



Παραδοτέο Π8.2: Έκθεση αποτελεσμάτων συνεργειών μεταξύ επιτόπιων μετρήσεων, τηλεπισκόπησης και υπολογιστικών μοντέλων στην δημιουργία χαρτών έκθεσης σε πόλεις της Ελλάδας

Πακέτο Εργασίας	ΠΕ 8
Νο Παραδοτέου	Π8.2
Επικεφαλής δικαιούχος	ΠΚ
Συγγραφείς	Δημήτρης Κασκαούτης
Συμμετέχοντες	Ελένη Λιακάκου, Μαρία Κανακίδου, Νικόλαος Μιχαλόπουλος,
Εσωτερικοί κριτές	
Τύπος Παραδοτέου	Αναφορά
Επίπεδο Διάχυσης	PU (δημόσιο)
Εκτιμώμενη ημερομηνία Παράδοσης	Μήνας 46 (30/6/2022)
Πραγματική ημερομηνία Παράδοσης	
Έκδοση	
Σχόλια	

Πίνακας Περιεχομένων

Περίληψη.....	2
Σωματιδιακή ρύπανση και επιπτώσεις στην υγεία	3
Μετρήσεις σωματιδίων στον ελλαδικό χώρο	5
Ανθρακούχα αερολύματα και μετρήσεις μαύρου άνθρακα	8
Συνεισφορά του μαύρου και καφέ άνθρακα στη φασματική απορρόφηση.....	11
Διαχρονική μεταβολή του BC στην Αθήνα.....	15
Μελέτη των τύπων αερολυμάτων στην Αθήνα	17
Συνδυαστικές επιτόπιες μετρήσεις και τηλεπισκόπηση στα Ιωάννινα	21
Συνδυαστικές επιτόπιες μετρήσεις και τηλεπισκόπηση στη Θεσσαλονίκη	24
Χρήση μοντέλου αστικής ρύπανσης στην Αθήνα κατά την περίοδο της καραντίνας	25
Δημοσιεύσεις PANACEA.....	27
Άλλες βιβλιογραφικές αναφορές.....	28

Περίληψη

Το παρόν παραδοτέο εμπεριέχει αποτελέσματα επιτόπιων μετρήσεων αερολυμάτων κοντά στο έδαφος, αλλά και για ολόκληρη την ατμοσφαιρική στήλη, που πραγματοποιήθηκαν κατά τη διάρκεια του προγράμματος ΠΑΝΑΚΕΙΑ σε διάφορες ελληνικές πόλεις. Στόχος της μελέτης είναι η αποτύπωση των επιπέδων σωματιδιακής ρύπανσης (particulate matter, PM) για σωματίδια διαμέτρων μικρότερων των 10 και 2.5 μικρομέτρων (PM₁₀ και PM_{2.5}, αντίστοιχα). Μεγάλες συγκεντρώσεις των σωματιδίων αυτών ευθύνονται για μια σειρά καρδιο-αναπνευστικών παθήσεων, με αποτέλεσμα η μελέτη της έκθεσης του πληθυσμού στη σωματιδιακή ρύπανση, ιδιαίτερα σε σωματίδια μικρών διαστάσεων που μπορούν να εισέρχονται στο κατώτερο αναπνευστικό, να είναι καίριας σημασίας.

Ιδιαίτερη βαρύτητα δίνεται, επίσης, στη μελέτη του μαύρου άνθρακα (black carbon, BC), καθόσον αποτελεί ένα ρυθμιστικό παράγοντα του περιοχικού, αλλά και του παγκόσμιου κλίματος, αλλά και με επιβαρυντικές επιπτώσεις στην υγεία. Μελετάται εκτενώς η απορρόφηση των αερολυμάτων (κυρίως από BC) σε διάφορες ελληνικές πόλεις, καθώς και η επίδραση διαφορετικών πηγών (καύση ορυκτών καυσίμων, καύση ξύλου/βιομάζας) στα επίπεδα και στις απορροφητικές ιδιότητες του μαύρου άνθρακα.

Εκτός των επιτόπιων μετρήσεων, κάθετες δομές των οπτικών ιδιοτήτων των αερολυμάτων μελετήθηκαν σε συγκεκριμένες πόλεις με τη χρήση οργάνων τηλεπισκόπησης (π.χ. lidar), οι οποίες παρέχουν πρόσθετη πληροφορία αναφορικά με τη συγκέντρωση των αερολυμάτων στην ατμόσφαιρα και την επίδραση των μετεωρολογικών συνθηκών.

Μοντέλο μικρής κλίμακας (city-scale modelling) χρησιμοποιήθηκε, επίσης, για την αποτύπωση της αέριας ρύπανσης στην Αθήνα τόσο πριν όσο και κατά τη διάρκεια της περιόδου καραντίνας (lockdown) για την αντιμετώπιση του COVID-19 (άνοιξη 2020).

Σωματιδιακή ρύπανση και επιπτώσεις στην υγεία

Με τον όρο ατμοσφαιρικά αερολύματα ορίζουμε όλα τα αιωρούμενα σωματίδια που βρίσκονται στην ατμόσφαιρα είτε σε στερεή είτε σε υγρή φάση είτε σε ένα μίγμα αυτών. Η διάμετρος τους κυμαίνεται μεταξύ 0.002 μm μέχρι και 100 μm , με τη μεγαλύτερη συχνότητα μεγεθών να παρατηρείται στην περιοχή μεταξύ των 0.02 μm με 10 μm . Βάσει της “ισοδύναμης διαμέτρου”, τα αερολύματα μπορούν να διαχωριστούν σε τρεις βασικές κατηγορίες:

1. Χονδρόκοκκα (coarse mode): η διάμετρος τους βρίσκεται μεταξύ 2 μm και 50 μm και συνήθως παράγονται από μηχανικές και φυσικές διεργασίες. Χημικά η σύστασή τους αντανάκλα την πηγή προέλευσης, όμως στην πλειοψηφία τους είναι σωματίδια βιογενούς προέλευσης, ή/και ερημική ή αστική σκόνη.
2. Κατάσταση συσσώρευσης (accumulation mode): η διάμετρος τους βρίσκεται μεταξύ 0.1 μm και 2 μm και παράγονται συνήθως είτε από συμπύκνωση ατμών με χαμηλή τάση ατμών είτε από συσσωμάτωση μικρότερων (fine) σωματιδίων. Από χημικής άποψης μπορούν να αποτελούνται από ανόργανα ιόντα ή/και οργανικά στοιχεία, ενώ η πηγή προέλευσής τους καθορίζει κύρια τη χημική τους σύσταση, καθώς και τις οπτικές και φυσικές τους ιδιότητες.
3. Κατάσταση πυρηνοποίησης (nucleation mode): η διάμετρος αυτών των αερολυμάτων είναι μικρότερη από 0.1 μm και παράγονται από τη μετατροπή αέριων ρύπων σε σωματίδια (gas-to-particle conversion) μέσω της διαδικασίας της πυρηνοποίησης.

Η παραγωγή αερολυμάτων μπορεί να συμβεί είτε με απευθείας εκπομπή σωματιδίων στην ατμόσφαιρα από κάποια πηγή (φυσική ή ανθρωπογενή), είτε μέσω της φωτοχημικής ρύπανσης, όπου σωματίδια σχηματίζονται μέσω χημικών αντιδράσεων (ομογενών και ετερογενών) στην ατμόσφαιρα. Τα αερολύματα που δημιουργούνται με την πρώτη μέθοδο ονομάζονται πρωτογενή, ενώ αυτά που είναι αποτέλεσμα φωτοχημικής ρύπανσης ονομάζονται δευτερογενή. Σημαντικές ποσότητες αερολυμάτων μπορούν να απελευθερωθούν στην ατμόσφαιρα μέσω φυσικών διεργασιών. Κάποιες από τις βασικότερες πηγές αυτών των αερολυμάτων είναι: ηφαιστειακές εκρήξεις, δασικές πυρκαγιές, κάθε λογής καύσεις ανθρωπογενούς προέλευσης, άνεμοι ικανοί να μεταφέρουν σωματιδιακή ύλη (κυρίως από ερημικές περιοχές, αλλά και από μεγάλα αστικά/βιομηχανικά κέντρα) και ωκεανοί που εκλύουν σωματίδια αλάτων (**Εικόνα 1**). Επιπλέον, σημαντικές πηγές εκπομπής ανθρωπογενών αερολυμάτων είναι οι μεταφορές, οι βιομηχανικές μονάδες, οι καύσεις γαιανθράκων

και αποβλήτων, η μεταλλουργία και παρασκευή τσιμέντου, οι διάφορες κατασκευές, κ.α. Ανάλογα λοιπόν με την πηγή προέλευσης, τα αερολύματα μπορούν να διακριθούν σε αστικά/βιομηχανικά, ερημικά, ηπειρωτικά, θαλάσσια, καύσης, αρκτικά, ηφαιστειακά.



Εικόνα 1 Διάφορες πηγές εκπομπής ατμοσφαιρικών αερολυμάτων και αερίων ρύπων.

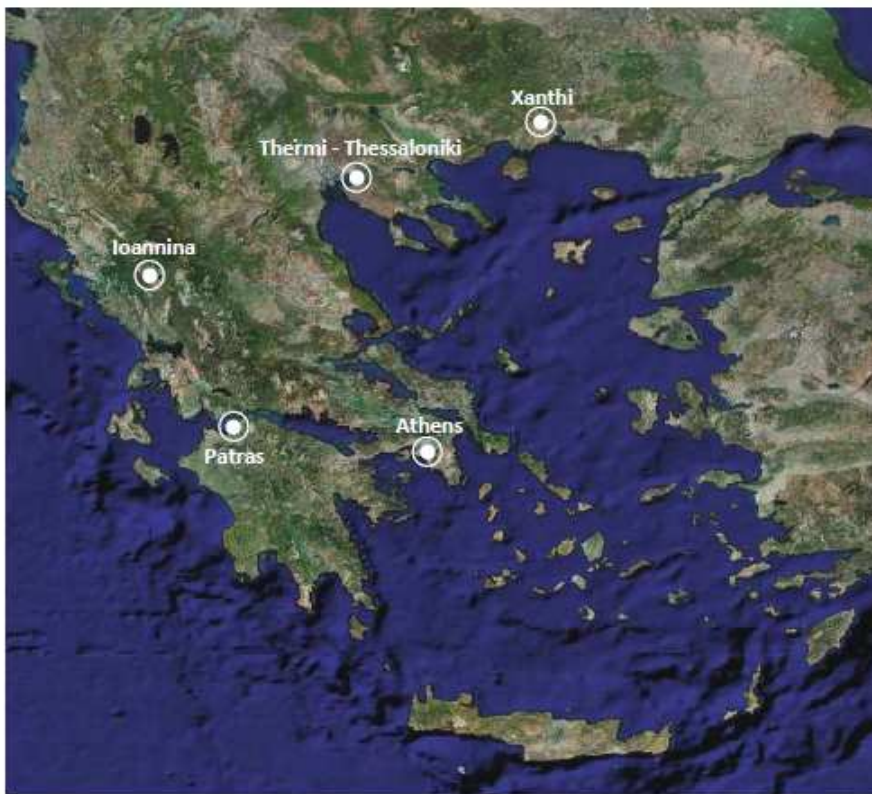
Υψηλά επίπεδα σωματιδιακής ρύπανσης εμφανίζουν επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία (Pope et al., 2020). Σε πολλές αστικές περιοχές τα αερολύματα θεωρούνται ο σημαντικότερος ρύπος και προκαλούν εξασθένηση της πνευμονικής λειτουργίας, αυξημένα αναπνευστικά προβλήματα, επιδείνωση χρόνιων πνευμονικών ασθενειών, πνευμονικές καρκινογενέσεις, αυξημένο ρυθμό εισαγωγής στα νοσοκομεία και θανάτους ενήλικων ατόμων (Di et al., 2017; Beelen et al., 2014; Bell et al., 2015). Για όλα αυτά ευθύνονται κυρίως τα μικρά αερολύματα με διάμετρο μικρότερη από 2.5 μm, καθώς έχουν την ικανότητα να συσσωρεύονται και να φτάνουν στα χαμηλότερα τμήματα του αναπνευστικού συστήματος (Kasdagli et al., 2022; Sawada et al., 2022; Ye et al., 2022).

Επίσης, υπάρχει άμεση συσχέτιση μεταξύ της συγκέντρωσης των αερολυμάτων και της μεταλλακτικής ικανότητας των κυττάρων. Όσο μικρότερο το μέγεθος των αερολυμάτων (< 2 μm) τόσο μεγαλύτερη είναι η μεταλλακτική ικανότητα των κυττάρων. Βεβαίως η επίδραση των αερολυμάτων στην ανθρώπινη υγεία είναι συνδυασμός πολλών παραγόντων με κυριότερη την τοξικότητα ορισμένων σωματιδίων (π.χ. πολύ-αρωματικοί υδρογονάνθρακες), αλλά και η προσκόλληση σε αυτά καρκινογόνων βαρέων μετάλλων, όπως χρώμιο (Cr), κάδμιο (Cd), μόλυβδος (Pb), νικέλιο (Ni), αρσενικό (As). Ως εκ τούτου, η ύπαρξη πυκνών δικτύων παρακολούθησης των συγκεντρώσεων PM_{2.5} μπορεί να βοηθήσει την ανάπτυξη και επικύρωση μεγαλύτερης ακρίβειας χωρικών μοντέλων όσον αφορά την αποτύπωση της σωματιδιακής ρύπανσης καθώς και τη δημιουργία χαρτών έκθεσης του πληθυσμού (Zaman et al., 2017, 2021). Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό για την προστασία του πληθυσμού και ιδιαίτερα των πιο ευάλωτων ομάδων (ηλικιωμένοι και παιδιά), βοηθώντας τους να αποφύγουν την υπερβολική έκθεση, ιδιαίτερα σε επεισόδια

υψηλής συγκέντρωσης, όπως πυρκαγιές σε περιαστικές περιοχές και βιομηχανικά ατυχήματα, τα οποία έχουν λάβει χώρα τουλάχιστον στην Αθήνα κατά τα τελευταία χρόνια.

Μετρήσεις σωματιδίων στον ελλαδικό χώρο

Για την καλύτερη παρακολούθηση της αέριας ρύπανσης και την καταγραφή της έκθεσης του πληθυσμού, στα πλαίσια της ΠΑΝΑΚΕΙΑ έχει αναπτυχθεί ένα δίκτυο περισσότερων από 100 αισθητήρων μικρού κόστους (low-cost sensors; Purple Air PA-II, www.air-quality.gr) σε πολλές ελληνικές πόλεις. Εδώ παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων των συγκεντρώσεων $PM_{2.5}$ σε πέντε μεγάλες ελληνικές πόλεις σε διάστημα δύο ετών (1/7/2019 - 30/6/2021). Δεκατέσσερις σταθμοί αισθητήρων στην Αθήνα, Πάτρα, Ιωάννινα, Ξάνθη και Θέρμη (στη Μητροπολιτική Περιοχή Θεσσαλονίκης), επιλέχθηκαν για την ανάλυση από περισσότερους από 100 σταθμούς του εθνικού δικτύου (Εικόνα 2, Πίνακας 1). Αξίζει να σημειωθεί ότι οι αισθητήρες μικρού κόστους ελέγχθηκαν και βαθμονομήθηκαν με όργανα αναφοράς καταλήγοντας σε πολύ καλές συσχετίσεις μέσω καμπυλών γραμμικής και πολυώνυμης συσχέτισης (Kosmopoulos et al., 2020; Stavroulas et al., 2020).



Εικόνα 2 Γεωφυσικός χάρτης με τις τοποθεσίες των 5 ελληνικών πόλεων όπου πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις $PM_{2.5}$ σωματιδίων (Dimitriou et al., 2022, submitted).

