

ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΕΠΙΣΟΔΙΩΝ ΕΜΦΑΝΙΣΗΣ ΣΚΟΝΗΣ ΑΠΟ ΤΗΝ ΣΑΧΑΡΑ, ΠΑΝΩ ΑΠ'Ο ΤΗΝ ΑΘΗΝΑ

Κοσμοπούλος Π.¹, Νάστος Π.¹, Κασκαούτης Δ.², Καμπεζίδης Χ.²

¹ *Εργαστήριο Κλιματολογίας και Ατμοσφαιρικού Περιβάλλοντος,
Τμήμα Γεωλογίας και Γεωπεριβάλλοντος, Πανεπιστήμιο Αθηνών*

² *Ινστιτούτο Ερευνών Περιβάλλοντος και Βιώσιμης Ανάπτυξης, Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών*

Περίληψη

Η μελέτη αυτή εστιάζει στον προσδιορισμό των Επεισοδίων Σκόνης από την Σαχάρα (ΕΣΣ), που εμφανίζονται πάνω από την Αθήνα, καλύπτοντας μια περίοδο έξι ετών (2000-2005). Τα ημερήσια δεδομένα του Οπτικού Βάθους των Αερολυμάτων (ΟΒΑ) στα 550 nm, που συνδέονται με τις τιμές του κλάσματος των αερολυμάτων Μικρού Μεγέθους (ΜΜ), από το φασματοραδιόμετρο (MODIS) που είναι εγκατεστημένο στον δορυφόρο πολικής τροχιάς EOS-TERRA καθώς επίσης και οι τιμές του Δείκτη Αερολυμάτων (ΔΑ) από το φασματομέτρο χαρτογράφησης του ολικού όζοντος (TOMS) έχουν χρησιμοποιηθεί προκειμένου να μελετηθούν η μεταβλητότητα και οι εποχικές τάσεις των ΕΣΣ πάνω από την Αθήνα. Όλες οι ανωτέρω παράμετροι λαμβάνονται σε ημερήσια βάση με χωρική ανάλυση 1x1ο (10x10 km), που έχει στο επίκεντρο του πλέγματος την Αθήνα (37.5οN, 23.43ο E). Αρχικά, από τη σχέση μεταξύ ΟΒΑ550 και ΜΜ, διαχωρίστηκαν τα χοντρόκοκκα αερολύματα, που πιθανόν να αντιστοιχούν σε σωματίδια σκόνης προερχόμενα από την έρημο Σαχάρας. Για αυτή την διάκριση επιλέχτηκαν τα κατώφλια ΟΒΑ550>0.3 και ΜΜ<0.6. Από τις 1809 ημέρες των μετρήσεων, 337 ικανοποιούν αυτό το κριτήριο. Εντούτοις, όλες αυτές οι περιπτώσεις δεν αντιστοιχούν σε ΕΣΣ. Αυτά τα επεισόδια ξεχωρίζονται περαιτέρω με τη χρήση των οπισθοτροχιών τεσσάρων ημερών, που υπολογίζονται από το μοντέλο HYSPLIT σε 3 ύψη (500m, 1000m και 4000m). Χρησιμοποιώντας αυστηρά κριτήρια σχετικά με την τροχιά και την πηγή των αερίων μαζών, υπολογίστηκε ότι 79 από τις ανωτέρω 337 περιπτώσεις αντιστοιχούν σε ΕΣΣ. Αυτά τα επεισόδια εμφανίζουν την μεγαλύτερη συχνότητα τον Ιούλιο, και ακολουθεί ο Σεπτέμβριος και ο Απρίλιος.

DETERMINATION OF SAHARAN DUST EPISODES OVER ATHENS

Kosmopoulos P.¹, Nastos P.¹, Kaskaoutis D.², Kambezidis H.²

¹ *Laboratory of Climatology and Atmospheric Environment, Faculty of Geology and
Geoenvironment, University of Athens*

² *Institute for Environmental Research and Sustainable Development,
National Observatory of Athens*

Abstract

This study focuses on the identification of the Saharan dust (SD) events occur over Athens covering a 6-year (2000-2005) period. Daily data of aerosol optical depth (AOD) at 550 nm associated with fine-mode FM fraction values from the MODerate resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) onboard EOS-TERRA polar-orbiting satellite and Aerosol Index (AI) values from the Total Ozone Mapping Spectrometer (TOMS) have been used in order to obtain the climatology and seasonal trends of SD events over Athens. FM fraction is the proportion of AOD contributed by the small particles, mainly soot or anthropogenic aerosols, while AI is an index that indicates the presence of elevated absorbing aerosols (desert dust) in the atmosphere. All the above parameters are obtained on daily basis with spatial resolution of 1x1ο (10x10 km) centered at Athens (37.5οN 23.43οE). Firstly, from the relation between AOD550 and FM, the coarse-mode aerosols were discriminated, probably

corresponding to dust particles originated from Sahara desert. For this discrimination the threshold values $AOD_{550} > 0.3$ and $FM < 0.6$ were selected. Out of 1809 days of measurements, 337 satisfy this criterion. However, not all these cases correspond to SD events. These events are further discriminated with the use of 4-day back trajectories computed from the HYSPLIT model at 3 altitudes (500m, 1000m and 4000m). Using strict criteria regarding the trajectory and the source of the air masses, it is established that 79 of the above 337 cases correspond to SD events. These events exhibit higher occurrence in July, followed by September and April.

Λέξεις κλειδιά: σκόνη Σαχάρας, οπτικό βάθος αερολυμάτων, οπισθοτροχιές, Αθήνα.

Key words: Saharan dust, aerosol optical depth, back trajectories, Athens.

