

Γ' ΚΟΙΝΟΤΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ ΣΤΗΡΙΞΗΣ
ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ



ΠΑΡΑΔΟΤΕΟ ΠΕ3 ΚΥΡΙΕΣ ΠΗΓΕΣ ΡΥΠΑΝΣΗΣ ΣΤΑ ΒΑΛΚΑΝΙΑ

Τίτλος έργου : **ΚΛΙΜΑΤΟΛΟΓΙΑ ΤΩΝ ΑΕΡΟΛΥΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ
ΤΡΟΠΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΩΝ ΑΕΡΙΩΝ ΜΑΖΩΝ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΩΝ
ΒΑΛΚΑΝΙΩΝ (ΑΘΗΝΑ & ΒΟΥΚΟΥΡΕΣΤΙ) ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΗΣ
ΤΕΧΝΙΚΗΣ LIDAR»**

Κωδικός έργου	:	167 - Γ
Ανάδοχος	:	Ε.Μ.ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ-ΤΕΜΦΕ-ΤΟΜΕΑΣ ΦΥΣΙΚΗΣ
Επιστημονικός Υπεύθυνος	:	ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΣ ΠΑΠΑΓΙΑΝΝΗΣ
Μέτρο	:	4.3
Δράση	:	4.3.6.1
Θεματικός Τομέας	:	ΕΛΛΑΔΑ - ΡΟΥΜΑΝΙΑ ΚΟΙΝΑ ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΑ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΑ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΑ (2005-2007) ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ
Αρμόδια Διεύθυνση ΓΓΕΤ	:	Διεύθυνση Διεθνούς Ε+Τ Συνεργασίας Τμήμα Β' Διακρατικών Σχέσεων
Αρμόδια χειρίστρια ΓΓΕΤ	:	Β. ΚΕΡΑΣΙΩΤΗ

ΠΑΡΑΔΟΤΕΟ 3: ΚΥΡΙΕΣ ΠΗΓΕΣ ΡΥΠΑΝΣΗΣ ΣΤΑ ΒΑΛΚΑΝΙΑ

Περίληψη

Κατά τη διάρκεια της Φάσης 3 του Έργου πραγματοποιήθηκε ο εντοπισμός των κύριων πηγών ρύπανσης και παραγωγής αερολυμάτων που επηρεάζουν την ποιότητα της ατμόσφαιρας στην περιοχή των Βαλκανίων. Έτσι, οι συστηματικές μετρήσεις lidar που πραγματοποιήθηκαν στο πλαίσιο του ΠΕ2, χρησιμοποιήθηκαν για τον εντοπισμό και την ταυτοποίηση των κύριων πηγών ρύπανσης και παραγωγής αερολυμάτων στην Ευρώπη και στην Β. Αφρική, που επηρεάζουν την ποιότητα της ατμόσφαιρας στην περιοχή των Βαλκανίων. Χρησιμοποιώντας, παράλληλα, και μετεωρολογικά δεδομένα, με την βοήθεια του κώδικα Hysplit, μελετήθηκε η διασυνοριακή αερομεταφερόμενη ρύπανση, οι μηχανισμοί μεταφοράς ρύπων και εντοπίστηκαν οι βασικές πηγές ρύπανσης και παραγωγής αερολυμάτων που επιδρούν στην ποιότητα της ατμόσφαιρας στην ευρύτερη περιοχή των Βαλκανίων.

ΠΑΡΑΔΟΤΕΟ 3: Κύριες πηγές ρύπανσης στα Βαλκάνια

Πολύ λίγα στοιχεία είναι γνωστά αναφορικά με τις βασικές πηγές ρύπανσης στην ευρύτερη περιοχή των Βαλκανίων. Τούτο, γιατί δεν υπάρχουν ακόμα συστηματικές μετρήσεις των αερολυμάτων και δεν υπάρχει συστηματική ανάλυση των διαθέσιμων δορυφορικών εικόνων μέσης ή μικρής ανάλυσης. Ο καθορισμός των κύριων πηγές ρύπανσης στην περιοχή των Βαλκανίων θα αποτελέσει μια πληροφορία εξαιρετικά σημαντική, καθόσον δεν υπάρχει διαθέσιμη στην διεθνή βιβλιογραφία και επιπλέον, πρόσφατες μελέτες (*Lelieveld et al.*, 2002) κατέδειξαν την ανάγκη αυτή, ιδιαίτερα στην ευρύτερη περιοχή της Ανατολικής Μεσογείου που αποτελεί σταυροδρόμι της αέριας ρύπανσης στο Βόρειο Ημισφαίριο της γης.

ΦΑΣΗ 3: Ανάλυση επιλεγμένων περιπτώσεων διασυνοριακής ρύπανσης – Υπολογισμός αεροτροχιών- Εντοπισμός βασικών πηγών αέριας ρύπανσης – Χρήση δορυφορικών και επίγειων μετρήσεων αερολυμάτων

Στο πλαίσιο αυτού του ερευνητικού προγράμματος πραγματοποιήθηκαν συνδυασμένες μετρήσεις των αιωρούμενων σωματιδίων πάνω από την περιοχή των Βαλκανίων με χρήση των συστημάτων lidar που λειτουργούν στην Αθήνα (EMΠ) και στο Βουκουρέστι (INOE). Το σύστημα της Αθήνας έχει δυνατότητα καταγραφής σήματος σε πέντε διαφορετικά μήκη κύματος: 1064, 532, 355 nm (ελαστικά οπισθοσκεδαζόμενη ακτινοβολία) και 607, 387 nm (σκεδαζόμενη ακτινοβολία κατά Raman από το ατμοσφαιρικό άζωτο από τα 532 και 355 nm, αντίστοιχα). Το σύστημα του Βουκουρεστίου έχει δυνατότητα καταγραφής δυο μηκών

κύματος (ελαστικά οπισθοσκεδαζόμενη ακτινοβολία στα 1064 και 532 nm). Η χωρική διακριτική ικανότητα των δυο συστημάτων είναι της τάξης των 15 m και η χρονική διακριτική ικανότητα ανέρχεται σε μερικά λεπτά γεγονός που καθιστά δυνατή, όχι μόνο την καταγραφή των στρωματώσεων των αιωρούμενων σωματιδίων, αλλά και την παρακολούθηση της χρονικής τους εξέλιξης.

