σωματιδίων
(AOD) σε παγκόσμια κλίμακα

ΤΗΣ

ΠΑΡΑΣΚΕΥΟΠΟΥΛΟΥ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΑΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΒΟΥΛΓΑΡΑΚΗΣ ΑΠΟΣΤΟΛΟΣ

ΧΑΝΙΑ ΜΑΡΤΙΟΣ, 2024

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.

Τριμελής Επιτροπή

- **Βουλγαράκης Απόστολος**

Αναπληρωτής Καθηγητής Σχολής Χημικών Μηχανικών και Μηχανικών Περιβάλλοντος

- **Λαζαρίδης Μιχαήλ**

Καθηγητής Σχολής Χημικών Μηχανικών και Μηχανικών Περιβάλλοντος

- **Γρυλλάκης Εμμανουήλ**

Εργαστηριακό Διδακτικό Προσωπικό (Ε.Δ.Ι.Π.)

Ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στο πλαίσιο του προγράμματος προπτυχιακών σπουδών της σχολής Χημικών Μηχανικών και Μηχανικών Περιβάλλοντος του Πολυτεχνείου Κρήτης, στο Εργαστήριο Ατμοσφαιρικού Περιβάλλοντος και Κλιματικής Αλλαγής.

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή της διπλωματικής μου εργασίας, κύριο Βουλγαράκη Απόστολο για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε, την πολύτιμη καθοδήγηση και το χρόνο που αφιέρωσε καθ' όλη τη διάρκεια της συνεργασίας μας. Θα ήθελα επίσης, να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον κύριο Γρυλλάκη Μανώλη, για την πολύτιμη βοήθεια που μου προσέφερε σε όλα τα στάδια της εργασίας μου, αφιερώνοντας χρόνο για όλες τις απορίες μου. Οι εμπειρίες μου από το εργαστήριο, μου άνοιξαν μια πόρτα στον κόσμο της έρευνας, γεγονός για το οποίο είμαι ευγνώμων και θα με συντροφεύσει στη μετέπειτα ζωή μου. Ακόμα, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά, τον κύριο Λαζαρίδη Μιχαήλ, για τον χρόνο που διέθεσε για την αξιολόγηση της εργασίας και της παρουσίας της.

Ευχαριστώ τις φίλες μου, για τα χρόνια που πορευθήκαμε μαζί, αποτελώντας αναπόσπαστο κομμάτι της φοιτητικής μου ζωής.

Τέλος, το μεγαλύτερο ευχαριστώ το οφείλω στους γονείς μου, Παρασκευά και Μαρία για τα εφόδια και την αμέριστη στήριξή τους με κάθε μέσο, καθώς και στην αδερφή μου Αθανασία για όλη την πολύτιμη υποστήριξη που μου προσέφερε, στο πολυετές αυτό ταξίδι.

Περίληψη

Οι πυρκαγιές αποτελούν μέρος του κύκλου ζωής των οικοσυστημάτων του πλανήτη, διαδραματίζοντας καταλυτικό ρόλο στη διαμόρφωση της χλωρίδας και της πανίδας. Ως φαινόμενο, μπορεί να αποβεί καταστροφικό για το περιβάλλον και την ανθρώπινη υγεία, έχοντας μια αμφίδρομη σχέση επιδείνωσης με την κλιματική αλλαγή. Βάσει μελετών, προβλέπεται ότι κάτω από ένα κλίμα θέρμανσης, ολοένα και περισσότερες περιοχές του πλανήτη θα είναι ευάλωτες απέναντι στις πυρκαγιές.

Συγχρόνως, οι πυρκαγιές αποτελούν σημαντική πηγή ατμοσφαιρικής ρύπανσης, απελευθερώνοντας αιωρούμενα σωματίδια τα οποία επιδρούν στην εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία και κατά συνέπεια την θερμοκρασία της γης, ενώ ακόμα παρουσιάζουν τοξική δράση για το ανθρώπινο αναπνευστικό και καρδιαγγειακό σύστημα. Για την ποσοτικοποίηση των αιωρούμενων σωματιδίων στον ατμοσφαιρικό αέρα, έχει δημιουργηθεί ο δείκτης Οπτικού Βάθους Αιωρούμενων Σωματιδίων (Aerosol Optical Depth- AOD), ο οποίος χρησιμοποιείται ευρέως για την εκτίμηση επίδρασής τους.

Στην παρούσα μελέτη, στόχος είναι η συσχέτιση των πυρκαγιών και των αιωρούμενων σωματιδίων, στα πλαίσια της ατμοσφαιρικής ρύπανσης και της κλιματικής αλλαγής, για την επιπλέον κατανόηση των συνεπειών αλλά και των κινδύνων. Βάσει αυτού, διερευνήθηκε η σχέση μεταξύ της καμένης έκτασης (BA) από πυρκαγιές και του δείκτη AOD, σε παγκόσμια κλίμακα, κάνοντας χρήση δορυφορικών δεδομένων σε βάθος δεκαοκτώ ετών.

Τα αποτελέσματα, αποδεικνύουν πολύ καλή συσχέτιση μεταξύ του BA και του δείκτη AOD, κυρίως στις τροπικές και υποτροπικές περιοχές του πλανήτη, σε εποχιακό επίπεδο. Αφαιρώντας ωστόσο την εποχικότητα, η συσχέτιση μειώνεται δραματικά, εφόσον οι κλιματικές συνθήκες επηρεάζουν την εμφάνιση πυρκαγιών, καθώς και την αύξηση ή μείωση του AOD. Επιλέγοντας συγκεκριμένες περιοχές του πλανήτη που πλήττονται διαχρονικά από πυρκαγιές, για περαιτέρω ανάλυση, η σχέση του BA και του AOD, δείχνει να έχει θετική τάση συσχέτισης στις πλείστες των περιπτώσεων, ωστόσο δεν προκύπτει μια τόσο ισχυρή σχέση μεταξύ των δεικτών.

Abstract

Wildfires are part of the lifecycle of the planet's ecosystems, playing a catalytic role in shaping flora and fauna. As a phenomenon, it can be catastrophic for the environment and human health, having a two-way relationship of deterioration with climate change. Studies predict that under a warming climate, more and more areas of the world will be vulnerable to wildfires.

At the same time, wildfires are an important source of air pollution, releasing particulate matter that affect the incoming solar radiation and consequently the Earth's temperature, while also having toxic effects on the human respiratory and cardiovascular system. To quantify aerosols in ambient air the Aerosol Optical Depth index has been created and is widely used to assess their impact.

In this study, the aim is to correlate wildfires and aerosols, in the context of air pollution and climate change, for further understanding the consequences and risks. Based on this, the relationship between burned area (BA) from wildfires and the AOD index, was analyzed on a global scale using eighteen years of satellite data.

The results, demonstrate a very good correlation between BA and AOD index, especially in tropical and subtropical regions of the world, seasonally. Removing seasonality, the correlation decreases dramatically, since climatic conditions influence the occurrence of fires as well as the increase in AOD. By generating scatter plots for specific regions of the world that are affected by fires over time, the relationship between BA and AOD, shows a positive correlation trend in most cases, however, not as strong a relationship emerges.

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες	3
Περίληψη	4
Abstract	5
Εισαγωγή.....	10
Γενικά Στοιχεία.....	10
Σκοπός.....	11
Θεωρητικό Υπόβαθρο	12
1.1 Κατηγοριοποίηση δασικών πυρκαγιών	12
1.2 Αίτια πρόκλησης δασικών πυρκαγιών.....	14
1.3 Κλιματική αλλαγή και πυρκαγιές.....	16
1.4 Αιωρούμενα σωματίδια.....	17
1.4.1 Ρύπανση από αιωρούμενα σωματίδια.....	18
1.4.2 Οπτικό Βάθος Αιωρούμενων Σωματιδίων (Aerosol Optical Depth-AOD).....	19
1.4.3 Επίδραση ερημικής σκόνης	21
1.5 Πυρκαγιές ανά τον κόσμο.....	22
1.6 Επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία.....	28
Μεθοδολογία.....	30
2.1 Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS)	31
2.2 Επεξεργασία Δεδομένων με τη χρήση MATLAB	32
2.3 Δισδιάστατος Συντελεστής Συσχέτισης	33
2.4 Συντελεστής Προσδιορισμού (R^2).....	33
2.5 Διάγραμμα Διασποράς	34
2.6 Μεθοδολογία που ακολουθήθηκε	34
2.6.1 Ομαδοποίηση δεδομένων	34
2.6.2 Λογαρίθμηση τιμών καμένης έκτασης (BA)	34
2.6.3 Αφαίρεση μηδενικών τιμών.....	34
2.6.4 Μέσες τιμές δεικτών.....	35
2.6.5 Αφαίρεση εποχικότητας	35
2.6.6 Διαγράμματα διασποράς.....	36
2.7 Διάγραμμα Ροής	37
Αποτελέσματα	38
3.1 Καμένη έκταση (BA) και δείκτης οπτικού βάθους αιωρούμενων σωματιδίων (AOD).....	38
3.2 Συσχέτιση BA-AOD	43
3.2 Συσχέτιση ανωμαλιών του BA και του AOD	47

3.3 Διαγράμματα Διασποράς.....	48
Συμπεράσματα.....	67
Βιβλιογραφία	68

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1: Υπόγεια Πυρκαγιά (Ontario.ca, 2020)	12
Εικόνα 2: Έρπουσα Πυρκαγιά (Ontario.ca, 2020).....	13
Εικόνα 3: Επικόρυφη Πυρκαγιά (Ontario.ca, 2020).....	13
Εικόνα 4: Τρίγωνο της φωτιάς (Ontario.ca, 2020).....	14
Εικόνα 5: Η μεταβολή των παραγόντων πυρκαγιάς χωρικά και χρονικά (Higuera, 2015).....	15
Εικόνα 6: Δορυφορική τηλεπισκόπηση του AOD: Από την λήψη δεδομένων έως τα προϊόντα έρευνας του AOD (Wei, Chang, Bai & Gao, 2019)	20
Εικόνα 7. Κορύφωση της εποχής πυρκαγιών, νοτιοκεντρική Αφρική, 22 Αυγούστου 2019, NASA earth observatory	22
Εικόνα 8. Καπνός από πυρκαγιές στα βορειοανατολικά της χώρας κινείται πάνω απ' τη Μεσόγειο, 22 Αυγούστου 2023, NASA earth observatory	23
Εικόνα 9. Χάρτης ενεργών πυρκαγιών στο τροπικό δάσος του Αμαζονίου στη Βραζιλία, όπως παρατηρήθηκε από τους Terra και Aqua MODIS μεταξύ 15-22 Αυγούστου 2019.	24
Εικόνα 10. Μεγάλες εκπομπές μονοξειδίου του άνθρακα από δασικές πυρκαγιές της Σιβηρίας που εξαπλώνονται σε όλη την Ασία, βάσει δεδομένων NASA, 12 Αυγούστου 2019, Reuters Graphics	25
Εικόνα 11. Καπνός από τις πυρκαγιές στην Αυστραλία, Ιανουάριος 2020, NASA earth observatory	26
Εικόνα 12 . Καπνός από πυρκαγιές τυρφώνων στην Ινδονησία, 14 Σεπτεμβρίου 2019, NASA earth observatory	27
Εικόνα 13. Καπνός από πυρκαγιές στην Καλιφόρνια, NASA earth observatory	28
Εικόνα 14. Εικόνα 14. Διάγραμμα Ροής της ανάλυσης δεδομένων που ακολουθήθηκε στην εργασία	37
Εικόνα 15. Παγκόσμιοι χάρτες για: (α) Μέση τιμή BA 2001-2018 (β) Μέση τιμή AOD 2001-2018	38
Εικόνα 16. Παγκόσμιοι χάρτες για την μέση τιμή του BA για τις εποχές: α) MAM β) IIA γ) ΣΟΝ δ) ΔΙΦ	39
Εικόνα 17. Παγκόσμιοι χάρτες για την μέση τιμή του AOD για τις εποχές: α) MAM β) IIA γ) ΣΟΝ δ) ΔΙΦ	41
Εικόνα 18. Παγκόσμιος χάρτης συσχέτισης BA-AOD την περίοδο 2001-2018.....	43

Εικόνα 19. Παγκόσμιοι χάρτες συσχέτισης BA-AOD ανά εποχή: α) ΜΑΜ β) ΙΙΑ γ) ΣΟΝ δ) ΔΙΦ	45
Εικόνα 20. Παγκόσμιοι χάρτες συσχέτισης ανωμαλιών BA-AOD ανά εποχή: α) ΜΑΜ β) ΙΙΑ γ) ΣΟΝ δ) ΔΙΦ	47
Εικόνα 21. Παγκόσμιος χάρτης με την περιοχή της Βόρειας Αφρικής που εξετάστηκε	49
Εικόνα 22. Παγκόσμιος χάρτης με την περιοχή της Κεντρικής Αφρικής που εξετάστηκε.....	51
Εικόνα 23. Παγκόσμιος χάρτης με την περιοχή της Νότιας Αφρικής που εξετάστηκε	53
Εικόνα 24. Παγκόσμιος χάρτης με την περιοχή της Νότιας Αμερικής που εξετάστηκε	55
Εικόνα 25. Παγκόσμιος χάρτης με την περιοχή της Βόρειας Αμερικής που εξετάστηκε	57
Εικόνα 26. Παγκόσμιος χάρτης με την περιοχή της Ευρώπης που εξετάστηκε	59
Εικόνα 27. Παγκόσμιος χάρτης με την περιοχή της Σιβηρίας που εξετάστηκε.....	61
Εικόνα 28. Παγκόσμιος χάρτης με την περιοχή της Νοτιοανατολικής Ασίας που εξετάστηκε.....	63
Εικόνα 29. Παγκόσμιος χάρτης με την περιοχή της Αυστραλίας που εξετάστηκε.....	65

Κατάλογος Διαγραμμάτων

Διάγραμμα 1. Συγκεντρωτικό διάγραμμα διασποράς BA-AOD για την Βόρεια Αφρική την περίοδο 2001-2018.....	49
Διάγραμμα 2. Διαγράμματα διασποράς BA-AOD για την Βόρεια Αφρική τις εποχές: α) MAM, β) ΙΙΑ, γ) ΣΟΝ, δ) ΔΙΦ	50
Διάγραμμα 3. Συγκεντρωτικό διάγραμμα διασποράς BA-AOD για την Κεντρική Αφρική την περίοδο 2001-2018.....	51
Διάγραμμα 4. Διαγράμματα διασποράς BA-AOD για την Κεντρική Αφρική τις εποχές: α) MAM, β) ΙΙΑ, γ) ΣΟΝ, δ) ΔΙΦ	52
Διάγραμμα 5. Συγκεντρωτικό διάγραμμα διασποράς BA-AOD για την Νότια Αφρική την περίοδο 2001-2018	53
Διάγραμμα 6. Διαγράμματα διασποράς BA-AOD για την Νότια Αφρική τις εποχές: α) MAM, β) ΙΙΑ, γ) ΣΟΝ, δ) ΔΙΦ	54
Διάγραμμα 7. Συγκεντρωτικό διάγραμμα διασποράς BA-AOD για την Νότια Αμερική την περίοδο 2001-2018.....	55
Διάγραμμα 8. Διαγράμματα διασποράς BA-AOD για την Νότια Αμερική τις εποχές: α) MAM, β) ΙΙΑ, γ) ΣΟΝ, δ) ΔΙΦ	56
Διάγραμμα 9. Συγκεντρωτικό διάγραμμα διασποράς BA-AOD για την Βόρεια Αμερική την περίοδο 2001-2018.....	57
Διάγραμμα 10. Διαγράμματα διασποράς BA-AOD για την Βόρεια Αμερική τις εποχές: α) MAM, β) ΙΙΑ, γ) ΣΟΝ, δ) ΔΙΦ	58
Διάγραμμα 11. Συγκεντρωτικό διάγραμμα διασποράς BA-AOD για την Ευρώπη την περίοδο 2001-2018	59
Διάγραμμα 12. Διαγράμματα διασποράς BA-AOD για την Ευρώπη τις εποχές: α) MAM, β) ΙΙΑ, γ) ΣΟΝ, δ) ΔΙΦ	60
Διάγραμμα 13. Συγκεντρωτικό διάγραμμα διασποράς BA-AOD για την Σιβηρία την περίοδο 2001-2018.....	61
Διάγραμμα 14. Διαγράμματα διασποράς BA-AOD για την Σιβηρία τις εποχές: α) MAM, β) ΙΙΑ, γ) ΣΟΝ, δ) ΔΙΦ	62
Διάγραμμα 15. Συγκεντρωτικό διάγραμμα διασποράς BA-AOD για την Νοτιοανατολική Ασία την περίοδο 2001-2018.....	63
Διάγραμμα 16. Διαγράμματα διασποράς BA-AOD για την Νοτιοανατολική Ασία τις εποχές: α) MAM, β) ΙΙΑ, γ) ΣΟΝ, δ) ΔΙΦ	64
Διάγραμμα 17. Συγκεντρωτικό διάγραμμα διασποράς BA-AOD για την Αυστραλία την περίοδο 2001-2018	65
Διάγραμμα 18. Συγκεντρωτικό διάγραμμα διασποράς BA-AOD για την Αυστραλία την περίοδο 2001-2018	66

Εισαγωγή

Γενικά Στοιχεία

Οι πυρκαγιές αποτελούν ένα φυσικό φαινόμενο, που διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στη διαμόρφωση του περιβάλλοντος και τη διατήρηση της βιοποικιλότητας παγκοσμίως (Shlisky et al., 2009). Παράλληλα, αποτελούν βαρύνουσας σημασίας παράγοντα επηρεασμού της δομής και λειτουργίας των δασών (Flannigan et al., 2006). Συγκαταλέγονται στις φυσικές καταστροφές, καθώς έχουν μεγάλο και πολυδιάστατο αντίκτυπο στο περιβάλλον, με μια από τις πιο σημαντικές διαστάσεις αυτού, να είναι η απελευθέρωση υψηλών συγκεντρώσεων αέριων ρύπων στην ατμόσφαιρα.

Η εκδήλωση πυρκαγιών εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, ωστόσο η αυξανόμενη συχνότητα εμφάνισής τους, θεωρείται πιθανή συνέπεια της θέρμανσης του κλίματος, υπό την οποία αυξάνονται οι πιθανότητες ανάφλεξης (Baker, 2022). Η αύξηση του κινδύνου εμφάνισης πυρκαγιών υπό τις συγκεκριμένες κλιματικές συνθήκες, έχει ως αποτέλεσμα την εισαγωγή του όρου «περίοδος πυρκαγιάς» (fire season), ο οποίος περιγράφει μια περίοδο ξηρασίας και υψηλών θερμοκρασιών.

Κατά τις «περιόδους πυρκαγιάς», η εκδήλωση ανέμων, σε συνδυασμό με τον μη έγκαιρο εντοπισμό εστιών φωτιάς, καθιστά την κατάσβεσή τους πολύ δύσκολη, ενώ ακόμη, έχει ως αποτέλεσμα την εκδήλωση μεγαλύτερων και πιο επικίνδυνων πυρκαγιών (megafires). Τέτοιου είδους και μεγέθους συμβάντα, δύνανται να μεταβάλλουν τη φυσική ισορροπία της γης, έχοντας επιπτώσεις στην ατμόσφαιρα, τη χλωρίδα, την πανίδα, τον υδρολογικό κύκλο, καθώς και την ανθρώπινη υγεία.

Λαμβάνοντας υπόψη τα ανωτέρω, μελλοντικά, το μεταβαλλόμενο κλίμα αναμένεται να καταστήσει περισσότερες περιοχές ευαίσθητες σε πυρκαγιές (Turco et al., 2019) καθώς οι «περίοδοι πυρκαγιάς», θα διαρκούν περισσότερο χρονικό διάστημα, συντελώντας έτσι, στην αύξηση της μέσης ετήσιας καμένης έκτασης (Stephens et al., 2014).

Παράλληλα, το πλούμιο του καπνού που δημιουργείται από την καύση, δύναται να εξαπλωθεί τοπικά αλλά και να μεταφερθεί σε μεγάλες αποστάσεις, αναλόγως του μεγέθους και της έντασης της πυρκαγιάς. Σημειώνεται μάλιστα, ότι το πλούμιο των πυρκαγιών, συντίθεται από εκατοντάδες χημικά αέρια και αιωρούμενα σωματίδια (Paugam et al., 2016), πολλά εκ των οποίων θεωρούνται «αέρια του θερμοκηπίου» και σημαντικοί ατμοσφαιρικοί ρύποι. Ειδικότερα, παρά το μικρό κλάσμα μάζας ή όγκου τους, τα σωματίδια αυτά, επιδρούν στη μεταφορά ακτινοβολούμενης ενέργειας και τη θέρμανση της ατμόσφαιρας, επηρεάζοντας έτσι τον καιρό και το κλίμα (Grell et al., 2011). Ακόμα, η ύπαρξη αιωρούμενων σωματιδίων, επιδρά αρνητικά στην ορατότητα, τους βιογεωχημικούς κύκλους και βάσει του μεγέθους

τους, στο ανθρώπινο αναπνευστικό και καρδιαγγειακό σύστημα (Spracklen et al., 2007).

Καθώς η εμφάνιση των πυρκαγιών εντείνεται χωρικά και χρονικά, η εξέλιξη των τεχνολογικών μέσων στοχεύει στην εύρεση συστημάτων που δύνανται να προβλέψουν και να ελαχιστοποιήσουν την εμφάνιση τέτοιου είδους καταστροφικών φαινομένων. Ως εκ τούτου, η ανάλυση της φύσης και των επιπτώσεων των πυρκαγιών, αλλά και των δεσμών που αυτές έχουν με το κλίμα, την ατμόσφαιρα και τους αέριους ρύπους, κρίνεται ως απαραίτητη διαδικασία για την κατανόηση της δυναμικής τους και για την πρόβλεψη μελλοντικών κινδύνων (Mansoor et al., 2022).

Σκοπός

Ο κύριος στόχος της εργασίας είναι η ανάλυση της σχέσης των πυρκαγιών και των αιωρούμενων σωματιδίων, στα πλαίσια της ατμοσφαιρικής ρύπανσης και της κλιματικής αλλαγής, για την κατανόηση περαιτέρω συνεπειών στην ατμόσφαιρα, στο περιβάλλον και τον άνθρωπο.

Η καμένη έκταση (BA) αποτελεί σημαντικό μέγεθος ως προς τις μελέτες εφόσον, αποτυπώνει τις περιοχές που πλήττονται από πυρκαγιές, σε παγκόσμια κλίμακα και παρουσιάζουν σημαντικές αλλαγές στην κάλυψη της γης και τη βλάστηση. Παράλληλα, οι πυρκαγιές αποτελούν μείζονα παράγοντα για την εκπομπή αιωρούμενων σωματιδίων. Ως εκ τούτου, εξετάζεται ο δείκτης οπτικού βάθους αιωρούμενων σωματιδίων (AOD), ο οποίος ποσοτικοποιεί τα σωματίδια στην ατμόσφαιρα, από όποια πηγή και αν προέρχονται. Ο δείκτης αυτός, αποτελεί ένα εξίσου σημαντικό μέγεθος για την ποιότητα του ατμοσφαιρικού αέρα, παρέχοντας πολύτιμες πληροφορίες. Στη συγκεκριμένη μελέτη, βάσει δορυφορικών δεδομένων, που συγκεντρώθηκαν για τις δύο παραμέτρους, σε περίοδο δεκαοκτώ ετών, βρίσκεται και αξιολογείται πόσο ισχυρή είναι η συσχέτιση τους, αλλά και οι παράγοντες που την επηρεάζουν.

Λόγω της κλιματικής αλλαγής, οι συνθήκες που συντελούν στην εμφάνιση πυρκαγιών, αυξάνονται συνεχώς. Δεδομένου αυτού, είναι σημαντικό να κατανοηθεί η σχέση μεταξύ πυρκαγιών και αιωρούμενων σωματιδίων, καθώς δύναται να επηρεάσουν τη φυσική ισορροπία της Γης.

Η παρούσα εργασία εστιάζει στη διερεύνηση αυτής της σχέσης, εφόσον δεν έχει ερευνηθεί στο παρελθόν η σύνδεση μεταξύ BA-AOD σε παγκόσμια κλίμακα, κάνοντας χρήση δορυφορικών δεδομένων.

Θεωρητικό Υπόβαθρο

1.1 Κατηγοριοποίηση δασικών πυρκαγιών

Οι δασικές πυρκαγιές, σε ορισμένη συχνότητα και έκταση, αποτελούν διαδικασία φυσικής ανανέωσης των δασών. Ειδικότερα, μπορούν να είναι ευεργετικές όταν συναντώνται σε μικρή κλίμακα, για την αποφυγή συσσώρευσης καύσιμης ύλης και την μετέπειτα έναρξη μεγαλύτερης κλίμακας πυρκαγιάς. Μελετώντας τις δασικές πυρκαγιές δεν είναι δυνατό να καταταγούν όλες σε ένα είδος, λόγω των διαφορετικών αιτίων και επιπτώσεων. Η κατηγοριοποίηση συνδέεται με παράγοντες όπως, η καύσιμη ύλη, ο τρόπος εξάπλωσής τους, η προέλευσή τους κ.α. Οι δασικές πυρκαγιές, προσεγγίζοντας την κατηγοριοποίηση βάσει του τρόπου εξάπλωσής τους, διακρίνονται σε τρεις επιμέρους κατηγορίες (DeBano et al., 1998).

- **Υπόγειες πυρκαγιές ή πυρκαγιές εδάφους (ground fire)**

Οι υπόγειες πυρκαγιές, συναντώνται συχνότερα στις βόρειες χώρες και καύσιμη ύλη τους, αποτελεί το στρώμα οργανικής ύλης που αποσυντίθεται κάτω από το έδαφος. Συγκαταλέγονται στις ιδιαίτερα επικίνδυνες πυρκαγιές, παρότι η ταχύτητα καύσης και η παροχή οξυγόνου είναι αρκετά μικρές. Η επικινδυνότητά τους, συνδέεται με το γεγονός, ότι μπορούν να μην γίνουν αντιληπτές για μεγάλο χρονικό διάστημα, επειδή παράγουν ελάχιστο έως καθόλου καπνό, ενώ παράλληλα δεν παράγουν φλόγες. Η μεγάλη υπόγεια εξάπλωσή τους, έχει ως αποτέλεσμα την ολική καταστροφή του ριζικού συστήματος των φυτών (DeBano et al., 1998).



Εικόνα 1: Υπόγεια Πυρκαγιά (Ontario.ca, 2020).

- **Έρπουσες πυρκαγιές ή πυρκαγιές επιφάνειας (surface fire)**

Οι έρπουσες πυρκαγιές, αποτελούν την πιο συχνή κατηγορία πυρκαγιών. Ξεκινούν υπέργεια και έχουν ως καύσιμη ύλη, νεκρή ύλη που βρίσκεται στο έδαφος, όπως βελόνες, κλαδιά και φύλλα, αλλά και ζωντανή βλάστηση, όπως θάμνους, δενδρύλλια, πώδη φυτά και μικρά δέντρα. Χαρακτηρίζονται συχνά από πολύ γρήγορη διάδοση,

λόγω της αφθονίας σε οξυγόνο, της μεγάλης ταχύτητας που αναπτύσσεται, των πυκνών σχηματισμών της καύσιμης ύλης και των κλιματικών συνθηκών. Δημιουργείται μεγάλη φλόγα, ωστόσο φτάνει σε μικρά ύψη όπως και ο καπνός (DeBano et al., 1998).



Εικόνα 2: Έρπουσα Πυρκαγιά (Ontario.ca, 2020).

- **Επικόρυφες πυρκαγιές ή πυρκαγιές κόμης (crown fire)**

Οι επικόρυφες πυρκαγιές έχουν ως καύσιμη ύλη το ζωντανό και νεκρό φύλλωμα των δέντρων και θάμνων, καίγοντας αρχικά την κόμη του δέντρου μέχρι την ολοσχερή καταστροφή του. Κρίνονται ως ιδιαίτερα επικίνδυνες πυρκαγιές, καθώς η ταχύτητα διάδοσής τους είναι πολύ μεγάλη, βάσει των κλιματικών συνθηκών μπορούν να μεταπηδούν οι φλόγες στις κόμες των γύρω δέντρων. Οι επικόρυφες πυρκαγιές μπορούν να μετατραπούν σε έρπουσες, ενώ ισχύει και το αντίστροφο. Ο άνεμος στην συγκεκριμένη περίπτωση έχει ιδιαίτερα καταλυτικό ρόλο, καθώς διευκολύνει την μεταπήδηση της φλόγας αλλά και την συμπαράσυρση φλεγόμενης ύλης για τη δημιουργία νέων εστιών (DeBano et al., 1998).



Εικόνα 3: Επικόρυφη Πυρκαγιά (Ontario.ca, 2020).

1.2 Αίτια πρόκλησης δασικών πυρκαγιών

Η δημιουργία, καθώς και η εξάπλωση των πυρκαγιών μπορεί να οφείλεται σε πολλούς παράγοντες. Η απλούστερη προσέγγιση εντοπίζεται αρχικά στην δημιουργία φλόγας, για την οποία είναι απαραίτητη η παρουσία οξυγόνου, καύσιμης ύλης και θερμότητας, το λεγόμενο τρίγωνο της φωτιάς.



Εικόνα 4. Τρίγωνο της φωτιάς (Ontario.ca, 2020).

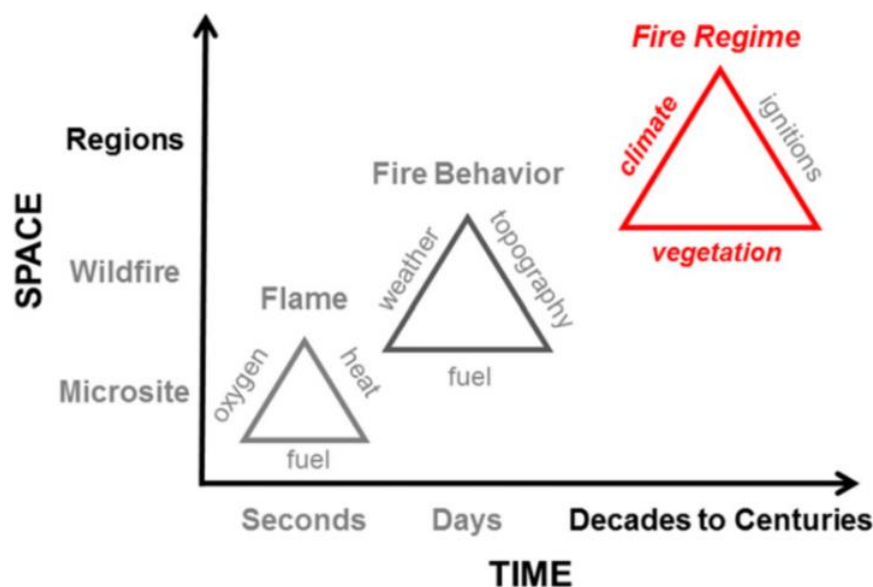
Οι πυρκαγιές δύνανται να προκληθούν από φυσικά αίτια, στα οποία οφείλεται περίπου το 10%-16% των δασικών πυρκαγιών, καθώς και από ανθρωπογενείς ενέργειες, οι οποίες ευθύνονται για το υπόλοιπο 84%-90% των πυρκαγιών. Ως πιο συχνά φυσικά αίτια, θεωρούνται κυρίως οι κεραυνοί, ενώ σε μικρή κλίμακα οι ηφαιστειακές εκρήξεις (Hoover, 2017). Οι ανθρωπινες δραστηριότητες που οδηγούν στη δημιουργία πυρκαγιών μπορούν να οφείλονται είτε στην άμεση έναρξη φωτιάς, είτε να οδηγούν σε αυτές, με έμμεση σύνδεση. Βάσει μελετών, οι ανθρωπογενείς πυρκαγιές παρουσιάζουν ισχυρούς δεσμούς με την αστικοποίηση, την εξάρτηση από ορυκτά καύσιμα (Balch et al., 2017), και την αποψίλωση των δασών.