1. Εισαγωγή

Η έρημος της Σαχάρας αποτελεί τη σημαντικότερη πηγή σκόνης στον κόσμο. Τα σωματίδια αυτά της σκόνης από τη Σαχάρα επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό τη Μεσόγειο θάλασσα και τα παράλια της Ευρώπης, αφού μπορούν και ταξιδεύουν σε μεγάλες αποστάσεις και σε μεγάλα ύψη μέσα στην ατμόσφαιρα, με αποτέλεσμα να παραμένουν εκεί από μερικές μέρες μέχρι και μερικές εβδομάδες (Pandis et al., 1995). Η ύπαρξη σκόνης από τη Σαχάρα εντοπίζεται και προσδιορίζεται στις περιοχές της Ευρώπης από την χαρακτηριστική κόκκινη βροχή που αποτελεί και την υγρή απόθεση σκόνης, ή από την σκόνη που βρίσκεται παγιδευμένη στο χιόνι ή στον πάγο και που αποτελεί την ξηρή απόθεση σκόνης. Η εμφάνιση των επεισοδίων σκόνης πάνω από τη Μεσόγειο έχει ένα συγκεκριμένο εποχικό κύκλο, που κατευθύνεται και επηρεάζεται κυρίως από κάποιους έντονους κυκλώνες που αποκαλούνται Sharav και δρουν νότια των βουνών Atlas στο Μαρόκο (Moulin et al., 1998). Αυτοί οι κυκλώνες γεννώνται στο μέτωπο των διαφορετικών αερίων μαζών, όπου από τη μια πλευρά έρχονται οι κρύες αέριες μάζες της θαλάσσιας περιοχής του Ατλαντικού και από την άλλη οι θερμές μάζες της ηπειρωτικής περιοχής. Οι αέριες αυτές μάζες διασταυρώνονται πάνω από τη βόρεια Αφρική κατά τη διάρκεια της άνοιξης και του Καλοκαιριού και για αυτό τον λόγο σε αυτές τις εποχές κυρίως έχουμε ανύψωση σκόνης που στη συνέχεια ανάλογα και με τις μετεωρολογικές συνθήκες κατευθύνεται στην ευρύτερη περιοχή της Μεσογείου.

Η σκόνη της Σαχάρας, ορυκτολογικώς αποτελείται σε ποσοστό 89% από ιλίτη, καολινίτη και μοντμοριλλονίτη (Sokolik and Toon, 1999), αλλά και από αιματίτη (Quijano et al., 2000). Ο αιματίτης έχει τη φυσική ιδιότητα να απορροφά την ηλιακή ακτινοβολία, και συνδυαζόμενος με τα υπόλοιπα τρία αργιλικά ορυκτά που είναι σχετικά διαφανή στην ηλιακή ακτινοβολία, έχει σαν αποτέλεσμα μια μεγαλύτερης τάξης απορρόφηση ιδιαίτερα στις μικρού μήκους κύματος ακτινοβολίες. Επιπροσθέτως, τα σωματίδια σκόνης με την απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας επιδρούν έτσι και στη θέρμανση της κατώτερης ατμόσφαιρας. Σαν αποτέλεσμα, ένα μεμονωμένο επεισόδιο σκόνης μπορεί να προκαλέσει στην κατώτερη ατμόσφαιρα, δηλαδή στο ύψος των 1,5 μέχρι και των 3.5 χιλιομέτρων, μια μέση αύξηση της θερμοκρασίας κατά 0,2 βαθμούς Κελσίου τη μέρα. Σε διάστημα λοιπόν ενός χρόνου και με περίπου 30 επεισόδια σκόνης να έχουν συμβεί, η επίδρασή τους στη συνολική θέρμανση της περιοχής στην οποία επιδρούν είναι της τάξης των 6 βαθμών Κελσίου το χρόνο (Alpert et al., 1998).

Λόγω των σπουδαίων επιπτώσεων από τις εξάρσεις της σκόνης στο κλίμα, την ανθρώπινη υγεία και τα οικοσυστήματα, έχουν διεξαχθεί πολυάριθμες έρευνες για την ατμόσφαιρα της Μεσογείου, αλλά και πολλά επιστημονικά όργανα και τεχνικές έχουν χρησιμοποιηθεί για τον προσδιορισμό και τη διερεύνηση των εξάρσεων σκόνης από τη Σαχάρα. Στην παρούσα μελέτη χρησιμοποιήθηκαν παρατηρήσεις αερολυμάτων από τον αισθητήρα Terra-MODIS όπως επίσης και οι τιμές του δείκτη αερολυμάτων από το φασματόμετρο χαρτογράφησης του ολικού όζοντος (TOMS) για το χαρακτηρισμό των ιδιοτήτων της σκόνης που μας ενδιαφέρει, αλλά και για την ανάλυση των επεισοδίων σκόνης από τη Σαχάρα πάνω από την ευρύτερη περιοχή

της Αθήνας για τη χρονική περίοδο 2000-2005. Βασικός σκοπός της έρευνας είναι ο ακριβής προσδιορισμός της εποχικής διακύμανσης των οπτικών ιδιοτήτων της σκόνης με έμφαση στην αέρια μεταφορά των σωματιδίων σκόνης από την έρημο Σαχάρα. Χρησιμοποιώντας τέλος τις οπισθοτροχιές των αερίων μαζών αναλύουμε επιπλέον και τις γενικές διόδους μεταφοράς της σκόνης αλλά και την κατακόρυφη κατανομή της στην ατμόσφαιρα.