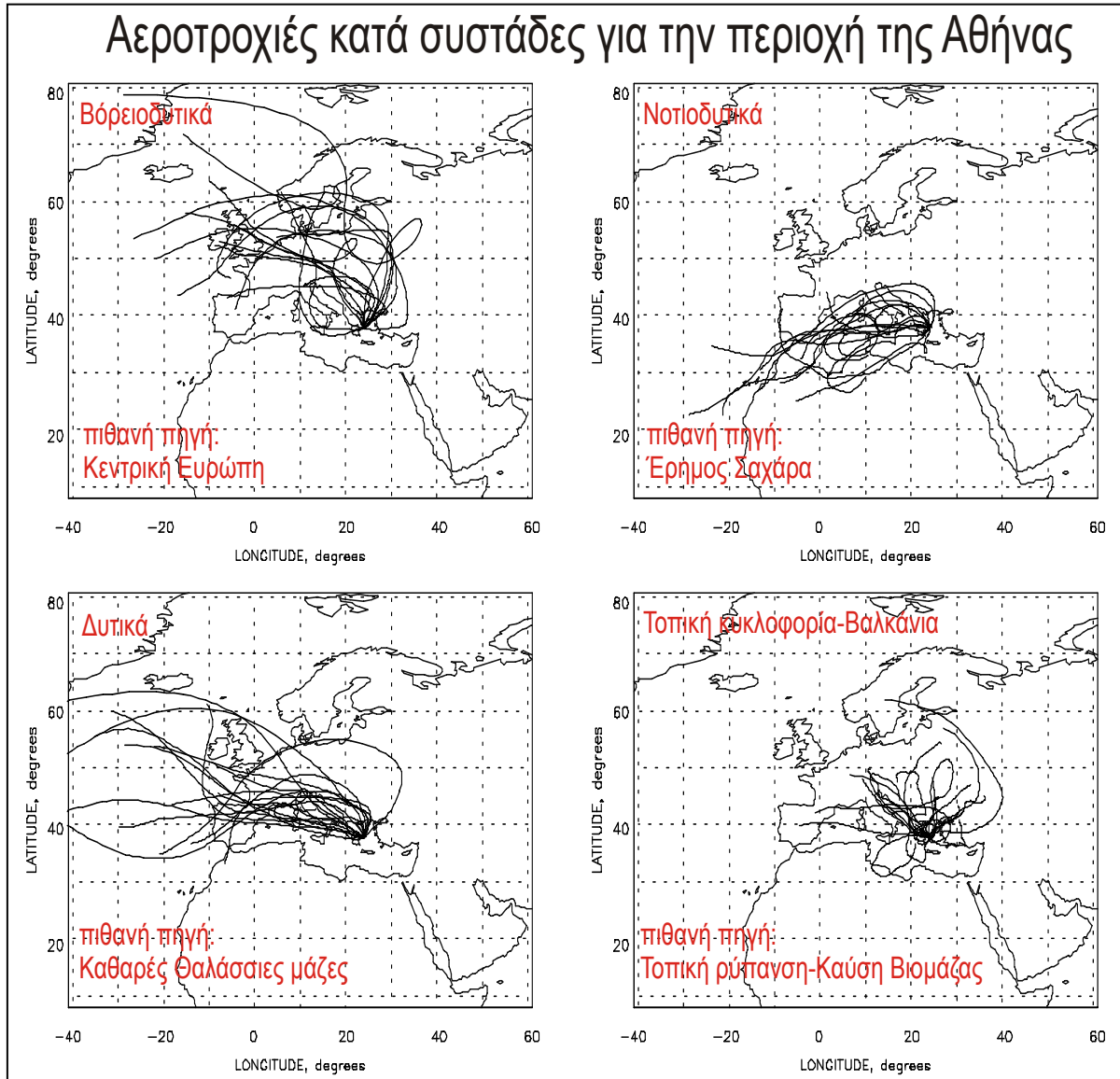
Έτσι, κατά τη διάρκεια της φάσης αυτής, συγκεντρώθηκαν σε ένα κοινό αρχείο excel όλες οι ημερομηνίες και τα κύρια χαρακτηριστικά των μετρήσεων lidar που πραγματοποιήθηκαν στην Αθήνα και το Βουκουρέστι, κατά τη διάρκεια υλοποίησης του έργου (βλ. Παραδοτέο ΠΕ2). Οι μετρήσεις lidar συγκεντρώθηκαν σε 4 βασικές κατηγορίες ανάλογα με την πηγή προέλευσής τους: (1) κεντρική Ευρώπη, (2) θαλάσσια προέλευση, (3) ερημική πρόελευση (έρημος Σαχάρα) και (4) καύση βιομάζας.