Παράλληλα, τα αίτια πυρκαγιών μπορούν να διαφοροποιούνται βάσει των συνθηκών που επικρατούν στην εκάστοτε υπό εξέταση περιοχή, εφόσον κάποιες από αυτές, παρουσιάζουν πιο έντονα κύματα καύσωνα, ξηρασία ή πλήττονται εντονότερα από την κλιματική αλλαγή (Haque et al., 2021). Ως εκ τούτου, σημαντικοί παράγοντες επηρεασμού, εμφάνισης και εξάπλωσης των πυρκαγιών, αφορούν τις μετεωρολογικές συνθήκες που επικρατούν στην κάθε περιοχή, όπως η βροχόπτωση, η θερμοκρασία, η ταχύτητα και η κατεύθυνση του ανέμου καθώς και η υγρασία του εδάφους (Mhawe et al., 2017). Η βλάστηση, αν και από μόνη της δεν αποτελεί μοντέλο καυσίμου αποτελεί δυνητικά καύσιμη ύλη, η οποία επηρεάζεται άμεσα από τις κλιματολογικές συνθήκες. Η ξηρασία καθιστά την δασική βλάστηση κατάλληλη καύσιμη ύλη, ενώ λόγω της έλλειψης υγρασίας, οι δασικές πυρκαγιές και η εξάπλωσή τους γίνεται πιο εύκολη. Ωστόσο, η συμπεριφορά της πυρκαγιάς ποικίλλει ανάλογα με τον τύπο βλάστησης (Alexandre et al., 2015).

Η τοπογραφία της εκάστοτε περιοχής, σαν μεταβλητή, αποτελεί βασικό παράγοντα, καθώς επιδρά στον υδρολογικό κύκλο και κατά συνέπεια στις κλιματολογικές

συνθήκες, ενώ επηρεάζει και την κατανομή της βλάστησης. Η εξάπλωση μίας πυρκαγιάς, ανάλογα τα τοπογραφικά χαρακτηριστικά, επηρεάζεται άμεσα. Οι τοπογραφικές μεταβλητές, αφορούν το υψόμετρο, την όψη, την κλίση του εδάφους και χαρακτηριστικά της περιοχής, όπως την ύπαρξη στενών κοιλάδων ή απότομων πλαγιών (Alexandre et al., 2015). Βάσει εργαστηριακών μελετών προέκυψε ότι ακόμη και στις προσεκτικά ελεγχόμενες συνθήκες των εργαστηριακών πειραμάτων, ο ρυθμός εξάπλωσης της πυρκαγιάς κεφαλής αυξάνεται συνεχώς όταν υπάρχει απότομη κλίση εδάφους ή σε περίπτωση φαραγγιού ο ρυθμός αυξάνεται όταν είναι πολύ κλειστό. Σημειώνεται ότι η κατάσβεση μπορεί να καθίσταται πολύ πιο δύσκολη σε τέτοιες περιπτώσεις (Sari, 2022).

Οι παράγοντες αυτοί δημιουργούν ένα μεταβαλλόμενο περιβάλλον το οποίο καθορίζει σε μεγάλο βαθμό την έκβαση μιας πυρκαγιάς. Ωστόσο, λαμβάνεται υπόψη ότι μεταβάλλονται τόσο χωρικά όσο και χρονικά, καθώς και τα χαρακτηριστικά της πυρκαγιάς δεν είναι σταθερά. Λόγω της συνεχούς αυτής μεταβολής ο χρόνος λαμβάνεται ως ένας πολύ σημαντικός επιπρόσθετος παράγοντας (Viegas, 2006).



Εικόνα 5. Η μεταβολή των παραγόντων πυρκαγιάς χωρικά και χρονικά (Higuera, 2015).

1.3 Κλιματική αλλαγή και πυρκαγιές

Οι πυρκαγιές και το κλίμα είναι δεδομένο ότι συνδέονται με ιδιαίτερα ισχυρούς δεσμούς. Το κλίμα μπορεί να επηρεάσει διαχρονικά τη δραστηριότητα της πυρκαγιάς, εφόσον επιδρά με πολύπλοκους τρόπους, στην καύσιμη ύλη, τις ατμοσφαιρικές συνθήκες που ευνοούν την καύση και τις αναφλέξεις (Moritz et al., 2012). Ειδικότερα, σε οικοσυστήματα που είναι επιρρεπή στην πυρκαγιά, η κλιματική αλλαγή αυξάνει την περίοδο πυρκαγιάς (περίοδος με συνδυασμό υψηλών θερμοκρασιών, χαμηλής υγρασίας, χαμηλών βροχοπτώσεων και συχνά ισχυρούς ανέμους), ενώ σε οικοσυστήματα που δεν είναι επιρρεπή σε πυρκαγιές, αυξάνει την συχνότητα των ετών που αυτές εμφανίζονται (Pausas & Keeley, 2021). Βάσει δεδομένων παρατήρησης, οι εποχές με καιρό πυρκαγιάς (fire weather) έχουν επιμηκυνθεί κατά περίπου 25% στις περιοχές του πλανήτη που καλύπτονται από βλάστηση. Απόρροια αυτού, είναι η αύξηση κατά περίπου 20% της μέσης διάρκειας των περιόδων πυρκαγιάς παγκοσμίως (Jones et al., 2020).

Στις τροπικές και υποτροπικές περιοχές που πλήττονται από την κλιματική αλλαγή, παρατηρούνται έντονες ανωμαλίες στις βροχοπτώσεις, οι οποίες συγκεντρώνονται διαρκώς στο χειμώνα. Λόγω της συσσώρευσης αυτής, οι υπόλοιπες εποχές, είναι ολοένα ξηρότερες και θερμότερες, με σαφή αύξηση της εύφλεκτης βλάστησης, στη διάρκεια των περιόδων αυτών. Καθίσταται σαφές, ότι η εμφάνιση αλλά και η συμπεριφορά των πυρκαγιών μπορεί να επηρεαστεί έμμεσα και άμεσα από την κλιματική αλλαγή, μέσω των δέντρων. Δεδομένου ότι η κλιματική αλλαγή επηρεάζει την ανάπτυξη των δέντρων, την ηλικιακή κατανομή και τους ρυθμούς αποσύνθεσης, μεταβάλλει άμεσα το δυναμικό φορτίο της πιθανής καύσιμης ύλης.

Παράλληλα, μετά το 2010 παρατηρείται παγκόσμια αύξηση της επιφανειακής ταχύτητας του ανέμου, ενώ η κλιματική αλλαγή αναμένεται να οδηγήσει σε μεγαλύτερες διαφορές στην πίεση του αέρα μεταξύ ξηράς και θάλασσας. Οι διαφορές στην πίεση εντείνουν την ισχύ των ανέμων στις τροπικές και υποτροπικές περιοχές. Μέσω των ισχυρών ανέμων, παρέχεται περισσότερο οξυγόνο για τις πυρκαγιές ενώ επιταχύνεται και η εξάπλωσή τους (Xu et.al, 2020).

Η αλληλεπίδραση της κλιματικής αλλαγής με τις πυρκαγιές μπορεί να είναι πολύπλοκη, ωστόσο αποδεδειγμένα η κλιματική αλλαγή οδηγεί σε συχνότερες και σοβαρότερες πυρκαγιές με μεγαλύτερη ένταση. Πιο συγκεκριμένα, οι πυρκαγιές αποτελούν σημαντική πηγή εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, οι οποίες συνδέονται άμεσα με την κλιματική αλλαγή. Τα εκλυόμενα αέρια σωματίδια αποτελούνται από διοξείδιο του άνθρακα (CO₂), μεθάνιο (CH₄), μονοξείδιο του άνθρακα (CO), μαύρο άνθρακα (BC) και άλλων σωματιδίων στον καπνό. Το CO₂ και ο BC κατατάσσονται στα σωματίδια με την μεγαλύτερη συμβολή ως προς την αύξηση της θερμοκρασίας της ατμόσφαιρας.

Ως εκ τούτου, δημιουργείται μια κυκλική σχέση όπου η κλιματική αλλαγή αυξάνει τη συχνότητα των πυρκαγιών και οι αέριες εκπομπές των πυρκαγιών αυξάνουν το ρυθμό της κλιματικής αλλαγής (Boegelsack et al., 2018).

1.4 Αιωρούμενα σωματίδια

Τα αιωρούμενα σωματίδια (PM) είναι τα μικροσκοπικά στερεά και υγρά σωματίδια που αιωρούνται στην ατμόσφαιρα. Τα αιωρούμενα σωματίδια, αν και δεν είναι ορατά από το ανθρώπινο μάτι, όταν αυξάνονται οι συγκεντρώσεις τους, μπορούν να γίνουν εύκολα αισθητά, λόγω την έντονης θολερότητας που προκαλούν στην ατμόσφαιρα. Αποτελούν σημαντική παράμετρο ατμοσφαιρικής ρύπανσης, με επιδράσεις στο περιβάλλον και την ανθρώπινη υγεία. Προέρχονται είτε από φυσικές είτε από ανθρωπογενείς πηγές και περιλαμβάνουν καπνό από πυρκαγιές, σκόνη, ηφαιστειακή τέφρα, ερημική σκόνη, αστική ομίχλη, σωματίδια καπνού, θαλασσινό αλάτι, αέριες εκπομπές από βιομηχανίες κ.α.. Η σύστασή τους ποικίλει συνήθως ανάλογα με την πηγή εκπομπής τους, ενώ ακόμα αλληλεπιδρούν με αέρια της ατμόσφαιρας. Εμφανίζονται σε εξαιρετικά μεταβλητές συγκεντρώσεις, λόγω της ανομοιομορφίας των πηγών που τα παράγουν και του μικρού χρόνου παραμονής τους στην ατμόσφαιρα, ο οποίος μπορεί να κυμαίνεται από ώρες έως εβδομάδες (Boucher, 2015). Λόγω της μεταβολής των χαρακτηριστικών των αιωρούμενων σωματιδίων χωρικά και χρονικά, απαιτούνται συνεχείς παρατηρήσεις από δορυφόρους, δίκτυα επίγειων οργάνων και πειράματα πεδίου.

Βάσει της πηγής εκπομπής τους, είναι πρωτογενή, εκπεμπόμενα από συγκεκριμένες πηγές ή δευτερογενή, σχηματιζόμενα στην ατμόσφαιρα από αέριους ρύπους (SO_2 , NO_x , NH_3 , VOC και NMVOC) (Χρυσικού κ.α., 2008).

Η πιο συνήθης ταξινόμηση, γίνεται βάσει τους μεγέθους των σωματιδίων:

- PM_{10} : Αιωρούμενα σωματίδια διαμέτρου $\leq 10\mu\text{m}$
- $\text{PM}_{2.5}$: Αιωρούμενα σωματίδια με διάμετρο $\leq 2.5\mu\text{m}$ -λεπτά σωματίδια
- PM_1 : Αιωρούμενα σωματίδια με διάμετρο $\leq 1\mu\text{m}$ -υπομικρά σωματίδια
- $\text{PM}_{0.1}$: Αιωρούμενα σωματίδια με διάμετρο $\leq 0.1\mu\text{m}$ -υπέρλεπτα σωματίδια
- TSP: Συνολικά τα αιωρούμενα σωματίδια

(Ścieżor & Czaplicka, 2020).

Το μέγεθος των αιωρούμενων σωματιδίων οδηγεί στην διαφορετική μεταφορά τους στην ατμόσφαιρα, λόγω διαφορετικών ταχυτήτων, ενώ παράλληλα, τα μικρότερα σωματίδια είναι γνωστά για τις αρνητικές επιπτώσεις που δύναται να προκαλέσουν στην ανθρώπινη υγεία καθώς εισχωρούν ευκολότερα στο αναπνευστικό σύστημα.

1.4.1 Ρύπανση από αιωρούμενα σωματίδια

Σε παγκόσμια κλίμακα, η κύρια πηγή πρωτογενών ανθρακούχων αιωρούμενων σωματιδίων είναι η καύση βιομάζας, λόγω των δασικών πυρκαγιών και της ευρείας χρήσης της, ως καυσίμου (Pio et al., 2008). Ειδικότερα, τα κύρια εκπεμπόμενα αέρια που προκύπτουν από τις πυρκαγιές είναι το διοξείδιο του άνθρακα (CO_2), το μονοξείδιο του άνθρακα (CO), τα οξείδια του αζώτου (NO_x) και οι πτητικές οργανικές ενώσεις πλην του μεθανίου (NMVOCs). Τα παραπάνω αέρια σε συνδυασμό με τα αιωρούμενα σωματίδια οργανικού άνθρακα (OC) και μαύρου άνθρακα (BC) είναι βασικοί παράγοντες επηρεασμού της ατμοσφαιρικής χημείας και ρύπανσης καθώς έχουν την ικανότητα να σκεδάζουν και να απορροφούν την ηλιακή ακτινοβολία, μεταβάλλοντας το ισοζύγιο της, στην επιφάνεια της γης (Voulgarakis & Field, 2015).

Ως εκ τούτου, η αύξηση της συγκέντρωσής τους στην ατμόσφαιρα και οι αλλαγές στη σύνθεσή τους, μπορεί να αποβούν ιδιαίτερα επιβλαβή όχι μόνο για την ατμοσφαιρική θερμοκρασία στην επιφάνεια της γης, αλλά και το σχηματισμό νεφών, την καταστολή στην απελευθέρωση βροχής, την ορατότητα, καθώς και την ανθρώπινη υγεία, λόγω της τοξικής τους δράσης (Jiang et al., 2012).

Ωστόσο, για την ατμοσφαιρική χημεία και ρύπανση, οι εκπομπές αιωρούμενων σωματιδίων κατά τη διάρκεια μιας πυρκαγιάς που θεωρούνται σημαντικότερες είναι ο μαύρος άνθρακας (BC) και ο οργανικός άνθρακας (OC) (Voulgarakis & Field, 2015). Βάσει αυτού, επιλέγεται να αναλυθούν εκτενέστερα παρακάτω.

- **Οργανικός Άνθρακας (OC) & Μαύρος Άνθρακας (BC)**

Ο οργανικός άνθρακας (OC) είναι μίγμα διαφόρων οργανικών ενώσεων και αποτελεί σημαντικό συστατικό των ατμοσφαιρικών αιωρούμενων σωματιδίων. Τα αιωρούμενα σωματίδια OC θεωρούνται τοξικές ουσίες για το περιβάλλον, έχουν σημαντικές επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία, την ορατότητα και το κλίμα. Οι πηγές έκκλησης OC εντοπίζονται στην καύση ορυκτών καυσίμων και βιοκαυσίμων, πυρκαγιές και προϊόντα οξείδωσης από βιογενείς υδρογονάνθρακες (Spracklen et al., 2007).

Ο μαύρος άνθρακας (BC) αποτελεί ξεχωριστό τύπο ανθρακούχου υλικού, που σχηματίζεται μόνο σε φλόγες κατά την καύση ανθρακούχων καυσίμων. Αποτελεί ένα σημαντικό υποπροϊόν της ατελούς καύσης του επίγειου οργανικού άνθρακα (OC).

Ο συγκεκριμένος τύπος άνθρακα απορροφά έντονα στο ορατό μήκος κύματος της ακτινοβολίας ενώ ούσα η κύρια ουσία που απορροφά την ηλιακή ακτινοβολία, συνδέεται άρρηκτα με την αύξηση της επιφανειακής θερμοκρασίας της γης αλλά και της ατμοσφαιρικής (Cruz Núñez et al., 2014). Η παρουσία του, μειώνει την ορατότητα, επηρεάζει τα νέφη, μεταβάλλοντας τη δομή της ατμοσφαιρικής θερμοκρασίας μέσα, κάτω ή πάνω από τα σύννεφα και κατά συνέπεια επηρεάζει την κατανομή τους. Οι

επιδράσεις του στο κλίμα εντοπίζονται σε αλλαγές στο χιόνι, θέρμανση της τροπόσφαιρας και της κορυφής της κρυόσφαιρας, αλλαγές στις βροχοπτώσεις και άλλες έμμεσες κλιματικές επιπτώσεις (Bond et al., 2013). Η ρύπανση που προκαλείται από τον μαύρο άνθρακα, έχει τόσο αντίκτυπο, ώστε από τη μείωση εκπομπών του θα περιοριζόταν η υπερθέρμανση του πλανήτη, ενώ ακόμα, θα καθυστερούσε ο χρόνος κατά τον οποίο οι ανθρωπογενείς επιπτώσεις θα αύξαναν την παγκόσμια θερμοκρασία πάνω από 2°C (Fuzzi et al., 2015).

Σημαντικός αντίκτυπος από το συνδυασμό εκπομπών οργανικού και μαύρου άνθρακα από πυρκαγιές σε μεγάλο υψόμετρο, εντοπίζεται στην επίδρασή τους στην ανακλαστικότητα (albedo) του θαλάσσιου πάγου. Όταν οι συγκεκριμένοι τύποι αιωρούμενων σωματιδίων εναποτίθενται στον πάγο, μπορούν να αποτελέσουν καταλυτικό παράγοντα στην τήξη των παγετώνων, με καταστροφικές συνέπειες για το περιβάλλον (Evangelίου et al., 2019).

Εκτιμάται ότι με κατάλληλη διαχείριση των πυρκαγιών οι εκπομπές οργανικού και μαύρου άνθρακα μπορούν να μετριαστούν σημαντικά.

1.4.2 Οπτικό Βάθος Αιωρούμενων Σωματιδίων (Aerosol Optical Depth-AOD)

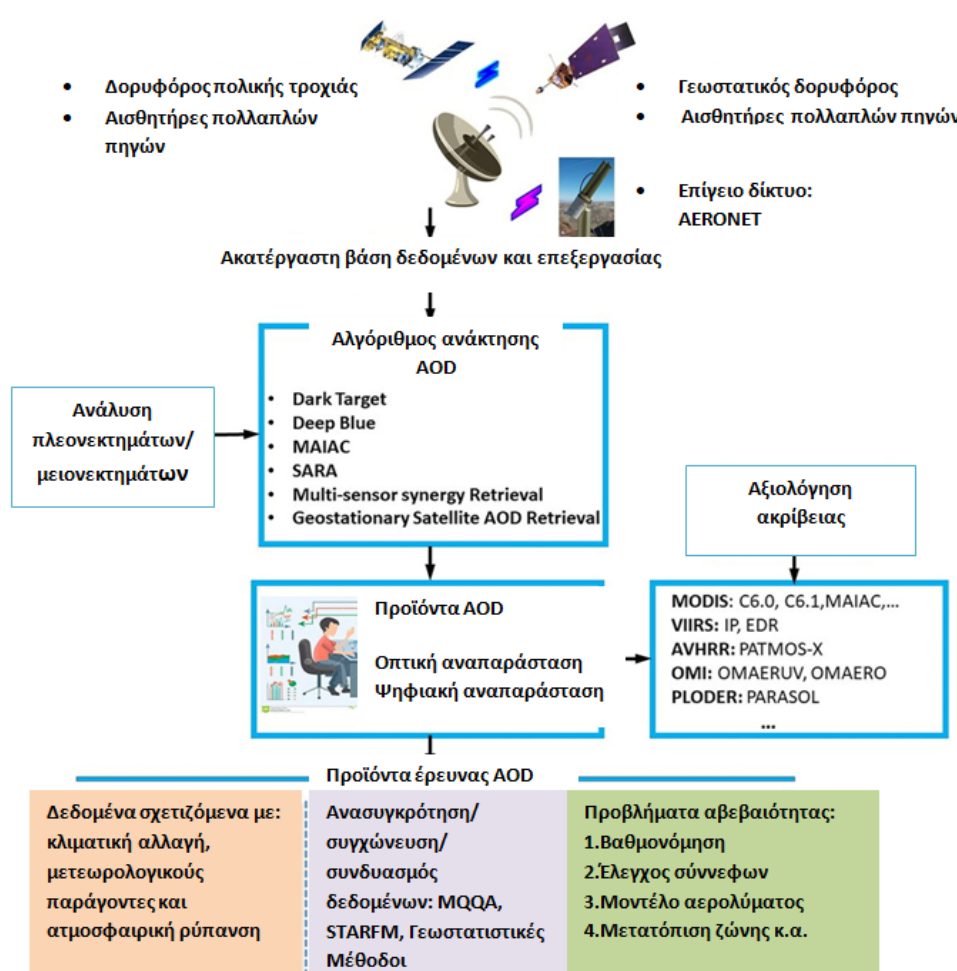
Τα αιωρούμενα σωματίδια αποτελούν κρίσιμο παράγοντα για την ατμόσφαιρα, το κλίμα, το περιβάλλον και την ανθρώπινη υγεία. Με την παράλληλη, αύξηση της συγκέντρωσής τους στην ατμόσφαιρα, κρίνεται καίριας σημασίας η κατανόηση των πηγών και των καταβοθρών των αιωρούμενων σωματιδίων, της σύνθεσής τους και της κατανομής τους. Αποτελώντας βασικό μέρος της σύγχρονης έρευνας στην ατμοσφαιρική φυσική, η ανάκτηση δορυφορικών δεδομένων είναι άκρως σημαντική, παρέχοντας πληροφορίες σε περιφερειακή και παγκόσμια κλίμακα, για τη χωροχρονική βιωσιμότητα των αιωρούμενων σωματιδίων (Mei et al., 2019).

Λόγω της σημαντικότητάς τους, μετράται και εξετάζεται το οπτικό βάθος αιωρούμενων σωματιδίων, το οποίο θεωρείται ευρέως ως κρίσιμος δείκτης στην κατανόηση της ατμοσφαιρικής φυσικής και της περιφερειακής ποιότητας του αέρα. Ο δείκτης ποσοτικοποιεί τη φόρτιση αιωρούμενων σωματιδίων στην ατμόσφαιρα, τα οποία διανέμονται σε μια στήλη αέρα, μετρώντας την ποσότητα φωτός που τα αιωρούμενα σωματίδια διασκορπίζουν και απορροφούν στην ατμόσφαιρα. Η μέτρηση των σωματιδίων γίνεται με ηλιακό φασματοφωτόμετρο, όπου η τάση που μετράται, είναι ανάλογη της φασματικής ακτινοβολίας που φτάνει στην επιφάνεια του οργάνου μέτρησης. Τα δορυφορικά όργανα και τα επίγεια δίκτυα αισθητήρων, δίνουν τις πιο ακριβείς πληροφορίες που μπορούν να είναι προσβάσιμες βοηθώντας στην περαιτέρω κατανόηση του επηρεασμού του κλίματος από τα αιωρούμενα σωματίδια.

Παρά την αξιοσημείωτη, ωστόσο πρόοδο της επιστήμης στη δημιουργία μέσων για τη μέτρηση του AOD, εντοπίζονται ακόμα δυσκολίες όπως στη μέτρηση των σωματιδίων μέσα στα σύννεφα λόγω των διαφορετικών τύπων σωματιδίων που μπορούν να συσσωρευτούν μαζί. Ακόμα, δυσκολία εντοπίζεται λόγω των αλλαγών των ιδιοτήτων και των αλληλεπιδράσεων κάποιων αιωρούμενων σωματιδίων, βάσει αυξομειώσεων της θερμοκρασίας ή της υγρασίας (Wei et al., 2019).

Ενδεικτικές τιμές του δείκτη, που βάσει των διακυμάνσεων, αντιστοιχούν σε διαφορετικές συνθήκες ορατότητας στην ατμόσφαιρα:

- $AOD < 0,05$: Μέγιστη ορατότητα με σχετικά λίγα αιωρούμενα σωματίδια
- $AOD \approx 1$: Χαμηλότερη ορατότητα, θολές συνθήκες, υψηλή συγκέντρωση
- $AOD > 2$: Λίγη ορατότητα, πολύ υψηλές συγκεντρώσεις αιωρούμενων σωματιδίων



Εικόνα 6. Δορυφορική τηλεπισκόπηση του AOD: Από την λήψη δεδομένων έως τα προϊόντα έρευνας του AOD (Wei, Chang, Bai & Gao, 2019).

1.4.3 Επίδραση ερημικής σκόνης

Στην ατμόσφαιρα, ως σημαντική κατηγορία αιωρούμενων σωματιδίων, θεωρείται η ορυκτή σκόνη. Λόγω της επίδρασής της στην απορρόφηση και τη σκέδαση της ηλιακής ακτινοβολίας, μπορεί να αποτελέσει σημαντικό παράγοντα για το κλίμα τόσο σε περιφερειακό όσο και σε παγκόσμιο επίπεδο (Proestakis et al., 2018). Ειδικότερα, οι διαταραχές που εντοπίζονται στο ατμοσφαιρικό σύστημα της γης, που προκαλείται από τα σωματίδια ορυκτής σκόνης, αφορούν τη θέρμανση της ατμόσφαιρας, τη σταθερότητα των βιολογικών και χημικών οικοσυστημάτων, τον υδρολογικό κύκλο και την ποιότητα του ατμοσφαιρικού αέρα. Τα διαφορετικά είδη των φυσικών ορυκτών σωματιδίων σκόνης, δύναται να επηρεάσουν τη θερμοκρασία της γης, αντανakλώντας την ακτινοβολία των βραχέων κυμάτων (SW) , προκαλώντας ψύξη ή απορροφώντας τα μακρά κύματα (LW) ακτινοβολίας, με αποτέλεσμα την θέρμανση (Alam et al., 2014)

Πέραν αυτού, τα αιωρούμενα σωματίδια ορυκτής σκόνης μεταφέρονται σε ιδιαίτερα μεγάλες αποστάσεις (έως και της τάξης των χιλιάδων χιλιομέτρων), ανάλογα τους ανέμους, καθώς ανυψώνονται και συσσωρεύονται στην ατμόσφαιρα. Ωστόσο, το φορτίο αιωρούμενων σωματιδίων σκόνης υπόκειται σε ισχυρές ενδο-ετήσιες και διετείς διακυμάνσεις με διαφορετικούς κύκλους ανάλογα την πηγή και την περιοχή με κατεύθυνση μακριά από την πηγή του ανέμου (downwind).

Οι κύριες φυσικές πηγές σκόνης εντοπίζονται στο Βόρειο Ημισφαίριο με την περιοχή της Σαχάρας να χαρακτηρίζεται ως η κυρίαρχη (Logothetis et al., 2021). Τα χονδροειδή σωματίδια από την έρημο Σαχάρα, μεταφερόμενα μέσω των αέριων μαζών, αποτελούν την μεγαλύτερη πηγή σωματιδίων ορυκτής σκόνης και βιολογικού υλικού στην Ευρώπη και τη Μεσόγειο, με ιδιαίτερο επηρεασμό της Ιβηρικής Χερσονήσου. Παρότι τα φαινόμενα μεταφοράς της ορυκτής σκόνης είναι έντονα τις περιόδους της άνοιξης και του καλοκαιριού του βορείου ημισφαιρίου, σημειώνονται ασυνήθη περιστατικά έξαρσης κατά τη χειμερινή περίοδο.

Τις ημέρες με έντονη κίνηση Σαχάριας σκόνης, παρατηρείται υπέρβαση ημερήσιας οριακής τιμής των σωματιδίων PM₁₀, με έντονη επίδραση στον ατμοσφαιρικό αέρα, δημιουργώντας μειωμένη ορατότητα και δυσκολία στην αναπνοή. Η ταχεία εμφάνιση πλουμίου που μεταφέρει σκόνη παρατηρείται μέσω της αύξησης των μετρήσεων του AOD (Oduber et al., 2019).

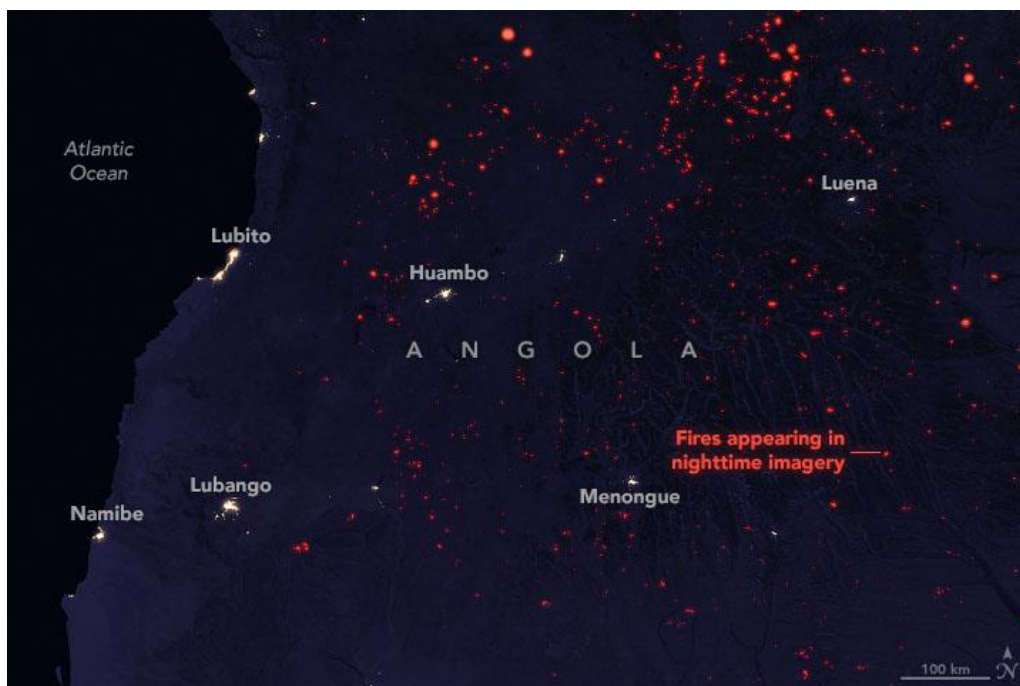
Σε μερικές περιπτώσεις, η αιολική κίνηση των σωματιδίων της ορυκτής σκόνης της ερήμου Σαχάρας, είναι τόσο μεγάλη ώστε τα σήματα αιωρούμενων σωματιδίων της, να υπερτερούν των ανθρωπογενών και των θαλάσσιων αιωρούμενων σωματιδίων. Δεδομένου αυτού, κατά την μελέτη του δείκτη AOD λαμβάνεται υπόψη η επίδραση της Σαχάριας σκόνης για τις περιοχές επηρεασμού της.

1.5 Πυρκαγιές ανά τον κόσμο

Η εμφάνιση όλο ένα και μεγαλύτερων πυρκαγιών τόσο σε ισχύ όσο και σε διάρκεια, πλήττει παγκοσμίως κάποιους από τους βασικούς «πνεύμονες» του πλανήτη, απελευθερώνοντας στην ατμόσφαιρα υψηλές συγκεντρώσεις αέριων ρύπων. Η αδυναμία προστασίας των μεγάλων δασών προκαλεί έντονες αλλαγές στα οικοσυστήματα, καθώς στα χιλιάδες στρέμματα δασών συναντώνται σπάνια ήδη πανίδας και χλωρίδας, οδηγώντας κάποια από αυτά στην εξαφάνιση.

• Αφρική

Η υποσαχάρια Αφρική αποτελεί μια από τις περιοχές, που πλήττονται περισσότερο από πυρκαγιές, παγκοσμίως. Στην συγκεκριμένη περιοχή, οι πυρκαγιές συνδέονται ισχυρά με την μεταβλητότητα των βροχοπτώσεων ανά εποχή. Στα βόρεια οι περισσότερες πυρκαγιές εντοπίζονται κυρίως από το Νοέμβριο έως τον Φεβρουάριο, ενώ νότια οι περισσότερες καύσεις παρατηρούνται από τον Μάιο έως τον Οκτώβριο κατά την ξηρή περίοδο (Gatebe et al., 2014). Η εμφάνιση πυρκαγιών, υφίσταται συχνότερα στις σαβάνες. Κάθε 2 χρόνια, εκτιμάται ότι καίγεται περίπου το 51% της αφρικανικής σαβάνας, ετησίως το 9% της γης και κάθε 8 χρόνια το 22% της ηπείρου, κατά τις περιόδους πυρκαγιών. Σε παγκόσμιο επίπεδο, οι Αφρικανικές δασικές πυρκαγιές ευθύνονται περίπου για το 70% των καμένων εκτάσεων ετησίως, εκλύοντας μεγάλες ποσότητες αιωρούμενων σωματιδίων στην ατμόσφαιρα (De Sales et al., 2018). Η Αγκόλα αποτελεί μια από τις περισσότερο πληγείσες, από δασικές πυρκαγιές χώρες της νοτιοκεντρικής Αφρικής. Κατά μέσο όρο από το 2001 καίγεται περίπου το 30% της χώρας ετησίως (Catarino et al., 2020).