2. Δεδομένα και Ανάλυση

Για την πραγματοποίηση της παρούσας έρευνας χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από τον δορυφορικό αισθητήρα Terra-MODIS, από το φασματόμετρο χαρτογράφησης του ολικού όζοντος (TOMS) και υπολογίστηκαν οπισθοτροχιές αερίων μαζών με τη βοήθεια του μοντέλου HYSPLIT. Ειδικότερα για τα ανακτημένα δεδομένα του MODIS αναφέρουμε τα παρακάτω: ο λογικός αναλυτής φασματικού μετρητή ραδιενέργειας (MODIS) εκτοξεύτηκε το Δεκέμβριο του 1999 με τον πολιτική τροχιάς δορυφόρο NASA-EOS Terra. Για τους σκοπούς της παρούσας μελέτης ανακτήθηκαν οι παράμετροι οπτικού βάθους αερολυμάτων στα 550 νανόμετρα (OBA_{550}) και οι τιμές του κλάσματος των αερολυμάτων Μικρού Μεγέθους (MM). Οι ανωτέρω παράμετροι ελήφθησαν σε ημερήσια βάση με χωρική ανάλυση $1 \times 1^\circ$ (10×10 km), και με επίκεντρο του πλέγματος την Αθήνα ($37.5^\circ N$, $23.43^\circ E$). Η ανάλυση των παραμέτρων έχει ως σκοπό την εποχική και χωρική κατανομή και διακύμανση των αερολυμάτων στην ατμόσφαιρα και που στην περίπτωση μας το ρόλο των αερολυμάτων παίζει η σκόνη από τη Σαχάρα. Οι ημερήσιες μετρήσεις που συλλέχθηκαν φτάνουν τις 1809 και λαμβάνουν χώρα από τις 26 Φεβρουαρίου του 2000 μέχρι και τις 31 Δεκεμβρίου του 2005.

Όσον αφορά τα δεδομένα από το φασματόμετρο χαρτογράφησης του ολικού όζοντος (TOMS) να εξηγήσουμε ότι η παράμετρος που μας ενδιαφέρει είναι οι τιμές του Δείκτη Αερολυμάτων (ΔΑ). Ο δείκτης αερολυμάτων είναι το μέτρο της μεταβλητότητας του μήκους κύματος κατά την απορρόφηση της ακτινοβολίας από τα αερολύματα. Και επομένως με τη βοήθεια του δείκτη αυτού μπορούμε να διαπιστώσουμε κάθε στιγμή και να εντοπίζουμε την ύπαρξη ανυψωμένων αερολυμάτων πάνω από επιφάνειες υψηλής αντανάκλασης, δηλαδή σε περιοχές στην ξηρά όπου έχουμε ύπαρξη ερήμου. Για τις ανάγκες της μελέτης ανακτήσαμε τις τιμές του ΔΑ για την περίοδο 2000-2005 από τον δορυφόρο TOMS ο οποίος είναι εξοπλισμένος με το φασματόμετρο χαρτογράφησης του ολικού όζοντος (Ahmad *et al.*, 2003).

Τέλος, για τις οπισθοτροχιές και το HYSPLIT πρέπει να πούμε πως στο μοντέλο αυτό υπολογίσαμε τις αναλυτικές τροχιές των αερίων μαζών για χρονικό διάστημα τεσσάρων ημερών (Draxler and Rolph, 2003). Αυτό στάθηκε αναγκαίο για να μπορούμε να αναγνωρίσουμε και να ταξινομήσουμε τις κύριες διόδους κατευθύνσεως της σκόνης πάνω από την Αθήνα. Οι οπισθοτροχιές υπολογίστηκαν για συγκεκριμένους λόγους σε τρία διακριτά υψόμετρα. Στα 500 μέτρα για να δώσουμε τις αντιπροσωπευτικές πηγές των αερίων μαζών κοντά στην επιφάνεια, στα 1000 μέτρα, υψόμετρο που εξηηρετεί στην οριοθέτηση του ανώτερου ορίου μέχρι το οποίο εμφανίζεται η πλειοψηφία των αερολυματικών σωματιδίων και στα 4000 μέτρα για την περιοχή εμφάνισης της σκόνης από τη Σαχάρα. Συγκεκριμένα, μεταξύ των 3,5 και 4,5 χιλιομέτρων πάνω από την Αθήνα σχηματίζεται μια στρώση η οποία απαρτίζεται από σκόνη προερχόμενη από την έρημο Σαχάρα (Papayannis *et al.*, 2005). Επομένως, όταν η σκόνη αυτή φτάνει από τη βόρεια Αφρική στην Αθήνα στις περισσότερες των περιπτώσεων εντοπίζεται σε αυτής της τάξης το υψόμετρο. Οι οπισθοτροχιές του μοντέλου HYSPLIT υπολογίστηκαν σε ημερήσια βάση και αναφέρονται στις 11:00 UTC, ώρα δηλαδή κοντινή στη διέλευση και του δορυφόρου Terra-MODIS, ώστε η διασταύρωση των αποτελεσμάτων των δύο αυτών πηγών να είναι αξιόπιστη.

Στον εναέριο χώρο των Αθηνών παρατηρούνται 4 βασικοί τύποι αερολυμάτων. i) Τα ηπειρωτικά αερολύματα, ή βιομηχανικά αερολύματα που παράγονται από τις ανθρωπογενείς δραστηριότητες, όπως τα εναέρια απόβλητα από την καύση του πετρελαίου, οι εκπομπές καυσαερίων των αυτοκινήτων αλλά και των κεντρικών θερμαντικών συστημάτων των πόλεων. Στα ηπειρωτικά αερολύματα επίσης ανήκουν και τα αέρια από τις εποχικές φωτιές των δασών.

ii) Τα θαλάσσια αερολύματα που οφείλουν την προέλευσή τους στους ανέμους, οι οποίοι επιδρούν στις θαλάσσιες επιφάνειες με αποτέλεσμα να ανυψώνουν θαλάσσια σωματίδια. iii) Αερολύματα καπνού (καμένης βιομάζας) από τις εποχικές φωτιές στα δάση. iv) Σκόνη ερήμου που προέρχεται από τις άνυδρες περιοχές της βόρειας Αφρικής, δηλαδή από την έρημο Σαχάρα.