- **Υπολογισμός και ανάλυση οπισθοτροχιών αερίων μαζών**

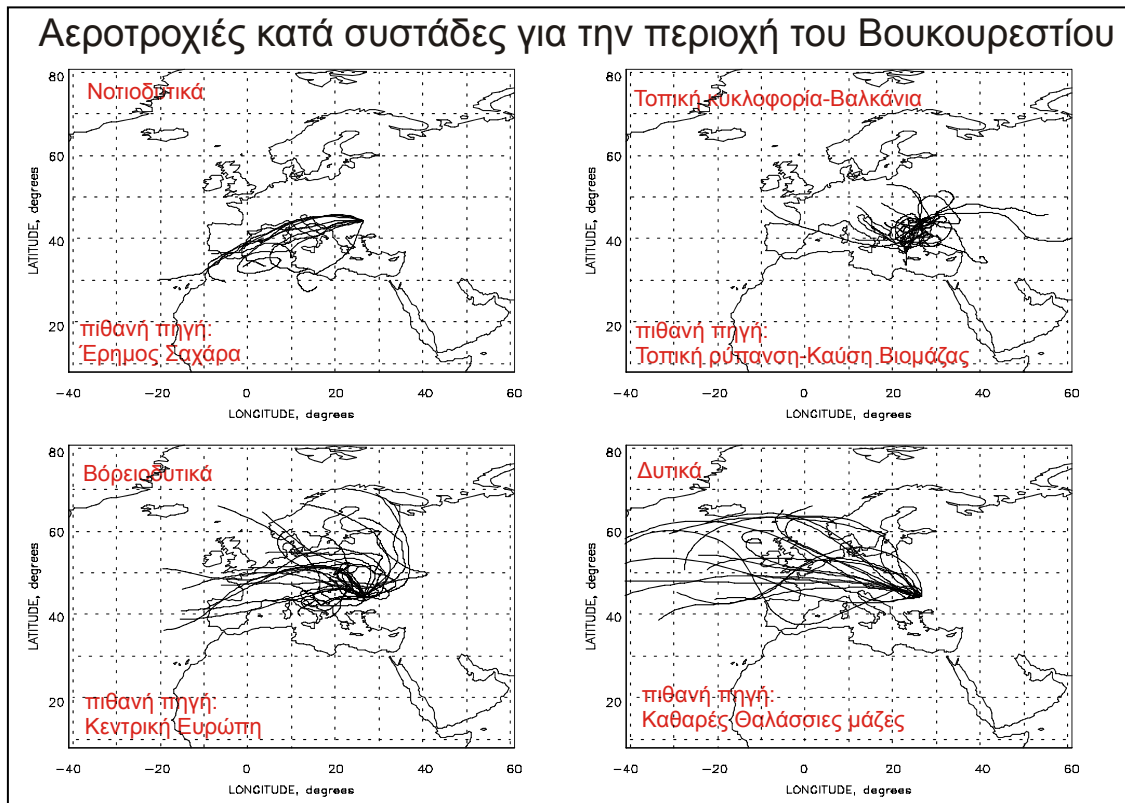
Για τον προσδιορισμό της προέλευσης, αλλά και του τύπου των αιωρούμενων σωματιδίων πάνω από την περιοχή των Βαλκανίων, οι μετρήσεις lidar συνδυάστηκαν με δεδομένα από άλλες μεθόδους όπως ηλιακά φωτόμετρα (τα οποία μας παρέχουν πληροφορίες για το οπτικό βάθος των αερολυμάτων), δορυφορικά δεδομένα οπτικού βάθους, καθώς και προγνώσεις μοντέλων σχετικά με την μετακίνηση των αερίων μαζών (HYSPLIT). Στο έργο αυτό χρησιμοποιήσαμε το μοντέλο υπολογισμού οπισθοτροχιών HYSPLIT για να υπολογίσουμε οπισθοτροχιές τεσσάρων ημερών για το ύψος άφιξης των πάνω από την Αθήνα και το Βουκουρέστι. Η πλήρης περιγραφή του μοντέλου HYSPLIT για τον υπολογισμό οπισθοτροχιών με την χρήση μετεωρολογικών δεδομένων της Εθνικής Μετεωρολογικής Υπηρεσίας των Ηνωμένων Πολιτειών ETA είναι διαθέσιμη στην βιβλιογραφία (*Draxler and Hess, 1997*).

Οι υπολογισμοί επιλέχθηκαν να γίνουν για το ύψος των 2500 m, μιας και το ύψος αυτό αντιπροσωπεύει καλύτερα τον διαχωρισμό μεταξύ οριακού στρώματος και ελεύθερης τροπόσφαιρας. Οι οπισθοτροχιές υπολογίστηκαν για τον χρόνο άφιξης των 12:00 UTC. Στα δεδομένα οπισθοτροχιών εφαρμόσαμε τον αλγόριθμο ανάλυσης κατά συστάδες (cluster analysis) που προτάθηκε από τους *Dorling et al. (1992)* για τον διαχωρισμό των

οπισθοτροχιών σε μέσες τροχιές και επομένως για τον προσδιορισμό των πιθανότερων πηγών ρύπανσης για την περιοχή της Ανατολικής Μεσογείου και της Ανατολικής Ευρώπης.



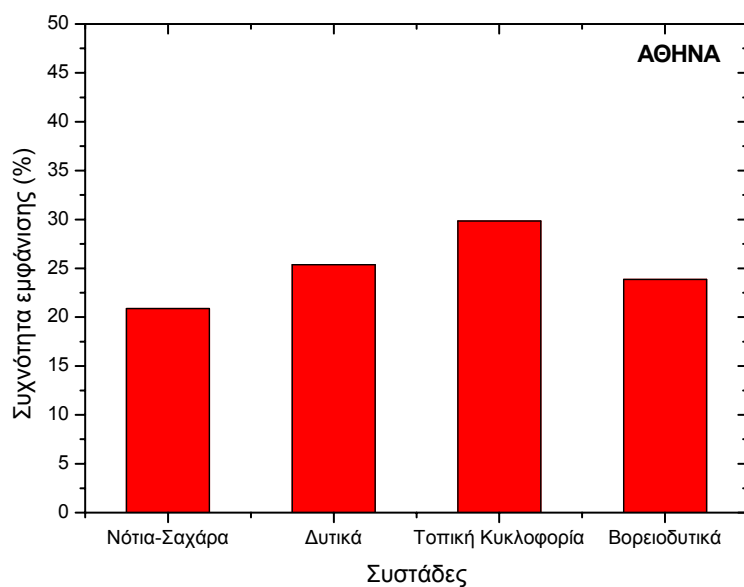
Εικόνα 3.1: Ανάλυση κατά συστάδες για την περιοχή της Αθήνας και οι αντίστοιχες πιθανές πηγές αέριας ρύπανσης.