Η ανάλυση ανέδειξε υψηλές συσχετίσεις μεταξύ των μέσων ημερήσιων επιπέδων $PM_{2.5}$ μεταξύ όλων των σταθμών μέτρησης, υποδεικνύοντας ισχυρή συν-διακύμανση

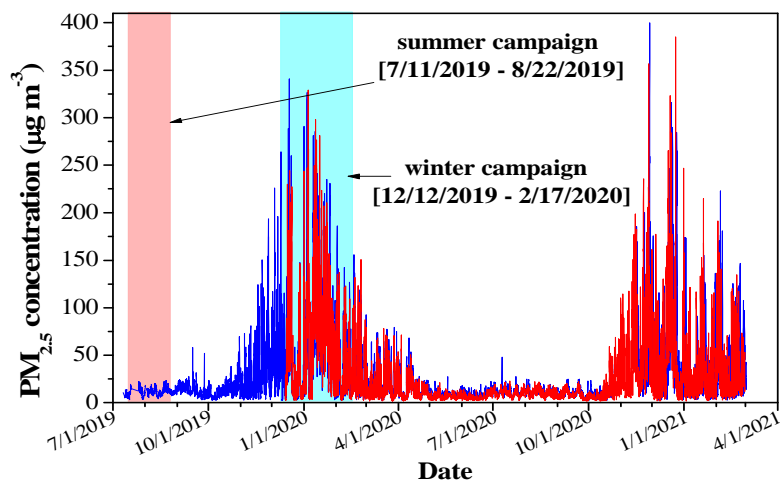
των συγκεντρώσεις, ιδίως για σταθμούς της ίδιας πόλης, τόσο κατά την ψυχρή (16 Οκτωβρίου - 15 Απριλίου) όσο και κατά τη θερμή (16 Απριλίου - 15 Οκτωβρίου) περίοδο. Οι υψηλότερες συγκεντρώσεις PM_{2.5} σε όλες τις πόλεις κατά την ψυχρή περίοδο ήταν αποτέλεσμα κυρίως των χαμηλών θερμοκρασιών και στάσιμων αντικυκλωνικών συνθηκών, ευνοώντας έτσι τον εγκλωβισμό των εκπομπών από τις θερμάνσεις των κατοικιών, ιδίως από την καύση βιομάζας. Οι αντικυκλωνικές συνθήκες συνδέθηκαν, επίσης, με αυξημένη συχνότητα επεισοδίων PM_{2.5}, με συγκεντρώσεις που υπερέβαιναν το ημερήσιο όριο των 15 μg m⁻³ (Dimitriou et al., 2022, submitted). Κατά τη διάρκεια της θερμής περιόδου, σχεδόν ομοιόμορφα επίπεδα PM_{2.5} συναντώνται σε όλη την ηπειρωτική Ελλάδα, ανεξάρτητα από το μέγεθος του πληθυσμού των πόλεων. Αυτή η ομοιομορφία υποδηλώνει έντονα τη σημασία των μεταφορών μεγάλης κλίμακας και το σχηματισμό δευτερογενών αερολυμάτων κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου. Οι μέγιστες συγκεντρώσεις PM_{2.5} το καλοκαίρι συνδέονταν με βόρειες ροές ανέμου πάνω από την Ελλάδα και τη Βαλκανική Χερσόνησο. Η χρήση των μετρήσεων από το πανελλαδικό δίκτυο αισθητήρων χαμηλού κόστους, υπό την προϋπόθεση ότι υπάρχει ισχυρό πρωτόκολλο βαθμονόμησης και συνεχής παρακολούθηση της ποιότητας των δεδομένων, έχει αποδειχθεί πολύ αποτελεσματικό εργαλείο για την απόκτηση γνώσεων σχετικά με τα επίπεδα και τη μεταβλητότητα των συγκεντρώσεων PM_{2.5} σε ολόκληρη τη χώρα. Το δίκτυο αυτό που στήθηκε στα πλαίσια του προγράμματος ΠΑΝΑΚΕΙΑ, βοηθά στην κατανόηση των χωρικών και εποχιακών ιδιαιτεροτήτων και χρησιμεύει ως ένα πολύτιμο εργαλείο και σύστημα προειδοποίησης σε πραγματικό χρόνο.

Πίνακας 1 Μέσες συγκεντρώσεις PM_{2.5} στους 14 σταθμούς μέτρησης των 5 ελληνικών πόλεων κατά την περίοδο 1/7/2019 - 30/6/2021 (Dimitriou et al., 2022, submitted).

Site	City	PM _{2.5} (μg m ⁻³)	
		Cold period	Warm period
THI	Athens	16.0	9.9
VOU	Athens	9.6	8.5
PIR	Athens	15.7	10.2
PEF	Athens	14.9	9.4
ANA	Ioannina	37.5	10.0
VIL	Ioannina	37.0	9.1
XAC	Xanthi	24.2	9.7
XAD	Xanthi	11.8	8.0
AGI	Patras	12.6	8.4
AGA	Patras	17.1	9.1
UPA	Patras	8.7	8.1
KAR	Thermi ^a	20.7	10.8
DIM	Thermi ^a	18.7	10.2
VAS	Thermi ^a	23.7	10.3

^aΕυρύτερη μητροπολιτική περιοχή Θεσσαλονίκης

Τα αυξημένα επίπεδα $PM_{2.5}$ που μετρήθηκαν σε όλες τις τοποθεσίες κατά τη διάρκεια της ψυχρής περιόδου, οφείλονται κυρίως στις αυξημένες συγκεντρώσεις κατά τις βραδινές και νυχτερινές ώρες που αποδίδονται κυρίως στη θέρμανση και σε μικρότερο βαθμό στις εκπομπές αυτοκινήτων, χωρίς να αγνοείται η επίδραση του χαμηλού νυχτερινού οριακού στρώματος. Μέγιστες μέσες συγκεντρώσεις $PM_{2.5}$ της τάξης των $37.5 \mu\text{g m}^{-3}$ στο σταθμό Ανατολή (ANA) και $37 \mu\text{g m}^{-3}$ στο σταθμό Βηλαρά (VIL) παρατηρήθηκαν στα Ιωάννινα κατά την ψυχρή περίοδο (**Πίνακας 1**) που σχετίζονται με την εκτεταμένη χρήση της καύσης βιομάζας για οικιακή θέρμανση (Sindosi et al., 2021; Papanikolaou et al., 2022) καθώς και με την τοπογραφία της περιοχής που εμποδίζει τον εξαερισμό και διασπορά των ρυπασμένων αερίων μαζών. Οι Kaskaoutis et al. (2022) αναφέρουν, επίσης, ακραία επίπεδα $PM_{2.5}$, συγκεντρώσεων οργανικού άνθρακα και λεβογλουκοζάνης (levoglucosan) στα Ιωάννινα κατά τη χειμερινή περίοδο, που αποδόθηκαν στην υπερβολική οικιστική καύση ξύλων. Στην **Εικόνα 3** αποτυπώνονται οι εξαιρετικά υψηλές τιμές $PM_{2.5}$ στα Ιωάννινα, όπως καταγράφηκαν στους δύο σταθμούς της πόλης. Συγκεντρώσεις $PM_{2.5}$ στα όρια των 250 - 300 $\mu\text{g m}^{-3}$ κρίνονται σπάνιες για τις Ευρωπαϊκές αστικές περιοχές και είναι συγκρίσιμες με τιμές στις ρυπασμένες πόλεις της Κίνας και της Ινδίας (Kaskaoutis et al., 2022).



Εικόνα 3 Ωριαίες συγκεντρώσεις $PM_{2.5}$ στα Ιωάννινα κατά την περίοδο της ΠΑΝΑΚΕΙΑ. Οι χρωματισμένες περιοχές δείχνουν τις εξειδικευμένες πειραματικές εκστρατείες (καλοκαίρι, χειμώνα). Κόκκινο: αστικός σταθμός, Μπλε: περιαστικός σταθμός (Kaskaoutis et al., 2022).

Αντίθετα, τα χαμηλότερα επίπεδα $PM_{2.5}$ κατά την ψυχρή περίοδο εντοπίστηκαν στις τρεις προαστιακές τοποθεσίες υποβάθρου, συγκεκριμένα στους σταθμούς ΥΡΑ-Πάτρα ($8.7 \mu\text{g m}^{-3}$), VOU-Αθήνα ($9.6 \mu\text{g m}^{-3}$) και ΧΑΔ-Ξάνθη ($11.8 \mu\text{g m}^{-3}$), λόγω της περιορισμένης επίδρασης των τοπικών πηγών εκπομπών (**Πίνακας 1**). Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι κατά τη διάρκεια της ψυχρής περιόδου τα επίπεδα $PM_{2.5}$ μπορεί να ποικίλλουν έως και 4.5 φορές μεταξύ των διαφορετικών τοποθεσιών, με τις

υψηλότερες τιμές να καταγράφονται στις βόρειες πόλεις (Ιωάννινα, Θέρμη-Θεσσαλονίκη και Ξάνθη), που χαρακτηρίζονται από ψυχρότερους χειμώνες, υπογραμμίζοντας έτσι το σημαντικό ρόλο των συνθηκών θερμοκρασίας που σχετίζονται με το βαθμό καύσης ξύλου, και συνεπώς, με τα παρατηρούμενα επίπεδα $PM_{2.5}$ στις ελληνικές πόλεις.

Κατά τη διάρκεια της θερμής περιόδου, χαμηλές μέσες συγκεντρώσεις $PM_{2.5}$ μετρήθηκαν σε όλες τις περιοχές, αν και με πολύ περιορισμένο εύρος, από $8.0 \mu\text{g m}^{-3}$ στο ΧΑΔ-Ξάνθη έως $10.8 \mu\text{g m}^{-3}$ στο ΚΑΡ-Θέρμη (συντελεστής εύρους 1.4), που δείχνει σχεδόν ομοιόμορφη κατανομή $PM_{2.5}$ στην Ελλάδα (Πίνακας 1). Μικρό ημερήσιο εύρος στις συγκεντρώσεις $PM_{2.5}$ τη θερμή περίοδο παρατηρήθηκε ακόμη και σε κεντρικούς σταθμούς (π.χ. ΑΓΑ, VIL, ΧΑC) που επηρεάζονται από τις εκπομπές κυκλοφορίας. Αυτές οι μικρές μεταβολές υπογραμμίζουν τη σχετικά μικρή συμβολή των τοπικών πηγών (συμπεριλαμβανομένων των οδικών μεταφορών) στα $PM_{2.5}$ κατά τη θερινή περίοδο (Dimitriou et al., 2022, submitted). Δεδομένου ότι η μεταβλητότητα των εκπομπών των οχημάτων καθ' όλη τη διάρκεια του έτους είναι περιορισμένη, τα αποτελέσματα αυτά υποδηλώνουν ότι τα πρωτογενή $PM_{2.5}$ από τις εκπομπές οχημάτων δεν είναι πλέον η κυρίαρχη πηγή στις ελληνικές πόλεις.

Ανθρακούχα αερολύματα και μετρήσεις μαύρου άνθρακα

Τα ανθρακούχα αερολύματα αποτελούν το κύριο ποσοστό (~40–70%) των ανθρωπογενών εκπομπών σε αστικές περιοχές (Bond et al., 2013; Sarkar et al., 2017; Liakakou et al., 2020a). Αποτελούνται από μια μεγάλη ποικιλία ενώσεων, που γενικά ομαδοποιούνται υπό τον οργανικό άνθρακα (organic carbon, OC) και το μαύρο ή στοιχειακό άνθρακα (black carbon, BC; elemental carbon, EC), με διαφορετικά οπτικά και φυσικοχημικά χαρακτηριστικά (Hoffer et al., 2006; Choudhary et al., 2017). Ο μαύρος άνθρακας είναι το αποτέλεσμα ατελούς καύσης ορυκτών καυσίμων (ντίζελ, πετρέλαιο, άνθρακας) και βιομάζας (οικιακή καύση ξύλου, γεωργικά απόβλητα, δασικές πυρκαγιές) και είναι ένα απορροφητικό αερόλυμα με σημαντικές επιπτώσεις στην ατμοσφαιρική θέρμανση και την κλιματική αλλαγή (Ramanathan και Carmichael, 2008; Bond et al., 2013; Xu et al., 2016; Yang et al., 2019). Αντιθέτως, ο οργανικός άνθρακας μπορεί να εκλύεται και από πρωτογενείς (π.χ. καύση, φυτά, έδαφος) αλλά και από δευτερογενείς (π.χ. μετατροπή αερίου σε σωματίδιο, φωτοχημικές αντιδράσεις) πηγές και, αν και θεωρείται ως σκεδαστικό αερόλυμα, μπορεί, επίσης, να απορροφήσει την ηλιακή ακτινοβολία στην υπεριώδη φασματική περιοχή. Αυτό το κλάσμα του OC που απορροφά το φως είναι γνωστό ως καφέ άνθρακας (brown carbon, BrC) (Kumar et al., 2018; Liakakou et al., 2020b).

Η μακροχρόνια έκθεση σε υψηλά επίπεδα BC έχει συνδεθεί επίσης με δυσμενείς επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία και την καρδιαγγειακή θνησιμότητα (Gan et al., 2011; Grahame et al., 2014). Ωστόσο, άλλες μελέτες συσχετίζουν, επίσης, τη

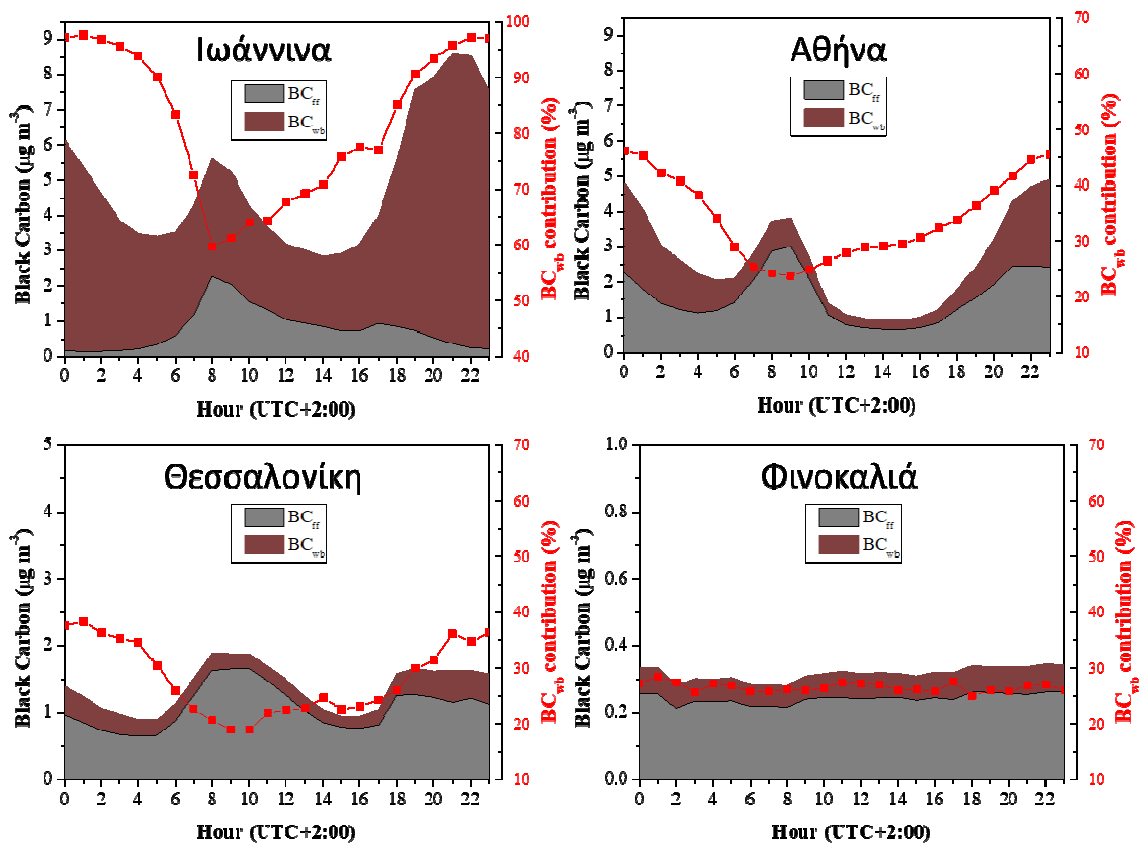
βραχυπρόθεσμη έκθεση στο BC με αναπνευστικά συμπτώματα, συμπεριλαμβανομένης της πνευμονικής φλεγμονής και των επιπτώσεων που σχετίζονται με το άσθμα (Zanobetti et al., 2010; Lin et al., 2011; Saenen et al., 2016). Επομένως, η λεπτομερής διερεύνηση των πηγών εκπομπής του BC, οι διαδικασίες ανάμειξης του στην ατμόσφαιρα και η μακροπρόθεσμη όσο και βραχυπρόθεσμη χρονική μεταβλητότητα αποτελούν βασικό πεδίο έρευνας προκειμένου να κατανοηθούν ζητήματα που αφορούν την ατμοσφαιρική φυσική και χημεία, ακτινοβολία και ανθρώπινη υγεία.