Όλοι οι παραπάνω τύποι αερολυμάτων λόγω των διαφορετικών προελεύσεών τους, παρουσιάζουν ουσιαστικές διαφορές στα οπτικά αλλά και στα φυσικοχημικά τους χαρακτηριστικά (Dubovik et al., 2002). Ειδικότερα, στα αστικά περιβάλλοντα οι οπτικές ιδιότητες των αερολυμάτων απαρτίζονται στο μεγαλύτερο ποσοστό τους από σωματίδια μικρού μεγέθους (Remer and Kaufman, 1998), ενώ αντίθετα στη σκόνη της ερήμου τα σωματίδια που κυριαρχούν είναι τα χοντρόκοκκα (Masmudi et al., 2003), δηλαδή αυτά με το μεγαλύτερο σχετικά πάντα μέγεθος. Στα θαλάσσια περιβάλλοντα, η σχετική συνεισφορά των χοντρόκοκκων σωματιδίων, αν και έχει μεγάλη μεταβλητότητα, είναι υψηλότερη από ότι συμβαίνει στις αστικές συνθήκες και χαμηλότερη από ότι στη σκόνη της ερήμου (Smirnov et al., 2002). Βασίζομενοι σε αυτά τα στοιχεία, διαχωρίζουμε την παρουσία και τη συνεισφορά των διαφόρων τύπων αερολυμάτων στην ατμόσφαιρα της Αθήνας. Ο διαχωρισμός αυτός καθορίστηκε βάση του συνδυασμού των δεδομένων του OBA550 και του MM (Barnaba and Gobbi, 2004). Τα σωματίδια σκόνης λοιπόν που μας ενδιαφέρουν, που εμφανίζονται σε ολόκληρη τη Μεσόγειο και συνήθως παίζουν το ρόλο δείκτη για τον προσδιορισμό διαφόρων επεισοδίων έξαρσης σκόνης, παρουσιάζουν υψηλές τιμές OBA αλλά και μικρή αναλογία των μικρών σωματιδίων προς τα χοντρόκοκκα (Balis et al., 2004). Συνεπώς, για το διαχωρισμό των σωματιδίων σκόνης από την έρημο, επιλέγουμε τα κατώφλια $OBA550 > 0.3$ και $MM < 0.6$ (Kaskaoutis et al., 2007). Έτσι, σύμφωνα με αυτό το κριτήριο, από τις 1809 μέρες των μετρήσεων, 337 το ικανοποιούν αριθμητικώς.

Η βασική υπόθεση τώρα για το διαχωρισμό των καθαρών επεισοδίων σκόνης από τις 337 περιπτώσεις των χοντρόκοκκων σωματιδίων, έχει να κάνει με τις αέριες μάζες οι οποίες φτάνουν στην Αθήνα στα 4000 μέτρα υψόμετρο κυρίως ή και στις κατώτερες στρώσεις. Αυτές οι μάζες θα πρέπει να είναι φορτωμένες με σκόνη ερήμου και να έχουν προέλευση από την έρημο Σαχάρα. Πρέπει να σημειωθεί πως μια αέρια μάζα για να χαρακτηρίζεται ως ερημικής προέλευσης πρέπει να έχει περάσει μεγάλο σχετικά χρονικό διάστημα πάνω από τη Σαχάρα. Ειδικότερα, η άνοδος της σκόνης συμβαίνει όταν η αέρια μάζα περνά περισσότερο από το 70% της διάρκειας των 4 τελευταίων ημερών της διαδρομής της πάνω από την έρημο Σαχάρα. Αυτές οι συνθήκες έχουν ελεγχθεί για τις οπισθοτροχίες τεσσάρων ημερών που καταλήγουν στα 4000 μέτρα πάνω από την Αθήνα, αλλά και για τις οπισθοτροχίες που φτάνουν στα 1000 και τα 500 μέτρα, δηλαδή τις εγκύτερες στην επιφάνεια. Μετά από αυτήν την ανάλυση, οι περιπτώσεις που αντιστοιχούν σε επεισόδια σκόνης από τη Σαχάρα, πέφτουν από τις 337 στις 79. Επομένως η μελέτη αυτή έχει να ασχοληθεί με 79 επεισόδια σκόνης από την έρημο Σαχάρα σε διάστημα χρόνου 6 ετών, από το 2000 μέχρι το 2005.

3. Αποτελέσματα και Συζήτηση

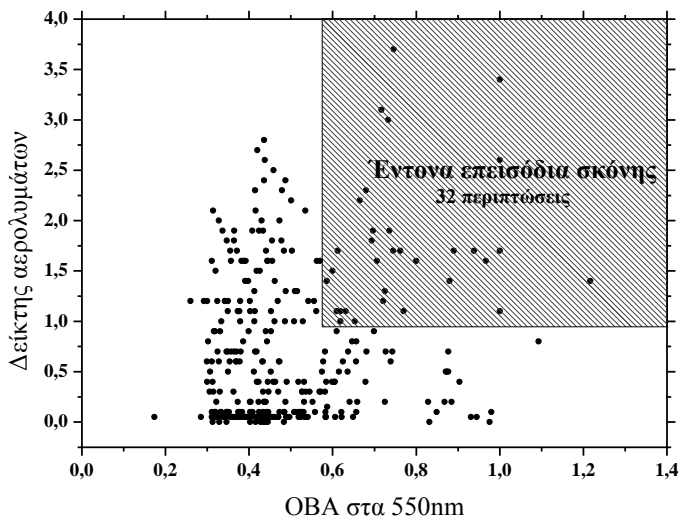
Η ευρύτερη περιοχή της Αθήνας καλύπτει μια έκταση περίπου 450 τετραγωνικών χιλιομέτρων και έχει καταγεγραμμένους 4 εκατομμύρια κατοίκους. Η λεκάνη στην οποία βρίσκεται η πόλη της Αθήνας απαρτίζεται από τις τρεις πλευρές της με βουνά και με τον Σαρωνικό κόλπο στα νότια. Αυτή η σύνθετη τοπογραφία έχει σαν αποτέλεσμα τη φτωχή γενικά αέρια κυκλοφορία πάνω από την Αθήνα (Kambezidis et al., 1995). Συνοπτικά, η ατμόσφαιρα της Αθήνας από μετεωρολογικής άποψης ανάλογα με την εποχή, επηρεάζεται και τελικώς καθορίζεται από τη γενικότερη αέρια κυκλοφορία της Μεσογείου αλλά και της Ευρώπης. Συγκεκριμένα κατά τους χειμερινούς μήνες επιδρά ο αντικυκλώνας της Σιβηρίας όπου και προκαλεί κάθοδο ψυχρών αέριων μαζών από την βορειοανατολική Ευρώπη, επιδρά επίσης ο αντικυκλώνας της κεντρικής και ανατολικής Ευρώπης και τέλος τα χαμηλού βαρομετρικού συστήματα της δυτικής Ευρώπης και του Ατλαντικού ωκεανού που προκαλούν κινήσεις από τα δυτικά προς τα ανατολικά. Κατά το καλοκαίρι η Ελλάδα αλλά και γενικότερα η ανατολική Μεσόγειος βρίσκεται υπό την επίδραση δύο βαρομετρικών συστημάτων που