Εικόνα 7. Κορύφωση της εποχής πυρκαγιών, νοτιοκεντρική Αφρική, 22 Αυγούστου 2019, NASA earth observatory.

- **Ευρώπη**

Οι δασικές πυρκαγιές που πλήττουν επανειλημμένα την Ευρώπη, εμφανίζονται κυρίως στις Μεσογειακές χώρες. Οι πυρκαγιές αυτές ευθύνονται περίπου για το 85% της συνολικής καμένης έκτασης στην Ευρώπη, σε ετήσια βάση. Οι πυρκαγιές στη Μεσόγειο συνδέονται με τις καιρικές συνθήκες, όπως οι ισχυροί άνεμοι, οι ξηρές συνθήκες αέρα, η παρατεταμένη ξηρασία και τα εξαιρετικά θερμά καλοκαίρια (Costa et al., 2020). Παράλληλα, ενώ πολλά είδη φυτών που συναντώνται στην Μεσόγειο, χαρακτηρίζονται από ανθεκτικότητα στη φωτιά, έχουν υποστεί ισχυρές μεταβολές, καθιστώντας τα πολύ πιο ευάλωτα (Pausas et al., 2008).

Το 2023 στην βορειοανατολική Ελλάδα καταγράφηκε η μεγαλύτερη πυρκαγιά των τελευταίων δεκαετιών στην Ευρώπη, με το πλούμιο του καπνού να μεταφέρεται ως την Ιταλία. Συνολικά, το 2023 κάηκαν περίπου 173.000 ha σε όλη την ελληνική επικράτεια (Dosiou et al., 2024).



Εικόνα 8. Καπνός από πυρκαγιές στα βορειοανατολικά της χώρας κινείται πάνω απ' τη Μεσόγειο, 22 Αυγούστου 2023, NASA earth observatory.

- **Νότια Αμερική**

Οι πυρκαγιές στη Νότια Αμερική εμφανίζονται κυρίως στις τροπικές περιοχές της ηπείρου, με έντονη παρουσία στη Βραζιλία όπου οι συνθήκες είναι κατάλληλες για ανάφλεξη, λόγω της ζέστης και της ξηρασίας. Αποκλειστικά για το τροπικό δάσος του Αμαζονίου, η πυρκαγιά ιστορικά δεν αποτελούσε τη μεγαλύτερη απειλή, λόγω της υψηλής υγρασίας και των ελάχιστων φυσικών πηγών ανάφλεξης, ωστόσο, λόγω της συνεχούς μεταβολής του κλίματος, των ανθρώπινων παρεμβάσεων και των αλλαγών στις χρήσεις γης, ο κίνδυνος αυξάνεται σημαντικά (Burton et al., 2021).

Το τροπικό δάσος του Αμαζονίου, εκτείνεται σε εννέα χώρες, με το μεγαλύτερο κομμάτι του δάσους να βρίσκεται στη Βραζιλία. Τις τελευταίες δεκαετίες έχει καταστραφεί τουλάχιστον το 17% του πρωτογενούς δάσους (Müller, 2020). Σημαντική πρόβλεψη από έρευνες, έχει δείξει ότι η αναμενόμενη αύξηση ξηρασίας και πυρκαγιών υπό την κλιματική αλλαγή, θα μπορούσε να οδηγήσει σε μακροπρόθεσμη ξήρανση των τροπικών δασών (Le Roux et al., 2022).

Πάνω από τον Αμαζόνιο λόγω του καπνού μεγάλων πυρκαγιών που σημειώθηκαν το 2019, παρατηρήθηκε μεγάλη αύξηση αιωρούμενων σωματιδίων με τον δείκτη AOD σε κάποιες περιοχές να μετράται έως και 0,9. Η αύξηση των λεπτών σωματιδίων PM_{2.5}, θεωρείται ότι αποτέλεσε κύριο παράγοντα για επιπλέον 3.400 θανάτους το συγκεκριμένο έτος, λόγω της αυξημένης έκθεσης των ατόμων στην σωματιδιακή ατμοσφαιρική ρύπανση.

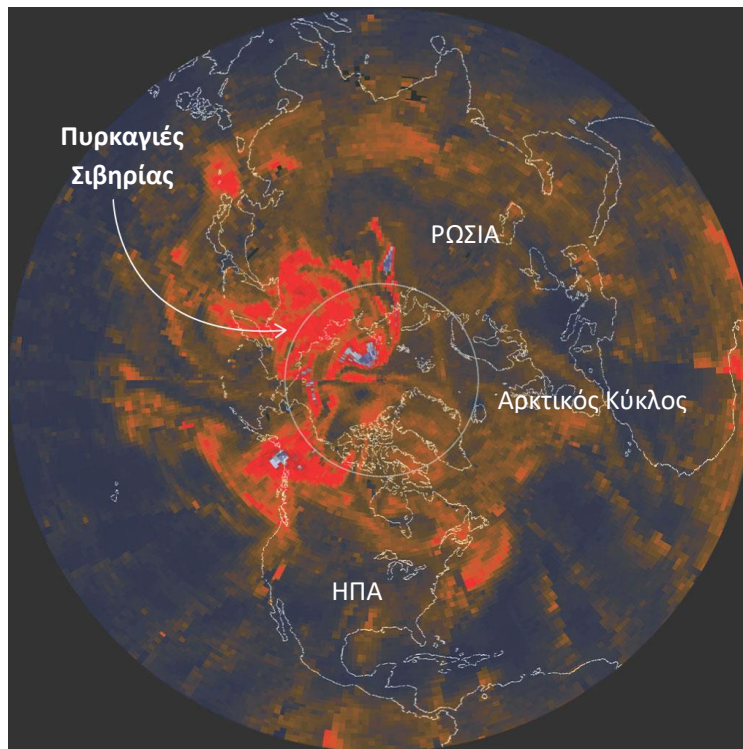


Εικόνα 9. Χάρτης ενεργών πυρκαγιών στο τροπικό δάσος του Αμαζονίου στη Βραζιλία, όπως παρατηρήθηκε από τους Terra και Aqua MODIS μεταξύ 15-22 Αυγούστου 2019.

- **Σιβηρία**

Η περιοχή της Σιβηρίας που καλύπτεται από δάσος, εκτιμάται περίπου στα 600 εκατομμύρια ha αποτελείται κυρίως από κωνοφόρα δέντρα και βλάστηση ανεκτική στο κρύο. Με την πάροδο των χρόνων παρατηρείται αύξηση θερμοκρασιών στη Σιβηρία, η οποία οδήγησε σε αύξηση της συχνότητας πυρκαγιών στο αρκτικό δάσος και κατά συνέπεια της καμένης έκτασης και των εκπομπών άνθρακα. Σε περίοδο 20 ετών, μεταξύ 1999 έως 2019 καταγράφηκαν στην Σιβηρία 325.000 πυρκαγιές, με σύνολο 200 εκατομμύρια ha καμένης έκτασης (Kharuk et al., 2021).

Το 2019 στη Σιβηρία σημειώθηκε μια σειρά ιδιαίτερα ισχυρών καταστροφικών πυρκαγιών με απολογισμό 3 εκατομμύρια ha καμένων εκτάσεων, υπερβαίνοντας τον μέσο όρο τιμών για τα έτη 2001 έως 2019, περισσότερο από τέσσερις φορές. Ακόμα, οι σχετικοί συνολικοί όγκοι επιβλαβών εκπομπών CO, CO₂ και αιωρούμενων σωματιδίων PM_{2.5} τον Ιούνιο του 2019, ήταν πέντε φορές υψηλότερες από τις μέσες τιμές τους για την περίοδο 2001 έως 2019 (Bondur et al., 2020). Παράλληλα, πάνω από τη Λειψία της Γερμανίας παρατηρήθηκε ένα στρώμα καπνού πάχους 4 χιλιομέτρων, στο κάτω μέρος της στρατόσφαιρας, που θεωρήθηκε ότι προέρχεται από τις πυρκαγιές της Σιβηρίας (Ansmann et al., 2021).



Εικόνα 10. Μεγάλες εκπομπές μονοξειδίου του άνθρακα από δασικές πυρκαγιές της Σιβηρίας που εξαπλώνονται σε όλη την Ασία, βάσει δεδομένων NASA, 12 Αυγούστου 2019, Reuters Graphics.

- **Αυστραλία**

Η Αυστραλία αποτελεί μια από τις πιο πυρόπληκτες περιοχές του πλανήτη. Στην νότια και ανατολική Αυστραλία, το 2019-2020, σημειώθηκαν οι μεγαλύτερες πυρκαγιές στην ιστορία της. Οι πυρκαγιές ήταν μεγάλης κλίμακας και έντασης (mega-fires), ενώ θεωρήθηκαν αποτέλεσμα του ακραίου καύσωνα και ξηρασίας που επικρατούσε, λόγω του μεγάλου αντίκτυπου της ταλάντωσης El Niño. Ως αποτέλεσμα, ήταν η καταστροφή περίπου 19 εκατομμύρια ha (Cui et al., 2023). Κατά την περίοδο αυτή, επλήγησαν αυστραλιανά οικοσυστήματα συμπεριλαμβανομένου του τροπικού δάσους της Γκοντβάνα και άλλων οικοσυστημάτων που χαρακτηρίζονται από αντοχή στη φωτιά, όπως τα δάση ευκαλύπτου που κυριαρχούν στην περιοχή (Ward et al., 2020).

Τον Ιούλιο του 2019 παρατηρήθηκε η δημιουργία ισχυρών νεφών από τις πυρκαγιές με αποτέλεσμα τη σημαντική ποσότητα σωματιδιακών και αέριων ρύπων στην άνω και κάτω στρατόσφαιρα. Το πλούμιο της αέριας ρύπανσης, οδήγησε σε σημαντικές επιπτώσεις στη στρατοσφαιρική σύνθεση, συμπεριλαμβανομένου του στρατοσφαιρικού όζοντος (Sellitto et al., 2022).

Η μέγιστη τιμή οπτικού βάθους αιωρούμενων σωματιδίων (AOD) βρέθηκε 0,54 και καταγράφηκε στην κατώτερη τροπόσφαιρα πάνω από τα σημεία πυρκαγιάς, ενώ στη στρατόσφαιρα παρατηρήθηκαν τιμές AOD έως 0,29 (Papanikolaou et al., 2022).



Εικόνα 11. Καπνός από τις πυρκαγιές στην Αυστραλία, Ιανουάριος 2020, NASA earth observatory.

- **Νοτιοανατολική Ασία**

Στη νοτιοανατολική Ασία τις τελευταίες δεκαετίες, έχει παρατηρηθεί αύξηση στις δασικές πυρκαγιές και τις πυρκαγιές τυρφώνων. Οι πυρκαγιές αυτές, έχουν συνδεθεί με το φαινόμενο ταλάντωσης El Niño, το οποίο προκαλεί παρατεταμένες περιόδους ξηρασίας. Ωστόσο, στη δεδομένη περίπτωση, ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι εκπομπές από τις καύσεις τυρφώνων καθώς επηρεάζουν ιδιαίτερα την ατμόσφαιρα απελευθερώνοντας μεγαλύτερες ποσότητες CO₂, από αυτές που λαμβάνουν χώρα σε ορυκτά εδάφη (Page et al., 2009).

Στην Ινδονησία το 2015 κατά την περίοδο πυρκαγιών, υπολογίζεται ότι καταστράφηκαν 2.6 εκατομμύρια ha εκτάσεων, πλούσιων σε βιοποικιλότητα. Σε κάποιες περιπτώσεις, οι ημερήσιες εκπομπές CO₂ από τις πυρκαγιές ξεπερνούσαν τις εκπομπές ολόκληρων των Ηνωμένων Πολιτειών (Edwards et al., 2020).



Εικόνα 12 . Καπνός από πυρκαγιές τυρφώνων στην Ινδονησία, 14 Σεπτεμβρίου 2019, NASA earth observatory.

- **Βόρεια Αμερική**

Η Βόρεια Αμερική αποτελεί μια από τις ηπείρους που λόγω της ποικιλομορφίας της δεν μπορεί να χαρακτηριστεί από ένα και μόνο είδος βλάστησης ή κλιματικές συνθήκες. Ο νότος της Βορείου Αμερικής, πλήττεται τα τελευταία χρόνια από σοβαρές συνθήκες ξηρασίας, ενώ ακόμα, οι πυρκαγιές αυξάνονται σε συχνότητα και σε ισχύ σε όλη την ήπειρο (Marín et al., 2018).

Η Καλιφόρνια, αποτελεί μια από τις περιοχές που πλήττονται ιδιαίτερα από τις πυρκαγιές καθώς το κλίμα και η βλάστησή της τις ευνοούν. Ειδικότερα, στην περιοχή καταγράφονται πυρκαγιές από τον Οκτώβρη ως τον Απρίλιο, οι οποίες οδηγούνται από τους ξηρούς ανέμους Santa Anna και από τον Ιούνιο έως τον Σεπτέμβριο, λόγω των θερμών καλοκαιριών και του Μεσογειακού κλίματος (Shi et al., 2019). Το 2017 καταγράφηκαν στην περιοχή κάποιες από τις μεγαλύτερες πυρκαγιές, με απολογισμό περισσότερα από 480.000 ha καμένων εκτάσεων (Li et al., 2019).



Εικόνα 13. Καπνός από πυρκαγιές στην Καλιφόρνια, NASA earth observatory.

1.6 Επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία

Παρατηρώντας την αυξητική τάση στην εμφάνιση δασικών πυρκαγιών, όπως αναμένεται, πλήττεται μεγαλύτερη μερίδα πληθυσμού παγκοσμίως από τις καταστροφικές, συχνά, συνέπειες.

Πέρα από τις υλικές καταστροφές, οι πυρκαγιές περιλαμβάνουν άμεσους κινδύνους από την έκθεση σε πυρκαγιά καθώς και κινδύνους από τον εκλυόμενο καπνό. Άμεσα, σε πρώτο στάδιο, απειλούνται τόσο οι πυροσβέστες όσο και οι κάτοικοι της πληγείσας περιοχής, εφόσον οι κίνδυνοι για την ανθρώπινη υγεία περιλαμβάνουν αυξημένες αναπνευστικές και καρδιαγγειακές παθήσεις, εγκαύματα, θερμοπληξία, επικίνδυνα επίπεδα αφυδάτωσης και σε ορισμένες περιπτώσεις θάνατο. Το αποτύπωμα των πυρκαγιών σε άτομα που βίωσαν απώλειες περιουσίας και

εκτοπισμό, μπορούν να εντοπιστούν ακόμα και στην εμφάνιση ψυχικών ασθενειών όπως η κατάθλιψη και το μετατραυματικό στρες (Xu et al., 2020).

Η έκλυση καπνού δύναται να επηρεάσει περιοχές που απέχουν έως και 1000 χιλιόμετρα από την πυρκαγιά, αποτελώντας απειλητικό παράγοντα για τη δημόσια υγεία. Βάσει μελετών αποδίδεται ένα μέρος των αιτιών θνησιμότητας της τάξης 21-38%, στα υψηλά επίπεδα όζοντος και αιωρούμενων σωματιδίων που εκλύθηκαν κατά τη διάρκεια μεγάλων δασικών πυρκαγιών μετά από ένα κύμα καύσωνα (Stedman, 2004).

Οι μελέτες των σωματιδίων που επιδρούν στην ανθρώπινη υγεία, επικεντρώνονται στα σωματίδια με διάμετρο 10 μm (PM_{10}) ή μικρότερη, καθώς το μικρότερο μέγεθος σωματιδίων σχετίζεται με υψηλότερη τοξική δράση. Η έκθεση σε αιωρούμενα σωματίδια από πυρκαγιές σχετίζεται με αυξημένο κίνδυνο αναπνευστικών προβλημάτων, μειωμένης πνευμονικής λειτουργίας, χρόνιας αποφρακτικής πνευμονοπάθειας, αναπνευστικής λοίμωξης και άσθματος (Xu et al., 2020), ενώ σημειώνεται επιπρόσθετα ότι τα λεπτά σωματίδια $\text{PM}_{2.5}$, μπορούν να λειτουργήσουν και ως παράγοντας ενεργοποίησης για οξεία στεφανιαία επεισόδια, με την σχετική θνησιμότητα (Haikerwal et al., 2015).

Μεθοδολογία

Στόχος της παρούσας εργασίας είναι η μελέτη και κατανόηση της σχέσης των καμένων εκτάσεων από πυρκαγιές (BA) με τον δείκτη οπτικού βάθους αιωρούμενων σωματιδίων (AOD). Στην συγκεκριμένη ενότητα, παρουσιάζεται η μεθοδολογία και τα βήματα που ακολουθήθηκαν, στα αντίστοιχα μέσα που χρησιμοποιήθηκαν, για την συλλογή και επεξεργασία δεδομένων, στοχεύοντας την εύρεση αποτελεσμάτων και συμπερασμάτων.

Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν αφορούν παγκόσμιες μηνιαίες μετρήσεις καμένης έκτασης (BA) και του δείκτη αιωρούμενων σωματιδίων (AOD), τα οποία μετρήθηκαν από δορυφορικά συστήματα και αφορούν τη χρονική περίοδο 2001 έως 2018. Από τα δεδομένα, κάνοντας χρήση της προγραμματιστικής πλατφόρμας MATLAB, δημιουργήθηκαν συγκεντρωτικοί χάρτες απεικόνισης για τις μέσες τιμές της κάθε παραμέτρου, που αφορούσαν το σύνολο των ετών τα οποία εξετάστηκαν, ενώ ακόμα δημιουργήθηκαν και οι αντίστοιχοι εποχιακοί χάρτες. Στη συνέχεια, δημιουργήθηκαν χάρτες συσχέτισης τόσο για τα συγκεντρωτικά όσο και οι εποχικά δεδομένα του BA και του AOD.

Στοχεύοντας ύστερα στην αφαίρεση της εποχικότητας, πραγματοποιήθηκε η συσχέτιση των εποχικών ανωμαλιών των δεδομένων καμένης έκτασης και του δείκτη οπτικού βάθους αιωρούμενων σωματιδίων. Για τη διαδικασία αυτή, λογαριθμήθηκαν τα δεδομένα του BA, καθώς και η μέση μηνιαία τιμή του, ενώ για την εύρεση της ανωμαλίας των τιμών του AOD, ακολουθήθηκε η ίδια διαδικασία χωρίς όμως τη λογαρίθμηση των τιμών. Με την κατάλληλη επεξεργασία των αποτελεσμάτων, δημιουργήθηκαν παγκόσμιοι εποχικοί χάρτες συσχέτισης της ανωμαλίας των τιμών του BA και του AOD.

Τελικώς, για περαιτέρω ανάλυση επιλέχθηκαν περιοχές του πλανήτη που διαχρονικά πλήττονται από πυρκαγιές, για τις οποίες δημιουργήθηκαν ετήσια και εποχικά διαγράμματα διασποράς BA – AOD, με τους αντίστοιχούς συντελεστές προσδιορισμού τους.

Παρακάτω, αναλύονται στις αντίστοιχες παραγράφους, η κάθε μέθοδος και ο εκάστοτε σκοπός τους.

2.1 Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS)

Τα δεδομένα γύρω από τα οποία δομήθηκε η μελέτη προέρχονται από το MODIS (Collection 6 MODIS Burned Area Product-MCD64) και αντιστοιχούν στις καμένες εκτάσεις (BA) από πυρκαγιές.

Το MODIS (Φασματοραδιόμετρο απεικόνισης μέτριας ανάλυσης) είναι ένα όργανο που χρησιμοποιεί αισθητήρες τοποθετημένους σε δορυφορικό σύστημα, για την απεικόνιση καθημερινής κάλυψης της γης. Το όργανο έχει 36 φασματικές ζώνες καλύπτοντας τόσο τις ηλιακές ανακλαστικές όσο και τις θερμικές φασματικές περιοχές εκπομπής, από 0,45 μm έως 14,385 μm . Η ραδιομετρική ανάλυσή του είναι της τάξης των 12 bit , έχει δυνατότητα χωρικών αναλύσεων 250 m, 500 m και 1 km, με μέση περίοδο επαναφοράς, μια με δύο ημέρες (Justice et al., 1998). Το MODIS σχεδιάστηκε και αναπτύχθηκε με στόχο την παρακολούθηση, καταγραφή και συλλογή παγκόσμιων δεδομένων για μελέτες τόσο βραχυπρόθεσμων όσο και μακροπρόθεσμων αλλαγών στα χερσαία (Terra MODIS), ωκεάνια (Aqua MODIS) και ατμοσφαιρικά συστήματα της γης. Τα στοιχεία που καταγράφονται είναι μείζονος σημασίας καθώς αφορούν φαινόμενα και παραμέτρους, όπως οι πυρκαγιές, η θερμοκρασία στην επιφάνεια των ωκεανών, η υγρασία της ατμόσφαιρας και τα αιωρούμενα σωματίδια. Γενικότερα, τα στοιχεία που προκύπτουν, είναι απαραίτητα για την επιστημονική κοινότητα ώστε να αξιολογήσει τον αντίκτυπο των παγκόσμιων περιβαλλοντικών και κλιματικών αλλαγών (Wenny, 2009).

Πιο συγκεκριμένα, στον τομέα των πυρκαγιών δύναται να αποτελέσει πολύ σημαντικό παράγοντα πληροφοριών, καθώς μπορεί να προσδιορίσει την έκταση και τη σοβαρότητα της πυρκαγιάς, μέσω της σύγκρισης θερμοκρασίας γειτονικών εικονοστοιχείων. Ωστόσο, σημειώνεται ότι δεν είναι δυνατός ο εντοπισμός των μικρών πυρκαγιών. Το προϊόν καμένης περιοχής περιέχει πληροφορίες καύσης και ποιότητας ανά εικονοστοιχείο και παράγεται από τις ημερήσιες εισόδους ανάκλασης επιφάνειας που προέρχονται από Terra MODIS. Ο αλγόριθμος αναλύει τη δυναμική της ημερήσιας ανάκλασης επιφάνειας για να εντοπίσει γρήγορες αλλαγές, και χρησιμοποιεί αυτές τις πληροφορίες για να ανιχνεύσει την κατά προσέγγιση ημερομηνία καύσης, χαρτογράφηση της χωρικής έκτασης των πρόσφατων πυρκαγιών μόνο. Παρέχει ποικίλες πληροφορίες αξιολόγησης της ποιότητας και μια ενιαία συνοπτική βαθμολογία αξιολόγησης της ποιότητας για κάθε εικονοστοιχείο. Ο αλγόριθμος βελτιώνεται σε προηγούμενες μεθόδους χρησιμοποιώντας μια προσέγγιση ανίχνευσης αλλαγών που βασίζεται σε μοντέλο BRDF για τον χειρισμό γωνιακών διακυμάνσεων στα δεδομένα και χρησιμοποιεί ένα στατιστικό μέτρο για τον προσδιορισμό της πιθανότητας αλλαγής από μια κατάσταση που παρατηρήθηκε προηγουμένως.

2.2 Επεξεργασία Δεδομένων με τη χρήση MATLAB

Η MATLAB (Matrix Laboratory) αποτελεί μια διαδραστική προγραμματιστική πλατφόρμα. Διαθέτει μεγάλη ποικιλία λειτουργιών, σχεδιασμένη για τον υπολογισμό αριθμητικών πινάκων, την ανάλυση δεδομένων, την ανάπτυξη αλγορίθμων και μοντέλων. Χρησιμοποιείται ευρέως ως εργαλείο για τους επιστήμονες σε πολλούς τομείς, όπως της μηχανικής, των μαθηματικών και της φυσικής, λόγω των πολλών δυνατοτήτων του στην πραγματοποίηση σύνθετων υπολογισμών, την οπτικοποίηση δεδομένων και γραφικών. Παρακάτω παρουσιάζονται τα πέντε κύρια μέρη της πλατφόρμας εν συντομία.

Κύρια Μέρη MATLAB

Γλώσσα προγραμματισμού ➡ Γλώσσα μήτρας-συστοιχίας (matrix-array), υψηλού επιπέδου δυνατότητα για έλεγχο, συναρτήσεις, δομές δεδομένων, εντολές ροής, εισόδου- εξόδου.

Περιβάλλον εργασίας ➡ Αποτελεί το σύνολο εργαλείων και εγκαταστάσεων. Περιλαμβάνει εγκαταστάσεις για τη διαχείριση των μεταβλητών στο χώρο εργασίας (Command Window, Workspace, Command History) για την εισαγωγή και εξαγωγή δεδομένων. Περιλαμβάνει επίσης εργαλεία για την ανάπτυξη, τη διαχείριση, τον εντοπισμό σφαλμάτων.

Σύστημα γραφικών ➡ Είναι υψηλού επιπέδου σύστημα για δισδιάστατη και τρισδιάστατη απεικόνιση δεδομένων, επεξεργασία εικόνας, κινούμενα σχέδια και γραφικά παρουσίασης

Βιβλιοθήκη μαθηματικών συναρτήσεων ➡ Αποτελείται από μια τεράστια συλλογή υπολογιστικών αλγορίθμων που κυμαίνονται από στοιχειώδεις μέχρι πιο εξελιγμένες συναρτήσεις.

Διεπαφή Προγράμματος Εφαρμογής (API) ➡ Η συγκεκριμένη βιβλιοθήκη επιτρέπει στο χρήστη να γράφει σε άλλες γλώσσες προγραμματισμού που αλληλοεπιδρούν με το MATLAB (C, Fortran).

2.3 Δισδιάστατος Συντελεστής Συσχέτισης

Ο συντελεστής συσχέτισης Pearson αποτελεί μέτρο ισχύος της γραμμικής συσχέτισης μεταξύ δύο μεταβλητών, δηλαδή το πως μεταβάλλεται η μια ως προς την άλλη. Ο συντελεστής συσχέτισης Pearson για δύο μεταβλητές x και y για ένα δείγμα n ζευγών με δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}$$

- Αν $r = \pm 1$ υπάρχει **τέλεια γραμμική συσχέτιση**.
- Αν $-0.3 \leq r < 0.3$ **δεν υπάρχει γραμμική συσχέτιση**, χωρίς όμως να σημαίνει ότι δεν υπάρχει άλλου είδους συσχέτιση μεταξύ των δύο μεταβλητών.
- Αν $-0.5 < r \leq -0.3$ ή $0.3 \leq r < 0.5$ υπάρχει **ασθενής γραμμική συσχέτιση**
- Αν $-0.7 < r \leq -0.5$ ή $0.5 \leq r < 0.7$ υπάρχει **μέση γραμμική συσχέτιση**
- Αν $-0.8 < r \leq -0.7$ ή $0.7 \leq r < 0.8$ υπάρχει **ισχυρή γραμμική συσχέτιση**
- Αν $-1 < r \leq -0.8$ ή $0.8 \leq r < 1$ υπάρχει **πολύ ισχυρή γραμμική συσχέτιση**

Ωστόσο, υπογραμμίζεται ότι οι θετικές τιμές συσχέτισης του r δεν αντιστοιχούν απαραίτητα σε μεγαλύτερο βαθμό γραμμικής συσχέτισης, καθώς αυτός καθορίζεται από την απόλυτη τιμή του r και όχι από το πρόσημό του. Το πρόσημο του r προσδιορίζει το αν η συσχέτιση είναι θετική ή αρνητική, το οποίο δείχνει αν η αύξηση της μίας μεταβλητής αντιστοιχεί σε αύξηση ή μείωση της άλλης μεταβλητής.

Στην περίπτωση που οι τιμές του y αυξάνουν όσο αυξάνουν και οι τιμές του x η τιμή του r είναι θετική οπότε οι μεταβλητές είναι θετικά σχετιζόμενες. Αντιστρόφως, στην περίπτωση που οι τιμές της y παρουσιάζουν μείωση όσο οι τιμές της x αυξάνουν, οι μεταβλητές κρίνονται αρνητικά σχετιζόμενες.

2.4 Συντελεστής Προσδιορισμού (R^2)

Ο συντελεστής προσδιορισμού χρησιμοποιείται στα απλά γραμμικά μοντέλα και οι τιμές του κυμαίνονται από 0 έως 1. Ο συντελεστής προκύπτει υψώνοντας τον συντελεστή συσχέτισης (r) στο τετράγωνο. Εκφράζει σε ποιο βαθμό η μεταβλητότητα της εξαρτημένης μεταβλητής εξηγείται από τη μεταβλητότητα της ανεξάρτητης.

Όσο μεγαλύτερες είναι οι τιμές που παρουσιάζει ο συντελεστής, τόσο ισχυρότερη είναι η γραμμική σχέση εξάρτησης μεταξύ δύο μεταβλητών X και Y .

2.5 Διάγραμμα Διασποράς

Τα διαγράμματα διασποράς χρησιμοποιούν σημεία δεδομένων για τη σχεδίαση δύο μέτρων σε οποιοδήποτε σημείο μιας κλίμακας και αποτελεί σημαντικό μέσο για την εύρεση συσχετίσεων δεδομένων. Πρακτικά, στα διαγράμματα διασποράς δημιουργείται ένα νέφος σημείων το οποίο δίνει απευθείας μια απεικόνιση της σχέσης που συνδέει τις μεταβλητές. Αν στα γραφήματα παρατηρείται ότι οι τιμές ακολουθούν κάποιο μοτίβο και δεν είναι τυχαία διασκορπισμένες σημαίνει ότι οι τιμές σχετίζονται μεταξύ τους.

2.6 Μεθοδολογία που ακολουθήθηκε

2.6.1 Ομαδοποίηση δεδομένων

Έχοντας συγκεντρώσει τα δεδομένα καμένης έκτασης (BA) και του δείκτη οπτικού βάθους αιωρούμενων σωματιδίων (AOD), πραγματοποιήθηκε χωροχρονική ομαδοποίηση των στοιχείων αυτών. Σκοπός της ομαδοποίησής τους είναι η ύπαρξη κοινής χωρικής και χρονικής κλίμακας μεταξύ του BA και του AOD, ώστε να μπορούν να επεξεργαστούν περεταίρω. Χρονικά τα δεδομένα χωρίζονται σε μηνιαίες τιμές μετρήσεων και για τις δύο παραμέτρους, ενώ η χωρική ανάλυση του BA αναδιατάσσεται από $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ σε $1^\circ \times 1^\circ$ ώστε να συμβαδίζει με την χωρική κλίμακα του AOD.

2.6.2 Λογαρίθμηση τιμών καμένης έκτασης (BA)

Κατά την ανάλυση των δεδομένων, χρησιμοποιείται ο λογάριθμος των τιμών BA. Αυτό αποτελεί πρακτική που παρουσιάζει καλή γραμμική συσχέτιση μεταξύ του BA και κλιματικών δεικτών και δεικτών πυρκαγιάς, σε εποχιακές και διαχρονικές κλίμακες (Grillakis et al., 2022). Στην προκειμένη περίπτωση, εφαρμόστηκε κατά την ανάλυση του BA με το AOD καθώς διερευνήθηκε αν παρουσιάζει αντίστοιχα καλή συσχέτιση.

2.6.3 Αφαίρεση μηδενικών τιμών

Τα δεδομένα που τίθενται προς επεξεργασία για το BA περιλαμβάνουν κάποιες μηδενικές τιμές. Οι τιμές αυτές επιλέγεται σε κάποιες περιπτώσεις να απομακρυνθούν, ώστε να μελετηθεί η σχέση του BA με το AOD, εστιάζοντας στα σημεία που παρουσιάζουν καμένες εκτάσεις. Βάσει αυτού μπορεί να επιτευχθεί καλύτερη ανάλυση της σχέσης και της σύνδεσης των δύο παραμέτρων που εξετάζονται αποφεύγοντας το θόρυβο των δεδομένων.