Στα πλαίσια της ΠΑΝΑΚΕΙΑ, μετρήσεις μαύρου άνθρακα (BC) υψηλής ευκρίνειας πραγματοποιήθηκαν με τη χρήση φασματικών οργάνων (7-λ Aethalometers AE33 ή AE31, Magee Scientific, 1 και 5 min ανάλυση, αντίστοιχα) ταυτόχρονα σε τρία αστικά κέντρα της Ελλάδας (Αθήνα, Θεσσαλονίκη, Ιωάννινα) και στον περιφερειακό σταθμό υποβάθρου της Φινοκαλιάς Κρήτης. Ταυτόχρονα πραγματοποιήθηκαν, επίσης, και δειγματοληψίες PM_{2.5} σε 24-ωρη βάση, οι οποίες αποσκοπούσαν στη μελέτη της χημικής σύστασης των σωματιδίων. Κύριος στόχος των πειραματικών εκστρατειών ήταν ο προσδιορισμός των επιπέδων BC στις ελληνικές πόλεις και η συγκριτική μελέτη μεταξύ τους, η ποσοτικοποίηση των πηγών συμβολής στο BC, δηλ. καύση ορυκτών καυσίμων (fossil fuel, BC_{ff}) και ξύλου/βιομάζας (wood burning, BC_{wb}). Ο προσδιορισμός των πηγών έγινε με τη χρήση του λεγόμενου “Aethalometer model” (Sandradewi et al., 2008; Liakakou et al., 2020a; Kaskaoutis et al., 2021a). Οι ταυτόχρονες μετρήσεις έλαβαν χώρα το καλοκαίρι 2019 (Ιούλιος-Αύγουστος) και το χειμώνα (Δεκέμβριος 2019 – Φεβρουάριος 2020), ενώ επαναλήφθηκαν στα Ιωάννινα κατά τη χειμερινή περίοδο 2021/22 (6 Δεκεμβρίου – 11 Ιανουαρίου). Ο Πίνακας 2 παρουσιάζει τις μέσες τιμές του BC κατά τη διάρκεια των κοινών μετρήσεων στις 4 τοποθεσίες.

Πίνακας 2 Μέσες συγκεντρώσεις BC στους 4 σταθμούς μέτρησης κατά την καλοκαιρινή (Ιούλιος-Αύγουστος 2019) και χειμερινή περίοδο (Δεκέμβριος 2019 – Φεβρουάριος 2020). Τα Ιωάννινα 2 αναφέρονται στην περίοδο 6 Δεκεμβρίου 2021 – 11 Ιανουαρίου 2022.

	Φινοκαλιά	Αθήνα	Θεσ/νίκη	Ιωάννινα	Ιωάννινα 2
Χειμώνας					
BC (μg m ⁻³)	0.31 ± 0.23	2.70 ± 3.59	1.38 ± 1.14	5.04 ± 4.71	3.86 ± 3.68
BC _{ff} (μg m ⁻³)	0.23 ± 0.18	1.63 ± 2.06	1.08 ± 1.03	0.76 ± 0.99	0.58 ± 0.69
BC _{wb} (μg m ⁻³)	0.07 ± 0.07	1.07 ± 1.79	0.30 ± 0.27	4.28 ± 4.50	3.28 ± 3.69
Καλοκαίρι					
BC (μg m ⁻³)	0.57 ± 0.24	0.65 ± 0.46	0.77 ± 0.45	1.05 ± 0.67	-
BC _{ff} (μg m ⁻³)	0.50 ± 0.20	0.52 ± 0.37	0.74 ± 0.44	0.90 ± 0.59	-
BC _{wb} (μg m ⁻³)	0.07 ± 0.09	0.14 ± 0.23	0.03 ± 0.03	0.15 ± 0.10	-

Από τις τιμές του **Πίνακα 2** προκύπτει ότι τα υψηλότερα επίπεδα BC συναντώνται στα Ιωάννινα κατά τη χειμερινή περίοδο, τα οποία συνοδεύονται από πολύ υψηλές συγκεντρώσεις BC_{wb} , χαρακτηριστικές της καύσης ξύλου για οικιακή θέρμανση. Αντιθέτως, στην Αθήνα, η οποία ακολουθεί σε συγκεντρώσεις BC, το μεγαλύτερο ποσοστό αυτού αντιστοιχεί στο BC_{ff} που αντιπροσωπεύει καύση ορυκτών καυσίμων (κεντρικές θερμάνσεις και εκπομπές από βιομηχανία και αυτοκίνητα). Το καλοκαίρι, οι τιμές BC είναι κατά πολύ μειωμένες λόγω της απουσίας καύσης βιομάζας, αλλά και της καλύτερης διάχυσης και διασποράς του BC λόγω και του βαθύτερου στρώματος ανάμειξης (Liakakou et al., 2020a). Η μέση εποχιακή ημερήσια διακύμανση των συγκεντρώσεων BC_{ff} και BC_{wb} στις 4 τοποθεσίες μελετάται στις **Εικόνες 4** και **5** κατά τις κοινές χειμερινές και καλοκαιρινές καμπάνιες, αντίστοιχα.

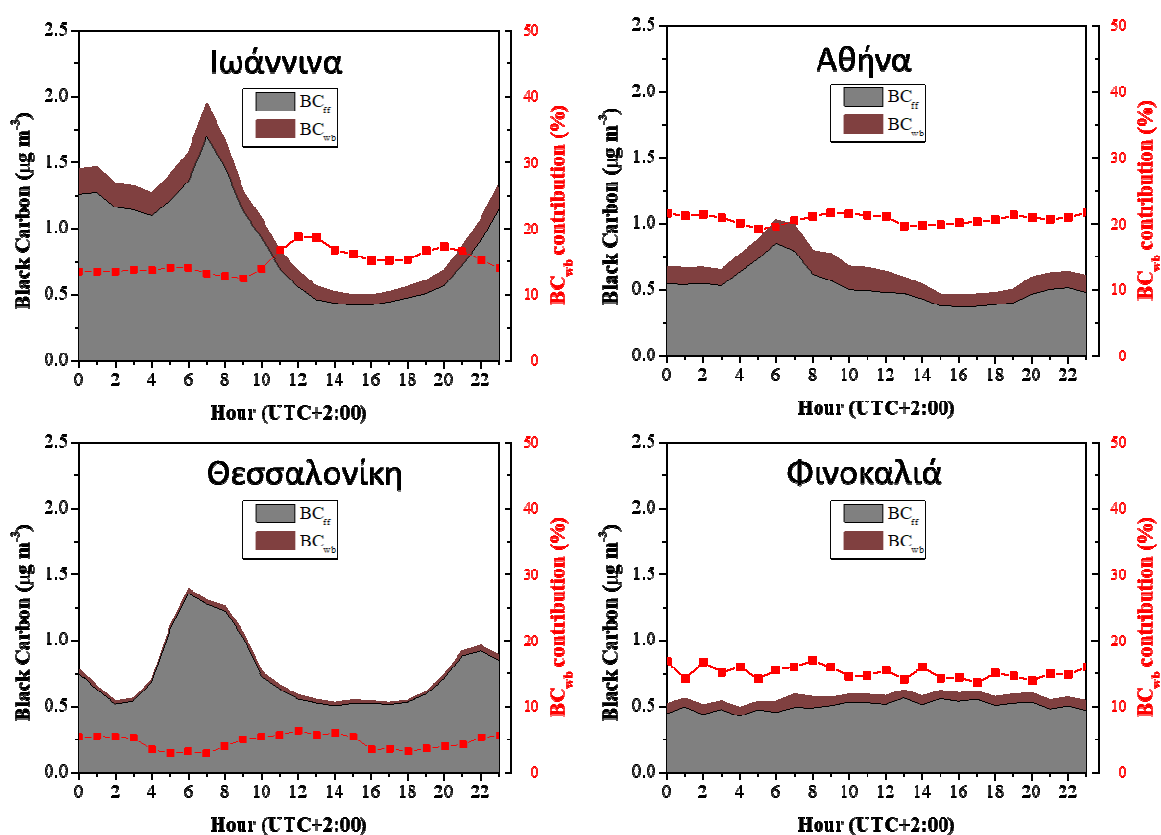


Εικόνα 4: Μέση ημερήσια διακύμανση των BC_{ff} και BC_{wb} κατά τη διάρκεια της κοινής χειμερινής καμπάνιας σε 4 τοποθεσίες στην Ελλάδα. Η κόκκινη γραμμή δείχνει τη μέση ημερήσια διακύμανση του ποσοστού καύσης βιομάζας στη συνολική συγκέντρωση του μαύρου άνθρακα (BC_{wb}/BC).

Η ανάλυση των μετρήσεων της χειμερινής περιόδου αναδεικνύει μεγάλες διαφορές στις συγκεντρώσεις όσο και στην ενδο-ημερήσια διακύμανση των BC_{ff} και BC_{wb} μεταξύ των 4 περιοχών. Στο σταθμό υποβάθρου της Φινοκαλιάς δεν παρατηρείται ενδο-ημερήσια διακύμανση και το BC_{ff} κυριαρχεί πλήρως, όπως και στη Θεσσαλονίκη, αλλά με εμφανές μέγιστο κατά τις πρωινές ώρες αιχμής (Voudouri et al., 2022, submitted).

Στην Αθήνα, παρατηρούνται δύο μέγιστα που σχετίζονται με τις εκπομπές από κυκλοφορία (πρωινό μέγιστο με κυρίαρχο ποσοστό το BC_{ff}) και την καύση βιομάζας τις νυχτερινές ώρες. Στα Ιωάννινα, η επικράτηση του BC_{wb} είναι καθολική καθ' όλη τη διάρκεια της μέρας, ενώ τα νυχτερινά μέγιστα είναι πάρα πολύ υψηλά για τα Ευρωπαϊκά δεδομένα.

Η μέση ενδο-ημερήσια διακύμανση των BC_{ff} και BC_{wb} (Εικόνα 5) για την καλοκαιρινή περίοδο, ουσιαστικά μειώνει δραστικά το νυχτερινό μέγιστο και αναδεικνύει τη μέγιστη συμβολή από την καύση ορυκτών καυσίμων καθ' όλη τη διάρκεια της μέρας σε όλους τους σταθμούς. Αυτό αντιπροσωπεύεται από τα πρωτεύοντα πρωινά μέγιστα λόγω της κυκλοφορίας, τα οποία όμως παρατηρούνται και κατά τις βραδινές ώρες, κυρίως για λόγους αναψυχής το καλοκαίρι. Στη Φινοκαλιά δεν παρατηρείται καμία ενδο-ημερήσια μεταβολή.

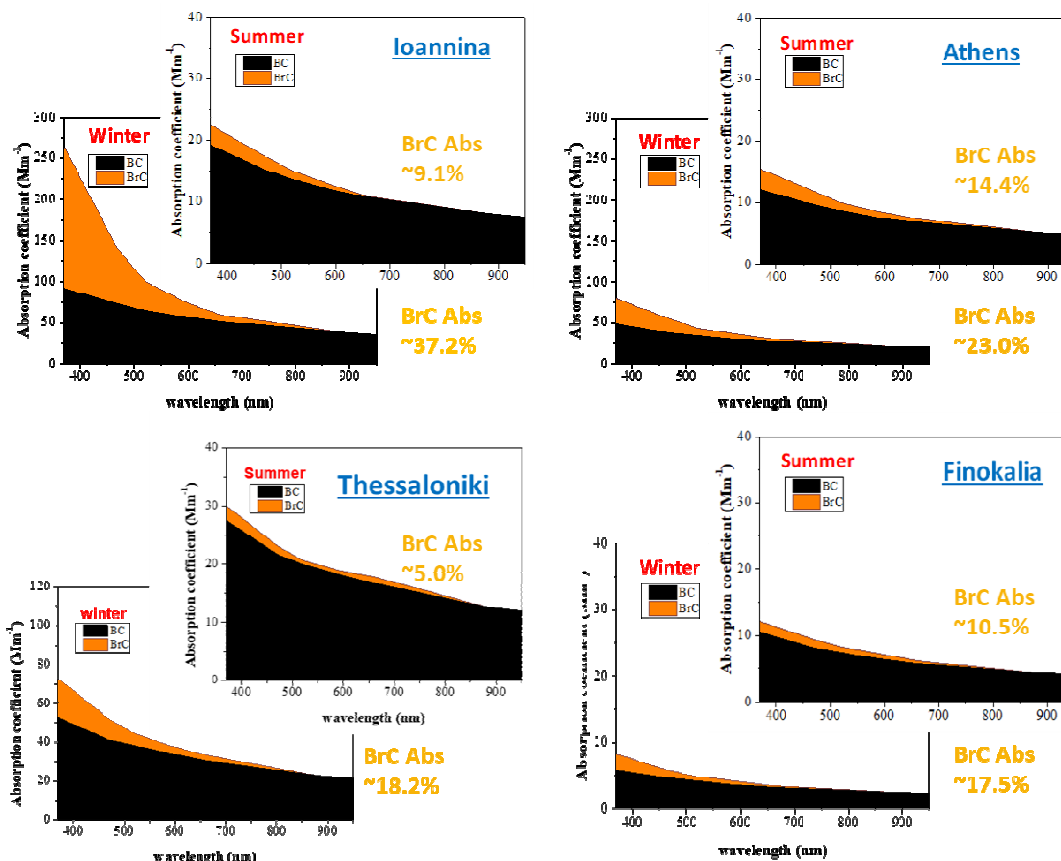


Εικόνα 5: Μέση ημερήσια διακύμανση των BC_{ff} και BC_{wb} κατά τη διάρκεια της κοινής καλοκαιρινής καμπάνιας σε 4 τοποθεσίες στην Ελλάδα. Η κόκκινη γραμμή δείχνει τη μέση ημερήσια διακύμανση του ποσοστού καύσης βιομάζας στη συνολική συγκέντρωση του μαύρου άνθρακα (BC_{wb}/BC).

Συνεισφορά του μαύρου και καφέ άνθρακα στη φασματική απορρόφηση

Στο εδάφιο αυτό μελετάται η συνεισφορά του μαύρου (BC) και καφέ άνθρακα (BrC) στην ολική απορρόφηση στις 4 τοποθεσίες. Μολονότι τα οργανικά αερολύματα

θεωρούνταν ως σκεδαστικά, το σύνολο των πρόσφατων μελετών (Liu et al., 2016; Zhang et al., 2020; Liakakou et al., 2020b) συμφωνεί στο ότι ένα σημαντικό μέρος των οργανικών αερολυμάτων μπορεί να απορροφήσει την ηλιακή ακτινοβολία και μάλιστα ισχυρά στα μικρά μήκη κύματος (UV, near-UV). Τα οργανικά αυτά αερολύματα αναφέρονται ως «καφέ άνθρακας, Brown Carbon», και επειδή μπορούν να αποτελούνται από πλήθος οργανικών ενώσεων, η παράμετρος που μελετάται είναι η απορρόφησή τους και όχι η μάζα τους. Η απορρόφηση αυτή οφείλεται σε διάφορες «χρωμοφόρες» που εμπεριέχονται στα οργανικά αερολύματα (Yuan et al., 2020), οι οποίες είναι πολύ δύσκολο να εντοπιστούν και να ποσοτικοποιηθούν. Οι χρωμοφόρες, και εν γένει η απορροφητική ικανότητα των οργανικών αερολυμάτων (BrC), είναι άρρηκτα συνδεδεμένες με τις πηγές παραγωγής και τις διαδικασίες γύρανσης (aging) και οξειδωσης (oxidation) στην ατμόσφαιρα. Τα οργανικά αερολύματα που προέρχονται από καύση βιομάζας είναι ιδιαίτερα απορροφητικά, ενώ αυτά που προέρχονται από καύσεις ορυκτών καυσίμων δεν χαρακτηρίζονται γενικά από μεγάλα ποσά απορροφητικών οργανικών αερολυμάτων (Yan et al., 2017). Ένας εύκολος τρόπος για το διαχωρισμό μεταξύ των απορροφήσεων του BC και BrC είναι μέσω του κυματικού εκθέτη απορρόφησης του Angstrom (AAE), ο οποίος θεωρείται κοντά στο 1.0 για τη φασματική απορρόφηση του BC. Έτσι, θεωρώντας ότι το BrC δεν απορροφά στα μεγάλα μήκη κύματος (π.χ. 880 nm), υπολογίστηκε η συνεισφορά του BrC στη συνολική απορρόφηση (Liakakou et al., 2020b). Τα αποτελέσματα για τις 4 τοποθεσίες φαίνονται στην **Εικόνα 6**.