οδηγούν σε ένα κυκλικό και επαναλαμβανόμενο μετεωρολογικό μοτίβο. Από τη μια πλευρά ο μόνιμος και ημιαυτόνομος αντικυκλώνας των Αζωρών και από την άλλη οι ασθενείς θερμές αέριες μάζες της Ινδίας. Τέλος στην αρχή της άνοιξης αλλά και στην αρχή του Καλοκαιριού όπου οι άνεμοι είναι ασθενείς και η γενική κυκλοφορία επηρεάζεται αποκλειστικά από την αύρα της θάλασσας, τότε και η επίδραση των ανθρωπογενών αερολυμάτων και η αέρια μόλυνση βρίσκεται στα υψηλότερα επίπεδα της χρονιάς. Οπότε τότε και η στασιμότητα στην ατμόσφαιρα των πάσης φύσεως αερίων σωματιδίων οποιασδήποτε προέλευσης θα γίνεται εντονότερα αισθητή.

3.1 Προσδιορισμός επεισοδίων εμφάνισης σκόνης από Σαχάρα

Από τις 337 μέρες που χαρακτηρίζονται από χονδρόκοκκα σωματίδια (πιθανή ύπαρξη σκόνης), οι 79 (23%) ικανοποιούν το κριτήριο χαρακτηρισμού τους ως επεισόδια σκόνης Σαχάρας (ΕΣΣ). Μέσα στις 79 αυτές περιπτώσεις υπάρχουν και ακραία φαινόμενα εντονότατων επεισοδίων σκόνης τα οποία παρακάτω θα αποκαλούμε ως έντονα επεισόδια σκόνης. Τα επεισόδια σκόνης Σαχάρας λοιπόν έχουν μια μέση τιμή OBA_{550} (οπτικού βάθους αερολυμάτων) της τάξεως του 0.54 ± 0.21 ενώ η μέση τιμή των MM (αερολυμάτων μικρού μεγέθους) είναι 0.46 ± 0.13 . Τέλος, ο ΔΑ (δείκτης αερολυμάτων) παρουσιάζει την υψηλή τιμή του 1.11 ± 0.77 .

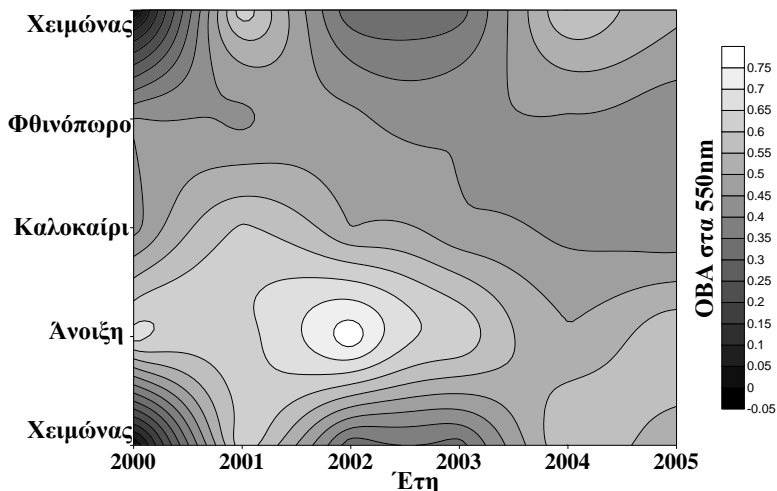
Οι υψηλότερες τιμές του OBA_{550} συνδυασμένες με τις υψηλότερες του ΔΑ ξετάστηκαν για τις περιπτώσεις των επεισοδίων σκόνης από Σαχάρα. Ειδικότερα χρησιμοποιήθηκαν τα κατώφλια $OBA_{550} > 0.6$ και $\Delta A > 1.0$. Χρησιμοποιώντας αυτό το κριτήριο, από τις 79 μέρες ΕΣΣ, μόνο οι 32 (42%) μπορούν να χαρακτηριστούν ως έντονα επεισόδια σκόνης. Σε αυτήν την περίπτωση οι μέσες τιμές των παραγόντων που εξετάζουμε μεταβάλλονται. Συγκεκριμένα το OBA_{550} γίνεται 0.79 ± 0.20 , το MM 0.51 ± 0.13 και ο ΔΑ 1.74 ± 0.76 , δηλαδή έχουμε μεγάλη σχετικά αύξηση και στους τρεις παράγοντες, πράγμα που εξηγεί και την ένταση του φαινομένου. Πρέπει να αναφερθεί εδώ ότι στα 79 ΕΣΣ οι οπισθοτροχιές δεν παρουσιάζουν σκόνη και στα τρία υψόμετρα. Αντιθέτως τα 32 επεισόδια έντονης σκόνης (ΕΕΣ) εμφανίζουν σκόνη και στα τρία υψόμετρα, δηλαδή και στα 4000 μέτρα αλλά και χαμηλότερα στα 1000 και στα 500 μέτρα. Όλα τα αποτελέσματα φαίνονται αναλυτικά στον πίνακα αυτής της μελέτης. Η συσχέτιση επίσης από την οποία προέκυψαν τα έντονα επεισόδια σκόνης (OBA_{550} με ΔΑ) δίνεται στο Σχήμα 1.