2.6.4 Μέσες τιμές δεικτών

Η ανάλυση της εργασίας βασίζεται στις μηνιαίες μετρήσεις που λήφθηκαν για το BA αλλά και για το AOD σε παγκόσμιο επίπεδο. Σε πρώτο στάδιο, δημιουργήθηκαν συγκεντρωτικοί χάρτες μέσων τιμών, για κάθε δείκτη ξεχωριστά, που αφορούν το σύνολο των δεκαοκτώ ετών που εξετάζονται. Σκοπός είναι η απεικόνιση των περιοχών που παρουσιάζουν διαχρονικά έντονες πυρκαγιές, με μεγάλες καμένες εκτάσεις αλλά και υψηλό δείκτη AOD. Από αυτά τα δεδομένα, δημιουργήθηκε ένας παγκόσμιος χάρτης συσχέτισης του AOD και του BA για τις μέσες τιμές όλων των ετών. Ωστόσο, οι χάρτες αυτοί δεν μπορούν να παρέχουν κάτι περισσότερο από μια γενικότερη εικόνα, εφόσον οι πληροφορίες και τα συμπεράσματα που μπορούν να διεξαχθούν δεν συμπεριλαμβάνουν την εποχικότητα, η οποία επηρεάζει ιδιαίτερα τις πυρκαγιές. Βάσει αυτού, δημιουργήθηκαν νέοι χάρτες με τις μέσες τιμές των δεικτών ανά εποχή, ενώ ακόμα, δημιουργήθηκαν και οι αντίστοιχοι εποχιακοί χάρτες συσχέτισης. Οι χάρτες αυτοί, συμβάλλουν στη βαθύτερη κατανόηση της σχέσης του BA και του AOD καθώς και στη διερεύνηση επηρεασμού της αλληλεπίδρασής τους, ανάλογα με τις κλιματολογικές συνθήκες.

2.6.5 Αφαίρεση εποχικότητας

Η έρευνα, σε επόμενο στάδιο, στράφηκε στην αφαίρεση της εποχικότητας από τα δεδομένα. Η διαδικασία αυτή αφορά τη συσχέτιση της ανωμαλίας των τιμών του BA και του AOD. Για το BA, αρχικά υπολογίστηκε ο λογάριθμός του, καθώς και η μέση μηνιαία τιμή του για τα δεκαοκτώ υπό εξέταση χρόνια. Έτσι προκύπτει η ανωμαλία του BA αφαιρώντας για κάθε μήνα κάθε έτους, από τη λογαριθμική τιμή του εκάστοτε μηνιαίου BA, τη μέση μηνιαία (για όλα τα έτη) λογαριθμική τιμή που αφορά τον συγκεκριμένο μήνα. Για την εύρεση της ανωμαλίας των τιμών του AOD, ακολουθήθηκε η ίδια διαδικασία χωρίς όμως την πρότερη λογαρίθμηση των τιμών.

Η κανονικοποιημένη ανωμαλία για το BA υπολογίστηκε βάσει του τύπου (1) και για το AOD υπολογίστηκε σύμφωνα με τον τύπο (2) που παρουσιάζονται παρακάτω:

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

$$AODA_{m,y} = AOD_{m,y} - \left(\frac{\sum AOD_m}{n_m} \right) \quad (2)$$

Όπου:

- BAA: η ανωμαλία του BA
- m: ο ημερολογιακός μήνας
- γ: το έτος
- n: ο αριθμός των μηνών
- AODA: η ανωμαλία του AOD

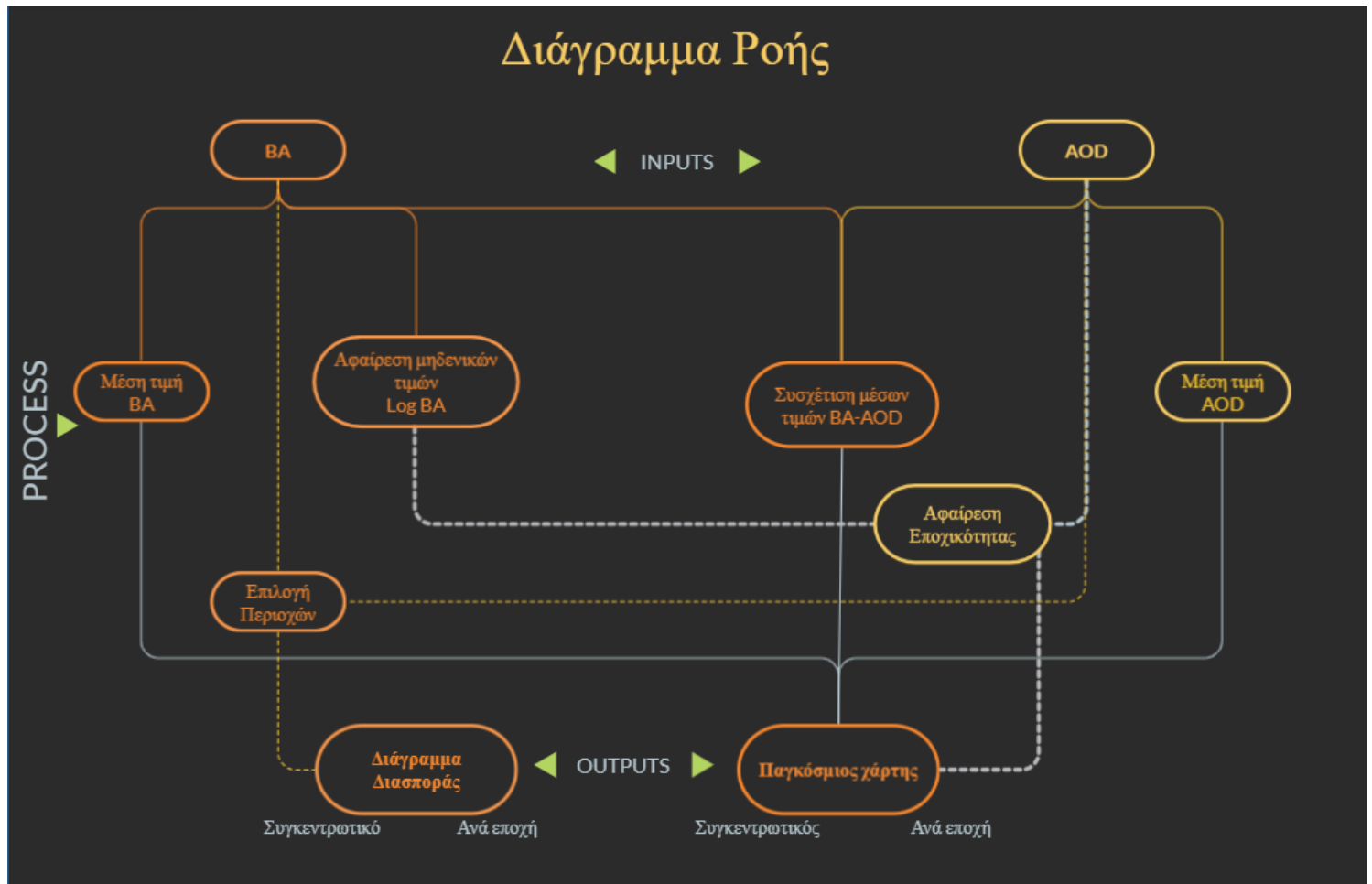
Με τη μέθοδο συσχέτισης ανωμαλιών του BA και του AOD δημιουργήθηκαν χάρτες που απομονώνουν τη σχέση των δύο μεταβλητών. Οι πυρκαγιές καθώς και τα αιωρούμενα σωματίδια, επηρεάζονται ιδιαίτερα από τις εποχιακές μεταβολές, ενώ με την αφαίρεση της εποχικότητας αφαιρούνται κι άλλοι παράγοντες που συνοδεύουν τις εποχές και επηρεάζουν την εμφάνιση πυρκαγιών. Έτσι, επιτυγχάνεται η απεικόνιση της σχέσης του BA και του AOD, χωρίς την επίδραση άλλων παραγόντων.

2.6.6 Διαγράμματα διασποράς

Τελική προσέγγιση στην ανάλυση, αποτελεί η δημιουργία διαγραμμάτων διασποράς, ώστε να παρατηρηθεί η σχέση και η ταυτόχρονη συμπεριφορά τους. Στα διαγράμματα επιλέχθηκε να απομονωθούν περιοχές που διαχρονικά πλήττονται από πυρκαγιές, με αποτέλεσμα την δημιουργία μεγάλων καμένων εκτάσεων, ώστε να εξεταστούν ξεχωριστά.

2.7 Διάγραμμα Ροής

Παρακάτω παρουσιάζεται το διάγραμμα ροής, που δημιουργήθηκε για την συνοπτική περιγραφή των κύριων επεξεργασιών, που περιγράφηκαν στις προηγούμενες παραγράφους, από τις οποίες πέρασαν τα δεδομένα, έως ότου να εξαχθούν τα επιθυμητά αποτελέσματα.

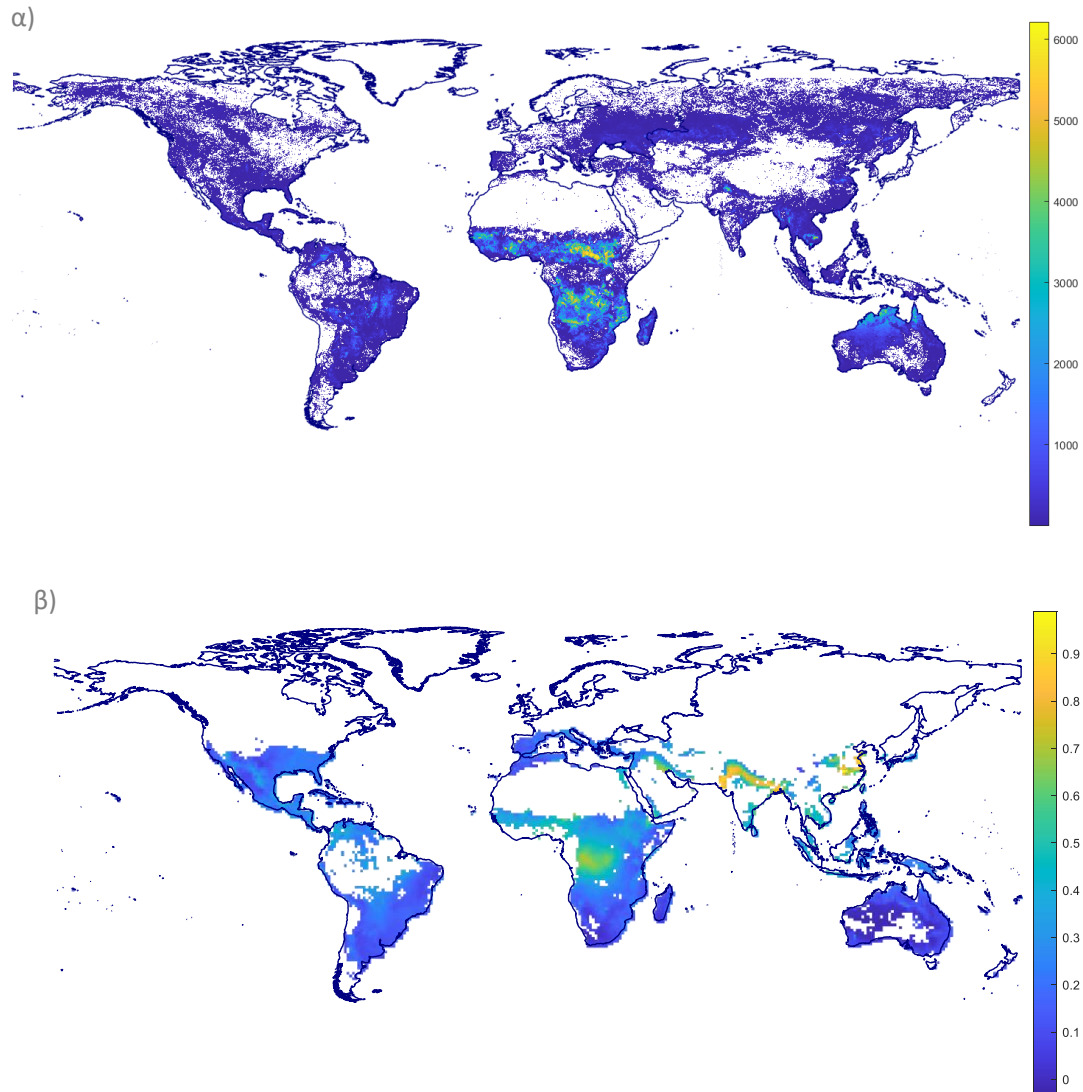


Εικόνα 14. Διάγραμμα Ροής της ανάλυσης δεδομένων που ακολουθήθηκε στην εργασία.

Αποτελέσματα

3.1 Καμένη έκταση (BA) και δείκτης οπτικού βάθους αιωρούμενων σωματιδίων (AOD)

Παρακάτω παρουσιάζονται οι εικόνες για τις μέσες τιμές του BA και του AOD, σε παγκόσμια κλίμακα, για τα έτη 2001 έως 2018.



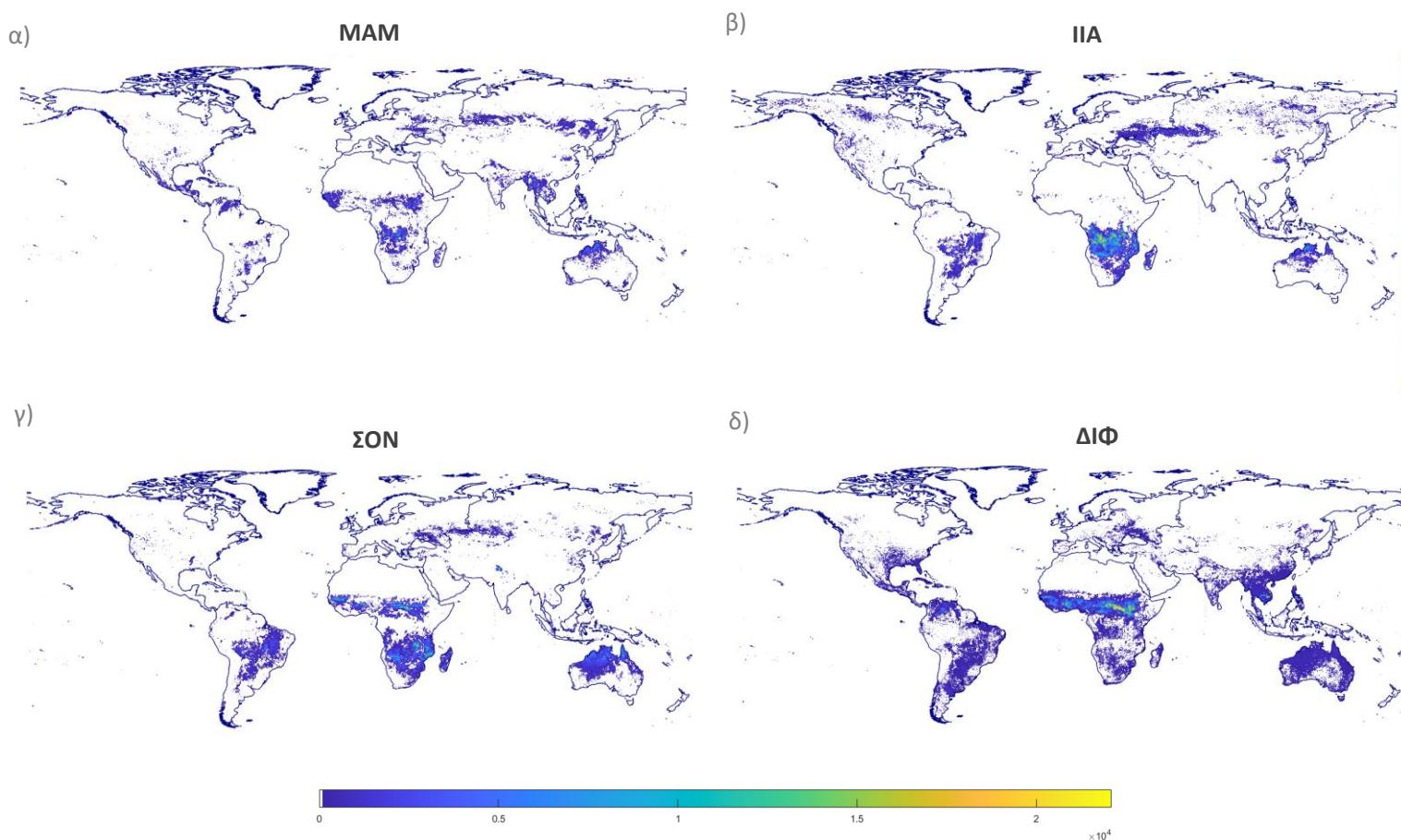
Εικόνα 15. Παγκόσμιοι χάρτες για: (α) Μέση τιμή BA 2001-2018 (β) Μέση τιμή AOD 2001-2018.

Από τον χάρτη στην Εικόνα 15.α παρατηρούνται, καμένες εκτάσεις από πυρκαγιές, σε όλη την αφρικανική ήπειρο, με τις μεγαλύτερες τιμές να καταγράφονται στο βόρειο κομμάτι της υποσαχάριας Αφρικής καθώς και στην κεντρική Αφρική. Ακολούθως παρατηρούνται καμένες εκτάσεις, στο βόρειο άκρο της Αυστραλίας, ενώ σημαντικά

μικρότερες εμφανίζονται στη Νότια Αμερική, στην νοτιοανατολική Ασία και τη Σιβηρία.

Στην Εικόνα 15.β ο παγκόσμιος χάρτης που αφορά το AOD, παρουσιάζει τις υψηλότερες τιμές του δείκτη σε περιοχές της νότιας και ανατολικής Ασίας, οι οποίες κατά προσέγγιση, ταυτίζονται με το ανατολικό άκρο της Κίνας και βόρειες περιοχές της Ινδίας. Υψηλές τιμές παρουσιάζει ο δείκτης στην κεντρική Αφρική, ενώ παγκοσμίως ο δείκτης φαίνεται αρκετά χαμηλότερος στην Ευρώπη, την Αυστραλία, την Βόρεια και την Νότια Αμερική.

Στην συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για τις μέσες τιμές του BA και του AOD ανά εποχή, για την διάρκεια των δεκαοκτώ ετών που εξετάζονται. Οι εικόνες ακολουθούν με τη σειρά για κάθε εποχή: α) Μάρτιος, Απρίλιος, Μάιος (εφεξής MAM), β) Ιούνιος, Ιούλιος, Αύγουστος (εφεξής IIA), γ) Σεπτέμβριος, Οκτώβριος, Νοέμβριος (εφεξής ΣΟΝ), δ) Δεκέμβριος, Ιανουάριος, Φεβρουάριος (εφεξής ΔΙΦ).



Εικόνα 16. Παγκόσμιοι χάρτες για την μέση τιμή του BA για τις εποχές: α) MAM β) IIA γ) ΣΟΝ δ) ΔΙΦ.

Από τους εποχιακούς χάρτες που δημιουργήθηκαν για το ΒΑ, παρατηρήθηκαν αυξημένες οι καμένες εκτάσεις κατά τις εποχές ΙΙΑ και ΔΙΦ, ενώ εντοπίζονται λιγότερες κατά την εποχή ΣΟΝ και ελάχιστες, συγκριτικά, την εποχή ΜΑΜ. Η Αφρικανική ήπειρος πλήττεται διαχρονικά, παρουσιάζοντας τον μεγαλύτερο αριθμό καμένων εκτάσεων και στις τέσσερις εποχές του χρόνου.

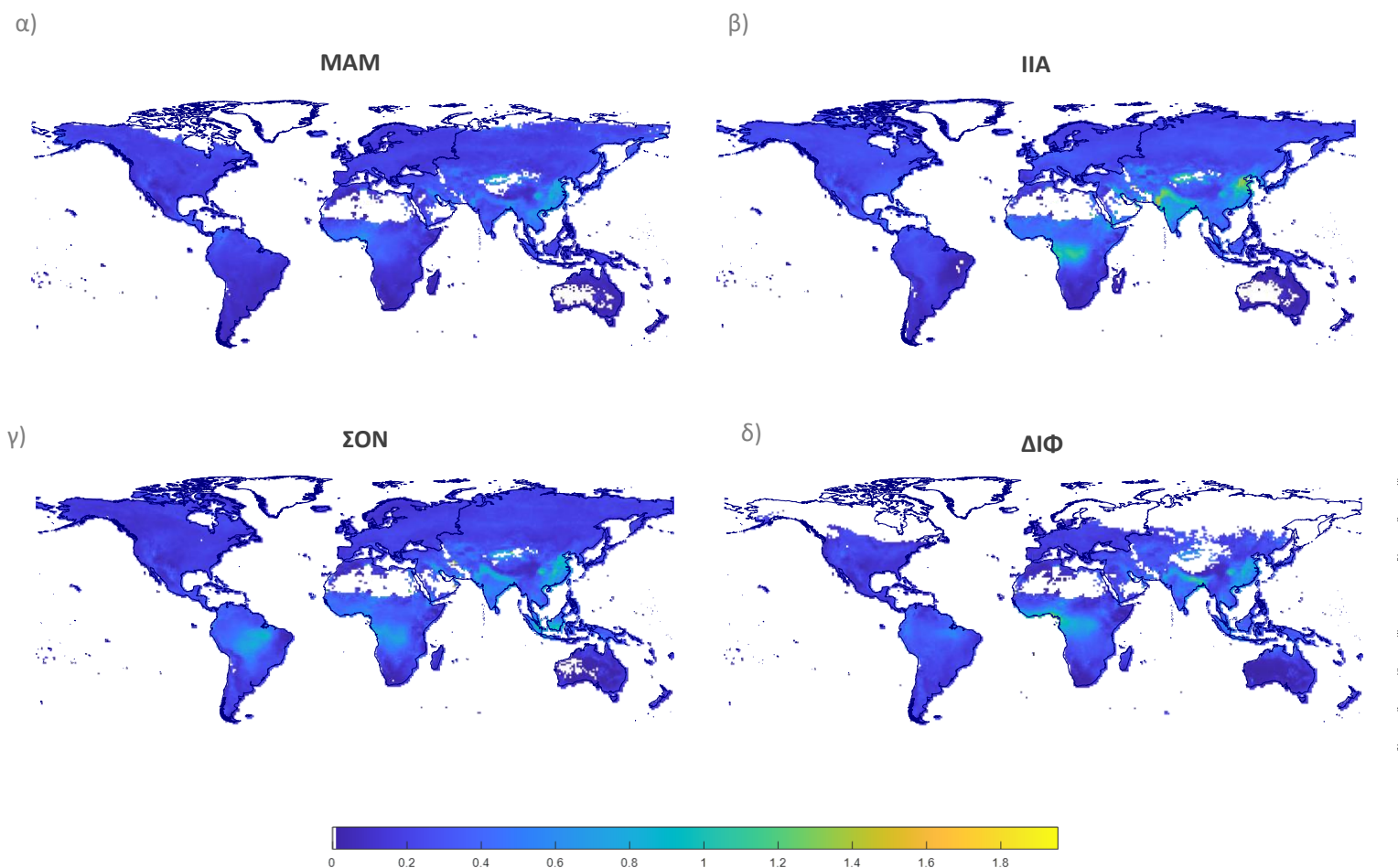
Ειδικότερα για την εποχή ΜΑΜ κατά την περίοδο των 18 ετών, παρατηρείται η περιορισμένη ύπαρξη καμένων εκτάσεων σε παγκόσμιο επίπεδο. Αυτές εντοπίζονται στη Σιβηρία, την νοτιοανατολική Ασία, στο βόρειο κομμάτι της Αυστραλίας ενώ είναι διάσπαρτες και στο ανατολικό, κεντροδυτικό και νότιο κομμάτι της υποσαχάριας Αφρικής.

Για την εποχή ΙΙΑ παρατηρούνται ιδιαίτερα μεγάλες καμένες εκτάσεις, κυρίως στο νότιο κομμάτι της κεντρικής και ανατολικής Αφρικής, με μεγάλη έξαρση στις περιοχές του Κονγκό, της Αγκόλας και της Ζάμπιας. Ακολουθούν με πολύ λιγότερες εκτάσεις, το βόρειο άνω άκρο της Αυστραλίας και το κεντροανατολικό κομμάτι της Νότιας Αμερικής, στο ύψος της Βραζιλίας, καθώς και η Ευρώπη, η Σιβηρία και η Βόρεια Αμερική.

Όσον αφορά την εποχή ΣΟΝ, παρατηρούνται καμένες εκτάσεις κατά μήκος όλου του βόρειου τμήματος της Αυστραλίας. Η Αφρικανική ήπειρος εμφανίζει καμένες εκτάσεις, στο βόρειο καθώς και στο νοτιοανατολικό κομμάτι της. Επιπρόσθετα, εντοπίζονται κάποιες καμένες εκτάσεις στις ανατολικές περιοχές της Νότιας Αμερικής, κυρίως στην περιοχή της Βραζιλίας.

Τέλος κατά την περίοδο ΔΙΦ, είναι εμφανής η μεγάλη συγκέντρωση καμένων εκτάσεων στο βόρειο κομμάτι της υποσαχάριας Αφρικής με έξαρση να παρουσιάζεται στις περιοχές του Σουδάν, του Τσαντ και της Κεντροαφρικανικής Δημοκρατίας. Στην συνέχεια παρουσιάζονται μερικές καμένες εκτάσεις στην νοτιοανατολική Ασία κατά προσέγγιση στην Καμπότζη και στο βόρειο / βορειοδυτικό άκρο της Νότιας Αμερικής κατά προσέγγιση στις χώρες της Βενεζουέλας και της Κολομβίας.

Παρακάτω παρουσιάζονται οι χάρτες των μέσων τιμών του δείκτη AOD, ανά εποχή, για την περίοδο των δεκαοκτώ ετών, με την ακόλουθη σειρά: α) ΜΑΜ, β) ΙΙΑ, γ) ΣΟΝ, δ) ΔΙΦ.



Εικόνα 17. Παγκόσμιοι χάρτες για την μέση τιμή του AOD για τις εποχές: α) ΜΑΜ β) ΙΙΑ γ) ΣΟΝ δ) ΔΙΦ.

Σύμφωνα με τους εποχιακούς χάρτες που δημιουργήθηκαν για το AOD, παρατηρούνται υψηλές τιμές του δείκτη κυρίως κατά την εποχή ΙΙΑ, ενώ διαχρονικά οι μεγαλύτερες τιμές σημειώνονται στα νότια και ανατολικά κομμάτια της Ασίας και την κεντρική Αφρική.

Αναλυτικότερα, η νότια και ανατολική Ασία, παρουσιάζει ιδιαίτερα υψηλές μετρήσεις του δείκτη, με τις υψηλότερες τιμές στις περιοχές της Ινδίας και της Κίνας. Κατά τη διάρκεια όλων των εποχών εμφανίζονται μεγάλες τιμές στην περιοχή, σε σύγκριση με τις υπόλοιπες ηπείρους, με την περίοδο ΙΙΑ να αποτελεί την εποχή με

την μεγαλύτερη αύξηση, ενώ για την εποχή ΣΟΝ, ο δείκτης αυξάνει στα νοτιοανατολικά νησιωτικά συμπλέγματα της Ασίας.

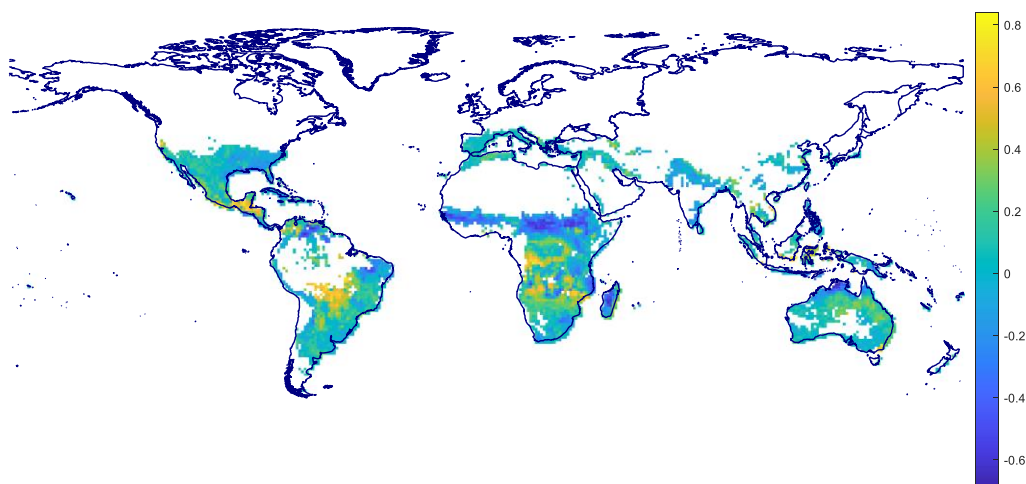
Ακολουθώντας, η Αφρική αποτελεί την επόμενη ήπειρο που καταγράφει υψηλές τιμές του δείκτη κυρίως την περίοδο ΙΙΑ και την εποχή ΔΙΦ, σύμφωνα με τους αντίστοιχους χάρτες, κυρίως στο κεντρικό κομμάτι της ηπείρου, περίπου στις περιοχές της Αγκόλας και του Κονγκό.

Τέλος, η Νότια Αμερική παρουσιάζει άνοδο στις τιμές του δείκτη κατά την εποχή ΣΟΝ, κατά προσέγγιση στην επικράτεια της Βραζιλίας και της Βολιβίας.

Γενικότερα, ο δείκτης αυξάνει τοπικά σε διάφορα μέρη παγκοσμίως, ωστόσο, λόγω της μεγάλης κλίμακας δεν είναι εύκολο να διακριθούν, ενώ ακόμα, σημειώνεται ότι για τη μέτρηση του AOD απαιτείται ηλιακό φως. Λόγω αυτού, το χειμώνα του Βόρειου Ημισφαιρίου, σε πολλές περιοχές καθίσταται ανέφικτη η μέτρησή του.

3.2 Συσχέτιση BA-AOD

Στη συνέχεια βρέθηκε ο χάρτης συσχέτισης του BA με το AOD στην διάρκεια των δεκαοκτώ ετών, όπως προκύπτει από τη χρήση όλων των μηνών κάθε έτους. Παρατηρείται ότι η κλίμακα κυμαίνεται από -0,6 έως 0,8 με τάση προς τη θετική συσχέτιση.



Εικόνα 18. Παγκόσμιος χάρτης συσχέτισης BA-AOD την περίοδο 2001-2018.

Από την Εικόνα 18, η συσχέτιση των δεικτών δείχνει να έχει ως επί το πλείστον θετική τάση η οποία εμφανίζεται στις τροπικές περιοχές του πλανήτη. Ειδικότερα, ο μεγαλύτερος βαθμός συσχέτισης εντοπίζεται στο νότιο άκρο της Βόρειας Αμερικής, στο κεντρικό κομμάτι της Νότιας Αμερικής και στα κεντρικά και νοτιοανατολικά κομμάτια της Αφρικανικής ηπείρου.

Ωστόσο, παρατηρώντας συνολικά τον παγκόσμιο χάρτη, δεν παρουσιάζεται μεγάλη συσχέτιση μεταξύ των δύο δεικτών, ενώ σε κάποιες περιπτώσεις εμφανίζεται αρνητική συσχέτιση. Το γεγονός αυτό θα μπορούσε να οφείλεται σε πλήθος παραγόντων κατά τους οποίους το BA και το AOD σχετίζονται με διαφορετικό τρόπο, ενώ σημαντική παρατήρηση αποτελεί το γεγονός ότι το AOD δεν αποτελεί δείκτη μέτρησης των αιωρούμενων σωματιδίων αποκλειστικά από πυρκαγιές, αλλά προερχόμενα και από άλλες πηγές, ανθρωπογενείς ή φυσικές.