Εικόνα 6: Μέση φασματική μεταβολή της απορρόφησης για BC και BrC για το χειμώνα και το καλοκαίρι σε 4 τοποθεσίες στην Ελλάδα. Δίδονται τα ποσοστά συνεισφοράς του BrC στη συνολική φασματική απορρόφηση (300-950 nm).

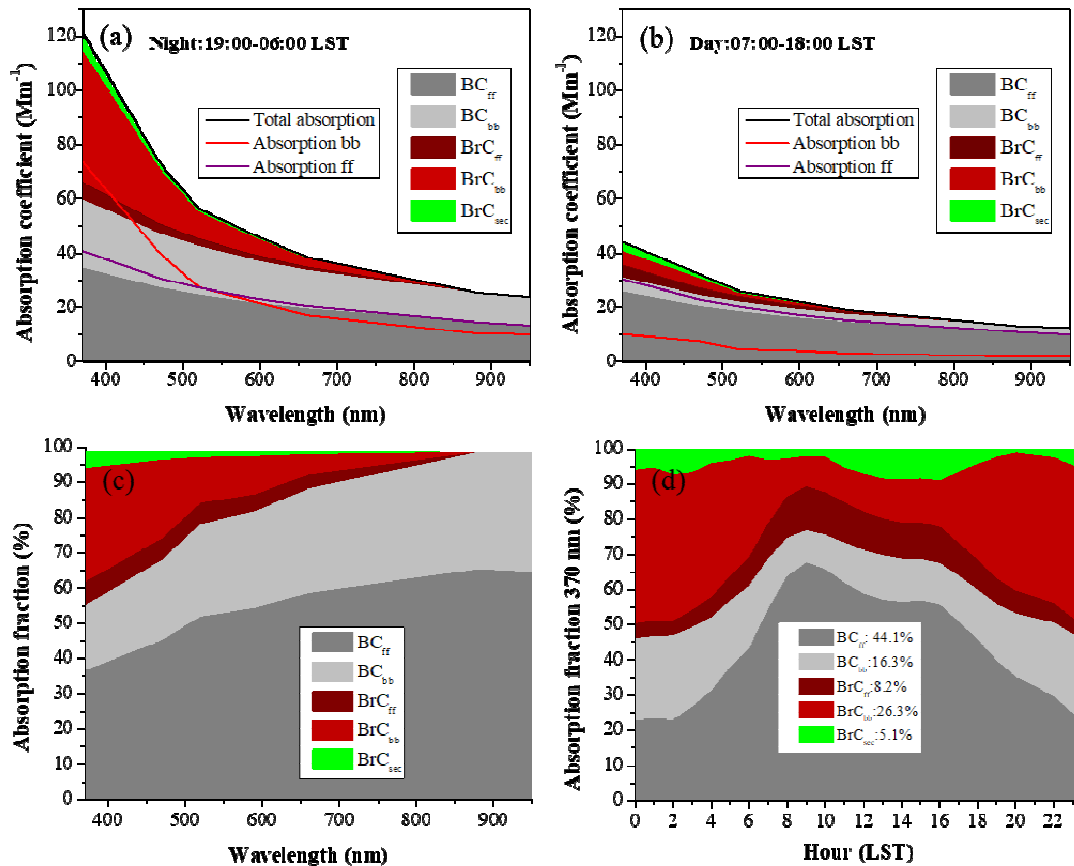
Είναι εμφανές ότι η συνεισφορά του BrC στη συνολική απορρόφηση είναι πολύ μεγαλύτερη το χειμώνα, λόγω της καύσης βιομάζας για οικιακή θέρμανση, κυρίως στα Ιωάννινα, όπου το φαινόμενο αυτό είναι ιδιαίτερα έντονο (Kaskaoutis et al., 2022). Αξίζει δε να παρατηρηθεί, ότι στα Ιωάννινα, η συνεισφορά του BrC στα 370 nm είναι της τάξης του 64%, η οποία είναι από τις μεγαλύτερες τιμές της διεθνούς βιβλιογραφίας, στις αστικές περιοχές η μέγιστη συνεισφορά αγγίζει το 50% (Xie et al., 2019; Pani et al., 2021), ενώ κατά τη χειμερινή περίοδο (μέσος όρος 4 ετών) στην Αθήνα είναι περίπου 36% (Liakakou et al., 2020b).

Να αναφερθεί, επίσης, ότι η συνεισφορά του BrC στη φασματική απορρόφηση μπορεί να προέρχεται εκτός από τις ανθρωπογενείς και από πλήθος φυσικών πηγών, όπως είναι οι βιογενείς εκπομπές, οργανικά αερολύματα προερχόμενα από το έδαφος (εδαφική σκόνη), αλλά και από δευτερογενείς πηγές (όπως σχηματισμό νέων σωματιδίων από πτητικές οργανικές ενώσεις), οξείδωση, κ.α. Η κυριότερη πηγή για τη συνεισφορά του BrC στην απορρόφηση είναι η καύση ξύλου/βιομάζας. Για το λόγο αυτό οι τιμές σε όλες τις αστικές περιοχές, ιδιαίτερα στα Ιωάννινα, είναι αυξημένες το

χειμώνα σε σχέση με το καλοκαίρι, ενώ η εποχικότητα είναι πολύ μικρή στη Φινοκαλιά (σταθμός υποβάθρου). Οι γενικά αυξημένες τιμές της συνεισφοράς του BrC στη Φινοκαλιά το καλοκαίρι (10.5%) οφείλονται κυρίως σε μεταφερόμενες αέρια μάζες που εμπεριέχουν καπνό από θερινές πυρκαγιές στη Μεσόγειο.

Χρησιμοποιώντας κοινές στη διεθνή βιβλιογραφία υποθέσεις σχετικά με τη φασματική εξάρτηση της απορρόφησης λόγω BC ($AAE_{BC} = 1$) και την καύση βιομάζας ($AAE_{bb} = 2$) και υπολογίζοντας μια βέλτιστη τιμή AAE_{ff} , η συνολική φασματική απορρόφηση διαχωρίστηκε σε πέντε συνιστώσες, που αντιστοιχούν στην απορρόφηση του BC και BrC από την καύση ορυκτών καυσίμων (fossil fuel) και την καύση βιομάζας (biomass burning) και στο δευτερογενές BrC που υπολογίστηκε μέσω της μεθόδου MRS (minimal R-squared) (Wang et al., 2019). Η εφαρμογή της μεθόδου έγινε σε δεδομένα φασματικής απορρόφησης στην Αθήνα κατά τη χειμερινή περίοδο Δεκέμβριος 2017 – Φεβρουάριος 2018 (Kaskaoutis et al., 2021a). Αξίζει να αναφερθεί ότι η προσέγγιση αυτή για το διαχωρισμό της φασματικής απορρόφησης προτάθηκε και πραγματοποιήθηκε για πρώτη φορά και δεν υπάρχουν ανάλογα αποτελέσματα σε άλλη περιοχή.

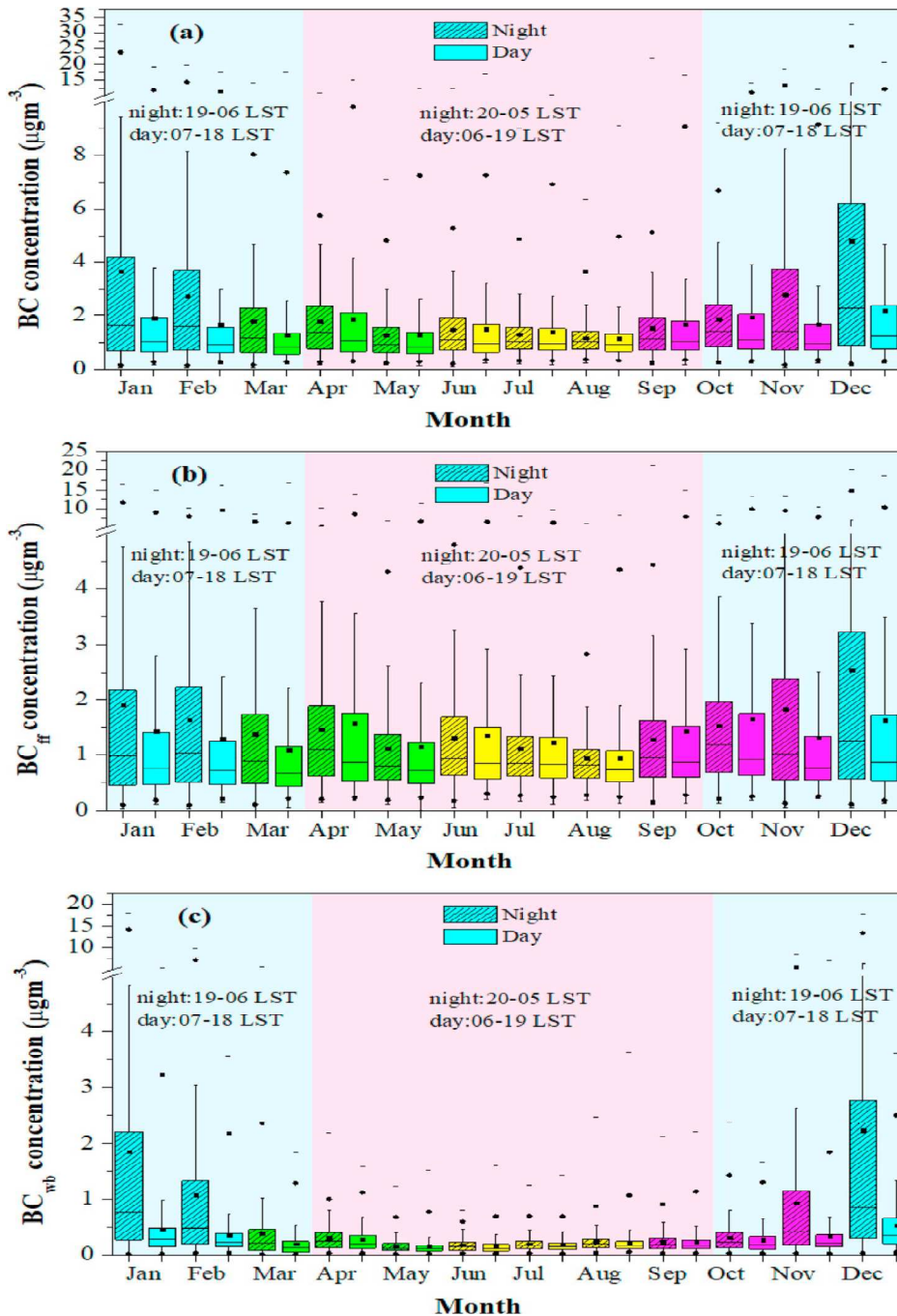
Η ανάλυση ανέδειξε σημαντικές διαφορές στη συμβολή των διαφόρων συστατικών στη συνολική απορρόφηση μεταξύ ημέρας και νύχτας (Εικόνα 7a, b), λόγω μεγάλων διαφορών στις εκπομπές και στις μετεωρολογικές καταστάσεις, καθώς το BrC και η καύση βιομάζας παρουσίασαν σημαντικά υψηλότερες απορροφήσεις τις νυχτερινές ώρες και στα μικρότερα μήκη κύματος (Εικόνα 7c). Η απορρόφηση λόγω BC_{ff} συνεισέφερε 44.1% κατά μέσο όρο, παρουσιάζοντας υψηλότερο ποσοστό (58.1%) κατά τη διάρκεια της ημέρας, ενώ η μέση απορρόφηση BC_{bb} υπολογίστηκε σε 16.3%. Οι μέσες συνεισφορές στην απορρόφηση λόγω BrC_{ff} , BrC_{bb} και BrC_{sec} ήταν 8.2%, 26.3% και 5.1%, αντίστοιχα. Η απορρόφηση του BC_{ff} παρουσίαζε μέγιστο κατά τις πρωινές ώρες αιχμής, ενώ παρόμοια συμπεριφορά παρατηρήθηκε και για το BrC_{ff} (Εικόνα 7d). Τα επίπεδα απορρόφησης και η συνεισφορά των BC_{bb} και BrC_{bb} κλιμακώθηκαν κατά τη διάρκεια της νύχτας και συσχετίζονταν σε μεγάλο βαθμό με στοιχεία ιχνηθέτες για καύση ξύλου, όπως το $nss-K^+$ (Kaskaoutis et al., 2021a). Η νέα αυτή μέθοδος διαχωρισμού των συστατικών της φασματικής απορρόφησης λόγω διαφορετικών πηγών δίνει αξιόπιστα αποτελέσματα και συστήνεται και για άλλες περιοχές.



Εικόνα 7: Μέση φασματική μεταβολή των διαφόρων συστατικών απορρόφησης της ηλιακής ακτινοβολίας τη νύχτα (a) και την ημέρα (b) κατά τη χειμερινή περίοδο στην Αθήνα. Μέση συνεισφορά της κάθε παραμέτρου στη φασματική περιοχή 370-950 nm (c). Μέση ημερήσια διακύμανση των συνεισφορών (%) της κάθε παραμέτρου και τα αντίστοιχα ποσοστά (d) (Kaskaoutis et al., 2021a).

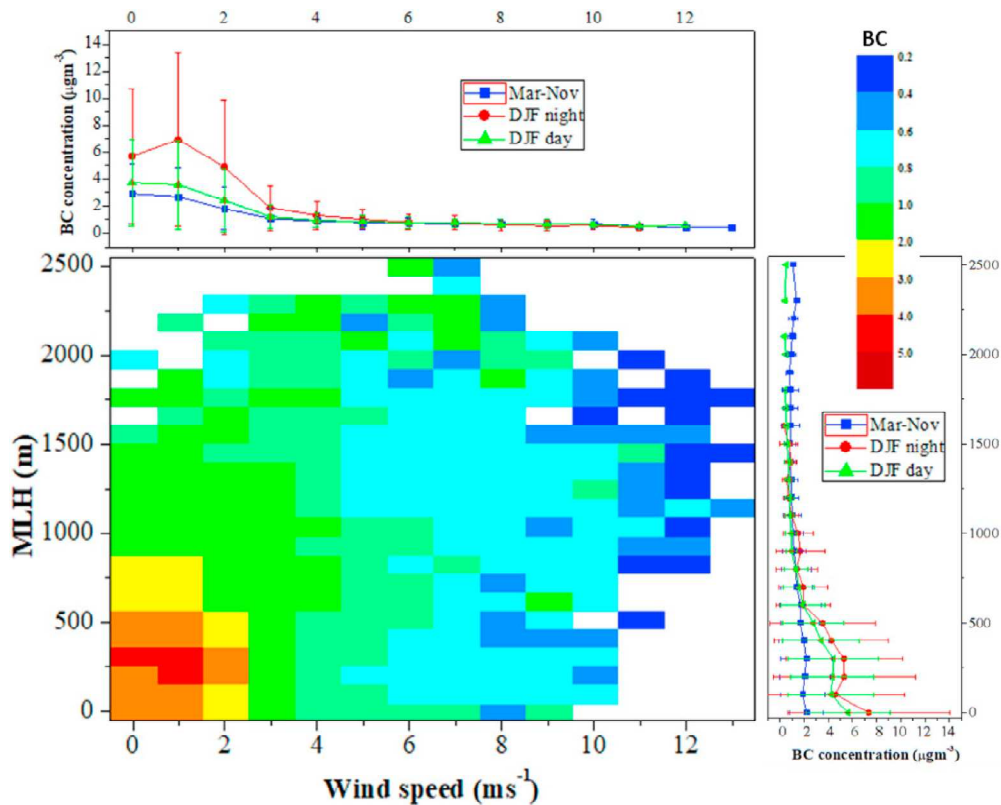
Διαχρονική μεταβολή του BC στην Αθήνα

Μια διαχρονική μελέτη 4 ετών (Μάιος 2015 – Απρίλιος 2019) πραγματοποιήθηκε στην Αθήνα με κύριο στόχο τον καθορισμό των συγκεντρώσεων αλλά και της εποχικότητας του BC και των 2 συστατικών του (BC_{ff}, BC_{wb}). Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν με το όργανο Αιθαλόμετρο (AE-33) στο σταθμό του Θησείου. Η μέση συγκέντρωση BC βρέθηκε της τάξης του $1.9 \pm 2.5 \mu\text{g m}^{-3}$ ($0.1 - 32.7 \mu\text{g m}^{-3}$, σε ωριαίες τιμές), με μικρότερες συγκεντρώσεις το καλοκαίρι ($1.3 \pm 1.1 \mu\text{g m}^{-3}$) και μεγαλύτερες ($3.0 \pm 4.0 \mu\text{g m}^{-3}$) το χειμώνα (Εικόνα 8a). Το χειμώνα παρατηρήθηκε έξαρση των τιμών BC τις πρωινές και βραδινές/νυχτερινές ώρες, ενώ κατά τις υπόλοιπες εποχές, αυτός ο ημερήσιος κύκλος φαίνεται να αδυνατίζει, με εξαίρεση την πρωινή αιχμή λόγω της κυκλοφορίας. Σε ετήσια βάση, το ποσοστό καύσης βιομάζας στις συγκεντρώσεις του BC στην Αθήνα αντιπροσωπεύει το $22 \pm 12\%$, ενώ η καύση ορυκτών καυσίμων (BC_{ff}) (εκπομπές κυκλοφορίας κυρίως) κυριαρχεί το καλοκαίρι (83%) και τις πρωινές ώρες (Εικόνα 8b). Αντιθέτως, το BC_{bb} παρουσιάζει μεγαλύτερη συνεισφορά το χειμώνα (32%), ιδιαίτερα τις νυχτερινές ώρες (39%) (Εικόνα 8c).