Σχήμα 1. Συσχέτιση των τιμών του οπτικού βάθους αερολυμάτων στα 550nm και του δείκτη αερολυμάτων για όλη την περίοδο των δεδομένων. Οι υψηλές τιμές του $OBA_{550} (> 0.6)$ και του $\Delta A (> 1.0)$ είναι χαρακτηριστικές για τα έντονα επεισόδια σκόνης.

3.2 Κατανομή των επεισοδίων σκόνης από Σαχάρα

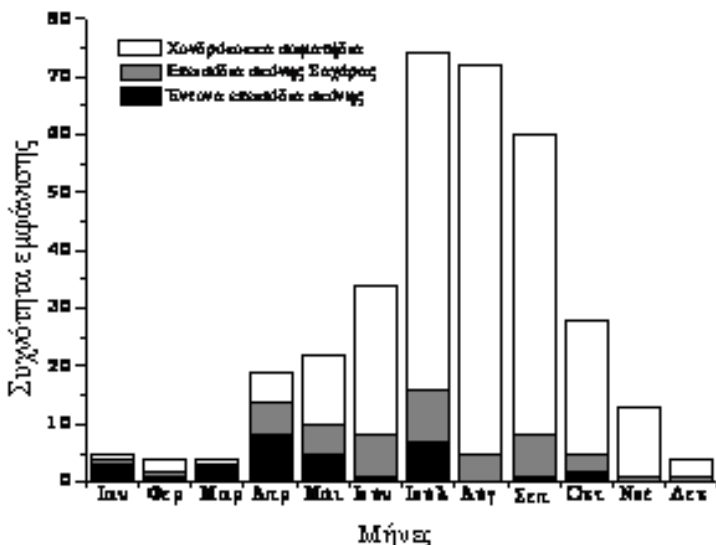
Η εποχική μεταβλητότητα των επεισοδίων σκόνης μπορεί να εξηγηθεί συνοπτικά από τις μετεωρολογικές συνθήκες που επικρατούν στην ευρύτερη περιοχή της Μεσογείου αλλά και στη βόρεια Αφρική. Έτσι, την άνοιξη στην βόρεια Αφρική λαμβάνουν χώρα πολλά κυκλωνικά φαινόμενα όπως ο κυκλώνας Sharav, όπου προκαλούν ανοδικές κινήσεις σωματιδίων σκόνης μέσα στην ατμόσφαιρα. Τα σωματίδια αυτά από την έρημο Σαχάρα (βόρεια Αφρική) κινούνται σε μεγάλες αποστάσεις με κυριότερες τις κινήσεις από δυτικά προς τα ανατολικά (Barnaba and Gobbi, 2004). Ωστόσο, η μεταφορά της σκόνης πάνω από τη Μεσόγειο παρουσιάζει μια περιοδικότητα που μας βοηθάει στον κατά προσέγγιση προσδιορισμό της διακύμανσής της μέσα στο χρόνο. Οι υψηλές τιμές του OBA_{550} την άνοιξη στην ανατολική Μεσόγειο και την Αθήνα ειδικότερα επαληθεύονται από την ύπαρξη καταγεγραμμένων έντονων επεισοδίων σκόνης με προέλευση από την έρημο της Σαχάρας. Η εποχική διακύμανση του OBA_{550} για όλη την περίοδο των μετρήσεων φαίνεται στο Σχήμα 2 όπου και παρατηρείται καθαρά πως οι υψηλότερες τιμές εμφανίζονται την άνοιξη.



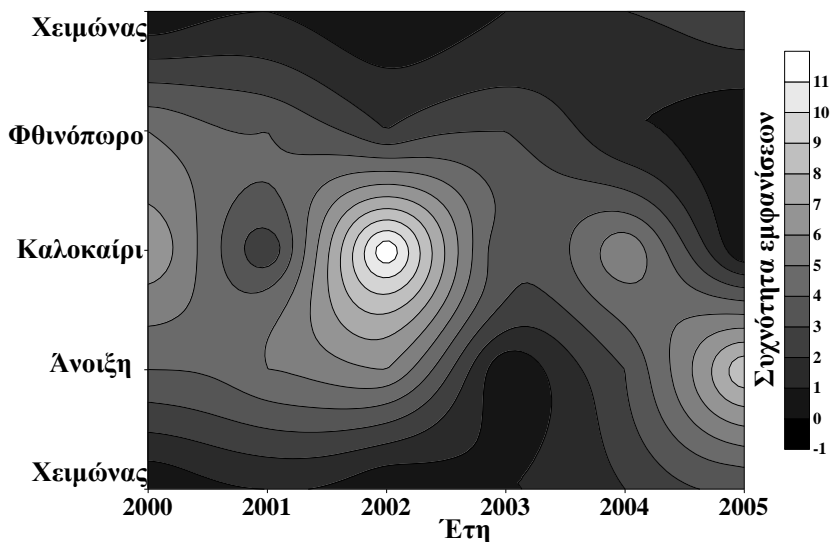
Σχήμα 2. Εποχική διακύμανση του οπτικού βάθους αερολυμάτων στα 550nm των χονδρόκοκκων σωματιδίων για την περίοδο 2000-2005.