Πιο συγκεκριμένα, ένας παράγοντας επηρεασμού είναι η ερημική σκόνη. Όπως έχει αναφερθεί στην αντίστοιχη παράγραφο, σε κάποιες περιόδους η αιολική κίνηση των σωματιδίων της, είναι τόσο μεγάλη ώστε τα σήματα αιωρούμενων σωματιδίων της, να υπερτερούν των ανθρωπογενών και των θαλάσσιων αιωρούμενων σωματιδίων. Στις συγκεκριμένες περιπτώσεις, δεν θα μπορούσε απαραίτητα να συνδεθεί αύξηση του BA με την αύξηση του AOD.

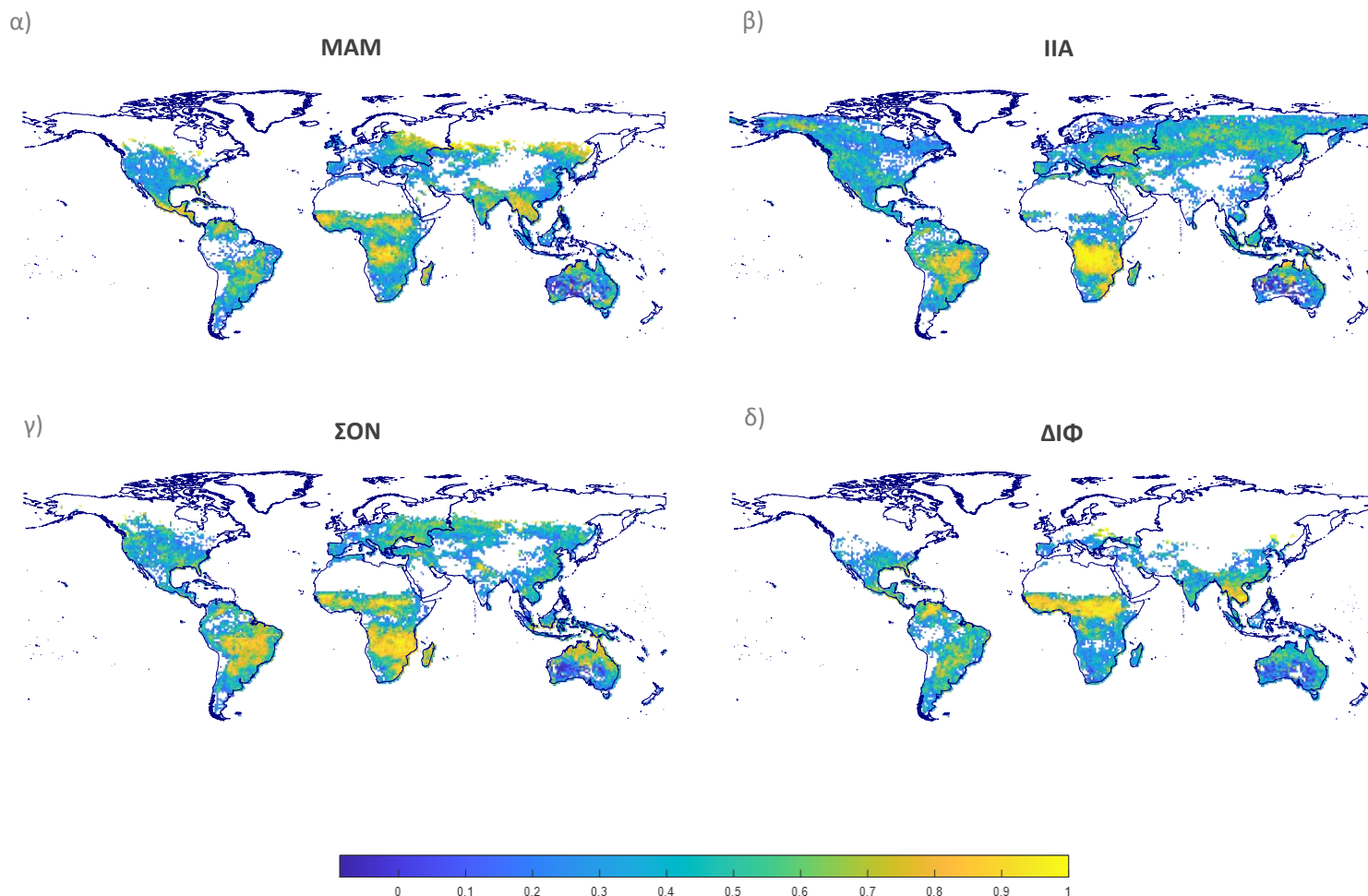
Αντίστοιχα, μείζονες παράγοντες επηρεασμού αποτελούν οι εποχές και οι μεταβολές που τις συνοδεύουν. Μια εποχή με αυξημένη υγρασία, οδηγεί σε μη ευνοϊκές συνθήκες για την εμφάνιση πυρκαγιών. Ωστόσο, η υψηλή υγρασία στη ατμόσφαιρα αυξάνει το AOD, οδηγώντας τους δύο παράγοντες σε αρνητική συσχέτιση, όπου ο ένας παράγοντας αυξάνεται και ο άλλος μειώνεται.

Επιπρόσθετα, σημαντικός παράγοντας επηρεασμού, θεωρείται η ατμοσφαιρική ρύπανση που προκαλείται από τα αστικά κέντρα και τις βιομηχανίες καθώς και οι αλλαγές στις χρήσεις γης. Τα παραπάνω αυξάνουν σημαντικά τις εκπομπές αιωρούμενων σωματιδίων και κατά συνέπεια τον δείκτη AOD. Ωστόσο, εφόσον δεν αυξάνουν το BA, οι δείκτες δεν μπορούν να συσχετιστούν θετικά.

Εντούτοις, είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι ο παραπάνω χάρτης αφορά τη συσχέτιση των δεικτών για το σύνολο των δεκαοκτώ ετών, χωρίς κάποια άλλη επεξεργασία για την εξαγωγή της «καθαρής» σχέσης μεταξύ του BA και του AOD.

Λόγω της γενικότητας του αρχικού χάρτη, δεν μπορούν να εξαχθούν ασφαλή συμπεράσματα για τη συσχέτιση των δύο δεικτών. Βάσει αυτού, επιλέχθηκε να δημιουργηθούν εποχιακοί χάρτες, εφόσον οι μεταβολές που τις συνοδεύουν, αποτελούν κύριο παράγοντα για την εμφάνιση πυρκαγιών αλλά και για την αύξηση ή μείωση του AOD.

Παρακάτω παρουσιάζονται οι εποχικοί χάρτες για τις εποχές ΜΑΜ, ΙΙΑ, ΣΟΝ και ΔΙΦ.



Εικόνα 19. Παγκόσμιοι χάρτες συσχέτισης BA-AOD ανά εποχή: α) MAM β) JJA γ) SON δ) ΔΙΦ.

Από την Εικόνα 19, φαίνεται να υπάρχει ισχυρή συσχέτιση μεταξύ του BA και του AOD σε εποχιακό επίπεδο, καθώς η συσχέτιση εμφανίζεται πολύ πιο καθαρά σε σχέση με την ανάλυση όλων των μηνών του έτους, με θετικές τάσεις σε όλες τις ηπείρους. Εντοπίζεται πιο ισχυρή στην Αφρική και την Νότια Αμερική ανεξαιρέτως εποχής, με ιδιαίτερα υψηλές τιμές συσχέτισης να φτάνουν έως και την τιμή 1, αντιπροσωπεύοντας την ισχυρότερη δυνατή συσχέτιση.

Ειδικότερα, για το βόρειο κομμάτι της υποσαχάριας Αφρικής η συσχέτιση παρουσιάζει τη μέγιστη ισχύ της την εποχή ΔΙΦ, ενώ είναι ισχυρή και τις εποχές ΣΟΝ και ΜΑΜ. Η κεντρική Αφρική και τα νοτιοδυτικά άκρα της παρουσιάζουν την υψηλότερη συσχέτιση κατά την εποχή JJA και ακολούθως την εποχή ΣΟΝ. Την εποχή ΜΑΜ η συσχέτιση είναι αρκετά καλή στο δυτικό κομμάτι της κεντρικής Αφρικής.

Η Νότια Αμερική παρουσιάζει την μεγαλύτερη συσχέτιση BA-AOD, την εποχή ΣΟΝ και ακολούθως την εποχή JJA. Τις εποχές ΜΑΜ και ΔΙΦ η συσχέτιση μειώνεται σε σχέση με τις άλλες δύο εποχές, ωστόσο τοπικά, οι δείκτες συσχετίζονται σε μεγάλο βαθμό.

Η Βόρεια Αμερική παρουσιάζει το μεγαλύτερο βαθμό συσχέτισης την εποχή ΜΑΜ στο νότιο άκρο της, ενώ τις υπόλοιπες εποχές η συσχέτιση εμφανίζεται τοπικά σε χαμηλότερες τιμές.

Για την Αυστραλία η συσχέτιση είναι υψηλότερη την εποχή ΣΟΝ, ενώ ακολουθούν οι εποχές ΙΙΑ και ΜΑΜ με τους δείκτες να συσχετίζονται σε λιγότερες περιοχές. Την εποχή ΔΙΦ η συσχέτιση είναι πολύ μικρή.

Η Σιβηρία, φαίνεται να παρουσιάζει μεγαλύτερη συσχέτιση κυρίως κατά την εποχή ΜΑΜ και ακολούθως, σε μικρότερο βαθμό την εποχή ΙΙΑ. Την εποχή ΣΟΝ η συσχέτιση είναι πολύ χαμηλή, ενώ την εποχή ΔΙΦ δεν καταγράφεται, γεγονός που αναμενόταν λόγω της θέσης της στο βόρειο ημισφαίριο.

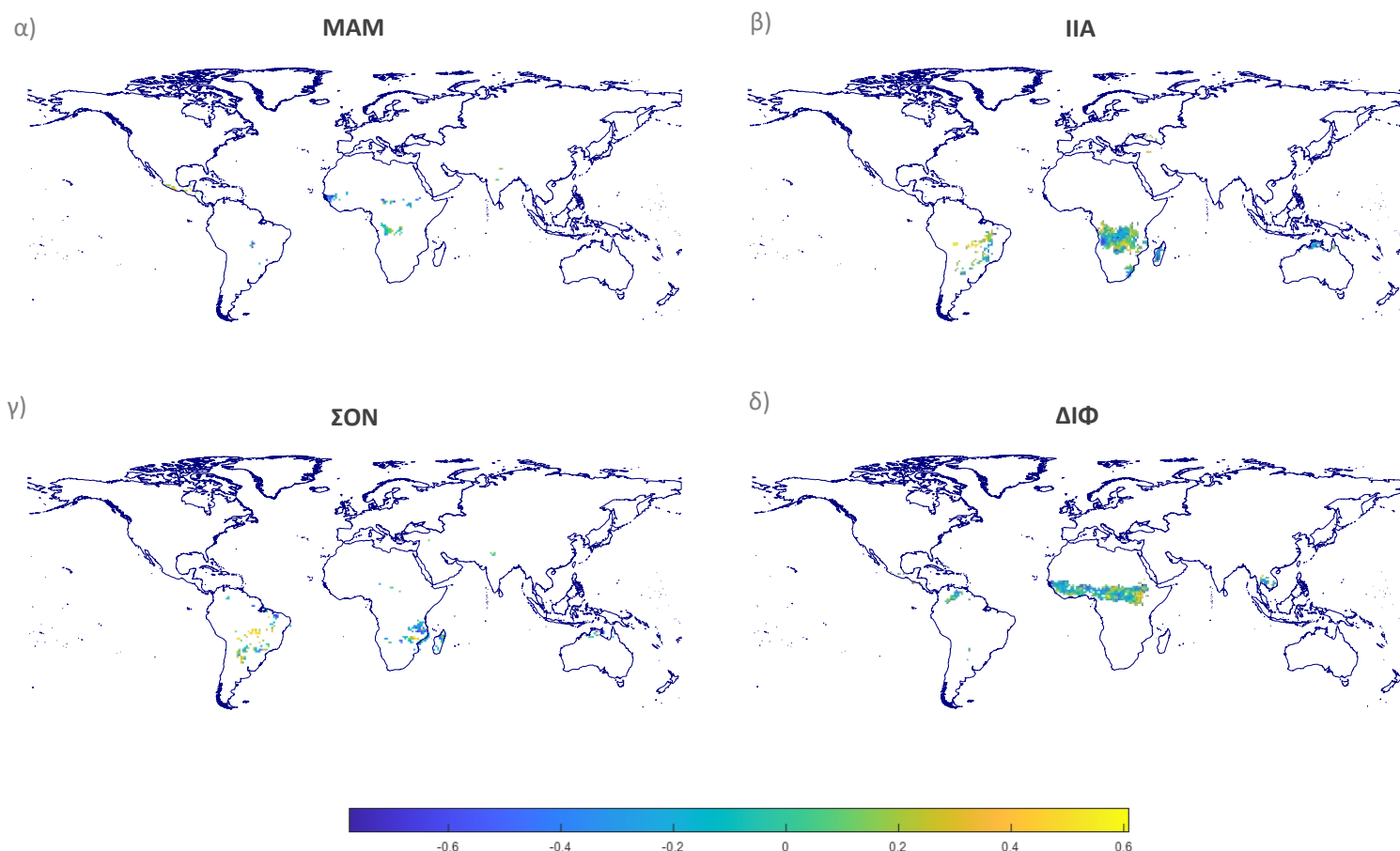
Στην νότια και νοτιοανατολική Ασία η συσχέτιση εμφανίζεται υψηλότερη τις εποχές ΜΑΜ και ΔΙΦ, ενώ εμφανίζεται τοπικά αυξημένη την εποχή ΣΟΝ και την εποχή ΙΙΑ έχει πολύ μικρές τιμές.

Αναφορικά με την Ευρώπη, η συσχέτιση φαίνεται υψηλότερη τις εποχές ΜΑΜ και ΙΙΑ, ενώ μειώνεται σημαντικά τις εποχές ΣΟΝ και ΔΙΦ.

Βάσει των χαρτών που δημιουργήθηκαν, οι περιοχές αυτές παρουσιάζουν έντονο ενδιαφέρον για περεταίρω ανάλυση και θα μελετηθούν ξεχωριστά παρακάτω.

3.2 Συσχέτιση ανωμαλιών του BA και του AOD

Ερευνώντας περαιτέρω την σχέση μεταξύ των δύο παραγόντων, δημιουργήθηκαν παγκόσμιοι εποχικοί χάρτες που απεικονίζουν τη συσχέτιση των ανωμαλιών του BA και του AOD, σύμφωνα με τη διαδικασία που περιγράφεται στην παράγραφο 2.5.6.



Εικόνα 20. Παγκόσμιοι χάρτες συσχέτισης ανωμαλιών BA-AOD ανά εποχή: α) MAM β) JJA γ) SON δ) ΔΙΦ.

Από τα παραπάνω αποτελέσματα, εφόσον έχει αφαιρεθεί η εποχικότητα, η συσχέτιση δεν εμφανίζεται για τις περισσότερες περιοχές στους χάρτες, ενώ φαίνεται να υπάρχει μια πολύ ασθενής συσχέτιση των ανωμαλιών ανά εποχή, η οποία εμφανίζεται με θετική τάση κατά την εποχή JJA στη νοτιοκεντρική Αφρική και την περίοδο ΔΙΦ στην Βόρεια Αφρική. Επιπρόσθετα, εντοπίζονται ελάχιστα διασπαρμένα κομμάτια με θετική τάση συσχέτισης, στη Νότια Αμερική, τις εποχές JJA και SON. Βάσει των χαρτών, εξάγεται το συμπέρασμα ότι η συσχέτιση του BA και του AOD συνδέεται άρρηκτα με τις εποχές και τα χαρακτηριστικά τους, το οποίο αποτελεί λογικό συμπέρασμα, εφόσον οι περισσότερες περιοχές που παρουσιάζουν έντονη εποχιακή συσχέτιση των δεικτών, βρίσκονται στην τροπική ζώνη. Οι τροπικές

περιοχές χαρακτηρίζονται από θερμό και υγρό κλίμα, περιόδους ξηρασίας και βροχών, παράγοντες που επηρεάζουν ιδιαίτερα την εμφάνιση πυρκαγιών.

3.3 Διαγράμματα Διασποράς

Στο σημείο αυτό, δημιουργήθηκαν διαγράμματα διασποράς για την περεταίρω διερεύνηση της σχέσης του BA και του AOD, εξετάζοντας περιοχές του πλανήτη, που παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον λόγω των αυξημένων καμένων εκτάσεων-BA διαχρονικά, καθώς και λόγω των υψηλών τιμών του δείκτη AOD, όπως και της συσχέτισης αυτών.

Ειδικότερα, οι τροπικές και υποτροπικές περιοχές παρουσιάζουν τις μεγαλύτερες καμένες εκτάσεις, έναντι των υπολοίπων, με την Αφρική να πλήττεται στον μεγαλύτερο βαθμό, ενώ ακολουθούν η Αυστραλία και η Νότια Αμερική.

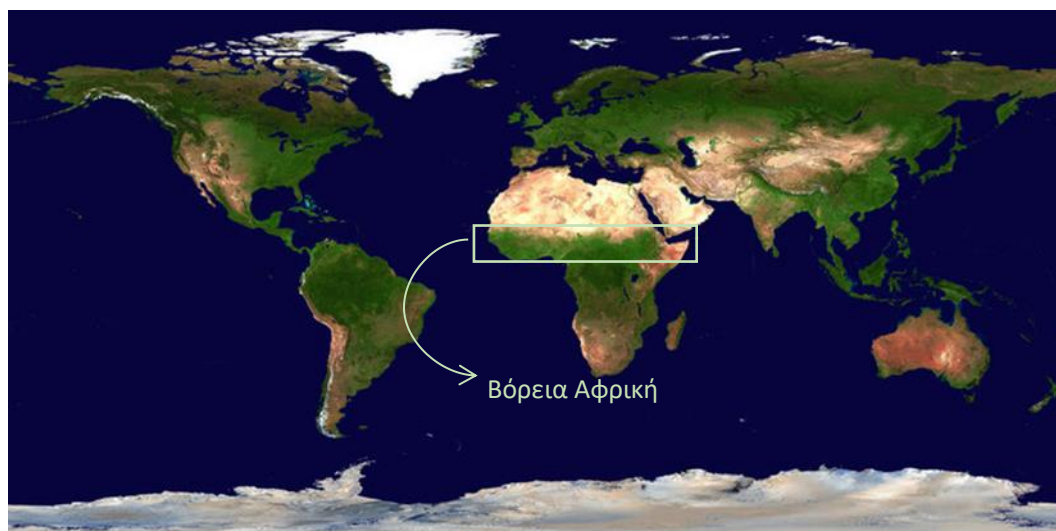
Οι εποχές που επηρεάζουν περισσότερο τις τάσεις στο Βόρειο Ημισφαίριο για την Ευρώπη είναι η ΙΙΑ, για τη Σιβηρία και το νότιο άκρο της Βορείου Αμερικής είναι η εποχή ΜΜΑ. Στο Νότιο Ημισφαίριο, που πλήττεται σε μεγαλύτερο βαθμό, οι εποχές που οδηγούν τις τάσεις, για την Βόρεια Αφρική είναι η εποχή ΔΙΦ, για την Κεντρική Αφρική είναι η εποχή ΙΙΑ, για τη Νότια Αφρική, την Νοτιοανατολική Ασία και την Αυστραλία είναι η εποχή ΣΟΝ.

Σε πολλές περιπτώσεις, ο συντελεστής προσδιορισμού πλησιάζει τιμές κοντά στο μηδέν, γεγονός που υποδηλώνει ότι το BA δεν εξηγεί μεγάλο μέρος της μεταβλητότητας του AOD, ωστόσο σημειώνεται, ότι παρατηρώντας τα συγκεντρωτικά διαγράμματα, εκτός της Βορείου Αφρικής, όλες οι υπόλοιπες περιοχές που εξετάστηκαν παρουσιάζουν θετική τάση, η οποία οδηγεί σε θετική συσχέτιση μεταξύ των μεταβλητών.

Ακόμα, από τα εποχικά διαγράμματα, παρατηρείται συνήθως ότι στις εποχές όπου παρουσιάζονται περισσότερες πυρκαγιές, εμφανίζεται θετική τάση στα διαγράμματα. Στις περιπτώσεις που δεν συναντάται αυτό το μοτίβο, λαμβάνεται υπόψη ότι το AOD αποτελεί δείκτη που επηρεάζεται από διάφορους παράγοντες, ενώ παράλληλα εκπέμπεται από διαφορετικές πηγές, ανθρωπογενείς ή φυσικές.

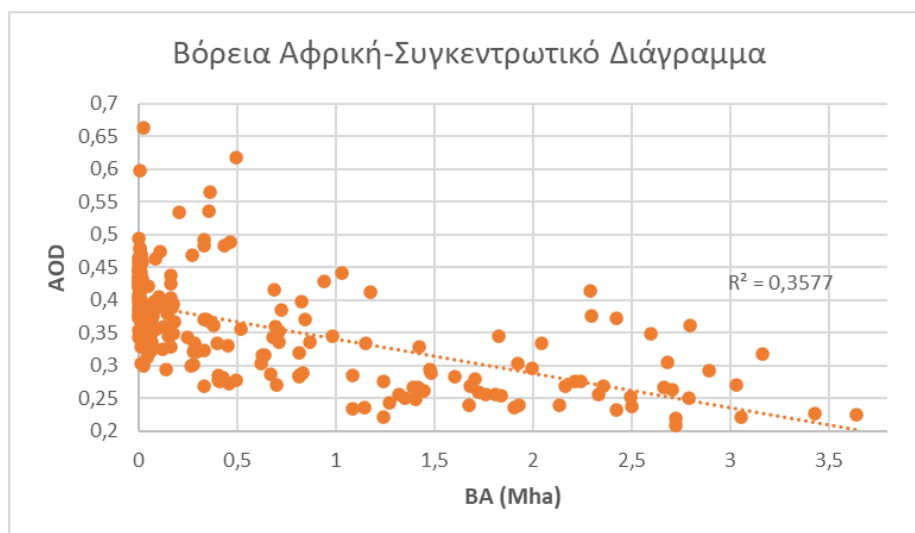
Παρακάτω, ακολουθούν αναλυτικά τα αποτελέσματα για κάθε περιοχή που εξετάστηκε, με συγκεντρωτικά και εποχικά διαγράμματα.

ΒΟΡΕΙΑ ΑΦΡΙΚΗ

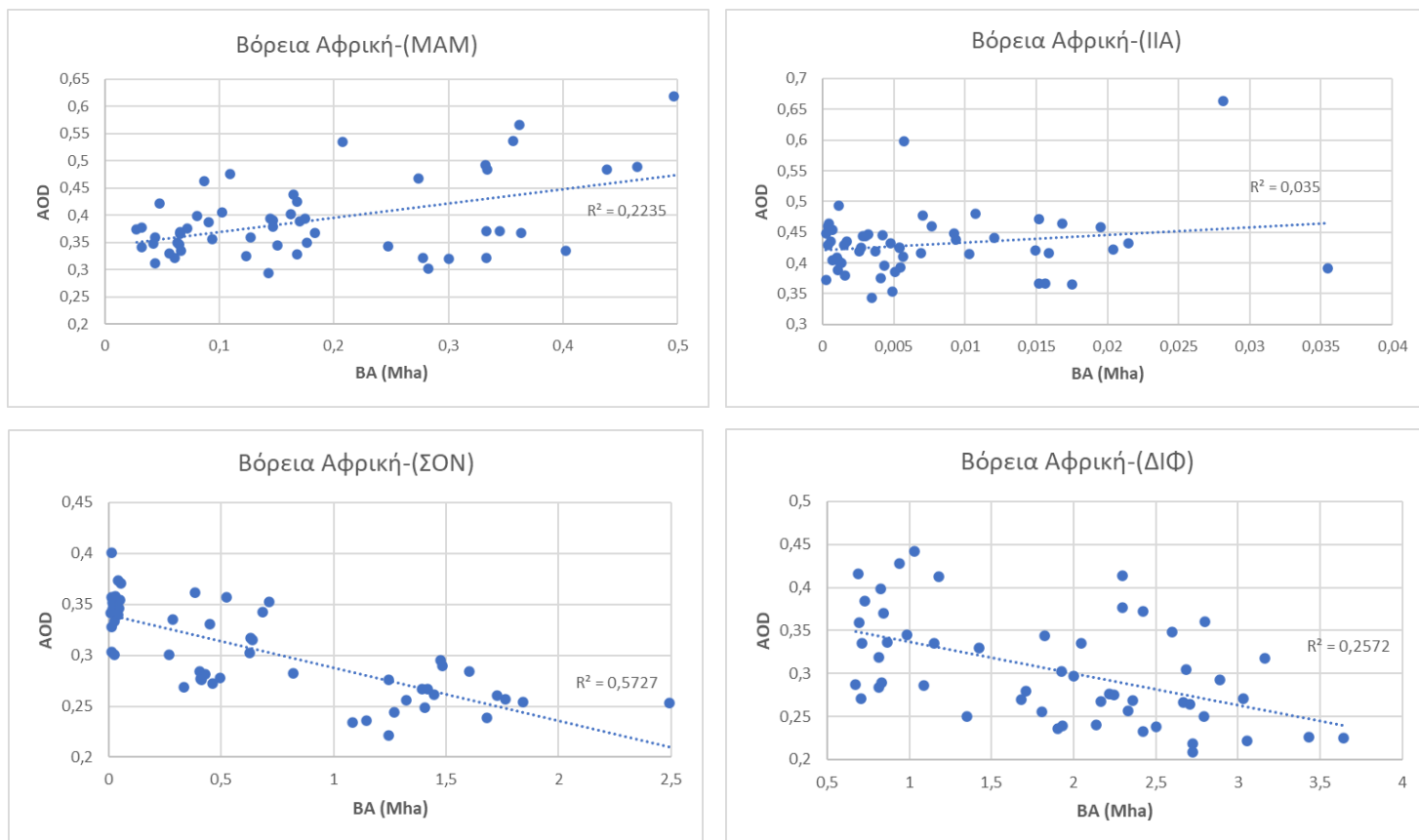


Εικόνα 21. Παγκόσμιος χάρτης με την περιοχή της Βόρειας Αφρικής που εξετάστηκε.

Αρχικά εξετάζεται η υποσαχάρια Βόρεια Αφρική για την οποία κατασκευάζεται το συγκεντρωτικό διάγραμμα που αφορά το σύνολο των δεκαοκτώ ετών που μελετώνται. Στο διάγραμμα, φαίνεται να υπάρχει αρνητική τάση ενώ ο συντελεστής προσδιορισμού R^2 ισούται με 0,3577. Ακόμα, δημιουργούνται αντίστοιχα εποχικά διαγράμματα για την παροχή περισσότερων πληροφοριών για τις περιόδους με έντονη εμφάνιση πυρκαγιών.



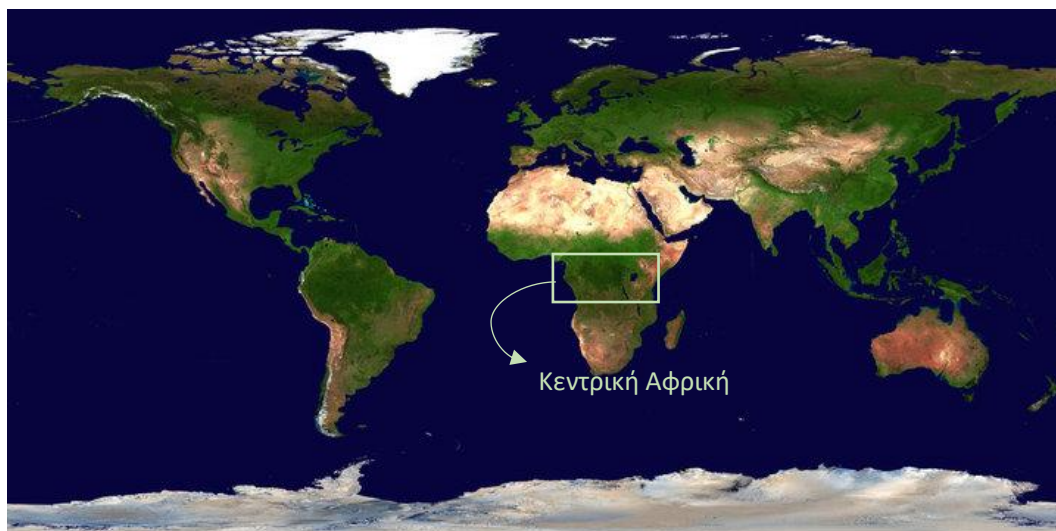
Διάγραμμα 1: Συγκεντρωτικό διάγραμμα διασποράς BA-AOD για την Βόρεια Αφρική την περίοδο 2001-2018.



Διάγραμμα 2: Διαγράμματα διασποράς BA-AOD για την Βόρεια Αφρική τις εποχές: α) MAM, β) IIA, γ) ΣΟΝ, δ) ΔΙΦ.

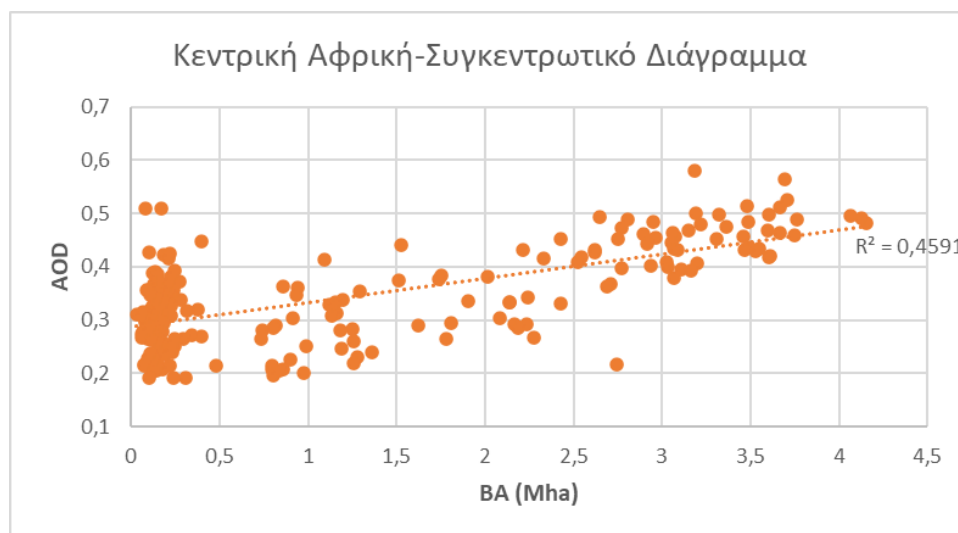
Από τα παραπάνω διαγράμματα, παρατηρείται ότι οι εποχές ΣΟΝ και ΔΙΦ παρουσιάζουν αρνητική τάση, ενώ ακόμα στις περιόδους αυτές καταγράφονται μεγαλύτερες με διαφορά καμένες εκτάσεις, με τις μέγιστες τιμές να φτάνουν περίπου τα 2,5 και 3,6 Mha αντίστοιχα. Οι εποχές MAM και IIA έχουν θετική τάση, με σημαντικά μικρότερες καμένες εκτάσεις, με τις μέγιστες τιμές κατά τις περιόδους αυτές, να φτάνουν περίπου τα 0,5 και τα 0,035 Mha. Ο συντελεστής R^2 παρουσιάζει την μεγαλύτερη τιμή την εποχή ΣΟΝ με τιμή 0,5727. Βάσει των παραπάνω, είναι εμφανές ότι οι εποχές ΣΟΝ και ΔΙΦ οδηγούν την αρνητική τάση του φαίνεται στο συγκεντρωτικό διάγραμμα.