Εικόνα 8: Μηνιαία μεταβολή των BC (a), BC_{ff} (b) και BC_{wb} (c) για ημερήσιες και νυχτερινές παρατηρήσεις σε μια περίοδο 4 ετών στην Αθήνα (Liakakou et al., 2020a).

Εκτός από την εποχικότητα και τις πηγές εκπομπής, αξιοπρόσεχτη ήταν, επίσης, η μεταβολή του BC ανάλογα με την ταχύτητα του ανέμου και το ύψος του στρώματος ανάμειξης (mixing layer height, MLH). Η **Εικόνα 9** είναι χαρακτηριστική της εξάρτησης του BC από την ταχύτητα του ανέμου, καθώς παρατηρείται σημαντική συσσώρευση για ταχύτητες ανέμου $< 3 \text{ m s}^{-1}$ και $\text{MLH} < 500 \text{ m}$. Ασθενείς άνεμοι και χαμηλό οριακό στρώμα παίζουν λοιπόν σημαντικό ρόλο στην αύξηση των συγκεντρώσεων μαύρου άνθρακα στην Αθήνα, ενώ παρόμοια είναι τα συμπεράσματα και για τα $\text{PM}_{2.5}$.

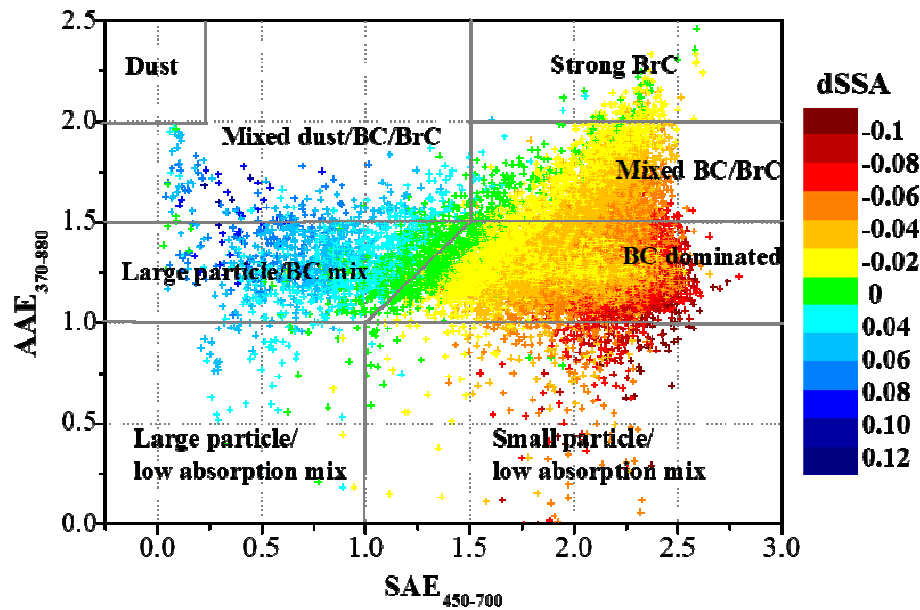


Εικόνα 9 Συγκέντρωση του BC ανάλογα με την ταχύτητα του ανέμου και το ύψος του στρώματος ανάμειξης στην Αθήνα (Μαΐος 2015 – Απρίλιος 2019). Οι μέσες συγκεντρώσεις BC δίνονται ως συνάρτηση του MLH και της ταχύτητας του ανέμου και για τρεις υπο-περιόδους, Μάρτιος-Νοέμβριος, χειμερινές νύχτες και χειμερινές ημέρες. Οι κάθετες και οριζόντιες ράβδοι αντιστοιχούν σε μία τυπική απόκλιση. Η ανάλυση πραγματοποιήθηκε για μη βροχερές ώρες (Liakakou et al., 2020a).

Μελέτη των τύπων αερολυμάτων στην Αθήνα

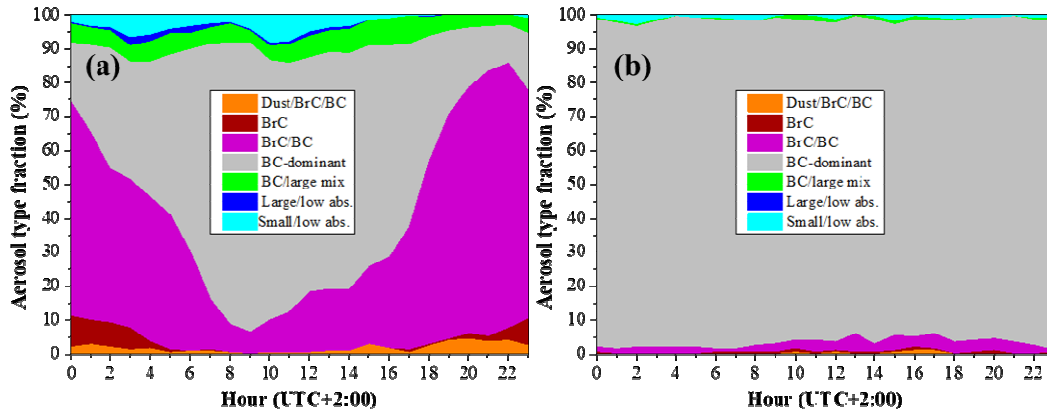
Συνδυαστικές μετρήσεις του κυματικού εκθέτη Ångström απορρόφησης και σκέδασης (AAE και SAE, αντίστοιχα), από μετρήσεις αιθαλομέτρου και νεφελόμετρου, χρησιμοποιήθηκαν για μια περίοδο τριών ετών στην Αθήνα, για τον προσδιορισμό και για μια πρώτη ταξινόμηση των τύπων αερολυμάτων. Επιπλέον, η λευκαύγεια απλής σκέδασης (single scattering albedo, SSA) και η εξάρτησή της από το μήκος κύματος (dSSA), καθώς και η χημική σύσταση των μικρών αερολυμάτων χρησιμοποιούνται για την παροχή περαιτέρω γνώσεων σχετικά με τις οπτικές και χημικές ιδιότητες και τις πηγές των διαφόρων τύπων αερολυμάτων. Τα αερολύματα στην Αθήνα χαρακτηρίζονται, ως επί το πλείστον, από τύπο που κυριαρχεί ο μαύρος Άνθρακα (BC-dominated) (76.3%), αντιπροσωπεύοντας μια ατμόσφαιρα όπου η καύση ορυκτών καυσίμων κυριαρχεί καθ' όλη τη διάρκεια του έτους, ενώ ένα σημαντικό ποσοστό (14.3%) αποτελείται από μίγμα BC και BrC, με μεγαλύτερη συχνότητα το χειμώνα και αντιπροσωπεύει την πηγή της καύσης βιομάζας. Τα αερολύματα σκόνης αναμεμειγμένα με αστική ρύπανση, καθώς και τα μεγάλα σωματίδια αναμεμειγμένα

με BC (6.5% σε ετήσια βάση) έχουν μεγαλύτερη συχνότητα εμφάνισης την άνοιξη. Επιπλέον, οι διαδικασίες γήρανσης και η μίξη του BC με οργανικά και ανόργανα συστατικά χαμηλής απορρόφησης οδηγούν στην παρουσία μικρών ή μεγάλων αερολυμάτων που χαρακτηρίζονται από μικρή φασματική εξάρτηση της απορρόφησης ($AAE < 1$). Η **Εικόνα 10** παρουσιάζει το σχήμα που χρησιμοποιήθηκε για τη διάκριση των τύπων αερολυμάτων στην Αθήνα, βασισμένο στους [Cappa et al. \(2016\)](#). Περαιτέρω λεπτομέρειες δίνονται στους [Kaskaoutis et al. \(2021b\)](#).



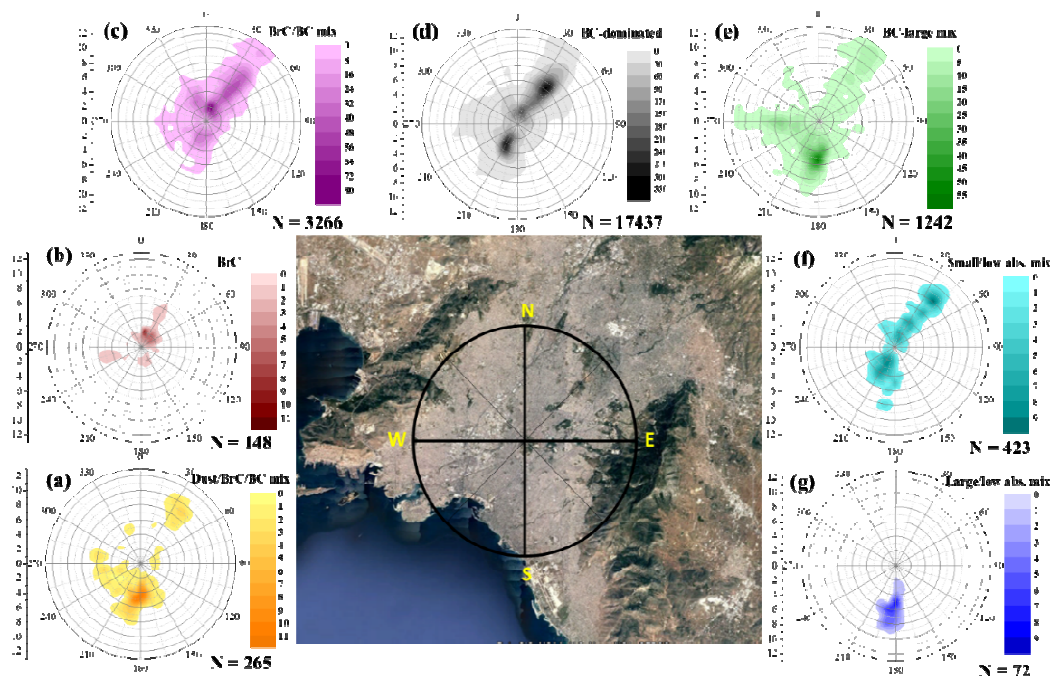
Εικόνα 10 Προσδιορισμός τύπων αερολυμάτων στην Αθήνα χρησιμοποιώντας το σχήμα ταξινόμησης $SAE_{450-700}$ - $AAE_{370-880}$ με τα όρια που προτείνονται από τους [Cappa et al. \(2016\)](#) και ως συνάρτηση του $dSSA$ ([Kaskaoutis et al. 2021b](#)).

Η **Εικόνα 11** δείχνει τη μέση-εποχιακή (για χειμώνα και καλοκαίρι) ημερήσια κύμανση του ποσοστού συμμετοχής του κάθε τύπου αερολύματος, όπου διακρίνεται η κυριαρχία του τύπου «BC-dom». Παρόλα αυτά, το χειμώνα η συνεισφορά του τύπου «BC/BrC» είναι ιδιαίτερα σημαντική κατά τις νυχτερινές ώρες, ενώ διακρίνεται και ο τύπος «BrC». Τα αποτελέσματα αυτά δείχνουν διάφορες πηγές αερολυμάτων στην Αθήνα, τόσο τοπικές (εντός λεκανοπεδίου), όσο και περιοχικές, οι οποίες παρουσιάζουν ιδιαίτερη εποχικότητα.



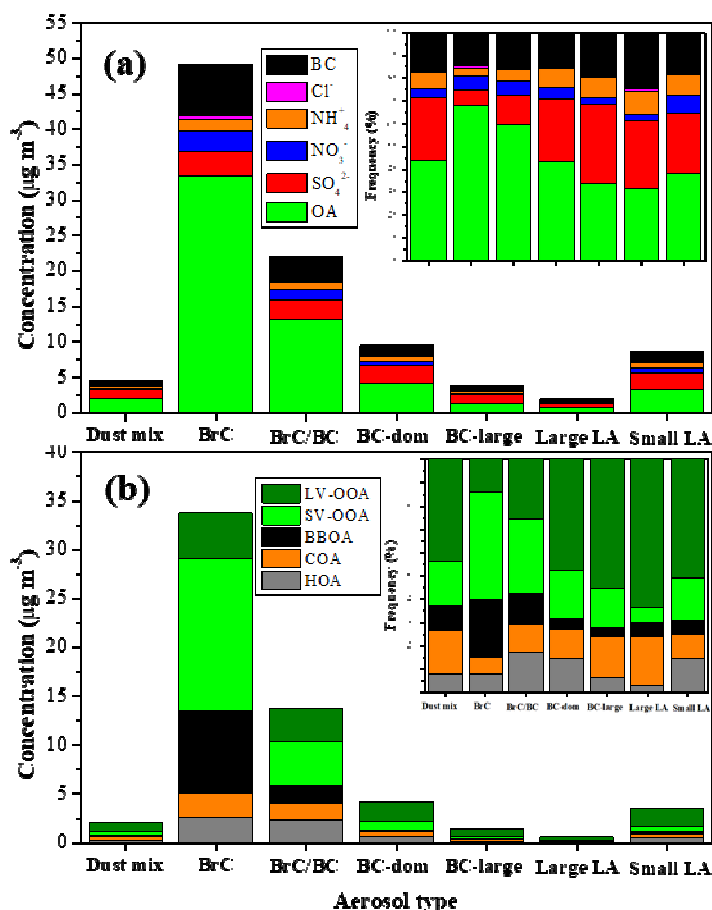
Εικόνα 11 Ημερήσια διακύμανση της σωρευτικής ποσοστιαίας συχνότητας για κάθε τύπο αερολύματος το χειμώνα (αριστερά) και το καλοκαίρι (δεξιά) στην Αθήνα (Kaskaoutis et al. 2021b).