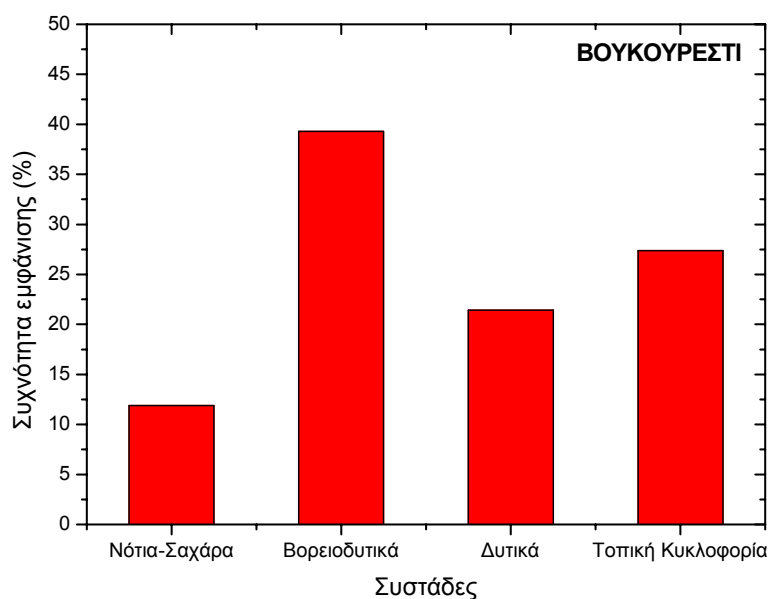
Εικόνα 3.2: Ανάλυση κατά συστάδες για την περιοχή του Βουκουρεστίου και οι αντίστοιχες πιθανές πηγές αέριας ρύπανσης.

Στις Εικόνες 3.1 και 3.2 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης κατά συστάδες για τον σταθμό της Αθήνας και τον σταθμό του Βουκουρεστίου, καθώς επίσης και η πιθανότερη πηγή αέριας ρύπανσης για κάθε μία περιοχή. Έτσι, από την ανάλυση των αποτελεσμάτων που πραγματοποιήθηκε προέκυψε ότι η περιοχή των Βαλκανίων επηρεάζεται σημαντικά από τις αέριες μάζες που είναι πλούσιες σε αιωρούμενα σωματίδια και έχουν προέλευση την έρημο Σαχάρα, την Κεντρική Ευρώπη και την καύση βιομάζας. Από την άλλη πλευρά οι αέριες μάζες με θαλάσσια προέλευση είναι πολύ λιγότερο φορτισμένες με αερολύματα σε σχέση με εκείνες που έχουν τις τρεις διαφορετικές προελεύσεις που προαναφέραμε.

Ακολούθως, θα παρουσιάσουμε τα κύρια στατιστικά αποτελέσματα ως προς τις κύριες πηγές ρύπανσης αναφορικά με τα αερολύματα στην περιοχή των Βαλκανίων και της Ανατολικής Ευρώπης, όπως αυτά μετρήθηκαν με το σύστημα UV-Raman lidar του ΕΜΠ στην Αθήνα και με το σύστημα lidar στο Βουκουρέστι, από τον Απρίλιο μέχρι τον Νοέμβριο του 2007.



Εικόνα 3.3: Διάγραμμα συχνότητας εμφάνισης των διευθύνσεων των αεροτροχιών ανά συστάδα για την περιοχή της Αθήνας



Εικόνα 3.4: Διάγραμμα συχνότητας εμφάνισης των διευθύνσεων των αεροτροχιών ανά συστάδα για την περιοχή του Βουκουρεστίου.

- **Εντοπισμός των κύριων πηγών ρύπανσης στην περιοχή των Βαλκανίων**

Για το σύνολο των μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν κατά την περίοδο του Απριλίου 2007 μέχρι τον Νοέμβριο 2007, στον σταθμό lidar της Αθήνας και του Βουκουρεστίου, πραγματοποιήθηκε μία στατιστική μελέτη όσον αφορά την προέλευση των αερίων μαζών και τις πηγές ρύπανσης αυτών. Στις Εικόνες 3.3 και 3.4 παρουσιάζονται οι συχνότητες εμφάνισης (%) της κάθε μίας διεύθυνσης (πηγής αερολύματος) που προέκυψε από την ανάλυση των οπισθοτροχιών των αερίων μαζών κατά συστάδες όπως ροαναφέρθηκε.

Στην Εικόνα 3.3 παρατηρούμε ότι η περιοχή των Αθηνών επηρεάζεται περισσότερο από την τοπική κυκλοφορία των αερίων μαζών (31%), ενώ οι αέριες μάζες με δυτική ή βορειοδυτική προέλευση (25%) είναι εκείνες που εμφανίζονται λιγότερο συχνά και επηρεάζουν την ποιότητα του αναπνεύσιμου αέρα στο Λεκανοπέδιο Αθηνών, ενώ τέλος, εκείνες με ερημική προέλευση (20%) εμφανίζονται λιγότερο συχνά. Αντίθετα, η περιοχή του Βουκουρεστίου επηρεάζεται περισσότερο από αέριες μάζες βορειοδυτικής προέλευσης (39%) ή τοπικής κυκλοφορίας (27%) και λιγότερο από εκείνες με δυτική προέλευση ή νότια-ερημική προέλευση (έρημος Σαχάρα).