ΚΕΝΤΡΙΚΗ ΑΦΡΙΚΗ

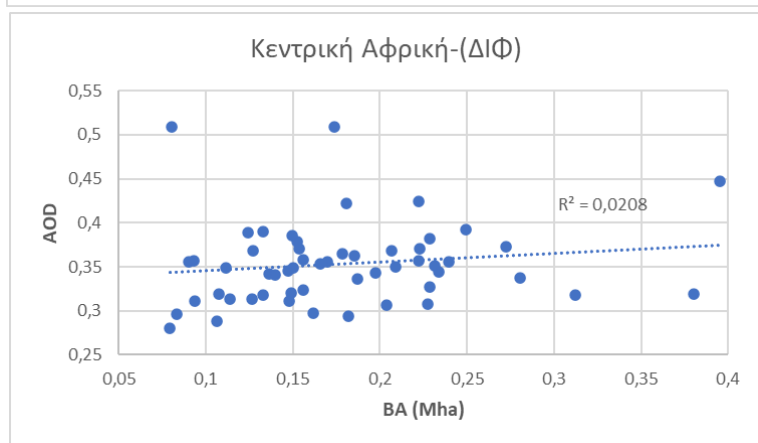
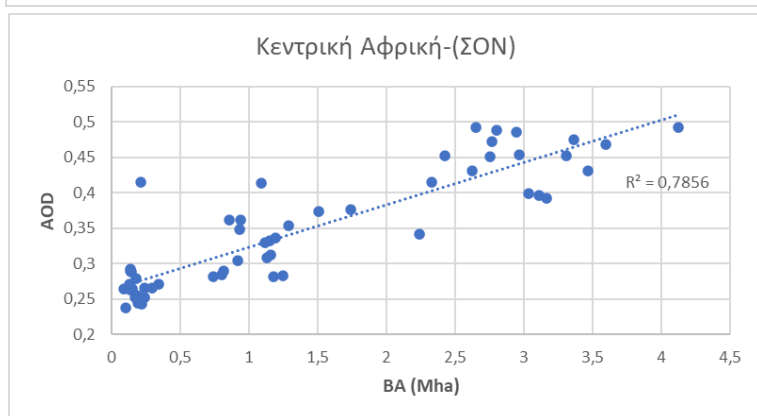
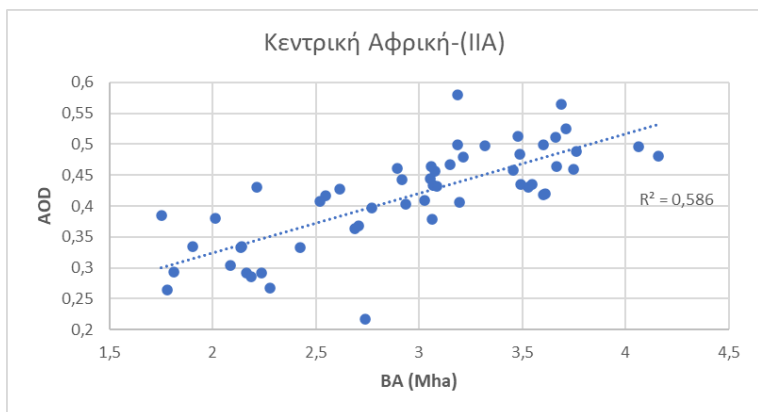
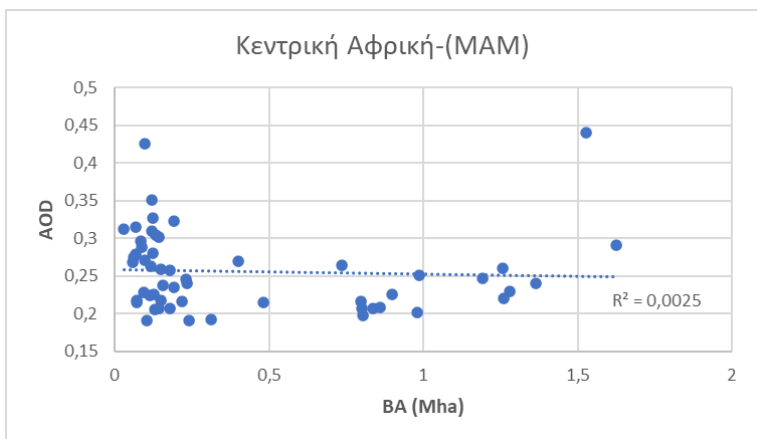


Εικόνα 22. Παγκόσμιος χάρτης με την περιοχή της Κεντρικής Αφρικής που εξετάστηκε.

Ακολούθως, εξετάζεται η Κεντρική Αφρική, από το συγκεντρωτικό διάγραμμα της οποίας, παρατηρείται θετική τάση και ο συντελεστής R^2 ισούται με 0,4591 . Δημιουργούνται αντίστοιχα εποχικά διαγράμματα για την παροχή περισσότερων πληροφοριών για τις περιόδους με έντονη εμφάνιση πυρκαγιών.



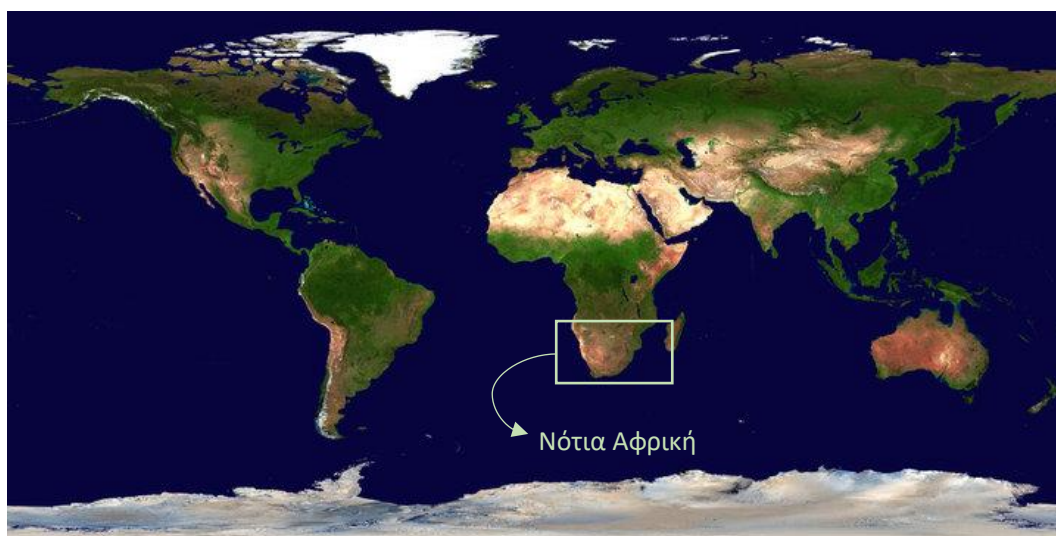
Διάγραμμα 3: Συγκεντρωτικό διάγραμμα διασποράς BA-AOD για την Κεντρική Αφρική την περίοδο 2001-2018.



Διάγραμμα 4: Διαγράμματα διασποράς BA-AOD για την Κεντρική Αφρική τις εποχές: α) MAM, β) IIA, γ) ΣΟΝ, δ) ΔΙΦ.

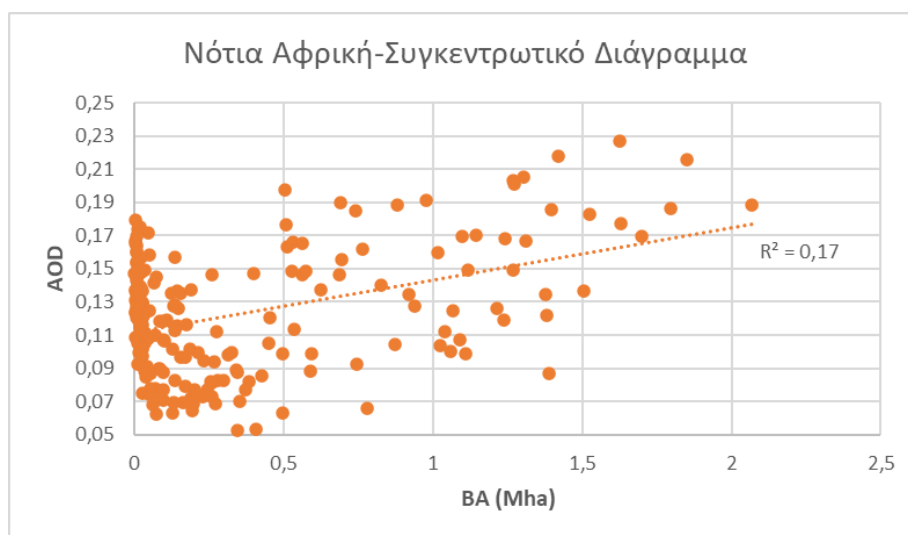
Στα εποχικά διαγράμματα, παρατηρείται ότι οι εποχές IIA, ΣΟΝ και ΔΙΦ παρουσιάζουν θετική τάση ενώ η εποχή MAM αρνητική. Πιο συγκεκριμένα, στις περιόδους IIA και ΣΟΝ σημειώνονται οι υψηλότερες τιμές καμένων εκτάσεων, με τις μέγιστες τιμές να φτάνουν και για τις δύο περίπου στα 4,2 Mha, ενώ καταγράφουν τις μεγαλύτερες τιμές του συντελεστή προσδιορισμού, με τιμές $R^2 = 0,586$ και $R^2 = 0,7856$ αντίστοιχα. Αντιθέτως, η εποχή ΔΙΦ που παρουσιάζει επίσης θετική τάση, έχει τη μικρότερη καμένη έκταση με το μέγιστο να φτάνει περίπου τα 0,4 Mha και τον συντελεστή R^2 να έχει ιδιαίτερα μικρή τιμή που ισούται με 0,0208. Η εποχή MAM που παρουσιάζει ελαφρώς αρνητική τάση, παρουσιάζει μέγιστη τιμή καμένης έκτασης στα 1,6 Mha και τον μικρότερο συντελεστή προσδιορισμού $R^2 = 0,0025$. Συμπερασματικά, οι εποχές IIA και ΣΟΝ έχουν την μεγαλύτερη επίδραση ως προς την θετική τάση που παρατηρείται στο συγκεντρωτικό διάγραμμα.

ΝΟΤΙΑ ΑΦΡΙΚΗ

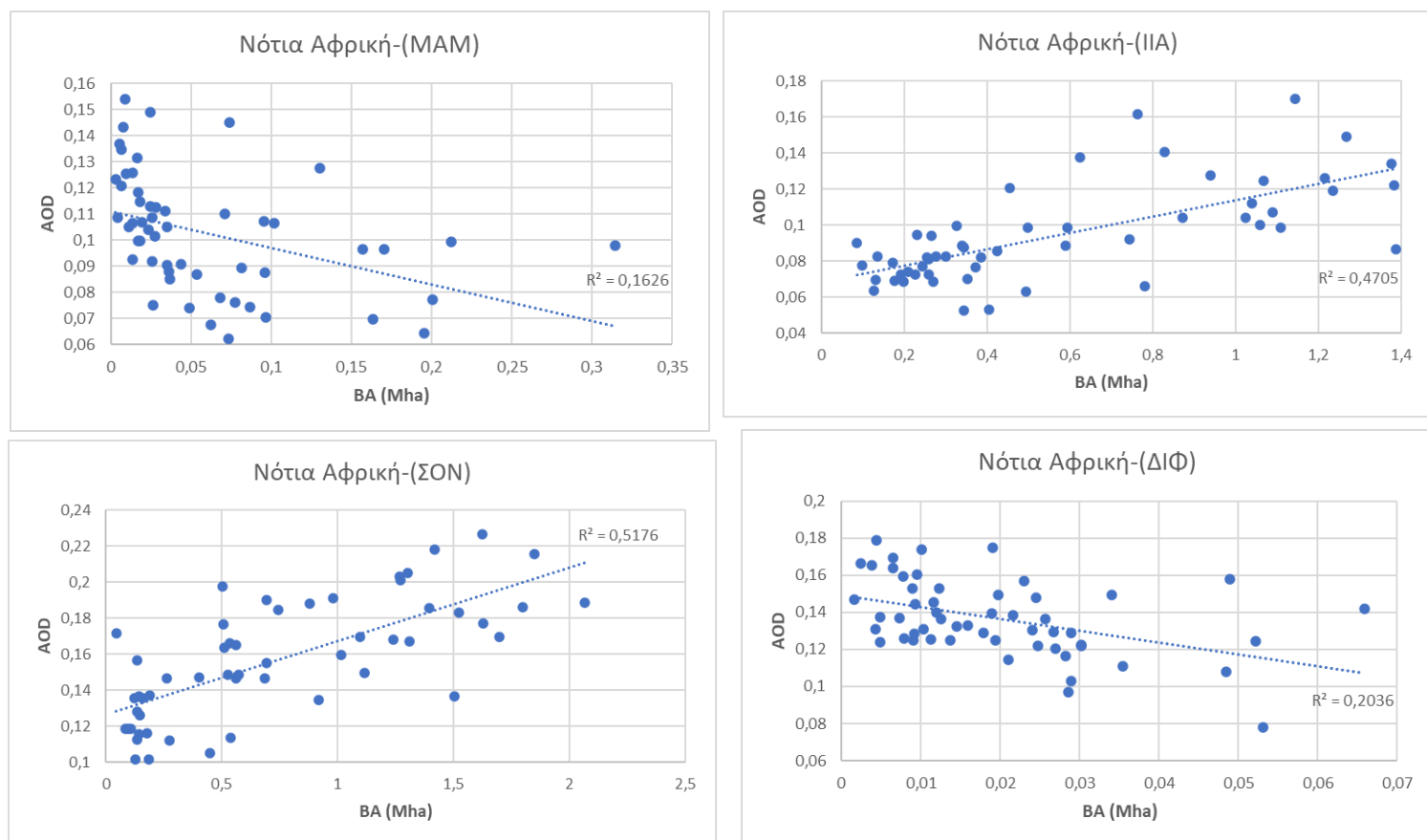


Εικόνα 23. Παγκόσμιος χάρτης με την περιοχή της Νότιας Αφρικής που εξετάστηκε.

Τελευταία στην Αφρικανική ήπειρο, εξετάζεται η Νότια Αφρική. Στο συγκεντρωτικό διάγραμμα που αφορά την υπό εξέταση περιοχή για το σύνολο των 18 ετών, παρατηρείται θετική τάση ενώ ο συντελεστής R^2 έχει τιμή 0,17. Τα εποχικά διαγράμματα ακολουθούν παρακάτω.



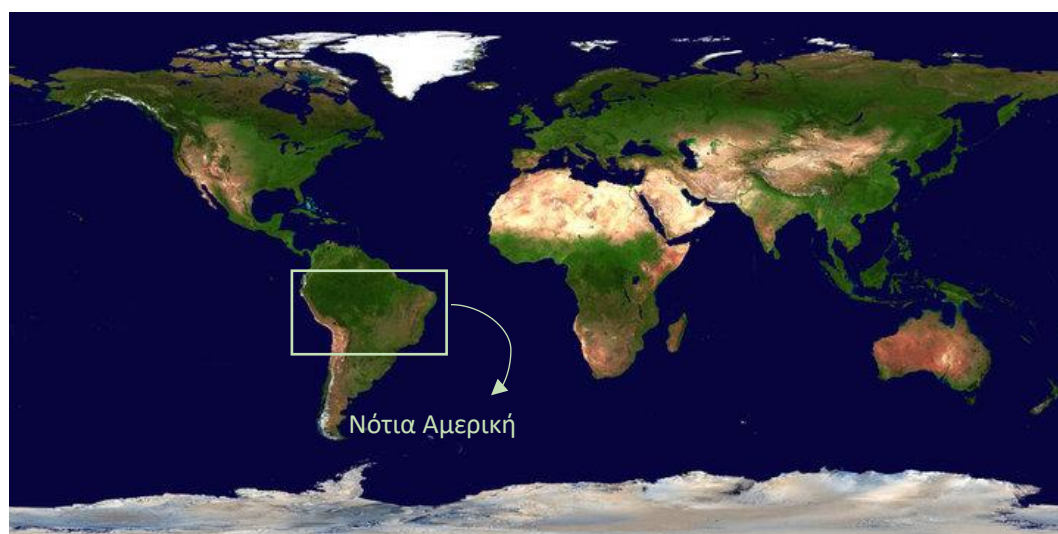
Διάγραμμα 5: Συγκεντρωτικό διάγραμμα διασποράς BA-AOD για την Νότια Αφρική την περίοδο 2001-2018.



Διάγραμμα 6: Διαγράμματα διασποράς BA-AOD για την Νότια Αφρική τις εποχές: α) MAM, β) IIA, γ) ΣΟΝ, δ) ΔΙΦ.

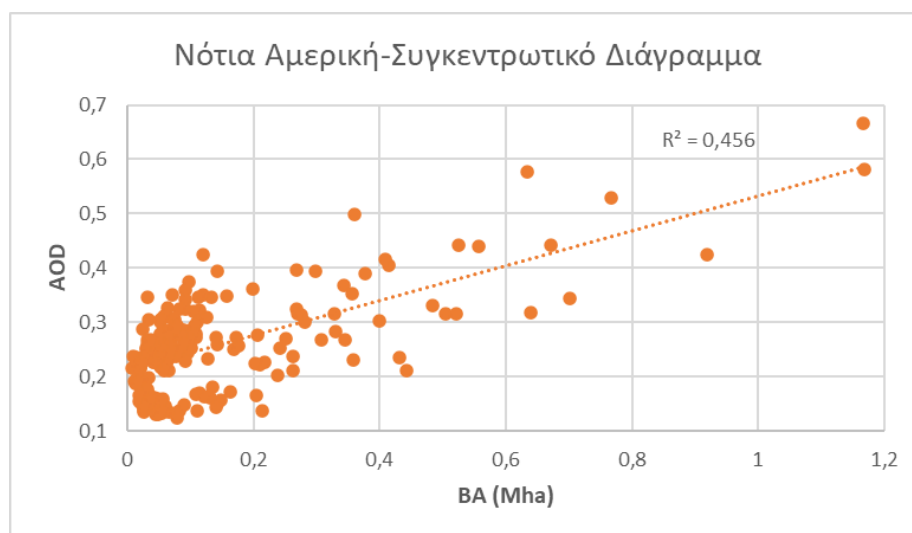
Βάσει των διαγραμμάτων, οι εποχές IIA και ΣΟΝ παρουσιάζουν θετική τάση, ενώ οι εποχές MAM και ΔΙΦ αρνητική τάση. Η περίοδος ΣΟΝ έχει τις περισσότερες καμένες εκτάσεις με μέγιστη τιμή να φτάνει περίπου τα 2,1 Mha, ενώ ακόμα παρουσιάζει τον μεγαλύτερο δείκτη προσδιορισμού σε σχέση με τις υπόλοιπες εποχές με τιμή $R^2 = 0,5176$. Ακολουθεί η εποχή IIA με υψηλές τιμές καμένων εκτάσεων, με τη μέγιστη να φτάνει 1,4 Mha. Στις εποχές MAM και ΔΙΦ που εμφανίζουν αρνητική τάση, παρατηρούνται σημαντικά μικρότερες καμένες εκτάσεις, με μέγιστες τιμές 0,35 Mha με συντελεστή $R^2 = 0,1626$ για την εποχή MAM και 0,07 Mha με συντελεστή $R^2 = 0,2036$ για την εποχή ΔΙΦ. Ως εκ τούτου, οι εποχές IIA και ΣΟΝ αποτελούν τις εποχές που οδηγούν την θετική τάση που παρατηρείται στο συγκεντρωτικό διάγραμμα.

ΝΟΤΙΑ ΑΜΕΡΙΚΗ

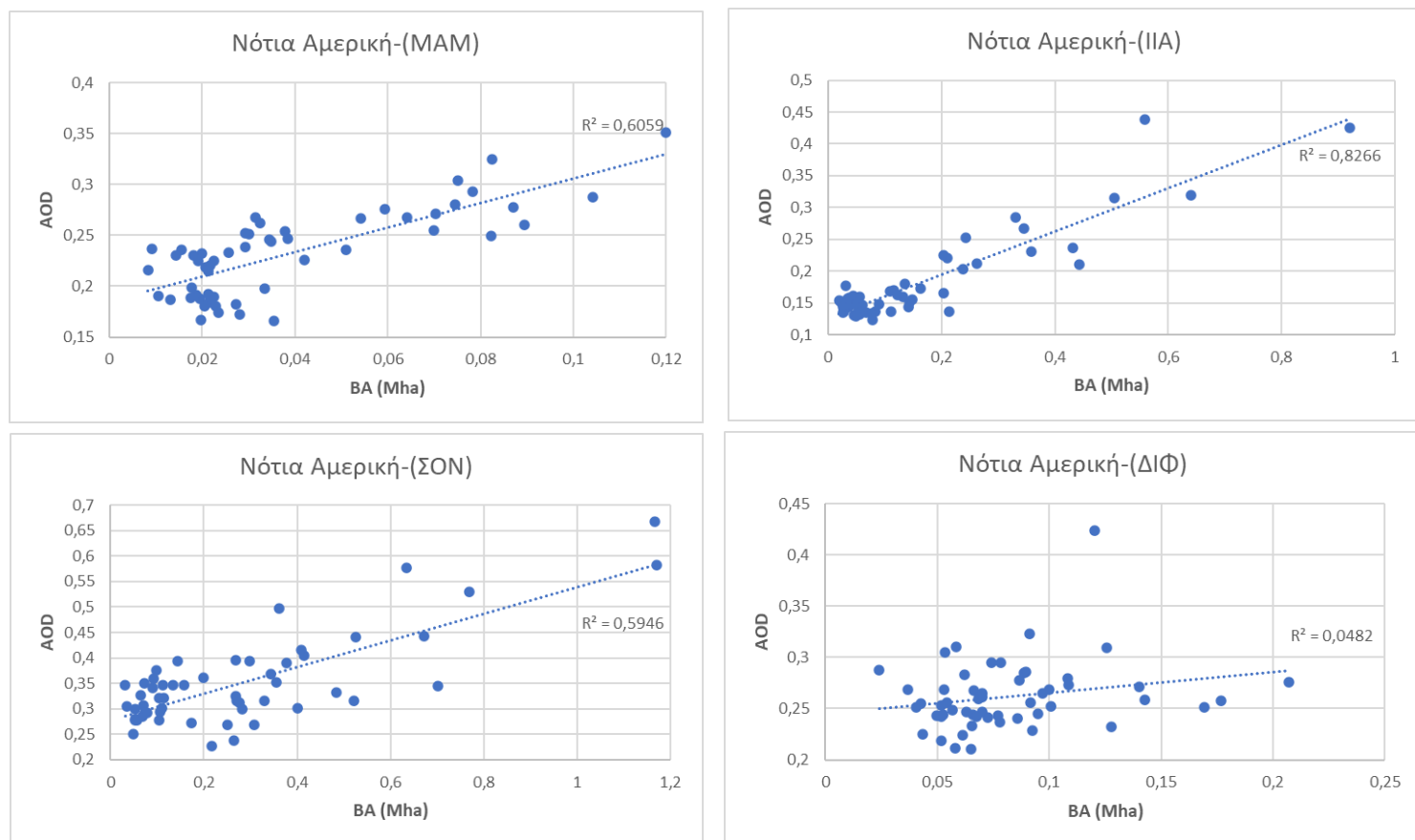


Εικόνα 24. Παγκόσμιος χάρτης με την περιοχή της Νότιας Αμερικής που εξετάστηκε.

Η Νότια Αμερική είναι η επόμενη ήπειρος που εξετάστηκε, εστιάζοντας στο κεντρικό κομμάτι της, λόγω του τροπικού δάσους του Αμαζονίου και των μεγάλων πυρκαγιών που εκδηλώνονται εκεί, με γεγονότα πυρκαγιών να διαρκούν έως και μήνες. Στο συγκεντρωτικό διάγραμμα που αφορά την περιοχή της Νότιας Αμερικής για το σύνολο των ετών, παρατηρείται θετική τάση, ενώ ο συντελεστής R^2 έχει τιμή 0,456. Τα εποχικά διαγράμματα ακολουθούν παρακάτω.



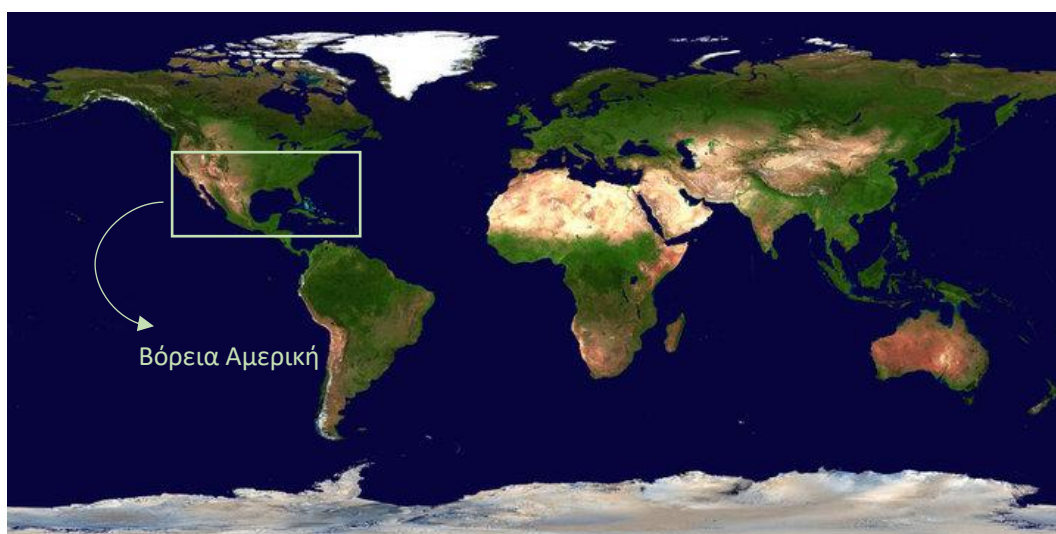
Διάγραμμα 7: Συγκεντρωτικό διάγραμμα διασποράς BA-AOD για την Νότια Αμερική την περίοδο 2001-2018.



Διάγραμμα 8: Διαγράμματα διασποράς BA-AOD για την Νότια Αμερική τις εποχές: α) MAM, β) JJA, γ) SON, δ) DJF.

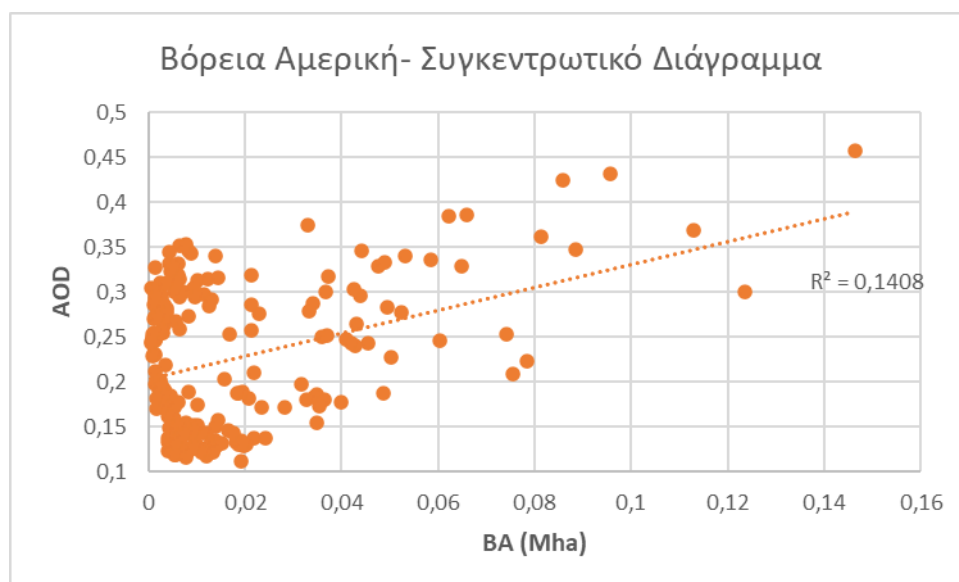
Στην δεδομένη περίπτωση, όλοι οι μήνες παρουσιάζουν θετική τάση, με μεγαλύτερες τιμές καμένων εκτάσεων να καταγράφονται τις εποχές SON και JJA, από τις οποίες η εποχή SON παρουσιάζει τις μεγαλύτερες καμένες εκτάσεις έναντι όλων, με τη μέγιστη τιμή να είναι 1,7 Mha ενώ η εποχή JJA ακολουθεί με τη μέγιστη τιμή να είναι 0,9 Mha. Αντίστοιχα, παρουσιάζουν τους μεγαλύτερους δείκτες $R^2 = 0,8266$ για την εποχή JJA και $R^2 = 0,5946$ για την εποχή SON. Οι εποχές MAM και DJF έχουν σημαντικά μικρότερες καμένες εκτάσεις και συντελεστή προσδιορισμού. Ως εκ τούτου οι εποχές SON και JJA (με κύρια την SON) οδηγούν τη θετική τάση που εμφανίζεται στο συγκεντρωτικό διάγραμμα.

ΒΟΡΕΙΑ ΑΜΕΡΙΚΗ

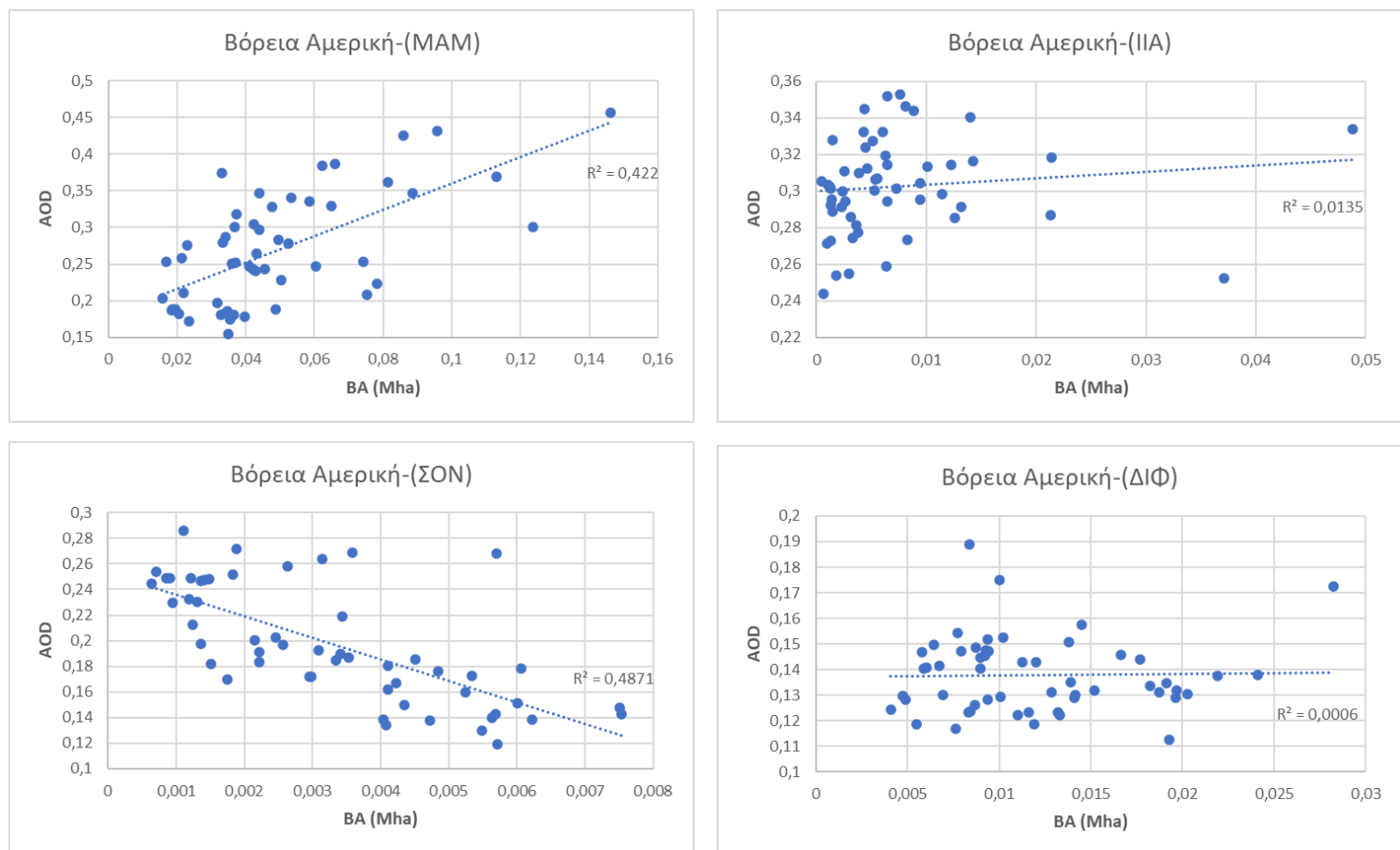


Εικόνα 25. Παγκόσμιος χάρτης με την περιοχή της Βόρειας Αμερικής που εξετάστηκε.