Βρέθηκε, επίσης, από συνδυαστικές μετρήσεις ταχύτητας και διεύθυνσης ανέμου και συχνότητας εμφάνισης κάθε τύπου αερολύματος, ότι οι διάφοροι τύποι παρουσιάζουν μια εξάρτηση από διάφορους γεωγραφικούς τομείς (Εικόνα 12). Έτσι, ο τύπος «BC/BrC» συναντάται περισσότερο για ανέμους που πνέουν από βορειο-ανατολικές διευθύνσεις, μεταφέροντας στο κέντρο του λεκανοπεδίου αερολύματα καύσης ξύλου (το χειμώνα), από τα βόρεια προάστια, όπου οι κατοικίες διαθέτουν σε μεγάλο ποσοστό τζάκια. Επίσης, ο τύπος που εμπεριέχει σκόνη (dust mix) προέρχεται κυρίως από νότιες διευθύνσεις (επεισόδια μεταφοράς σκόνης από την Αφρική).



Εικόνα 12 Ροδογράμματα ανέμου για τη συχνότητα εμφάνισης κάθε τύπου αερολύματος στην Αθήνα. Ο χάρτης της ευρύτερης περιοχής της Αθήνας εμφανίζεται με το κέντρο στο χώρο των μετρήσεων (Θησείο) (Kaskaoutis et al. 2021b).

Επιπλέον μετρήσεις χημικής σύστασης των μικρών (PM_{10}) σωματιδίων από το όργανο Aerosol Chemical Speciation Monitor (ACSM), καθώς και χαρακτηρισμού/διάκρισης των οργανικών αερολυμάτων σε 5 συστατικά (Stavroulas et al., 2019) χρησιμοποιήθηκαν για να μελετήσουν τη χημική σύσταση του κάθε τύπου αερολύματος, η οποία θα παράσχει χρήσιμες πληροφορίες αναφορικά με τις χημικές ιδιότητες του κάθε τύπου, αλλά και τις πηγές και διαδικασίες ανάμειξης στην ατμόσφαιρα. Η **Εικόνα 13** παρουσιάζει τη χημική (a) και οργανική (b) σύσταση του κάθε τύπου αερολύματος.



Εικόνα 13 Χημική (a) και οργανική (b) σύσταση του κάθε τύπου αερολύματος στην Αθήνα. Τα διαγράμματα εντός δείχνουν την ποσοστιαία χημική και οργανική σύσταση, αντίστοιχα.

Η χημική ανάλυση επιβεβαιώνει σε σημαντικό βαθμό την αντικειμενικότητα της μεθόδου προσδιορισμού των τύπων αερολυμάτων, καθώς οι τύποι «BrC» και «BC/BrC» παρουσιάζουν μεγάλα ποσοστά οργανικών αερολυμάτων (OA) και BBOA (Biomass burning organic aerosol), ενώ ο τύπος «BC-dom» χαρακτηρίζεται από σημαντικό ποσοστό HOA, που αντιπροσωπεύει αερολύματα καύσεων από οχήματα. Επίσης, οι τύποι που συνδέονται ως επί το πλείστον με περιοχικές πηγές (π.χ. BC-large, Large-LA) παρουσιάζουν σημαντικό ποσοστό δευτερογενών ανόργανων (π.χ. θειικών, SO_4^{2-}) και οργανικών (LV-OOA) αερολυμάτων. Αξίζει να σημειωθεί ότι είναι η πρώτη

φορά που η διάκριση διαφόρων τύπων αερολυμάτων μέσω των οπτικών τους ιδιοτήτων συνοδεύεται και από μελέτη της χημικής τους σύστασης, με τα αποτελέσματα να είναι ιδιαίτερος ενθαρρυντικά για την αξιοπιστία των μεθόδων.

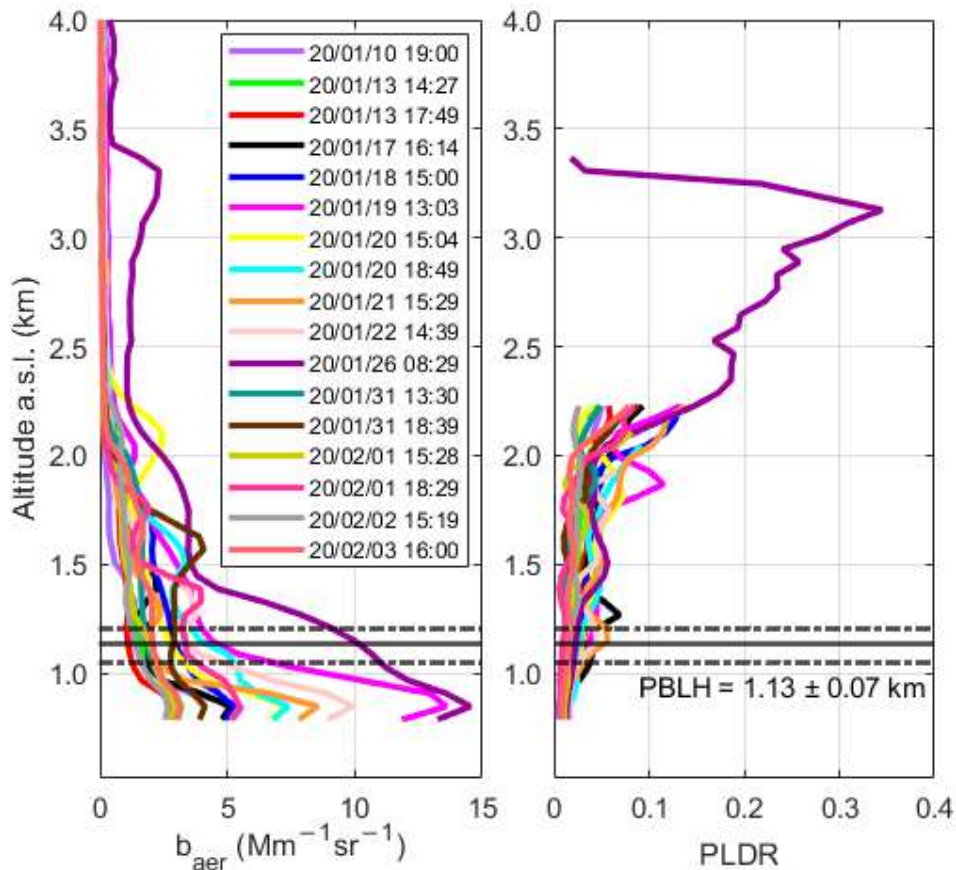
Συνδυαστικές επιτόπιες μετρήσεις και τηλεπισκόπηση στα Ιωάννινα

Κατά τη διάρκεια της χειμερινής εκστρατείας ΠΑΝΑΚΕΙΑ (10/01/2020 – 7/02/2020), στην πόλη των Ιωαννίνων πραγματοποιήθηκαν συνδυαστικές μετρήσεις αερολυμάτων στο επίπεδο του εδάφους ($PM_{2.5}$, BC) και κάθετων δομών σωματιδίων αερολύματος με το κινητό σύστημα lidar (AIAS) στα 532 nm (Papanikolaou et al., 2022). Οι κάθετες δομές (έως 4 km ύψος) βοηθούν στη μελέτη της χωροχρονικής εξέλιξης των αερολυμάτων μέσα στην ατμοσφαιρική στήλη και στον προσδιορισμό του ύψους του πλανητικού οριακού στρώματος (Planetary Boundary Layer, PBL). Το σύστημα AIAS πραγματοποίησε συνεχείς μετρήσεις από το πρωί έως αργά το βράδυ (συνήθως από τις 07:00 έως τις 19:00 UTC), υπό ανέφελες συνθήκες και παρέχει τα κατακόρυφα προφίλ του συντελεστή οπισθοσκέδασης αερολύματος (b_{aer}) και το λόγο γραμμικής εκπόλωσης σωματιδίων (particle linear depolarization ratio, PLDR) στα 532 nm.

Ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στη μελέτη των κατακόρυφων δομών για τα πολύ φρέσκα αερολύματα καύσης ξύλου που εκπεμπούν ταυτόχρονα με τις μετρήσεις lidar και που προέρχονταν από τοπικές δραστηριότητες οικιακής θέρμανσης (τζάκια) στην περιοχή των Ιωαννίνων. Ένα σημαντικό εύρημα είναι ότι 33 από τα συνολικά 34 στρώματα αερολύματος στην κατώτερη τροπόσφαιρα χαρακτηρίστηκαν ως καύση βιομάζας τοπικής προέλευσης, παρουσιάζοντας μέση τιμή PLDR 0.04 ± 0.02 (532 nm) σε ύψη μεταξύ 1.21 και 2.23 km από το επίπεδο της θάλασσας ($\sim 0.7 - 1.7$ km πάνω από το σταθμό). Τα ευρήματα αυτά συνδυάστηκαν και επιβεβαιώθηκαν από τις επιτόπιες μετρήσεις συγκεντρώσεων $PM_{2.5}$ και BC, μαζί με τις αντίστοιχες συνεισφορές από την καύση ορυκτών καυσίμων (BC_{ff}) και βιομάζας/ξύλου (BC_{wb}). Οι συγκεντρώσεις του BC έφθασαν σε τιμές ωριαίων μέγιστων της τάξης του $17.5 \mu g m^{-3}$, ενώ η συμβολή του BC_{wb} ήταν πολύ υψηλή, κυμαινόμενη από 65.6 – 99.9% στις ημέρες μελέτης (Papanikolaou et al., 2022).

Η **Εικόνα 14** παρουσιάζει τις κατακόρυφες δομές των b_{aer} και PLDR στα 532 nm, σύμφωνα με το κινητό σύστημα lidar AIAS στην πόλη των Ιωαννίνων. Το ύψους του πλανητικού οριακού στρώματος (PBLH) μαζί με την τυπική του απόκλιση, υπολογίστηκε και δίδεται στο σχήμα. Η πλειονότητα των περιπτώσεων εμφανίζει στρώματα αερολύματος κοντά στο έδαφος και μέχρι περίπου τα 1.5-2 km, τα οποία έχουν αρκετά χαμηλές τιμές PLDR (κάτω από 0.11) που αντιστοιχούν σε φρέσκα μικρού μεγέθους αερολύματα από καύση βιομάζας και αστικές εκπομπές. Ένα στρώμα σκόνης μεταξύ 2.7 και 3.5 km φαίνεται στις 26 Ιανουαρίου 2020 (**Εικ. 14**, μωβ

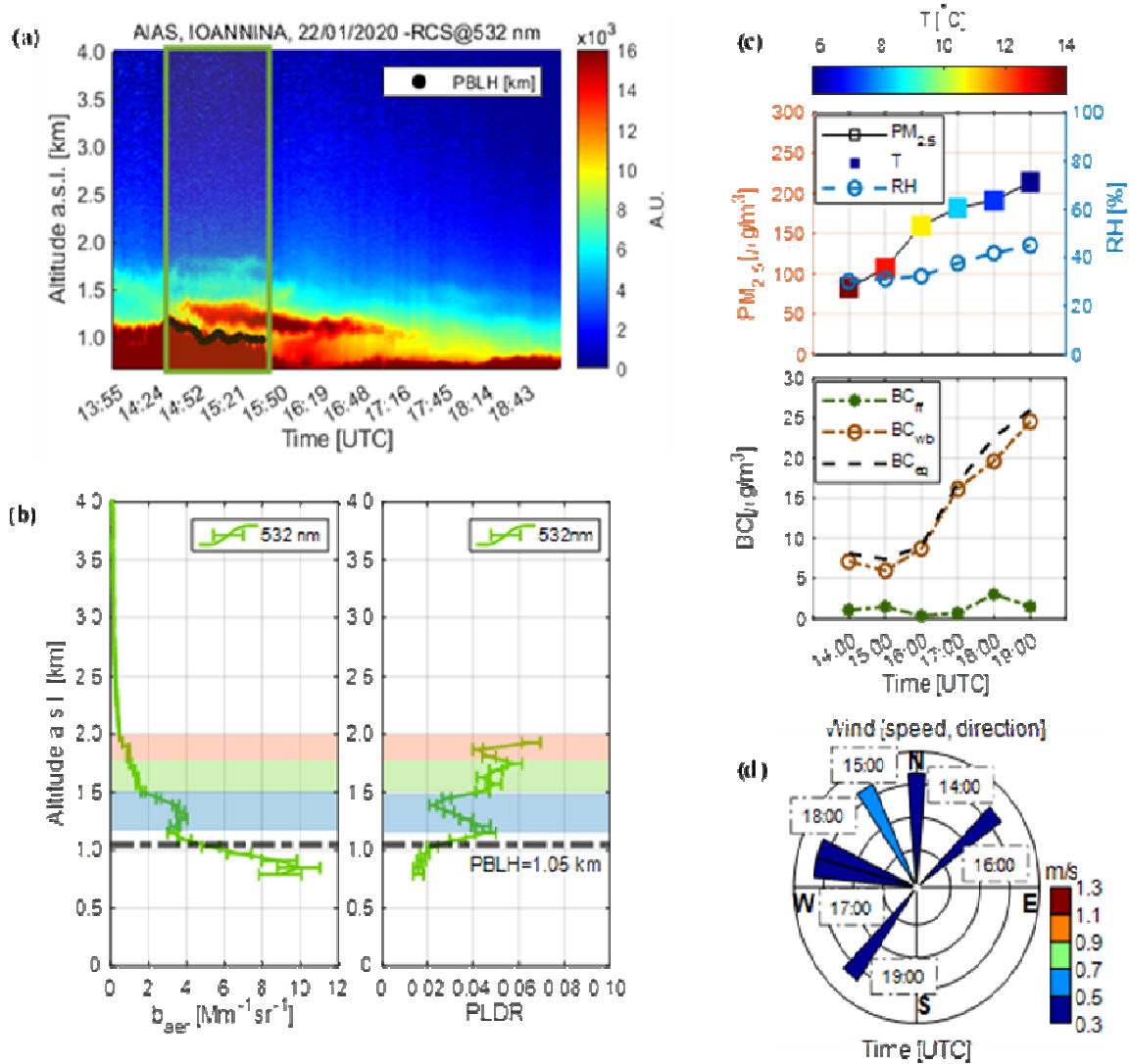
συμπαγής γραμμή). Η μέση τιμή του οριακού στρώματος (PBLH) βρέθηκε ίση με 1.13 ± 0.07 km (~ 0.6 km από το επίπεδο του σταθμού), η οποία είναι ιδιαίτερα χαμηλή και ενισχύει τη συσσώρευση των αερολυμάτων από καύση βιομάζας κοντά στο έδαφος, συμβάλλοντας έτσι σημαντικά στις πολύ υψηλές συγκεντρώσεις $PM_{2.5}$ και BC που παρατηρήθηκαν στα Ιωάννινα κατά τη χειμερινή περίοδο.



Εικόνα 14 Κατακόρυφες κατανομές b_{aer} ($Mm^{-1}sr^{-1}$) και PLDR στα 532 nm, από το κινητό lidar AIAS κατά τη χειμερινή εκστρατεία ΠΑΝΑΚΕΙΑ στην πόλη των Ιωαννίνων. Το μέσο PBLH μαζί με την τυπική του απόκλιση παρουσιάζεται με τις μαύρες συμπαγείς και διακεκομμένες γραμμές, αντίστοιχα (Papanikolaou et al., 2022).