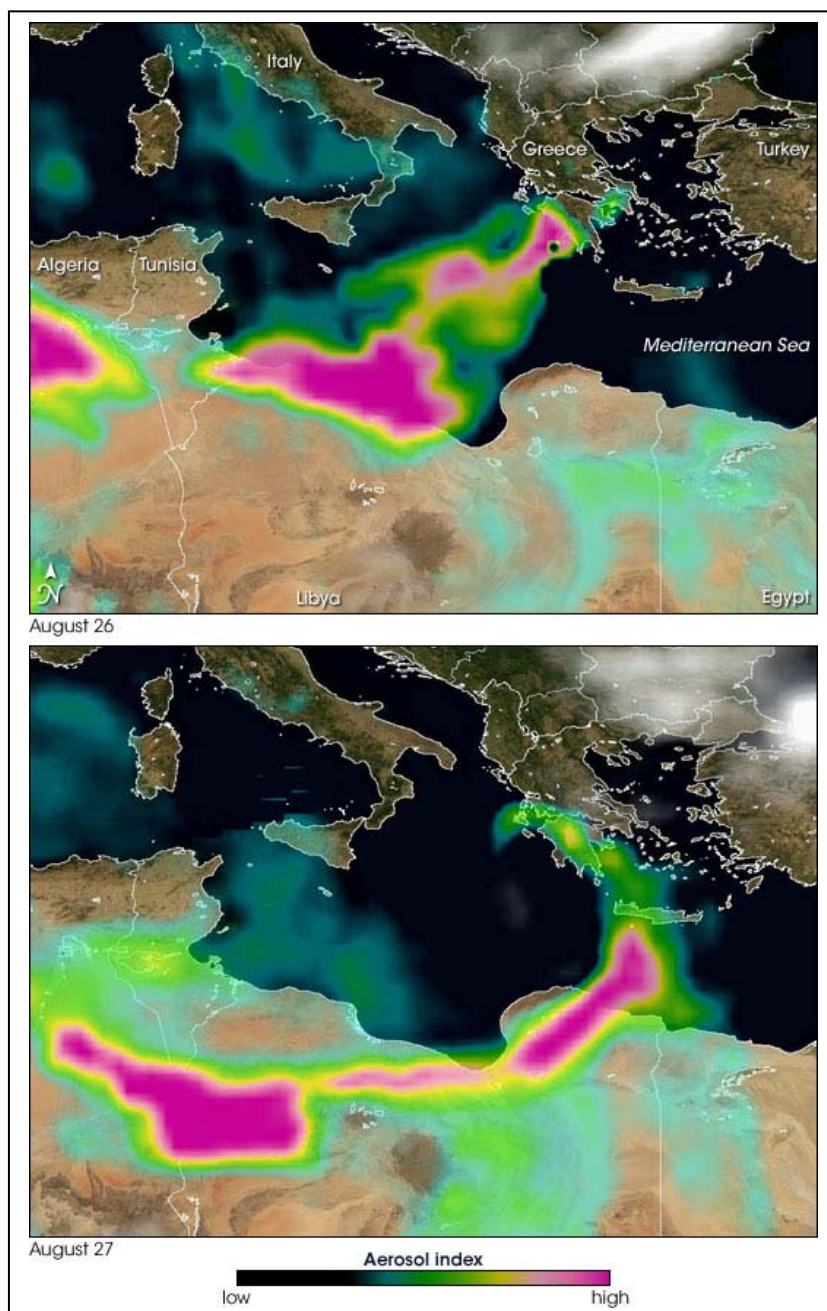
- **Ανάλυση επιλεγμένων περιπτώσεων διασυνοριακής ρύπανσης**

Ακολούθως, παρουσιάζουμε την ανάλυση επιλεγμένων περιπτώσεων διασυνοριακής ρύπανσης όπως καταγράφηκε στην περιοχή των Αθηνών και του Βουκουρεστίου.

Περίπτωση I: Δασικές πυρκαγιές (καύση βιομάζας στην περιοχή της Αθήνας (27 Αυγούστου 2007)

Κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού του έτους 2007 υπήρξε ένας αρκετά μεγάλος αριθμός πυρκαγιών σε περιοχές τόσο της Μολδαβίας και της Ουκρανίας, όσο και στην περιοχή των Βαλκανίων (Ελλάδα, Αλβανία, κλπ.) οι οποίες ήταν ορατές από τον δορυφόρο MODIS (Εικόνα 3.5). Παράλληλα, κατά την περίοδο 25–30 Αυγούστου 2007, δεν προβλέπονταν από το προγνωστικό μοντέλο DREAM (Dust Regional Atmospheric Model) η παρουσία σωματιδίων σκόνης από τη Σαχάρα πάνω από την περιοχή των Βαλκανίων. Όμως, οι

μετρήσεις lidar στην περιοχή της Αθήνας κατά τη συγκεκριμένη περίοδο κατέδειξαν παρουσία στρωματώσεων σωματιδίων στα ύψη των 1.500, 2.500 και 3.500 m .