Εν συνεχεία, χωρίζοντας τη Βόρεια Αμερική στα δύο, εξετάστηκε το νότιο κομμάτι της. Στο συγκεντρωτικό διάγραμμα που αφορά την περιοχή της Νότιας Αμερικής για το σύνολο των ετών, παρατηρείται θετική τάση, ενώ ο συντελεστής R^2 έχει τιμή 0,1408. Τα εποχικά διαγράμματα ακολουθούν παρακάτω.



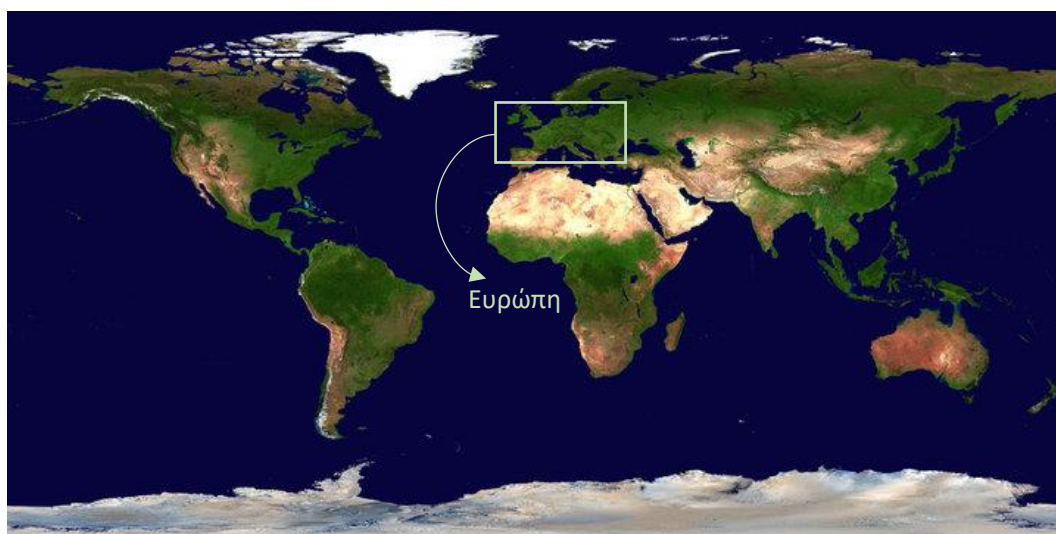
Διάγραμμα 9: Συγκεντρωτικό διάγραμμα διασποράς BA-AOD για την Βόρεια Αμερική την περίοδο 2001-2018



Διάγραμμα 10: Διαγράμματα διασποράς BA-AOD για την Βόρεια Αμερική τις εποχές: α) MAM, β) JJA, γ) SON, δ) DJF.

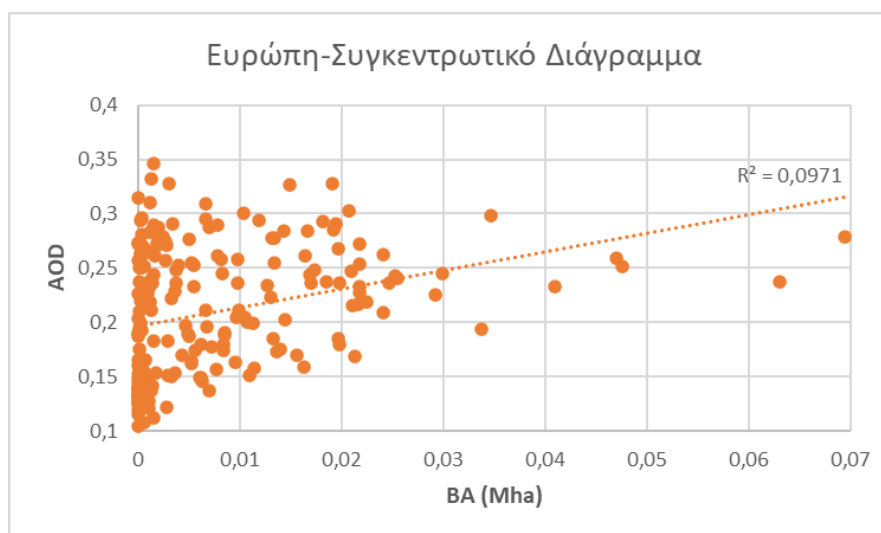
Αναφορικά με τα διαγράμματα, οι εποχές MAM, JJA και DJF παρουσιάζουν θετική τάση ενώ η εποχή SON αρνητική. Η εποχή MAM παρουσιάζει τις μεγαλύτερες διαχρονικά καμένες εκτάσεις με μέγιστη τιμή περίπου στα 0,15 Mha με δείκτη προσδιορισμού $R^2 = 0,422$. Οι υπόλοιπες εποχές που παρουσιάζουν θετική τάση, έχουν σαφώς λιγότερες καμένες εκτάσεις, έναντι της εποχής MAM, ενώ η εποχή SON που παρουσιάζει αρνητική τάση και έχει τον μεγαλύτερο δείκτη προσδιορισμού $R^2 = 0,4871$, φτάνει σε μέγιστη τιμή καμένης έκτασης μόλις στα 0,0075 Mha. Από τα αποτελέσματα εξάγεται το συμπέρασμα ότι η εποχή MAM οδηγεί την θετική τάση που παρατηρείται στο συγκεντρωτικό διάγραμμα.

ΕΥΡΩΠΗ

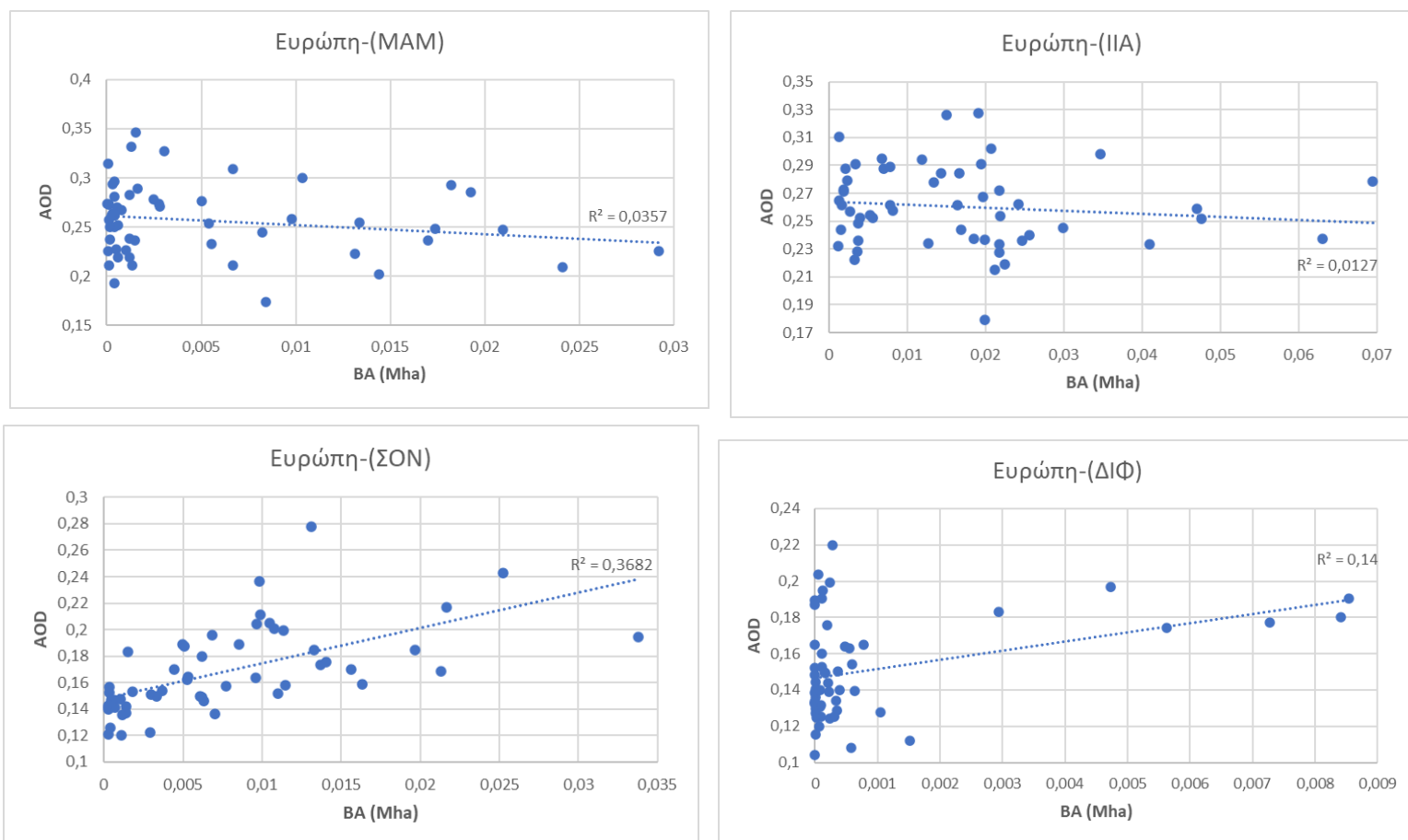


Εικόνα 26. Παγκόσμιος χάρτης με την περιοχή της Ευρώπης που εξετάστηκε.

Στο σημείο αυτό εξετάζεται μεγάλο μέρος της Ευρώπης συμπεριλαμβανομένων των χωρών της Μεσογείου, οι οποίες εμφανίζουν διαχρονικά τις μεγαλύτερες σε έκταση πυρκαγιές της ηπείρου. Στο συγκεντρωτικό διάγραμμα που αφορά την υπό εξέταση περιοχή, για το σύνολο των ετών, παρατηρείται θετική τάση, ενώ ο συντελεστής R^2 έχει τιμή 0,0971. Τα εποχικά διαγράμματα ακολουθούν παρακάτω.



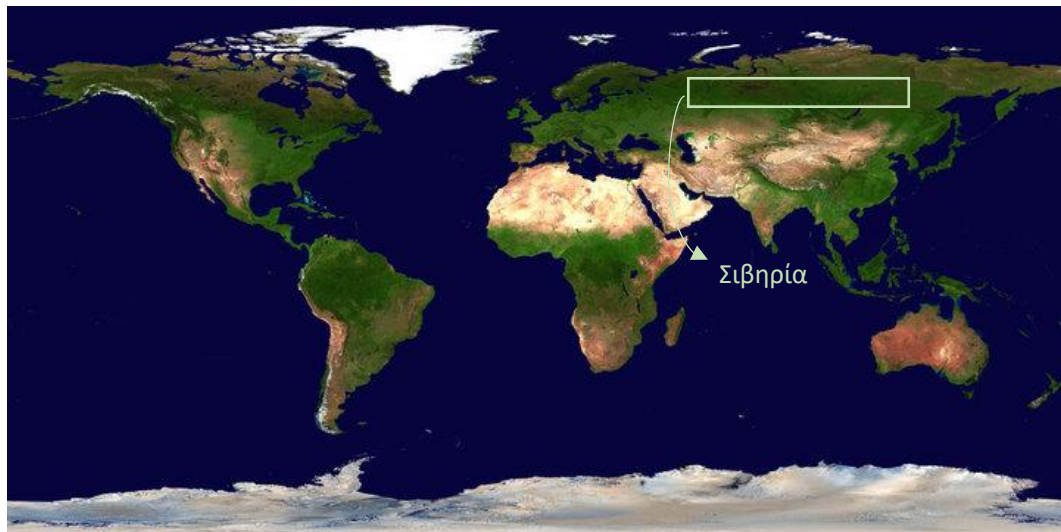
Διάγραμμα 11: Συγκεντρωτικό διάγραμμα διασποράς BA-AOD για την Ευρώπη την περίοδο 2001-2018



Διάγραμμα 12: Διαγράμματα διασποράς BA-AOD για την Αμερική τις εποχές: α) MAM, β) IIA, γ) ΣΟΝ, δ) ΔΙΦ.

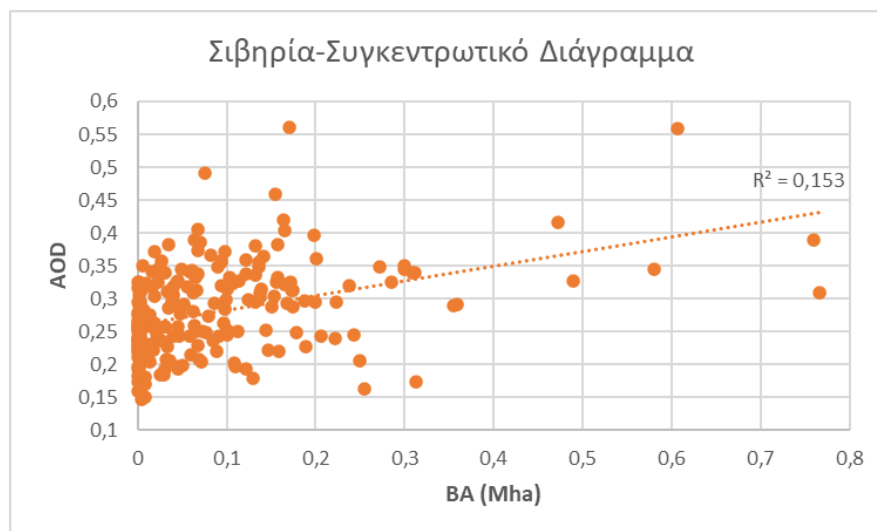
Από τα εποχικά διαγράμματα που αφορούν την Ευρώπη, παρατηρείται ότι οι εποχές ΣΟΝ και ΔΙΦ παρουσιάζουν θετική τάση, ενώ οι εποχές MAM και IIA αρνητική. Η εποχή IIA παρουσιάζει τις μεγαλύτερες καμένες εκτάσεις, με μέγιστη τιμή περίπου στα 0,07 Mha και δείκτη προσδιορισμού $R^2 = 0,0127$. Ωστόσο, λόγω των μικρών δεικτών R^2 στις αρνητικές τάσεις, επικρατεί η θετική τάση στο συγκεντρωτικό διάγραμμα.

ΣΙΒΗΡΙΑ

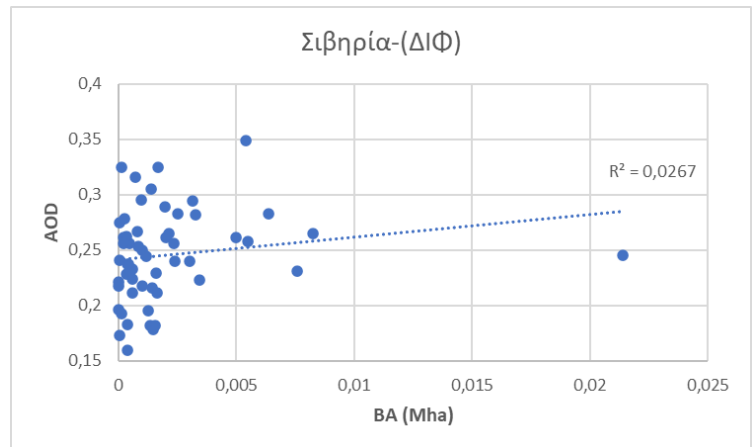
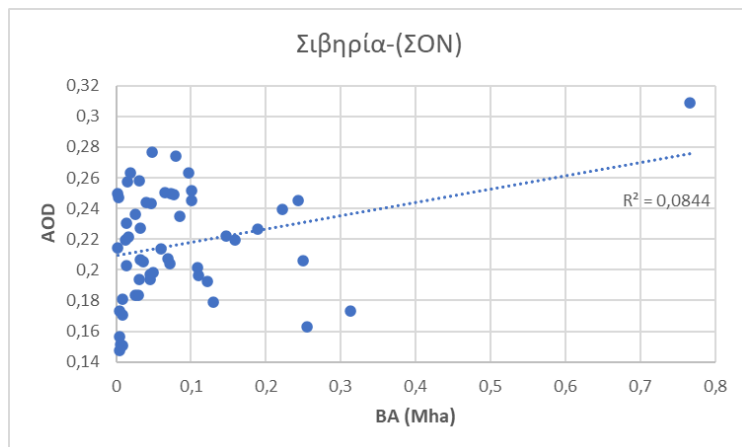
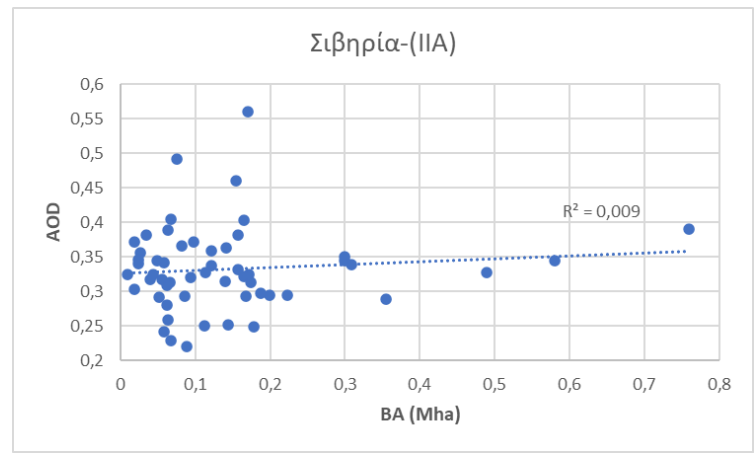
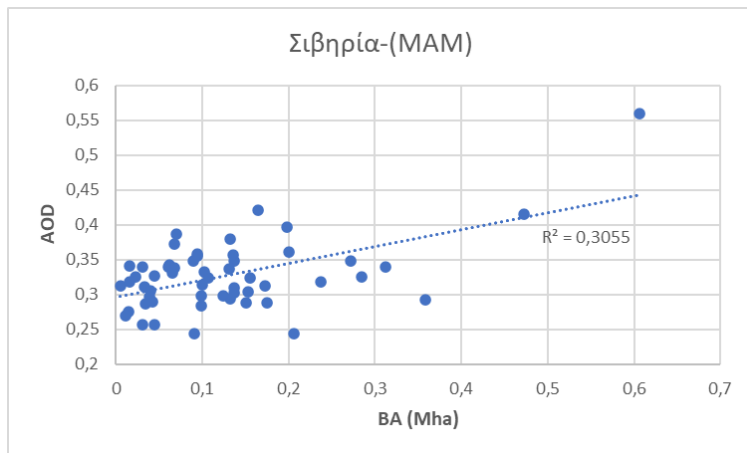


Εικόνα 27. Παγκόσμιος χάρτης με την περιοχή της Σιβηρίας που εξετάστηκε.

Εξετάζοντας περιοχή της Σιβηρίας, λόγω του τεράστιου αρκτικού δάσους και των πυρκαγιών που εμφανίζονται εκεί, δημιουργείται το συγκεντρωτικό διάγραμμα , για το σύνολο των υπό μελέτη ετών. Στο διάγραμμα, παρατηρείται θετική τάση, ενώ ο συντελεστής R^2 έχει τιμή 0,153. Τα εποχικά διαγράμματα ακολουθούν παρακάτω.



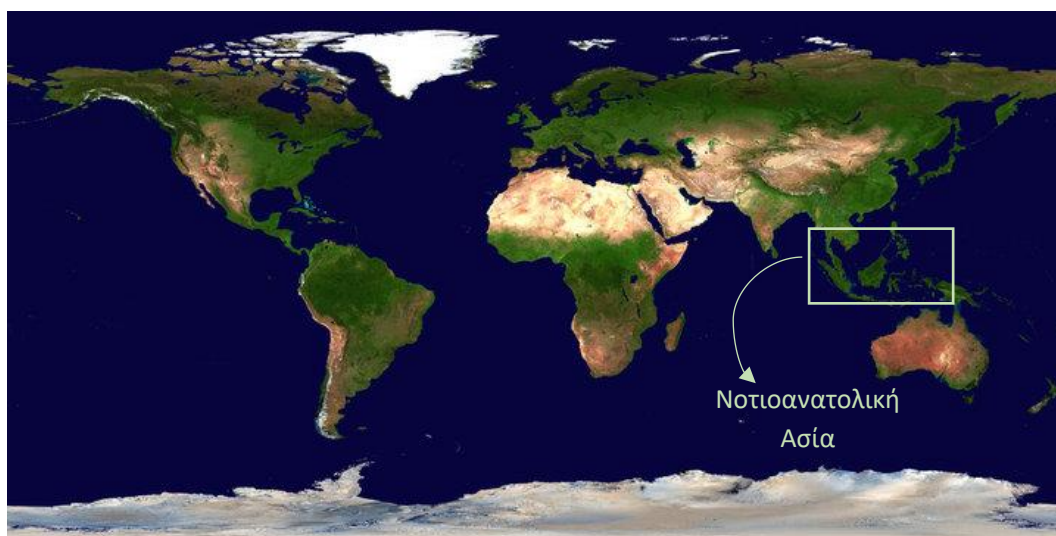
Διάγραμμα 13: Συγκεντρωτικό διάγραμμα διασποράς BA-AOD για την Σιβηρία την περίοδο 2001-2018.



Διάγραμμα 14: Διαγράμματα διασποράς BA-AOD για την Σιβηρία τις εποχές: α) MAM, β) IIA, γ) ΣΟΝ, δ) ΔΙΦ.

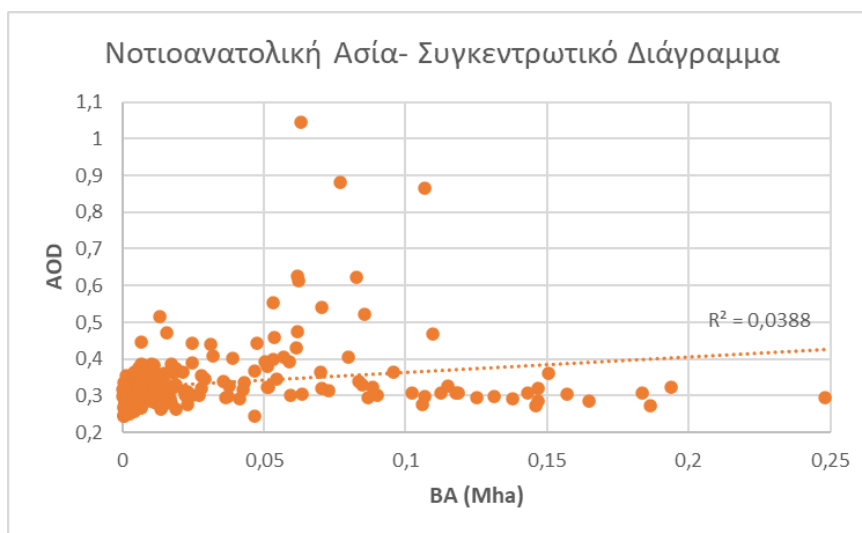
Στην δεδομένη περίπτωση για τη Σιβηρία, όλες οι εποχές έχουν θετική τάση, ενώ οι μεγαλύτερες καμένες εκτάσεις διαχρονικά εμφανίζονται την εποχή IIA, ενώ η μεγαλύτερη τιμή καμένης έκτασης καταγράφεται την εποχή ΣΟΝ, με τιμή περίπου 0,77 Mha. Η εποχή MAM έχει το μεγαλύτερο συντελεστή προσδιορισμού, έναντι των άλλων εποχών με τιμή $R^2 = 0,3055$, ενώ ακόμα παρουσιάζει αθροιστικά τις μεγαλύτερες καμένες εκτάσεις μετά την εποχή IIA η οποία ωστόσο παρουσιάζει ιδιαίτερα μικρό συντελεστή προσδιορισμού. Βάσει των παραπάνω, μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι η εποχή MAM οδηγεί τη θετική τάση που εμφανίζεται στο συγκεντρωτικό διάγραμμα.

ΝΟΤΙΟΑΝΑΤΟΛΙΚΗ ΑΣΙΑ

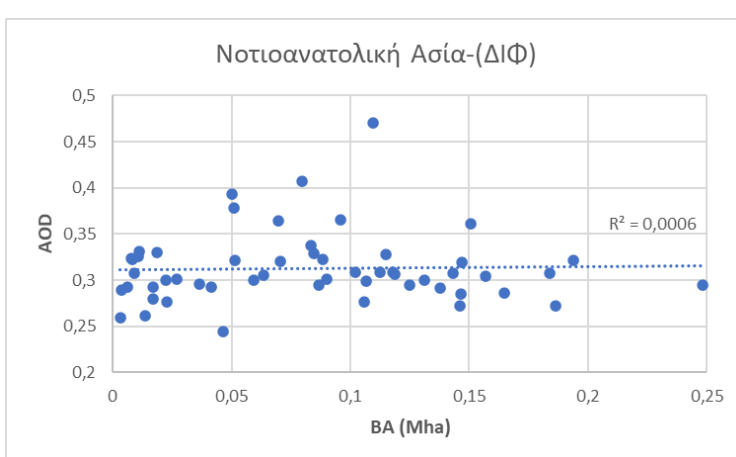
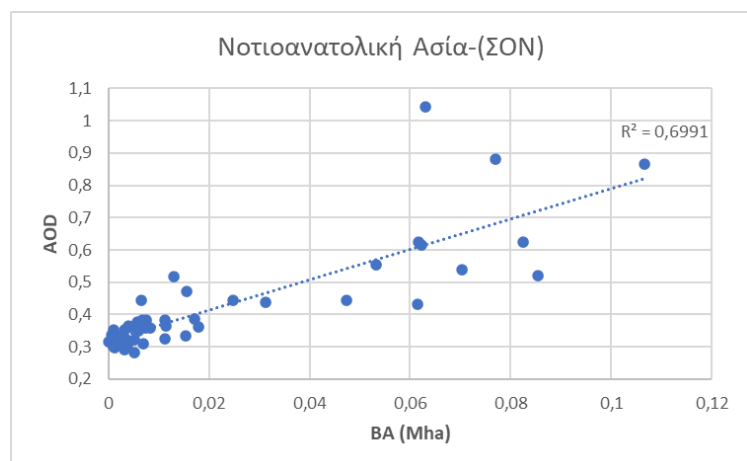
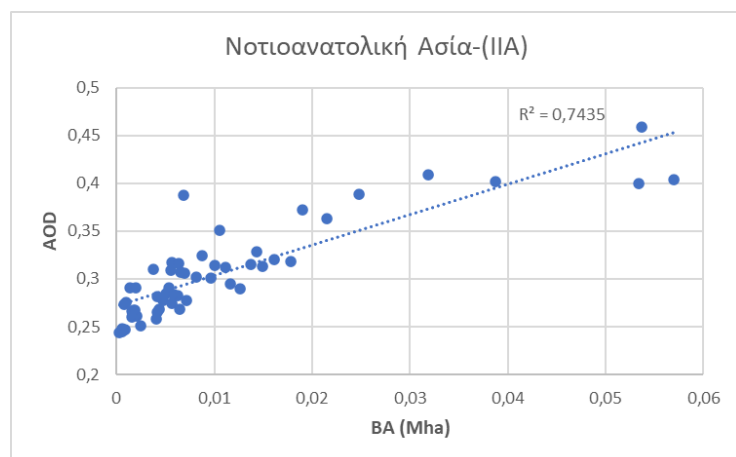
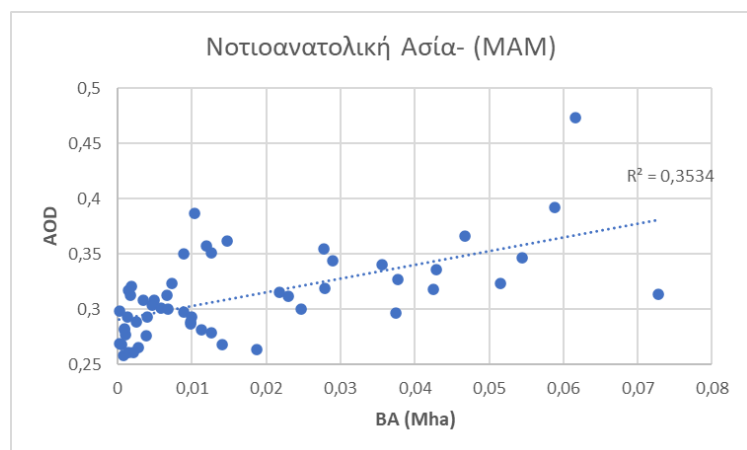


Εικόνα 28. Παγκόσμιος χάρτης με την περιοχή της Νοτιοανατολικής Ασίας που εξετάστηκε.

Από την ήπειρο της Ασίας επιλέγεται να εξεταστεί η νοτιοανατολική Ασία, η οποία αποτελεί τροπική περιοχή που πλήττεται από πυρκαγιές και ξηρασίες. Για την περιοχή αυτή, δημιουργήθηκε το συγκεντρωτικό διάγραμμα, το οποίο φαίνεται να παρουσιάζει θετική τάση και συντελεστή προσδιορισμού $R^2 = 0,0388$. Παρακάτω ακολουθούν τα εποχικά διαγράμματα.



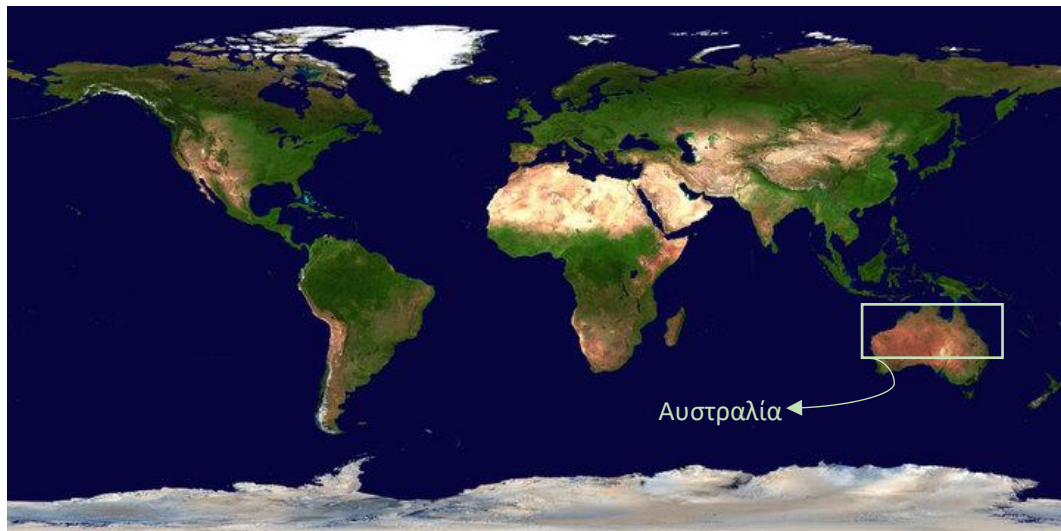
Διάγραμμα 15: Συγκεντρωτικό διάγραμμα διασποράς BA-AOD για την Νοτιοανατολική Ασία την περίοδο 2001-2018.



Διάγραμμα 16: Διαγράμματα διασποράς BA-AOD για την Νοτιοανατολική Ασία τις εποχές: α) MAM, β) IIA, γ) ΣΟΝ, δ) ΔΙΦ.