Εν συνεχεία, περιγράφεται μια συνέργεια μετρήσεων τηλεπισκόπησης και αερολυμάτων στο επίπεδο του εδάφους για την καλύτερη κατανόηση των ατμοσφαιρικών συνθηκών στην πόλη των Ιωαννίνων (**Εικόνα 15**). Στις 22 Ιανουαρίου 2020 παρατηρούνται 3 στρώματα αερολύματος πάνω από το στρώμα ανάμειξης που βρίσκεται στα 1.05 km (0.6 km από το έδαφος). Η μέση τιμή b_{aer} εντός του οριακού στρώματος βρέθηκε ίση με $7.96 \pm 1.88 Mm^{-1}sr^{-1}$, ενώ η μέση τιμή PLDR ήταν 0.02 ± 0.01 , που υποδεικνύουν την παρουσία φρέσκων αερολυμάτων καύσης βιομάζας. Στο ίδιο χρονικό διάστημα, οι συγκεντρώσεις $PM_{2.5}$ έδειξαν πολύ υψηλές τιμές (από 82.2 έως $213.7 \mu g m^{-3}$), ενώ η σχετική υγρασία (Relative Humidity, RH) αυξήθηκε από 30% σε 45%, με εξαιρετικά χαμηλές τιμές ταχύτητας ανέμου (0.33 έως $0.50 ms^{-1}$) που

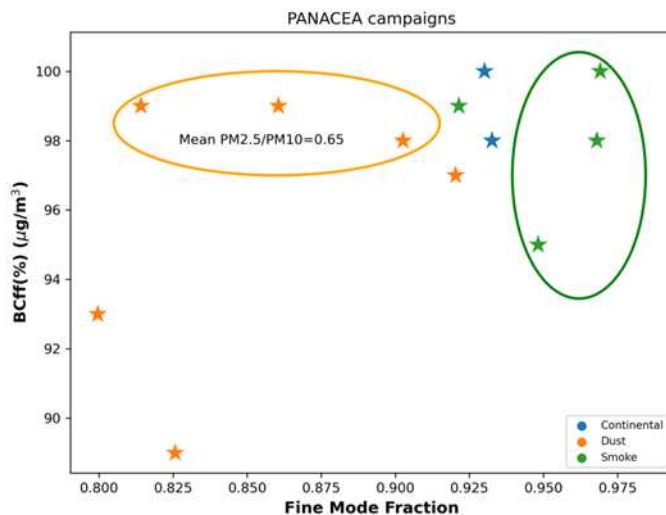
ευνοούν τη συσσώρευση αερολυμάτων. Τα επίπεδα συγκέντρωσης BC, κατά την ίδια χρονική περίοδο, παρουσίασαν αύξηση από 8.1 σε 26.0 $\mu\text{g m}^{-3}$, με τη συμβολή του BC_{wb} (80.7 - 96.8%) να είναι σχεδόν ίση με τις συνολικές συγκεντρώσεις BC (7.1-24.6 $\mu\text{g m}^{-3}$). Οι αντίστοιχες συγκεντρώσεις BC_{ff} έδειξαν πολύ χαμηλή μεταβλητότητα, όντας πάντα χαμηλότερες από 2.5 $\mu\text{g m}^{-3}$.



Εικόνα 15 (α) Χωροχρονική εξέλιξη του διορθωμένου σήματος lidar στα 532 nm και (β) η κατακόρυφη κατανομή του συντελεστή οπισθοσκέδασης b_{aer} [$\text{Mm}^{-1}\text{sr}^{-1}$] και του PLDR στα 532 nm, όπως παρατηρήθηκε από το κινητό lidar AIAS στις 22 Ιανουαρίου 2020 πάνω από την πόλη των Ιωαννίνων. Τα 3-χρωματικά-σκιασμένα ορθογώνια αντιπροσωπεύουν τα γεωμετρικά όρια των στρωμάτων αερολύματος που μελετήθηκαν. (γ) ανώτερο γράφημα: Χρονική εξέλιξη της συγκέντρωσης μάζας $\text{PM}_{2.5}$ [$\mu\text{g m}^{-3}$], θερμοκρασίας T [$^{\circ}\text{C}$] και RH [%]. χαμηλότερο γράφημα: συγκεντρώσεις BC [$\mu\text{g m}^{-3}$] στο επίπεδο του εδάφους, μαζί με τη συμβολή των BC_{ff} και BC_{wb} . (δ) ταχύτητα και κατεύθυνση του ανέμου (μέση ωριαία), κατά τη διάρκεια του χρόνου μέτρησης (Papanikolaou et al., 2022).

Συνδυαστικές επιτόπιες μετρήσεις και τηλεπισκόπηση στη Θεσσαλονίκη

Στο πλαίσιο του έργου της ΠΑΝΑΚΕΙΑ, πραγματοποιήθηκαν δύο εκστρατείες μετρήσεων στη Θεσσαλονίκη, που καλύπτουν τις περιόδους Ιούλιος - Αύγουστος 2019 και Ιανουάριος - Φεβρουάριος 2020. Οι οπτικές ιδιότητες των αερολυμάτων μελετήθηκαν με ταυτόχρονες μετρήσεις εδάφους και τηλεπισκόπησης. Η πλειονότητα των στρωμάτων αερολύματος που ανιχνεύτηκαν (16 από τα 40, κυμαινόμενα μεταξύ 0.8 και 4.5 km) ταξινομήθηκαν ως αερολύματα καύσης βιομάζας, που αποδίδονται είτε σε πηγές της πόλης είτε σε μεταφορές μεγάλης κλίμακας. Όσον αφορά άλλους τύπους αερολυμάτων που εντοπίστηκαν, ο τύπος «καθαρό ηπειρωτικό» εμφανίζεται σε ποσοστό 23%, ενώ επίσης, εντοπίστηκαν και στρώματα σκόνης αναμειγμένα με αστικά σωματίδια πάνω από τη Θεσσαλονίκη. Τα ευρήματα της τηλεπισκόπησης μελετώνται μαζί με τις συγκεντρώσεις σωματιδίων εδάφους ($PM_{2.5}$ και PM_{10}) και μαύρου άνθρακα (BC), που διαχωρίζονται σε κλάσματα ορυκτών καυσίμων (BC_{ff}) και καύσης βιομάζας/ξύλου (BC_{wb}). Είναι η πρώτη φορά που πραγματοποιείται συνέργεια οργάνων εδάφους και τηλεπισκόπησης στη Θεσσαλονίκη προκειμένου να αξιολογηθεί η παρουσία αερολυμάτων και του κυρίαρχου τύπου αυτών, τόσο κοντά στο έδαφος όσο και σε διάφορα ύψη. Συνολικά, η μελέτη έδειξε ότι η συνεισφορά του BC_{wb} στη Θεσσαλονίκη είναι αρκετά χαμηλή (11%), ενώ η πλειονότητα των στρωμάτων καύσης βιομάζας που εντοπίζονται από το σύστημα lidar, συνδέονται, επίσης, με ενισχυμένη συνεισφορά BC και υψηλές τιμές κλασμάτων μικρών αερολυμάτων.



Εικόνα 16 Εξάρτηση του ποσοστού μικρών σωματιδίων (FMF) από το BC_{ff} στο πρώτο στρώμα αερολύματος που μετρήθηκε με το lidar στη Θεσσαλονίκη κατά τις εκστρατείες ΠΑΝΑΚΕΙΑ (Voudouri et al. Submitted).

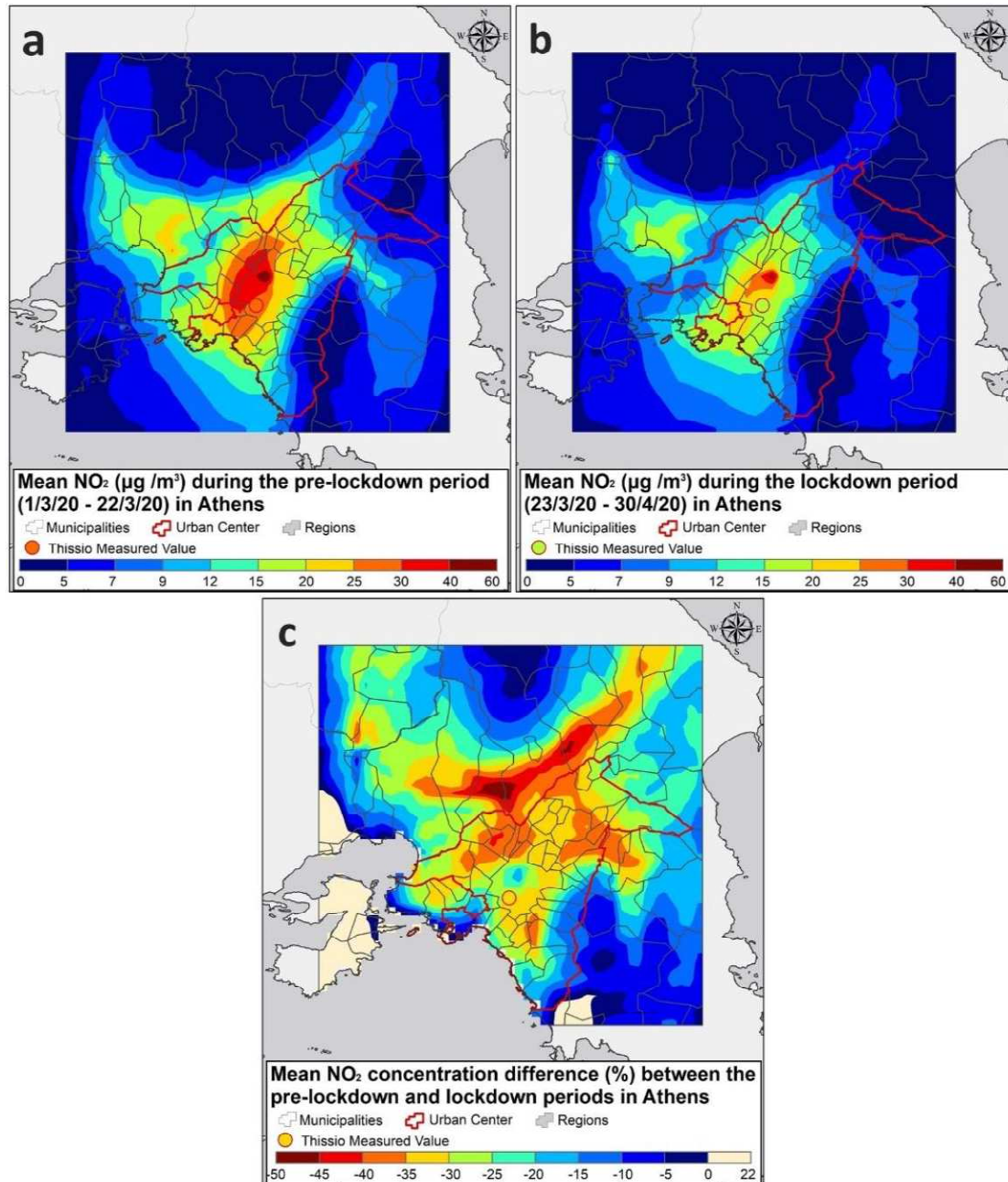
Η **Εικόνα 16** δείχνει τη συσχέτιση των μετρήσεων lidar στο κατώτερο ατμοσφαιρικό στρώμα με τη συνολική συνεισφορά BC_{ff} και το ποσοστό μικρών σωματιδίων (Fine Mode Fraction, FMF) που χρησιμοποιήθηκαν για τον εντοπισμό διάφορων τύπων αερολυμάτων μέσω 3 οργάνων (Sunphotometer, Aethalometer και lidar). Οι υψηλότερες τιμές του FMF αντιστοιχούν σε απορροφητικά στρώματα αερολυμάτων (καύση βιομάζας ή/και μείγματα με σκόνη ή ηπειρωτικά σωματίδια) και γενικά υψηλές συγκεντρώσεις BC_{ff} . Οι τιμές FMF κάτω από 0.92 αντιστοιχούν στα χονδρόκοκκα αερολύματα ενώ οι τιμές πάνω από 0.92 στα μικρά (λεπτόκοκκα) αερολύματα. Επιπλέον, διακρίνονται δύο ομάδες σκόνης, μία με υψηλές συγκεντρώσεις BC_{ff} (κίτρινο ελλειψοειδές, **Εικόνα 16**) και μία με χαμηλότερες συγκεντρώσεις BC_{ff} και χαμηλότερες τιμές FMF (< 0.9) και αναλογία $PM_{2.5}/PM_{10}$.

Χρήση μοντέλου αστικής ρύπανσης στην Αθήνα κατά την περίοδο της καραντίνας

Τα μέτρα της καραντίνας που εφαρμόστηκαν παγκοσμίως για την επιβράδυνση της εξάπλωσης της πανδημίας COVID-19, επέτρεψαν την εκτενή μελέτη των επιπτώσεων της δραστηκής εκπομπής αερίων ρυπαντών στην ποιότητα του αέρα των πόλεων ([Kaskaoutis et al., 2021c](#); [Paraskevopoulou et al., 2022](#)).

Η ποιότητα του αέρα πάνω από την αστική περιοχή της Αθήνας προσομοιώθηκε για την περίοδο προ και κατά τη διάρκεια της καραντίνας (άνοιξη 2020) χρησιμοποιώντας το μοντέλο Ατμοσφαιρικής Ρύπανσης (TAPM V4) ([Hurley et al., 2005](#)). Το TAPM είναι ένα προγνωστικό μοντέλο μετεωρολογίας - χημικής διασποράς, ικανό να προβλέπει και να προσομοιώνει ροές σημαντικές για την τοπικής κλίμακας ατμοσφαιρική ρύπανση, χρησιμοποιώντας ως υπόβαθρο μετεωρολογικές μεταβλητές συνοπτικής κλίμακας (ECMWF ERA5 στην περίπτωση μας). Το μοντέλο περιλαμβάνει, επίσης, χημικές μεταβλητές διασποράς εμπεριέχοντας PM_{10} , $PM_{2.5}$, NO_x , NO_2 , O_3 , SO_2 , ενώ περισσότερες πληροφορίες αναφέρονται στους [Grivas et al. \(2020\)](#). Χωρική απεικόνιση των μέσων συγκεντρώσεων NO_2 και των διαφορών συγκέντρωσης μεταξύ των δύο περιόδων (προ-καραντίνας και καραντίνας), όπως προβλέπονται από τα σενάρια προσομοίωσης του μοντέλου TAPM στο λεκανοπέδιο της Αθήνας, παρουσιάζονται στην **Εικόνα 17**. Η χωρική κατανομή του NO_2 δε μεταβλήθηκε ουσιαστικά μεταξύ των δύο περιόδων, ενώ η σύγκριση των επιπέδων NO_2 δείχνει μια μείωση της τάξης του 30–40% στην πλειονότητα των δήμων του λεκανοπεδίου της Αθήνας (**Εικόνα 17c**). Η μέση μείωση που υπολογίστηκε για το κέντρο της Αθήνας (περιοχή με κόκκινη γραμμή στην **Εικόνα 17**) είναι 27%. Η μέση μετρούμενη μείωση των επιπέδων NO_2 στο Θησείο (31%) είναι πολύ κοντά στη μέση μοντελοποιημένη μείωση στο δήμο Αθηναίων (29%), αναδεικνύοντας την πολύ καλή ακρίβεια του μοντέλου. Γενικά, το μοντέλο TAPM προσομοίωσε με μεγάλη ακρίβεια τη βελτίωση

της ποιότητας του αέρα πάνω από την Αθήνα κατά την περίοδο της καραντίνας. Τα ευρήματα αυτά δείχνουν μια δυνατότητα για τοπικές στρατηγικές διαχείρισης της κυκλοφορίας με σκοπό τη μείωση της έκθεσης του πληθυσμού και την ελαχιστοποίηση των υπερβάσεων των θεσπισμένων ορίων για τους πρωτογενείς ρύπους.



Εικόνα 17 Μέσες συγκεντρώσεις διοξειδίου του Αζώτου (NO₂) στην επιφάνεια (g m⁻³) κατά την περίοδο προ της καραντίνας (1–22 Μαρτίου) (a), κατά τη διάρκεια της καραντίνας (23 Μαρτίου–30 Απριλίου 2020) (b), και επί τοις εκατό (%) μεταβολές μεταξύ των 2 περιόδων (c), όπως προβλέπονται στην ευρύτερη περιοχή της Αθήνας (Grivas et al., 2020).