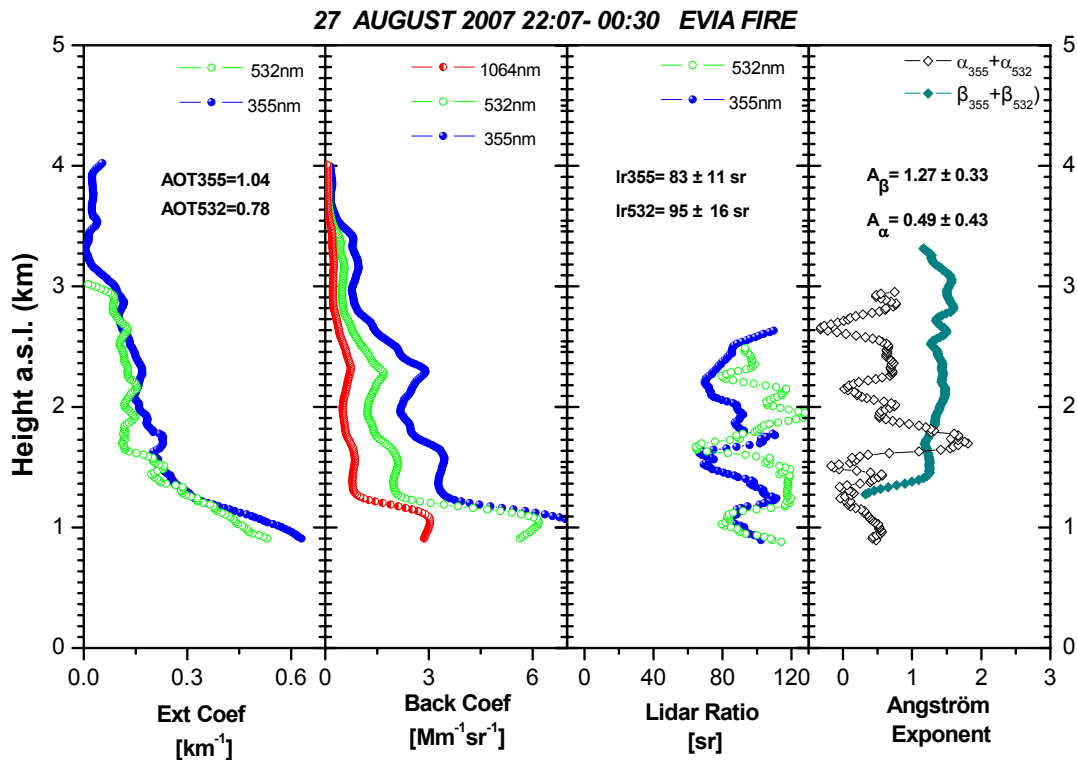


Εικόνα 3.5: Δείκτης αερολυμάτων (aerosol index) από καύση βιομάζας (δασικές πυρκαγιές) στον Ελλαδικό χώρο, όπως καταγράφηκε από τον δορυφόρο MODIS στις 26 και 27 Αυγούστου 2007.

Στην Εικόνα 3.6 παρουσιάζονται οι οπτικές ιδιότητες των αιωρούμενων σωματιδίων όπως προκύπτουν από τα δεδομένα του συστήματος Raman-Lidar του Ε.Μ.Π. στην Αθήνα. Εμφανείς είναι οι στρωματώσεις μεταξύ των 1.500 και 3.500 m. Από τις μετρήσεις των ελαστικών και ανελαστικών μηκών κύματος στα 355 και 532 nm, μετρήθηκαν οι συντελεστές εξασθένησης, οπισθοσκέδασης και ο λόγος lidar, για τις 27 Αυγούστου 2007 κατά την χρονική περίοδο μεταξύ 22:07 και 00:30 UTC. Οι κατακόρυφες κατανομές των μεγεθών αυτών μαζί με τον συντελεστή Ångström παρουσιάζονται στην Εικόνα 3.6. Τα οπτικά βάθη των αερολυμάτων για εκείνη την ημέρα όπως υπολογίστηκαν από την ολοκλήρωση της κατανομής του συντελεστή εξασθένησης, βρέθηκαν ίσα με 1.04 στα 355 nm και 0.78 στα 532 nm. Οι τιμές αυτές υπολογίστηκαν για την συνολική ατμοσφαιρική περιοχή με την προϋπόθεση πάντοτε ότι το ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα είναι καλώς αναμεμιγμένο, οπότε και η εξασθένηση στο χαμηλότερο σημείο της μετρήσεις (~800 m) μπορεί να θεωρηθεί σταθερή έως το έδαφος.

Η υπόθεση αυτή επιβεβαιώνεται από τις μετρήσεις ενός ηλιακού φωτομέτρου (MFR) το οποίο βρίσκεται σε κοντινή απόσταση (1000 m) από την Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου. Τα οπτικά βάθη των αερολυμάτων για τις 27 Αυγούστου 2007 ήταν της τάξης του 0.7 στα 500 nm, γεγονός που επιβεβαιώνει την ποιότητα των μετρήσεών μας. Η μέση τιμή του λόγου lidar για την περιοχή των υψών μεταξύ 0.8- 4.5 km ήταν 80 ± 10 sr και για τα δύο μήκη κύματος. Ο λόγος lidar ήταν σχεδόν σταθερός σε σχέση με το ύψος. Επιπλέον, καμία σημαντική εξάρτηση από το μήκος κύματος δεν παρατηρήθηκε.