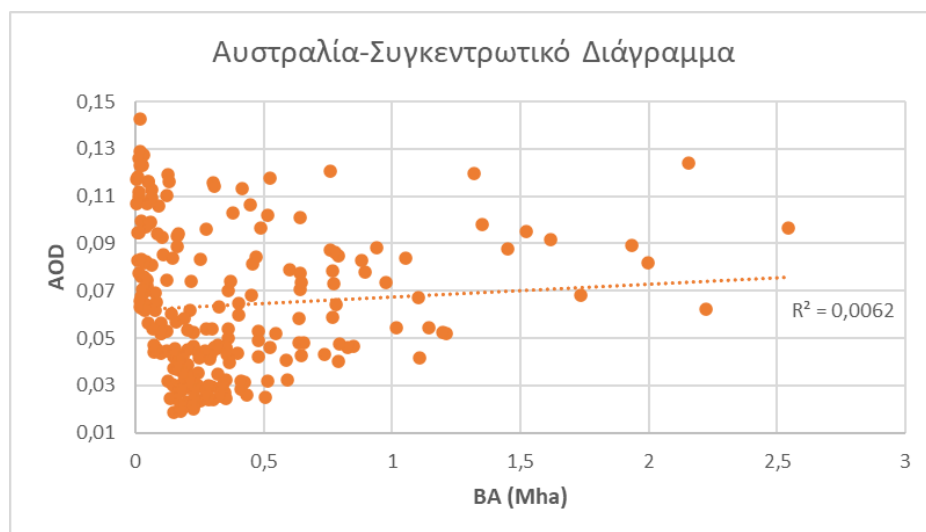
Για την νοτιοανατολική Ασία οι εποχές MAM, IIA και ΣΟΝ παρουσιάζουν ξεκάθαρη θετική τάση, ενώ η εποχή ΔΙΦ ελαφρώς θετική με τον δείκτη προσδιορισμού να είναι $R^2 = 0,0006$. Η εποχή ΔΙΦ έχει τις μεγαλύτερες καμένες εκτάσεις με τη μεγαλύτερη τιμή να φτάνει περίπου στα 0,25Mha. Ωστόσο, η εποχή ΣΟΝ αποτελεί την δεύτερη εποχή με τις μεγαλύτερες εκτάσεις και έχει τον δεύτερο μεγαλύτερο συντελεστή προσδιορισμού, με τιμή $R^2 = 0,6991$. Βάσει των παραπάνω η εποχή ΣΟΝ οδηγεί την θετική τάση που εμφανίζεται στο συγκεντρωτικό διάγραμμα.

ΑΥΣΤΡΑΛΙΑ

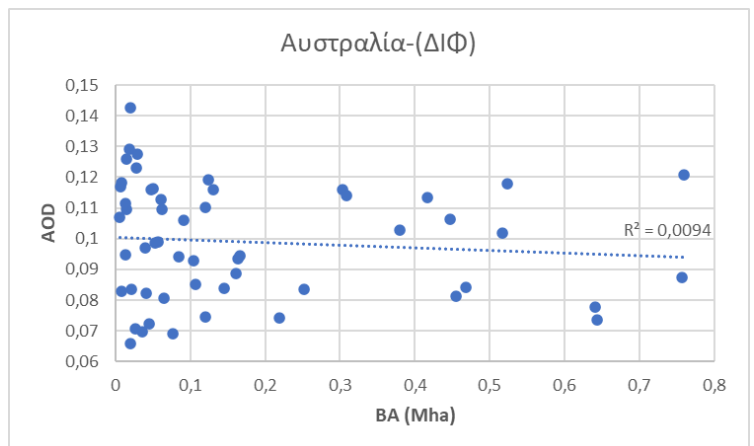
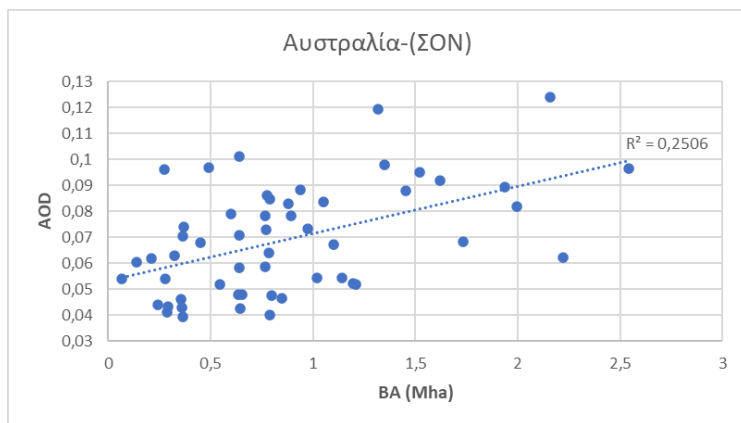
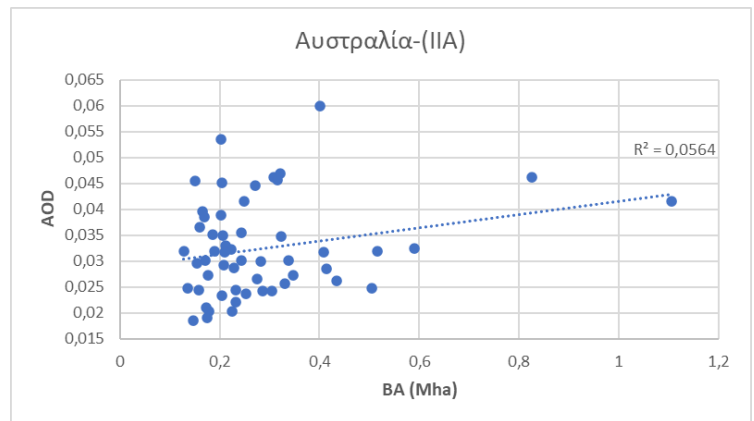
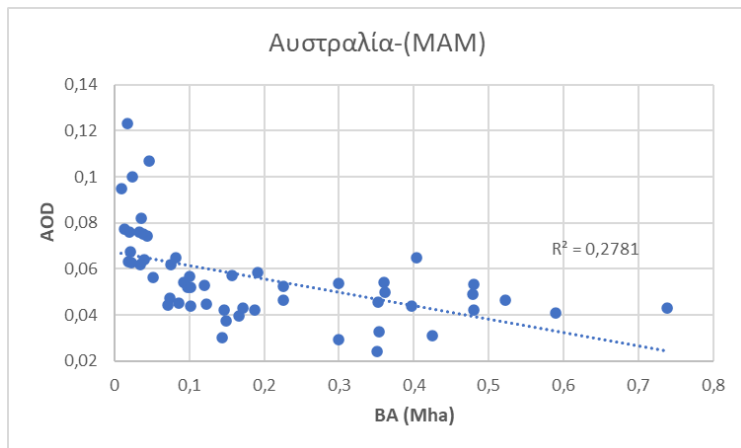


Εικόνα 29. Παγκόσμιος χάρτης με την περιοχή της Αυστραλίας που εξετάστηκε.

Τελικώς, εξετάζεται το μεγαλύτερο κομμάτι της Αυστραλίας. Από το συγκεντρωτικό διάγραμμα που δημιουργήθηκε για το σύνολο των ετών, φαίνεται να παρουσιάζει θετική τάση και συντελεστή προσδιορισμού $R^2 = 0,0062$. Παρακάτω ακολουθούν τα εποχικά διαγράμματα.



Διάγραμμα 17: Συγκεντρωτικό διάγραμμα διασποράς BA-AOD για την Αυστραλία την περίοδο 2001-2018.



Διάγραμμα 18: Διαγράμματα διασποράς BA-AOD για την Αυστραλία τις εποχές: α) MAM, β) IIA, γ) ΣΟΝ, δ) ΔΙΦ.

Στην περίπτωση της Αυστραλίας, οι εποχές IIA και ΣΟΝ παρουσιάζουν θετική τάση ενώ οι εποχές MAM και ΔΙΦ αρνητική τάση. Οι εποχές που εμφανίζουν αρνητική τάση παρουσιάζουν σημαντικά μικρότερες τιμές καμένων εκτάσεων, σε σχέση με αυτές που παρουσιάζουν θετική τάση. Η εποχή ΣΟΝ παρουσιάζει τις μεγαλύτερες καμένες εκτάσεις, με τη μέγιστη τιμή να φτάνει περίπου στα 2,6 Mha. Παρότι έχει τον δεύτερο μεγαλύτερο συντελεστή προσδιορισμού, με τιμή $R^2 = 0,2506$, είναι η εποχή που οδηγεί την θετική τάση που εμφανίζεται στο συγκεντρωτικό διάγραμμα.

Συμπεράσματα

Η παρούσα διπλωματική εργασία διερευνά τη σχέση μεταξύ καμένων εκτάσεων από πυρκαγιές (BA) και του δείκτη οπτικού βάθους αιωρούμενων σωματιδίων (AOD), βάσει δορυφορικών δεδομένων.

Από την έρευνα αυτή, προκύπτει αρχικά μια ασθενής σχετικά συσχέτιση του BA με το AOD, με θετική τάση συσχέτισης κυρίως στις τροπικές περιοχές. Σε επόμενο στάδιο οι δύο δείκτες συσχετίστηκαν εποχικά. Τα αποτελέσματα έδειξαν πολύ καλή συσχέτιση μεταξύ BA και AOD παγκοσμίως, με τις μεγαλύτερες τιμές συσχέτισης να καταγράφονται σε τροπικές και υποτροπικές περιοχές του πλανήτη, με κύριες την Αφρική και την Νότια Αμερική όπου οι τιμές συσχέτισης έφτασαν έως και 1, αντιπροσωπεύοντας την ισχυρότερη συσχέτιση.

Προχωρώντας την ανάλυση, κατά την αφαίρεση της εποχικότητας από τους δείκτες, συσχετίστηκε η ανωμαλία των τιμών τους. Η συσχέτιση παρουσίασε δραματική μείωση και εμφανίζεται σε πολύ λίγες περιοχές του πλανήτη. Ειδικότερα, με θετική τάση καταγράφεται κατά τις εποχές ΙΙΑ και ΔΙΦ στη νοτιοκεντρική Αφρική και Βόρεια Αφρική αντίστοιχα, ενώ ακόμα, εντοπίζονται διάσπαρτα κομμάτια με θετική τάση συσχέτισης στη Νότια Αμερική, τις εποχές ΙΙΑ και ΣΟΝ. Τα αποτελέσματα αυτά, είναι λογικά εφόσον οι εποχές και οι παράγοντες που τις συνοδεύουν, επηρεάζουν έμμεσα και άμεσα την εμφάνιση πυρκαγιών καθώς και την αύξηση ή μείωση των αιωρούμενων σωματιδίων στην ατμόσφαιρα.

Έπειτα, εξετάζοντας απομονωμένα διάφορες περιοχές του πλανήτη, που παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον, δημιουργήθηκαν διαγράμματα διασποράς, τα οποία στο σύνολο τους, όσον αφορά την περίοδο των 18 ετών, παρουσίασαν θετική τάση, εκτός της Βορείου Αφρικής που παρουσίασε αρνητική. Η θετική τάση οδηγεί συμπερασματικά σε θετική συσχέτιση μεταξύ των μεταβλητών, λόγω της ταυτόχρονης αύξησής τους. Ωστόσο, συνολικά, λόγω των ως επί το πλείστον χαμηλών συντελεστών προσδιορισμού, δεν εξάγεται κάποιο αξιοσημείωτο αποτέλεσμα ισχυρής γραμμικής συσχέτισης, ώστε η μεταβλητότητα του BA να εξηγεί εξολοκλήρου τη μεταβλητότητα του AOD.

Εν κατακλείδι, η συσχέτιση του BA και του AOD εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις εποχιακές μεταβολές, ωστόσο αφαιρώντας τα χαρακτηριστικά των εποχών, δεν μπορούν να συσχετιστούν σε μεγάλο βαθμό. Έτσι, παρότι τείνουν να έχουν θετική τάση συσχέτισης, η σχέση τους δεν προκύπτει τόσο ισχυρή, όταν απομονώνεται από τους κλιματικούς παράγοντες.

Βιβλιογραφία

1. Alam, K., Trautmann, T., Blaschke, T., Subhan, F. (2014). Changes in aerosol optical properties due to dust storms in the Middle East and Southwest Asia. *Remote Sensing of Environment*.
2. Alexandre, P. M., Stewart, S. I., Mockrin, M. H., Keuler, N. S., Syphard, A. D., Bar-Massada, A., ... Radeloff, V. C. (2015). The relative impacts of vegetation, topography and spatial arrangement on building loss to wildfires in case studies of California and Colorado. *Landscape Ecology*, 31(2), 415–430. doi:10.1007/s10980-015-0257-6
3. Ansmann, A., Ohneiser, K., Chudnovsky, A., Baars, H., & Engelmann, R. (2021). CALIPSO Aerosol-Typing Scheme Misclassified Stratospheric Fire Smoke: Case Study From the 2019 Siberian Wildfire Season. *Frontiers in Environmental Science*, 9, 769852. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2021.769852>
4. Baker S.J. (2022). Fossil evidence that increased wildfire activity occurs in tandem with periods of global warming in Earth's past.
5. Balch, J. K., Bradley, B. A., Abatzoglou, J. T., Nagy, R. C., Fusco, E. J., & Mahood, A. L. (2017). Human-started wildfires expand the fire niche across the United States. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 114(11), 2946-2951. <https://doi.org/10.1073/pnas.1617394114>
6. Boegelsack, N., Withey, J., O'Sullivan, G. and McMartin, D. (2018) A Critical Examination of the Relationship between Wildfires and Climate Change with Consideration of the Human Impact. *Journal of Environmental Protection*, 9, 461-467. doi: 10.4236/jep.2018.95028
7. Bond, T. C., Doherty, S. J., Fahey, D. W., Forster, P. M., Berntsen, T., DeAngelo, B. J., Flanner, M. G., Ghan, S., Kärcher, B., Koch, D., Kinne, S., Kondo, Y., Quinn, P. K., Sarofim, M. C., Schultz, M. G., Schulz, M., Venkataraman, C., Zhang, H., Zhang, S.,... Zender, C. S. (2013). Bounding the role of black carbon in the climate system: A scientific assessment. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118(11), 5380-5552. <https://doi.org/10.1002/jgrd.50171>
8. Bondur, V. G., Mokhov, I. I., Voronova, O. S., & Sitnov, S. A. (2020). Satellite Monitoring of Siberian Wildfires and Their Effects: Features of 2019 Anomalies and Trends of 20Year Changes. *Doklady Earth Sciences*, 492(1), 370–375. doi:10.1134/s1028334x20050049
9. Boucher, O. (2015). Atmospheric Aerosols. In: *Atmospheric Aerosols*. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-94-017-9649-1_2
10. Burton, C., Kelley, D. I., Jones, C. D., Betts, R. A., Cardoso, M., & Anderson, L. (2022). South American fires and their impacts on ecosystems increase with continued emissions. *Climate Resilience and Sustainability*, 1(1), e8. <https://doi.org/10.1002/cli2.8>
11. Catarino, S., Romeiras, M. M., Figueira, R., Aubard, V., Silva, J. M., & Pereira, J. M. (2020). Spatial and Temporal Trends of Burnt Area in Angola: Implications for Natural Vegetation and Protected Area Management. *Diversity*, 12(8), 307. <https://doi.org/10.3390/d12080307>

12. Cruz Núñez X., Villers Ruiz L., & Gay García C. (2014). Black carbon and organic carbon emissions from wildfires in Mexico. *Atmósfera*.
13. Cui, L., Zhu, C., Zou, Z., Yao, C., Zhang, C., & Li, Y. (2023). The Spatiotemporal Characteristics of Wildfires across Australia and Their Connections to Extreme Climate Based on a Combined Hydrological Drought Index. *Fire*, 6(2), 42. <https://doi.org/10.3390/fire6020042>
14. De Sales, F., Okin, G. S., Xue, Y., & Dintwe, K. (2018). On the effects of wildfires on precipitation in Southern Africa. *Climate Dynamics*. doi:10.1007/s00382-018-4174-7
15. DeBano L.F., Neary D.G., Ffolliott P.F. (1998). *Fire's Effects on Ecosystems*.
16. Dosiou, A., Athinelis, I., Katris, E., Vassalou, M., Kyrkos, A., Krassakis, P., Parcharidis, I., (2024). Employing Copernicus Land Service and Sentinel-2 Satellite Mission Data to Assess the Spatial Dynamics and Distribution of the Extreme Forest Fires of 2023 in Greece. *Fire* 2024, 7, 20. <https://doi.org/10.3390/fire7010020>
17. Edwards, R. B., Naylor, R. L., Higgins, M. M., & Falcon, W. P. (2020). Causes of Indonesia's forest fires. *World Development*, 127, 104717. doi: 10.1016/j.worlddev.2019.104717
18. Evangeliou, N., Kylling, A., Eckhardt, S., Myroniuk, V., Stebel, K., Paugam, R., Zibtev, S., and Stohl, A., (2019). Open fires in Greenland in summer 2017: transport, deposition and radiative effects of BC, OC and BrC emissions, *Atmos. Chem. Phys.*, 19, 1393–1411, <https://doi.org/10.5194/acp-19-1393-2019>
19. Flannigan, M.D., Amiro, B.D., Logan, K.A. et al. Forest Fires and Climate Change in the 21ST Century. *Mitig Adapt Strat Glob Change* 11, 847–859 (2006). <https://doi.org/10.1007/s11027-005-9020-7>
20. Fuzzi, S., Baltensperger, U., Carslaw, K., Decesari, S., Denier van der Gon, H., Facchini, M. C., Fowler, D., Koren, I., Langford, B., Lohmann, U., Nemitz, E., Pandis, S., Riipinen, I., Rudich, Y., Schaap, M., Slowik, J. G., Spracklen, D. V., Vignati, E., Wild, M., Williams, M., and Gilardoni, S., (2015). Particulate matter, air quality and climate: lessons learned and future needs, *Atmos. Chem. Phys.*, 15, 8217–8299, <https://doi.org/10.5194/acp-15-8217-2015>
21. Gatebe, C. K., Ichoku, C. M., Poudyal, R., Roman, M. O., & Wilcox, E., (2014). Surface albedo darkening from wildfires in northern sub-Saharan Africa. *Environ. Res. Lett.* 9 065003. doi: 10.1088/1748-9326/9/6/065003
22. Costa, H., de Rigo, D., Libertà, G., Houston Durrant, T., San-Miguel-Ayanz, J., (2020). European wildfire danger and vulnerability in a changing climate: towards integrating risk dimensions. Publications Office of the European Union, Luxembourg, 59 pp. ISBN:978-92-76-16898-0, <https://doi.org/10.2760/46951>
23. Grell, G., Freitas, S. R., Stuefer, M., and Fast, J. (2011). Inclusion of biomass burning in WRF-Chem: impact of wildfires on weather forecasts, *Atmos. Chem. Phys.*, 11, 5289–5303, <https://doi.org/10.5194/acp-11-5289-2011>

24. Grillakis, M., Voulgarakis, A., Rovithakis, A., Seiradakis, K. D., Koutroulis, A., Field, R.D., Kassoar, M., Papadopoulos, A. & Lazaridis, M. (2022). Climate drivers of global wildfire burned area. *Environ. Res. Lett.* 17 045021. doi: 10.1088/1748-9326/ac5fa1
25. Haikerwal, A., Akram, M., Del Monaco, A., Smith, K., Sim, M. R., Meyer, M., ... Dennekamp, M. (2015). Impact of Fine Particulate Matter (PM_{2.5}) Exposure During Wildfires on Cardiovascular Health Outcomes. *Journal of the American Heart Association*, 4(7), e001653. doi:10.1161/jaha.114.001653
26. Haque, M. , Azad, M. , Hossain, M. , Ahmed, T. , Uddin, M. and Hossain, M. (2021) Wildfire in Australia during 2019-2020, Its Impact on Health, Biodiversity and Environment with Some Proposals for Risk Management: A Review. *Journal of Environmental Protection*, 12, 391-414. doi: 10.4236/jep.2021.126024
27. Hoover T. (2017). Wildfires, the fire triangle, and CO₂ extinguishers. *Science Scope*.
28. Jiang, X., Wiedinmyer, C., & Carlton, A. G. (2012). Aerosols from Fires: An Examination of the Effects on Ozone Photochemistry in the Western United States. *Environ. Sci. Technol.* 2012, 46, 21, 11878–11886, <https://doi.org/10.1021/es301541k>
29. Jones M. W., Smith A., Betts R., Canadell J. G., Prentice I. C., & Le Quéré C. (2020). Climate Change Increases the Risk of Wildfires, *ScienceBrief*.
30. Justice, C. O., Vermote, E., Townshend, J. R. G., Defries, R., Roy, D. P., Hall, D. K., ... Barnsley, M. J. (1998). The Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS): land remote sensing for global change research. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 36(4), 1228–1249. doi:10.1109/36.701075
31. Kaufman, Y. J., Tanré, D., & Boucher, O. (2002). A satellite view of aerosols in the climate system. *Nature*, 419(6903), 215-223. <https://doi.org/10.1038/nature01091>
32. Kharuk, V. I., Ponomarev, E. I., Ivanova, G. A., Dvinskaya, M. L., Coogan, S. C. P., & Flannigan, M. D. (2021). Wildfires in the Siberian taiga. *Ambio*. doi:10.1007/s13280-020-01490-x
33. Le Roux, R., Wagner, F., Blank, L., Betbeder, J., Gond, V., Dessard, H., Funatzu, B., Bourgoïn, C., Cornu, G. & Herault, B. (2022). How wildfires increase the sensitivity of Amazon forests to droughts. *Environ. Res. Lett.* 17 044031. doi: 10.1088/1748-9326/ac5b3d
34. Li, A. X., Wang, Y., & Yung, Y. L. (2019). Inducing Factors and Impacts of the October 2017 California Wildfires. *Earth and Space Science*, 6(8), 1480- 1488. doi:10.1029/2019ea000661
35. Logothetis, S.-A., Salamalikis, V., Gkikas, A., Kazadzis, S., Amiridis, V., and Kazantzidis, A., (2021). 15-year variability of desert dust optical depth on global and regional scales, *Atmos. Chem. Phys.*, 21, 16499–16529, <https://doi.org/10.5194/acp-21-16499-2021>
36. Mansoor S., Farooq I., Kachroo M. M., Mahmoud A. E. D., Fawzy M., Popescu S. M., Alyemeni M., Sonne C., Rinklebe, J., & Ahmad P. (2022). Elevation in wildfire frequencies with respect to the climate change. *Journal of Environmental Management*.

37. Marín, P.-G., Julio, C. J., Dante Arturo, R.-T., & Daniel Jose, V.-N. (2018). Drought and Spatiotemporal Variability of Forest Fires Across Mexico. *Chinese Geographical Science*, 28(1), 25–37. doi:10.1007/s11769-017-0928-0
38. Mei, L., Strandgren, J., Rozanov, V., Vountas, M., Burrows, J. P., & Wang, Y. (2019). A study of the impact of spatial resolution on the estimation of particle matter concentration from the aerosol optical depth retrieved from satellite observations. *International Journal of Remote Sensing*, 1–29. doi:10.1080/01431161.2019.1601279
39. Mhaweji M., Faour G. & Adjizian-Gerard, J. (2017). A novel method to identify likely causes of wildfire. *Climate Risk Management*.
40. Moritz, M. A., Parisien, A., Batllori, E., Krawchuk, M. A., Dorn, J. V., Ganz, D. J., & Hayhoe, K. (2012). Climate change and disruptions to global fire activity. *Ecosphere*, 3(6), 1-22. <https://doi.org/10.1890/ES11-00345.1>
41. Müller, C. (2020). Brazil and the Amazon Rainforest: Deforestation, biodiversity and cooperation with the EU and international forums, EPRS: European Parliamentary Research Service. CID: 20.500.12592/15vqqg
42. Nguyen, D.-L., Czech, H., Pieber, S. M., Schnelle-Kreis, J., Steinbacher, M., Orasche, J., Henne, S., Popovicheva, O. B., Abbaszade, G., Engling, G., Bukowiecki, N., Nguyen, N.-A., Nguyen, X.-A., and Zimmermann, R., (2021). Carbonaceous aerosol composition in air masses influenced by large-scale biomass burning: a case study in northwestern Vietnam, *Atmos. Chem. Phys.*, 21, 8293–8312, <https://doi.org/10.5194/acp-21-8293-2021>
43. Oduer F., Calvo A. I., Blanco-Alegre C., Castro A., Nunes T., Alves C., ... Fraile, R. (2019). Unusual winter Saharan dust intrusions at Northwest Spain: Air quality, radiative and health impacts. *Science of The Total Environment*.
44. Page, S., Hoscilo, A., Langner, A., Tansey, K., Siegert, F., Limin, S., & Rieley, J. (2009). Tropical peatland fires in Southeast Asia. *Tropical Fire Ecology*, 263–287. doi:10.1007/978-3-540-77381-8_9
45. Papanikolaou, C., Kokkalis, P., Soupiona, O., Solomos, S., Papayannis, A., Mylonaki, M., Anagnou, D., Foskinis, R., & Gidarakou, M. (2022). Australian Bushfires (2019–2020): Aerosol Optical Properties and Radiative Forcing. *Atmosphere*, 13(6), 867. <https://doi.org/10.3390/atmos13060867>
46. Paugam, R., Wooster, M., Freitas, S., and Val Martin, M. (2016). A review of approaches to estimate wildfire plume injection height within large-scale atmospheric chemical transport models, *Atmos. Chem. Phys.*, 16, 907–925, <https://doi.org/10.5194/acp-16-907-2016> 43
47. Pausas, J. G., & Keeley, J. E. (2021). Wildfires and global change. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 19(7), 387-395. <https://doi.org/10.1002/fee.2359>
48. Pausas, J. G., Llovet, J., Rodrigo, A., Vallejo R. (2008) Are wildfires a disaster in the Mediterranean basin? – A review. *International Journal of Wildland Fire* 17, 713-723. <https://doi.org/10.1071/WF07151>

49. Pettinari, M. L., & Chuvieco, E. (2019). Temporal Anomalies in Burned Area Trends: Satellite Estimations of the Amazonian 2019 Fire Crisis. *Remote Sensing*, 12(1), 151. <https://doi.org/10.3390/rs12010151>
50. Pio C. A., Legrand M., Alves C. A., Oliveira T., Afonso J., Caseiro A., Puxbaum H., Sanchez-Ochoa A. & Gelencsér A. (2008). Chemical composition of atmospheric aerosols during the 2003 summer intense forest fire period. *Atmospheric Environment*
51. Proestakis, E., Amiridis, V., Marinou, E., Georgoulas, A. K., Solomos, S., Kazadzis, S., Chimot, J., Che, H., Alexandri, G., Binietoglou, I., Daskalopoulou, V., Kourtidis, K. A., de Leeuw, G., and van der A, R. J., (2018). Nine-year spatial and temporal evolution of desert dust aerosols over South and East Asia as revealed by CALIOP, *Atmos. Chem. Phys.*, 18, 1337–1362, <https://doi.org/10.5194/acp-18-1337-2018>
52. Ramanathan, V., Crutzen, P. J., Kiehl, J. T., & Rosenfeld, D. (2001). Aerosols, Climate, and the Hydrological Cycle. *Science*. <https://doi.org/0007>
53. Sari, F. (2022). Identifying anthropogenic and natural causes of wildfires by maximum entropy method-based ignition susceptibility distribution models. *J. For. Res.* 34, 355–371. <https://doi.org/10.1007/s11676-022-01502-4>
54. Ścieżor T., & Czaplicka A. (2020). The impact of atmospheric aerosol particles on the brightness of the night sky. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*.
55. Sellitto, P., Belhadji, R., Kloss, C., and Legras, B., (2022). Radiative impacts of the Australian bushfires 2019–2020 – Part 1: Large-scale radiative forcing, *Atmos. Chem. Phys.*, 22, 9299–9311, <https://doi.org/10.5194/acp-22-9299-2022>
56. Shi, H., Zhao, B., Jiang, Z., Li, Z., Chen, Y., Gu, Y., ... Worden, J. (2019). Modeling study of the air quality impact of record-breaking Southern California wildfires in December 2017. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. doi:10.1029/2019jd030472
57. Shlisky, A., Alencar, A.A.C., Nolasco, M.M., Curran, L.M. (2009). Overview: Global fire regime conditions, threats, and opportunities for fire management in the tropics. In: *Tropical Fire Ecology*. Springer Praxis Books. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-540-77381-8_3
58. Sparks, T. L., & Wagner, J. (2021). Composition of particulate matter during a wildfire smoke episode in an urban area. *Aerosol Science and Technology*, 55(6), 734–747. doi:10.1080/02786826.2021.1895429
59. Spracklen, D. V., Logan, J. A., Mickley, L. J., Park, R. J., Yevich, R., Westerling, A. L., & Jaffe, D. A. (2007). Wildfires drive interannual variability of organic carbon aerosol in the western U.S. In summer. *Geophysical Research Letters*, 34(16). <https://doi.org/10.1029/2007GL030037>
60. Stedman, J. R. (2004). The predicted number of air pollution-related deaths in the UK during the August 2003 heatwave. *Atmospheric Environment*.
61. Stephens, S. L., Burrows, N., Buyantuyev, A., Gray, R. W., Keane, R. E., Kubian, R., Liu, S., Seijo, F., Shu, L., & Tolhurst, K. G. (2014). Temperate and boreal forest mega-fires:

- Characteristics and challenges. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 12(2), 115-122. <https://doi.org/10.1890/120332>
62. Turco, M., Jerez, S., Augusto, S., Ratola, N., & Trigo, R. M. (2019). Climate drivers of the 2017 devastating fires in Portugal. *Scientific Reports*, 9(1), 1-8. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-50281-2>
 63. Viegas, D. X., (2006). Parametric study of an eruptive fire behavior model. *International Journal of Wildland Fire* 15(2) 169-177 <https://doi.org/10.1071/WF05050>
 64. Voulgarakis, A., Field, R.D. (2015). Fire Influences on Atmospheric Composition, Air Quality and Climate. *Curr Pollution Rep* 1, 70–81, <https://doi.org/10.1007/s40726-015-0007-z>
 65. Ward, M., Tulloch, A. I., Radford, J. Q., Williams, B. A., Reside, A. E., Macdonald, S. L., Mayfield, H. J., Maron, M., Possingham, H. P., Vine, S. J., L., J., Massingham, E. J., Greenville, A. C., Woinarski, J. C., Garnett, S. T., Lintermans, M., Scheele, B. C., Carwardine, J., Nimmo, D. G., . . . Watson, J. E. (2020). Impact of 2019–2020 mega-fires on Australian fauna habitat. *Nature Ecology & Evolution*, 4(10), 1321-1326. <https://doi.org/10.1038/s41559-020-1251-1>
 66. Wei, X., Chang, N.-B., Bai, K., & Gao, W. (2019). Satellite remote sensing of aerosol optical depth: advances, challenges, and perspectives. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 1–86. doi:10.1080/10643389.2019.1665944
 67. Wenny, B. N. (2009). Overview of NASA Earth Observing Systems Terra and Aqua moderate resolution imaging spectroradiometer instrument calibration algorithms and on-orbit performance. *Journal of Applied Remote Sensing*, 3(1), 032501. doi:10.1117/1.3180864
 68. Xu, R., Yu, P., Abramson, M. J., Johnston, F. H., Samet, J. M., Bell, M. L., ... Guo, Y. (2020). Wildfires, Global Climate Change, and Human Health. *New England Journal of Medicine*. doi:10.1056/nejmsr2028985
 69. Χρυσικού Λ., Αργυρόπουλος Γ., Φλαρούντζου Α., Τερζή Ε., Κούρας Α., Σοφωνίου Μ., Σαμαρά, Κ. , Νικολάου Κ. & Βαβατζανίδης Α. (2008). Αιωρούμενα σωματίδια PM2.5 και PM10 στην ατμόσφαιρα της Θεσσαλονίκης: Επίπεδα συγκεντρώσεων- Χημική σύσταση.