Δημοσιεύσεις PANACEA

- Dimitriou, K., Stavroulas, I., Grivas, G., Chatzidiakos, C., Kosmopoulos, G., Kazantzidis, A., Kourtidis, K., Karagiomas, A., Hatzianastassiou, N., Pandis, S.N., Mihalopoulos, N., Gerasopoulos, E., Intra- and inter-city variability of PM_{2.5} concentrations in 1 Greece as determined with a low-cost sensor network, *Atmospheric Environment* (*submitted*)
- Grivas, G., Athanasopoulou, E., Kakouri, A., Bailey, J., Liakakou, E., Stavroulas, I., Kalkavouras, P., Bougiatioti, A., Kaskaoutis, D.G., Ramonet, M., Mihalopoulos, N., Gerasopoulos, E., Integrating in situ Measurements and City Scale Modelling to Assess the COVID-19 Lockdown Effects on Emissions and Air Quality in Athens, Greece, *Atmosphere*, 11, 1174, <https://doi.org/10.3390/atmos11111174>, 2020.
- Kaskaoutis, D., Grivas, G., Stavroulas, I., Bougiatioti, A., Liakakou, E., Dumka, U.C., Gerasopoulos, E., Mihalopoulos, N., Apportionment of black and brown carbon spectral absorption sources in the urban environment of Athens, Greece, during winter, *Science of the Total Environment*, 149739, doi:10.1016/j.scitotenv.2021.149739, 2021a.
- Kaskaoutis D.G., Grivas G., Stavroulas I., Liakakou E., Dumka U.C., Dimitriou K., Gerasopoulos E., Mihalopoulos N., In situ identification of aerosol types in Athens, Greece, based on long-term optical and on online chemical characterization, *Atmospheric Environment*, 246, <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.118070>, 2021b.
- Kaskaoutis D.G., Grivas G., Liakakou E., Kalivitis N., Kouvarakis G., Stavroulas I., Kalkavouras P., Zampas P., Dumka U.C., Gerasopoulos E., Mihalopoulos N., Assessment of the COVID-19 Lockdown Effects on Spectral Aerosol Scattering and Absorption Properties in Athens, Greece, *Atmosphere*, 12 (2), <https://doi.org/10.3390/atmos12020231>, 2021c.
- Kaskaoutis, D.G., Grivas, G., Oikonomou, K., Tavernaraki, P., Papoutsidaki, K., Tsagkaraki, M., Stavroulas, I., Zampas, P., Paraskevopoulou, D., Bougiatioti, A., Liakakou, E., Gavrouzou, M., Dumka, U.C., Hatzianastassiou, N., Sciare, J., Gerasopoulos, E., Mihalopoulos, N. Impacts of severe residential wood burning on atmospheric processing, water-soluble organic aerosol and light absorption, in an inland city of Southeastern Europe. *Atmospheric Environment* 280, 119139, <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2022.119139>, 2022.
- Kosmopoulos, G., Salamalikis, V., Matrali, A., Pandis, S.N., Kazantzidis, A., Insights about the Sources of PM_{2.5} in an Urban Area from Measurements of a Low-Cost Sensor Network, *Atmosphere* 13, 440, 2022.
- Liakakou, E., Stavroulas, I., Kaskaoutis, D.G., Grivas, G., Paraskevopoulou, D., Dumka, U.C., Tsagkaraki, M., Bougiatioti, A., Oikonomou, K., Sciare, J., Gerasopoulos, E., Mihalopoulos N.: Long-term variability, source apportionment and spectral properties

- of black carbon at an urban background site in Athens, Greece, *Atmospheric Environment*, 222, 117137, <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2019.117137>, 2020a.
- Liakakou, E., Kaskaoutis, D.G., Grivas, G., Stavroulas, I., Tsagkaraki, M., Paraskevopoulou, D., Bougiatioti, A., Gerasopoulos, E., Mihalopoulos, N.: Long-term brown carbon spectral characteristics in a Mediterranean city (Athens), *Science of the Total Environment*, 708, 135019, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135019>, 2020b.
- Papanikolaou, C.-A., Papayannis, A., Mylonaki, M., Foskinis, R., Kokkalis, P., Liakakou, E., Stavroulas, I., Soupiona, O., Hatzianastassiou, N., Gavrouzou, M., Kralli, E., and Anagnou, D. Vertical profiling of fresh biomass burning aerosol optical properties over the Greek urban city of Ioannina, during the PANACEA winter campaign. *Atmosphere*, 13(1), 94, <https://doi.org/10.3390/atmos13010094>, 2022.
- Paraskevopoulou, D., Bougiatioti, A., Zampas, P., Tsagkaraki, M., Nenes, A., Mihalopoulos, N. Impact of COVID-19 Lockdown on Oxidative Potential of Particulate Matter: Case of Athens (Greece), *Toxics*, 10, 280, <https://doi.org/10.3390/toxics10060280>, 2022.
- Stavroulas, I., Bougiatioti, A., Grivas, G., Paraskevopoulou, D., Tsagkaraki, P., Zampas, P., Liakakou, E., Gerasopoulos, E., and Mihalopoulos, N., Sources and processes that control the submicron organic aerosol composition in an urban Mediterranean environment (Athens): a high temporal-resolution chemical composition measurement study, *Atmos. Chem. Phys.*, 19, 901-919, <https://doi.org/10.5194/acp-19-901-2019>, 2019.
- Stavroulas, I., Grivas, G., Michalopoulos, P., Liakakou, E., Bougiatioti, A., Kalkavouras P., Fameli, K.M., K.M., Hatzianastassiou, N., Mihalopoulos, N., and Gerasopoulos, E., Field Evaluation of Low-Cost PM Sensors (Purple Air PA-II) Under Variable Urban Air Quality Conditions, in Greece, *Atmosphere*, 11, 926, <https://doi.org/10.3390/atmos11090926>, 2020.
- Voudouri, K.A., Michailidis, K., Siomos, N., Chatzopoulou, A., Kouvarakis, G., Mihalopoulos, N., Tzoumaka, P., Kelessis, A., Balis, D., Evaluation of aerosol typing with combination of remote sensing techniques with in situ data during the PANACEA campaigns in Thessaloniki station, Greece, *Atmosphere (submitted)*

Άλλες βιβλιογραφικές αναφορές

- Bell, M.L., Son, J.-., Peng, R.D., Wang, Y., Dominici, F., 2015. Brief Report: Ambient PM_{2.5} and Risk of Hospital Admissions: Do Risks Differ for Men and Women? *Epidemiology*. 26, 575-579.
- Beelen, R., Stafoggia, M., Raaschou-Nielsen, O., Andersen, Z.J., Xun, W.W., Katsouyanni, K., Dimakopoulou, K., Brunekreef, B., Weinmayr, G., Hoffmann, B., Wolf, K., Samoli, E., Houthuijs, D., Nieuwenhuijsen, M., Oudin, A., Forsberg, B., Olsson, D., Salomaa, V.,

- Lanki, T., Yli-Tuomi, T., Oftedal, B., Aamodt, G., Nafstad, P., De Faire, U., Pedersen, N.L., Östenson, C.-., Fratiglioni, L., Penell, J., Korek, M., Pyko, A., Eriksen, K.T., Tjønneland, A., Becker, T., Eeftens, M., Bots, M., Meliefste, K., Wang, M., Bueno-De-Mesquita, B., Sugiri, D., et al., 2014. Long-term exposure to air pollution and cardiovascular mortality: An analysis of 22 European cohorts. *Epidemiology*. 25, 368-378.
- Bond, T.C., Doherty, S.J., Fahey, D.W., Forster, P.M., Berntsen, T., DeAngelo, B.J., Flanner, M.G., Ghan, S., K€archer, B., Koch, D., Kinne, S., Kondo, Y., Quinn, P.K., Sarofim, M.C., Schultz, M.G., Schulz, M., Venkataraman, C., Zhang, H., Zhang, S., Bellouin, N., Guttikunda, S.K., Hopke, P.K., Jacobson, M.Z., Kaiser, J.W., Klimont, Z., Lohmann, U., Schwarz, J.P., Shindell, D., Storelvmo, T., Warren, S.G., Zender, C.S., 2013. Bounding the role of black carbon in the climate system: a scientific assessment. *J. Geophys. Res.* 118, 5380–5552. <https://doi.org/10.1002/jgrd.50171>.
- Cappa, C.D., Kolesar, K.R., Zhang, X., Atkinson, D.B., Pekour, M.S., Zaveri, R.A., Zelenyuk, A., Zhang, Q., 2016. Understanding the optical properties of ambient sub and supermicron particulate matter: results from the CARES 2010 field study in northern California. *Atmos. Chem. Phys.* 16, 6511–6535. <https://doi.org/10.5194/acp-16-6511-2016>.
- Choudhary, V., Rajput, P., Rajeev, P., Gupta, T., 2017. Synergistic effect in absorption properties of brown carbon and elemental carbon over IGP during weak south-west monsoon. *Aerosol Sci. Eng.* <https://doi.org/10.1007/s41810-017-0013-1>.
- Di, Q., Wang, Y., Zanobetti, A., Wang, Y., Koutrakis, P., Choirat, C., Dominici, F., Schwartz, J.D., 2017. Air pollution and mortality in the medicare population. *New. Engl. J. Med.* 376, 2513-2522.
- Gan, W., Koehoorn, M., Davies, H., Demers, P., Tamburic, L., Brauer, M., 2011. Long-term exposure to traffic-related air pollution and the risk of coronary heart disease hospitalization and mortality. *Environ. Health Perspect.* 119, 501–507.
- Grahame, T.J., Schlesinger, R.B., 2010. Cardiovascular health and particulate vehicular emissions: a critical evaluation of the evidence. *Air Qual. Atmos. Health* 3, 3–27. <https://doi.org/10.1007/s11869-009-0047-x>
- Hoffer, A., Gelencser, A., Guyon, P., Kiss, G., Schmid, O., Frank, G.P., Artaxo, P., Andreae, M.O., 2006. Optical properties of humiclike substances (HULIS) in biomass-burning aerosols. *Atmos. Chem. Phys.* 6, 3563–3570.
- Kasdagli, M-I., Katsouyanni, K., de Hoogh, K., Lagiou, P., Samoli, 613 E., 2022. Investigating the association between long-term exposure to air pollution and greenness with mortality from neurological, cardio-metabolic and chronic obstructive pulmonary diseases in Greece. *Environ. Pollut.* 292, 118372.
- Kumar, N.K., Corbin, J.C., Bruns, E.A., Massabo, D., Slowik, J.G., Drinovec, L., Mocnik, G., Prati, P., Vlachou, A., Baltensperger, U., Gysel, M., El-Haddad, I., Prevot, A.S.H., 2018.

- Production of particulate brown carbon during atmospheric aging of wood burning emissions. *Atmos. Chem. Phys.* 18, 17843–17861.
- Lin, W., Huang, W., Zhu, T., Hu, M., Brunekreef, B., Zhang, Y., Liu, X., Cheng, H., Gehring, U., Li, C., Tang, X., 2011. Acute respiratory inflammation in children and black carbon in ambient air before and during the 2008 Beijing Olympics. *Environ. Health Perspect.* 119, 1507–1512.
- Liu, J., Lin, P., Laskin, A., Laskin, J., Kathmann, S.M., Wise, M., Caylor, R., Imholt, F., Selimovic, V., Shilling, J.E., 2016. Optical properties and aging of light-absorbing secondary organic aerosol. *Atmos. Chem. Phys.* 16, 12815–12827.
- Pani, S.K., Lin, N.-H., Griffith, S.M., Chantara, S., Lee, C.-T., Thepnuan, D., Tsai, Y.I., 2021. Brown carbon light absorption over an urban environment in northern peninsular Southeast Asia. *Environ. Poll.* <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.116735>.
- Pope, C.A., III., Coleman, N., Pond, Z.A., Burnett, R.T., 2020. Fine particulate air pollution and human mortality: 25+ years of cohort studies. *Environ. Res.* 183, 108924.
- Ramanathan, V., Carmichael, G., 2008. Global and regional climate changes due to black carbon. *Nat. Geosci.* 1, 221–227.
- Saenen, N.D., Provost, E.B., Viaene, M.K., Vanpoucke, C., Lefebvre, W., Vrijens, K., Roels, H.A., Nawrot, T.S., 2016. Recent versus chronic exposure to particulate matter air pollution in association with neurobehavioral performance in a panel study of primary schoolchildren. *Environ. Int.* 95, 112–119.
- Sandradewi, J., Prevot, A.S.H., Weingartner, E., Schmidhauser, R., Gysel, M., Baltensperger, U., 2008. A study of wood burning and traffic aerosols in an Alpine valley using a multi-wavelength Aethalometer. *Atmos. Environ.* 42, 101–112.
- Sarkar, C., Sinha, V., Sinha, B., Panday, A.K., Rupakheti, M., Lawrence, M.G., 2017. Source apportionment of NMVOCs in the Kathmandu Valley during the SusKat-ABC international field campaign using positive matrix factorization. *Atmos. Chem. Phys.* 17, 8129–8156.
- Sawada, N., Nakaya, T., Kashima, S., Yorifuji, T., Hanibuchi, 692 T., Charvat, H., Yamaji, T., Iwasaki, M., Inoue, M., Iso, H., Tsugane, S., 2022. Long-term exposure to fine particle matter and all-cause mortality and cause-specific mortality in Japan: the JPHC Study. *BMC. Public. Health.* 22, 466.
- Sindosi, O.A., Hatzianastassiou, N., Markozannes, G. et al., 2021. PM10 Concentrations in a Provincial City of Inland Greece in the Times of Austerity and Their Relationship with Meteorological and Socioeconomic Conditions. *Water Air Soil Pollut* 232, 77. <https://doi.org/10.1007/s11270-021-05008-3>.
- Wang, Q., Han, Y., Ye, J., Liu, S., Pongpiachan, S., Zhang, N., et al., 2019. High contribution of secondary brown carbon to aerosol light absorption in the southeastern margin of Tibetan Plateau. *Geophys. Res. Lett.* 46, 4962–4970.

- Xie, C., Xu, W., Wang, J., Wang, Q., Liu, D., Tang, G., Chen, P., Du, W., Zhao, J., Zhang, Y., Zhou, W., Han, T., Bian, Q., Li, J., Fu, P., Wang, Z., Ge, X., Allan, J., Coe, H., Sun, Y., 2019. Vertical characterization of aerosol optical properties and brown carbon in winter in urban Beijing, China. *Atmos. Chem. Phys.* 19, 165–179. <https://doi.org/10.5194/acp-19-165-2019>.
- Xu, Y., Ramanathan, V., Washington, W.M., 2016. Observed high-altitude warming and snow cover retreat over Tibet and the Himalayas enhanced by black carbon aerosols. *Atmos. Chem. Phys.* 16, 1303–1315.
- Yan, C.Q., Zheng, M., Bosch, C., Andersson, A., Desyaterik, Y., Sullivan, A.P., Collett, J.L., Zhao, B., Wang, S.X., He, K.B., Gustafsson, Ö., 2017. Important fossil source contribution to brown carbon in Beijing during winter. *Sci. Rep.* 7, 43182, <https://doi.org/10.1038/srep43182>.
- Yang, Y., Smith, S.J., Wang, H., Mills, C.M., Rasch, P.J., 2019. Variability, timescales, and nonlinearity in climate responses to black carbon emissions. *Atmos. Chem. Phys.* 19, 2405–2420.
- Ye, Z., Li, X., Han, Y., Wu, Y., Fang, Y., 2022. Association of long-term exposure to PM2.5 with hypertension and diabetes among the middle-aged and elderly people in Chinese mainland: a spatial study. *BMC. Public. Health.* 22, 569.
- Yuan, W., Huang, R.-J., Yang, L., Guo, J., Chen, Z., Duan, J., Wang, T., Ni, H., Han, Y., Li, Y., Chen, Q., Chen, Y., Hoffmann, T., O'Dowd, C., 2020. Characterization of the light absorbing properties, chromosphere composition and sources of brown carbon aerosol in Xi'an, northwestern China. *Atmos. Chem. Phys.* 20, 5129–5144.
- Zaman, N.A.F.K, Kanniah, K.D., Kaskaoutis, D.G., 2017. Estimating Particulate Matter using satellite based aerosol optical depth and meteorological variables in Malaysia. *Atmospheric Research*, 193, 142-162.
- Zaman, N.A.F.K., Kanniah, K.D., Kaskaoutis, D.G., Latif, M.T., 2021. Evaluation of Machine Learning Models for Estimating PM2.5 Concentrations across Malaysia. *Applied Sciences*, 11, 7326. <https://doi.org/10.3390/app11167326>.
- Zanobetti, A., Gold, D.R., Stone, P.H., Suh, H.H., Schwartz, J., Coull, B.A., Speizer, F.E., 2010. Reduction in heart rate variability with traffic and air pollution in patients with coronary artery disease. *Environ. Health Perspect.* 118, 324–330.
- Zhang, Y., Albinet, A., Petit, J.-E., Jacob, V., Chevrier, F., Gille, G., Pontet, S., Chrétien, E., Dominik-Sègue, M., Levigoureux, G., Mocnik, G., Gros, V., Jaffrezo, J.-L., Favez, O., 2020a. Substantial brown carbon emissions from wintertime residential wood burning over France. *Sci. Total Environ.* 743, 140752, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020>.