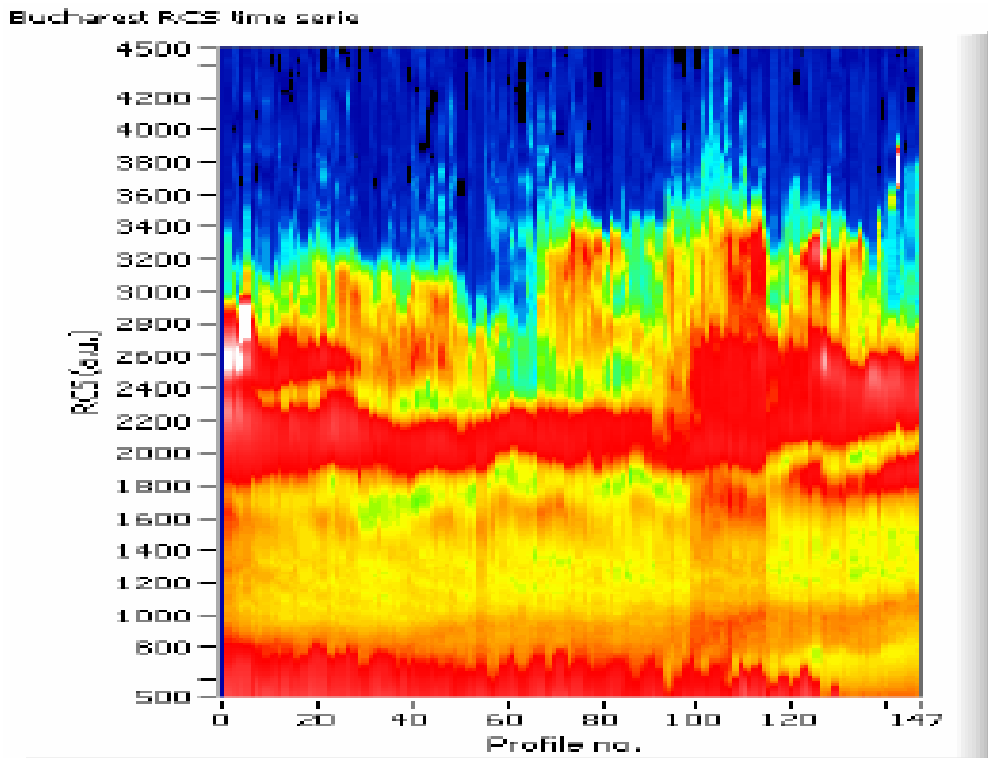
Στην παρούσα περίπτωση η εξάρτηση από το μήκος κύματος γίνεται σημαντική μόνο στην περιοχή των στρωματώσεων όπου παρατηρούνται αερολύματα από την καύση βιομάζας. Αντίστοιχα, ο εκθέτης Ångström κυμάνθηκε μεταξύ 0.5-1.3, που καταδεικνύει την ύπαρξη μεγάλων και μεσαίας διαμέτρου αερολυμάτων.



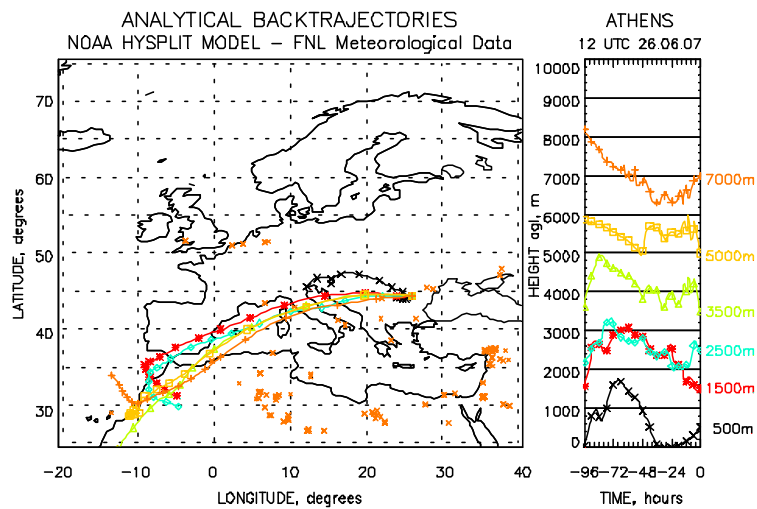
Εικόνα 3.6: Συντελεστής εξασθένησης, οπισθοσκέδασης, λόγος lidar και εκθέτης Ångström για τις 27 Αυγούστου 2007 στην περιοχή των Αθηνών.

Περίπτωση II: Αιωρούμενα σωματίδια στην περιοχή του Βουκουρεστίου με προέλευση την έρημο Σαχάρα (25-30 Ιουνίου 2007)