Η μηνιαία μεταβλητότητα των χονδρόκοκκων σωματιδίων, των επεισοδίων σκόνης από τη Σαχάρα και των έντονων επεισοδίων σκόνης φαίνεται στο Σχήμα 3. Είναι προφανές ότι κατά τη διάρκεια του χειμώνα και την άνοιξης το μεγαλύτερο ποσοστό των χονδρόκοκκων σωματιδίων αντιστοιχεί και σε επεισόδια σκόνης, ενώ αντίθετα τους καλοκαιρινούς μήνες συμβαίνει ακριβώς το αντίστροφο. Έχει βρεθεί ότι το καλοκαίρι και συγκεκριμένα τον Αύγουστο, η πλειοψηφία των χονδρόκοκκων σωματιδίων προέρχεται από αέριες μάζες που έρχονται από τα βόρεια και σηκώνουν θαλάσσια σωματίδια κατά το πέρασμά τους από το βόρειο Αιγαίο πέλαγος. Αντιθέτως το χειμώνα σχεδόν όλες οι περιπτώσεις χονδρόκοκκων σωματιδίων χαρακτηρίζουν και καθαρά επεισόδια σκόνης. Την περίοδο την άνοιξης και του καλοκαιριού τώρα και ειδικότερα τον Απρίλιο, τον Μάιο και τον Ιούλιο έχουμε τη μεγαλύτερη συγκέντρωση έντονων επεισοδίων σκόνης στην ατμόσφαιρα την Αθήνας. Αυτό το φαινόμενο οδηγείται από τις μετεωρολογικές συνθήκες αυτής της περιόδου. Δηλαδή οι γενικές κατευθύνσεις των αερίων μαζών έρχονται από τις νοτιοδυτικές περιοχές, οπότε και από την έρημο Σαχάρα. Οι αρχές του φθινοπώρου μπορούν να χαρακτηριστούν επίσης ως περίοδοι αρκετών αερίων μεταφορών σκόνης. Πρέπει να αναφερθεί τέλος ότι συνήθως η διάρκεια των επεισοδίων σκόνης διαρκεί από μια μέχρι και τέσσερις ημέρες. Η εποχική διακύμανση των επεισοδίων σκόνης για όλη την περίοδο των δεδομένων περιγράφεται στο Σχήμα 4. Τα

μέγιστα που εμφανίζονται το καλοκαίρι του 2003 και την άνοιξη του 2005 αποτελούν έντονα επεισόδια σκόνης, αλλά πάντως η γενική διακύμανση δείχνει ότι τα επεισόδια σκόνης ξεκινούν την άνοιξη, διαρκούν όλο το καλοκαίρι και καταλήγουν το φθινόπωρο.



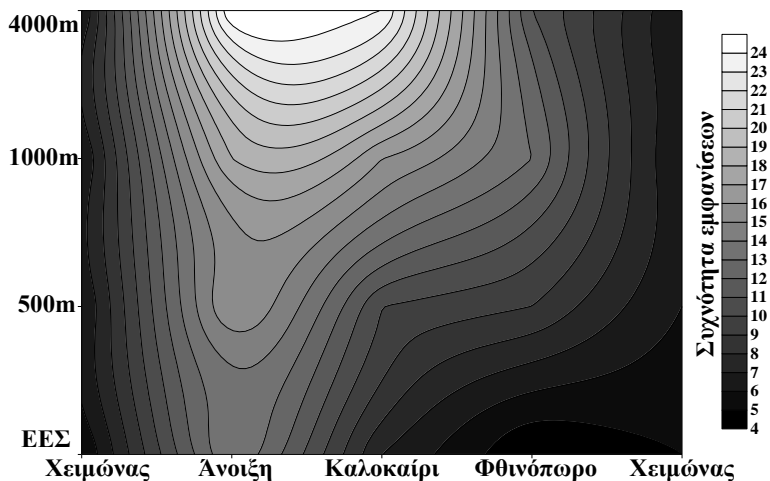
Σχήμα 3. Μηνιαία μεταβολή των εμφανίσεων των χονδρόκοκκων σωματιδίων (άσπρο χρώμα), των επεισοδίων σκόνης από τη Σαχάρα (γκρι χρώμα) και των έντονων επεισοδίων σκόνης στην ατμόσφαιρα της Αθήνας για την περίοδο 2000-2005. Τα έντονα επεισόδια σκόνης αναφέρονται σε $OBA550 > 0.6$ και σε $\Delta A > 1.0$.



Σχήμα 4. Εποχική διακύμανση της συχνότητας των εμφανίσεων των επεισοδίων σκόνης από τη Σαχάρα για την περίοδο 2000-2005.

3.3 Ανάλυση οπισθοτροχιών

Οι οπισθοτροχιές υπολογίστηκαν για όλες τις περιπτώσεις επεισοδίων σκόνης μέσα στην περίοδο από το 2000 ως το 2005. Για αυτές τις 79 περιπτώσεις αναλύθηκαν οι πορείες των αερίων μαζών στα τρία υψόμετρα που προκαθορίσαμε. Βρέθηκε λοιπόν πως οι δυτικές και οι νοτιοδυτικές περιοχές, όπως είναι η Αλγερία, είναι χαρακτηριστικές για τη μεταφορά αερίων μαζών στην ελεύθερη τροπόσφαιρα (4000 μέτρα) κατά τη διάρκεια των επεισοδίων σκόνης. Από την άλλη μεριά οι αέριες μάζες που καταλήγουν στην Αθήνα και που περιέχουν σκόνη στα χαμηλότερα υψόμετρα, έχουν ανυψωθεί ανατολικότερα στη Λιβύη, και σαν αποτέλεσμα οι νοτιότερες περιοχές κρατούν το μεγαλύτερο ποσοστό σκόνης. Έτσι στην Αθήνα, οι αέριες αυτές μάζες φτάνουν με μικρά ποσοστά σκόνης μέσα τους. Η μεγάλη συχνότητα των επεισοδίων σκόνης κατά τις θερμές περιόδους είναι κυρίως συνδεδεμένη με τη συνοπτική μετεωρολογική κατάσταση που επικρατεί στην Ελλάδα, όπου κατά τις θερμότερες περιόδους, οι αέριες μάζες έρχονται από τα νοτιοδυτικά την ίδια στιγμή που και τα επεισόδια σκόνης είναι συχνότερα. Στο Σχήμα 5 παριστάνεται η εποχική κατανομή της συχνότητας των εμφανίσεων των επεισοδίων σκόνης με βάση το ύψος των οπισθοτροχιών των εκάστοτε αερίων μαζών. Τα ύψη αυτά καλύπτουν τόσο το στρώμα εμφάνισης σκόνης πάνω από την Αθήνα (4000 m), όσο και τα εγγύτερα στρώματα προς στην επιφάνεια. Δείχνουμε επιπλέον και τις περιπτώσεις που η ύπαρξη σκόνης υψίσταται στα τρία υψόμετρα, δηλαδή έχουμε περιπτώσεις έντονων επεισοδίων σκόνης. Φαίνεται ξεκάθαρα ότι καθώς οι αέριες μάζες πλησιάζουν στα 4000 μέτρα, που όπως έχουμε αναφέρει είναι το στρώμα εμφάνισης επεισοδίων σκόνης, η συχνότητά τους είναι πολύ μεγαλύτερη. Μια ακόμα πληροφορία που λαμβάνουμε από το ίδιο Σχήμα είναι ότι σε γενικές γραμμές τα επεισόδια σκόνης επικεντρώνονται την άνοιξη και εξαπλώνονται το καλοκαίρι και το φθινόπωρο. Τέλος, στις περιπτώσεις που και στα τρία υψόμετρα έχουμε σκόνη, το μέγιστο των εμφανίσεων βρίσκεται πάλι την άνοιξη κάτι που επαληθεύει αλλά και μαρτυρεί την εποχή με τις ιδανικότερες συνθήκες για τη μεταφορά σκόνης από την έρημο Σαχάρα στην Αθήνα.