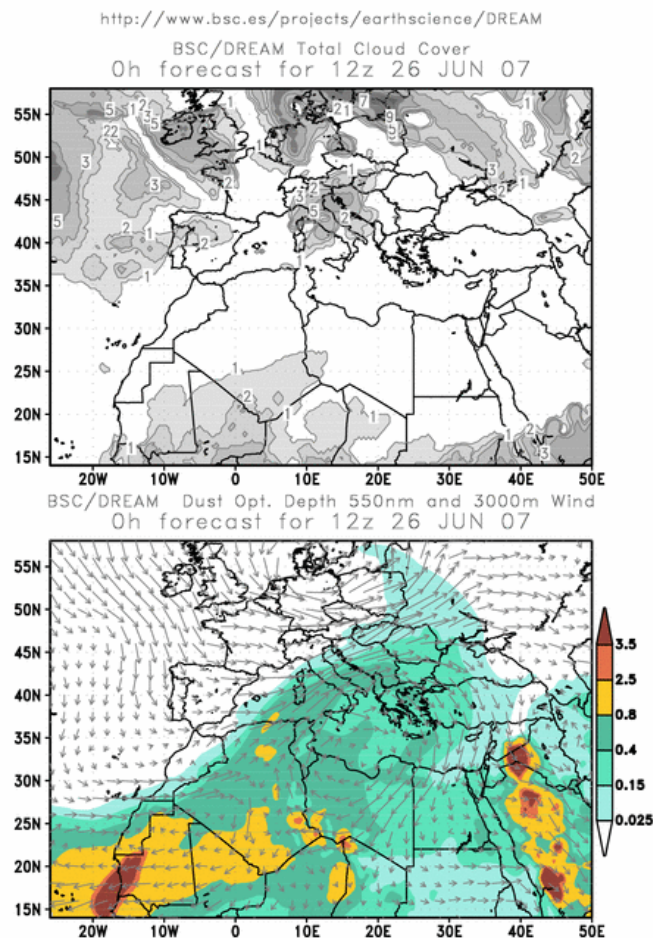
Το φαινόμενο της μεταφοράς μέσω των αερίων μαζών σωματιδίων σκόνης από την έρημο Σαχάρα πάνω από την περιοχή των Βαλκανίων είναι αρκετά συχνό, ιδίως κατά τους θερμούς μήνες του έτους (Απρίλιο – Σεπτέμβριο). Ένα τέτοιο φαινόμενο μεταφοράς σκόνης καταγράφηκε από τον σταθμό lidar στο Βουκουρέστι την περίοδο 25–30 Ιουνίου 2007. Στην Εικόνα 3.7 απεικονίζεται το χωρικά διορθωμένο σήμα lidar στα 1064 nm στις 26 Ιουνίου 2007 πάνω από την περιοχή του Βουκουρεστίου. Παρατηρούμε την ύπαρξη στρωμάτωσης σωματιδίων στο ύψος των 2.500 m, γεγονός που έρχεται σε συμφωνία με το μοντέλο οπισθοτροχιών HYSPLIT (Εικόνα 3.8). Τα σωματίδια παρατηρήθηκαν την κατά την περίοδο 26-28 Ιουνίου πάνω από την Ρουμανία γεγονός που προβλέφθηκε με επιτυχία από το μοντέλο DREAM όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 3.9.



Εικόνα 3.7: Χωρικά διορθωμένο σήμα lidar στα 1064 nm στο Βουκουρέστι στις 26 Ιουνίου 2007.



Εικόνα 3.8: Πρόγνωση του μοντέλου οπισθοτροχιών HYSPLIT για την περιοχή του Βουκουρεστίου στις 26 Ιουνίου 2007.



Εικόνα 3.9: Πρόγνωση του μοντέλου DREAM για την κατανομή στην περιοχή σωματιδίων με προέλευση την Έρημο Σαχάρα στις 26 Ιουνίου 2007.

Επιπροσθέτως, η ανάλυση των δεδομένων του ηλιακού φωτόμετρου στην περιοχή του Βουκουρεστίου έδειξε ότι η πρόκειται για μια τυπική περίπτωση αιωρούμενων σωματιδίων με προέλευση την έρημο Σαχάρα .

Συμπεράσματα

Στο πλαίσιο του Παραδοτέου αυτού (ΠΕ3) εντοπίστηκαν οι κύριες πηγές αέριας ρύπανσης που επηρεάζουν την ποιότητα του αναπνεύσιμου αέρα στην περιοχή των Βαλκανίων (έρημος Σαχάρα, κεντρική Ευρώπη, καύση βιομάζας) μέσω της ανάλυσης των αεροτροχιών των αερίων μαζών που καταλήγουν στις πόλεις της Αθήνας και του Βουκουρεστίου. Έτσι, οι συστηματικές μετρήσεις lidar που πραγματοποιήθηκαν στο πλαίσιο του ΠΕ2, χρησιμοποιήθηκαν για τον εντοπισμό και την ταυτοποίηση των κύριων πηγών ρύπανσης και

παραγωγής αερολυμάτων στην Ευρώπη και στην Βόρεια Αφρική, που επηρεάζουν την ποιότητα της ατμόσφαιρας στην περιοχή των Βαλκανίων. Χρησιμοποιώντας, παράλληλα, και μετεωρολογικά δεδομένα, με την βοήθεια του κώδικα Hysplit, μελετήθηκε η διασυννοριακή αερομεταφερόμενη ρύπανση, οι μηχανισμοί μεταφοράς ρύπων και εντοπίστηκαν οι βασικές πηγές ρύπανσης και παραγωγής αερολυμάτων που επιδρούν στην ποιότητα της ατμόσφαιρας στην ευρύτερη περιοχή των Βαλκανίων.

Το Παραδοτέο αυτό ολοκληρώθηκε κανονικά.

Βιβλιογραφικές αναφορές

Dorling, S., T. Davies, and C. Pierce, Cluster analysis: A technique for estimating the synoptic meteorological controls on air and precipitation chemistry – method and applications, *Atmos. Environ.*, 26A, 2575-2581, 1992.

Draxler, R.R. and G.D. Hess, An Overview of the Hysplit_4 Modeling System for Trajectories, Dispersion, and Deposition, *Aust. Met. Mag.*, 47, 295-308, 1998.

Lelieveld, J., H. Berresheim, S. Borrmann, P.J. Curtzen, F.J. Dentener, H. Fischser, J. Feichter, P.J. Flatau, J. Hegland, R. Holzinger, R. Kormann, M.G. Lawrence, Z. Levin, K.M. Karkowicz, N. Mihalopoulos, A. Minikin, V. Ramanathan, M. de Reus, G.J. Roelofs, H.A. Scheeren, J. Sciare, H. Schlager, M. Schultz, P. Siegmund, B. Steil, E.G. Stephanou, P. Stier, M. Traub, C. Warneke, J. Williams and H. Ziereis, Global Air Pollution Crossroads over the Mediterranean, *Science*, 298, 794-799, 2002.

Βεβαιώνεται η εκτέλεση του έργου

Ημερομηνία 31/01/2008

Ο Επιστημονικός Υπεύθυνος του Έργου

Δρ. Αλεξ. ΠΑΠΑΓΙΑΝΝΗΣ

Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.