Σχήμα 5. Εποχική κατανομή της συχνότητας των εμφανίσεων των επεισοδίων σκόνης με βάση το ύψος των οπισθοτροχιών των εκάστοτε αερίων μαζών. Τα ύψη αυτά καλύπτουν τόσο το στρώμα εμφάνισης σκόνης πάνω από την Αθήνα, όσο και τα εγγύτερα στρώματα προς στην επιφάνεια. Με την έννοια 'ΕΕΣ' συμβολίζουμε την ύπαρξη σκόνης και στα τρία υψόμετρα, δηλαδή έχουμε περιπτώσεις έντονων επεισοδίων σκόνης.

4. Συμπεράσματα

Χρησιμοποιώντας δεδομένα δορυφορικής προέλευσης αλλά και με τη βοήθεια του μοντέλου HYSPLIT μπορέσαμε και μελετήσαμε με αρκετή ακρίβεια τους μηχανισμούς, τις χρονικές διακυμάνσεις και τις κλιματολογικές παραμέτρους των επεισοδίων σκόνης από τη Σαχάρα. Εκμεταλλευόμενοι τις παραμέτρους του οπτικού βάθους αερολυμάτων στα 550 nm και το ποσοστό των μικρών σωματιδίων φτάσαμε στο διαχωρισμό των χονδρόκοκκων σωματιδίων για την περίοδο 2000-2005. Από τις περιπτώσεις αυτές, και με την παρατήρηση των οπισθοτροχιών καταλήξαμε στα επεισόδια σκόνης που η προέλευσή τους είναι από την έρημο Σαχάρα. Τα επεισόδια αυτά λαμβάνουν χώρα κυρίως την άνοιξη σε όλη την ανατολική Μεσόγειο και επεκτείνονται το καλοκαίρι αλλά και το φθινόπωρο. Το κύριο ύψος εμφάνισης της σκόνης στην ατμόσφαιρα της Αθήνας είναι τα 4000 μέτρα. Οι περιπτώσεις όπου η σκόνη εμφανίζεται σε όλα τα υψόμετρα αποτελούν τα έντονα επεισόδια σκόνης που χαρακτηρίζονται από υψηλές τιμές OBA₅₅₀ και ΔΑ (δείκτη αερολυμάτων). Τόσο τα χονδρόκοκκα σωματίδια, όσο τα επεισόδια σκόνης αλλά και τα έντονα επεισόδια σκόνης μελετήθηκαν για την ετήσια, την εποχική αλλά και τη μηνιαία μεταβλητότητά τους. Έτσι, τους καλοκαιρινούς μήνες επικρατούν τα χονδρόκοκκα σωματίδια, την άνοιξη και ιδιαίτερα τον Απρίλιο και Μάιο έχουμε την πλειοψηφία των έντονων επεισοδίων σκόνης και στην περίοδο από άνοιξη μέχρι και φθινόπωρο εμφανίζονται τα επεισόδια σκόνης από τη Σαχάρα.

Βιβλιογραφία

- Ahmad S.P., P.F. Levelt, P.K. Bhartia, E. Hilsenrath, G.W. Leppelmeier and J.E. Johnson, 2003: *Atmospheric Products* from the Ozone Monitoring Instrument (OMI). Proceedings of SPIE conference on Earth Observing Systems VIII, Volume 5151, pp 619630. (http://acdisc.gsfc.nasa.gov/ozone/docs/omispie_2003.doc)
- Alpert P., Y. Kaufman, Y. Shay-El, D. Tanrè, A. da Silva, S. Schubert and J. Joseph, 1998: Quantification of dust-forced heating of the lower troposphere. *Nature*, 395, 367-370
- Balis D.S., V. Amiridis, S. Nickovic, A. Papayannis and C.S. Zerefos, 2004: Optical properties of Saharan dust layers as detected by a Raman lidar at Thessaloniki, Greece. *Geophysical Research Letters*, 31 L13104, doi: 10.1029/2004GL019881.
- Barnaba F. and G.P. Gobbi, 2004: Aerosol seasonal variability over the Mediterranean region and relative impact of maritime, continental and Saharan dust particles over the basin from MODIS data in the year 200. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 4, 2367-2391.
- Draxler R.R. and G.D. Rolph, 2003: HYSPLIT (Hybrid single-particle Lagrangian Integrated Trajectory) model, <http://www.arl.noaa.gov/ready/hysplit4.html>, NOAA Air Resources Laboratory, Silver, Spring, MD.
- Dubovik O., B.N. Holben, T.F. Eck, A. Smirnov, Y.J. Kaufman, M.D. King, D. Tanrè and I. Slutsker, 2002: Variability of absorption and optical properties of key aerosol types observed in worldwide locations. *Journal of Atmospheric Sciences*, 59, 590-608.
- Kambezidis H.D., R. Tulleken, G.T. Amanatidis, A.G. Paliatsos and D.N. Asimakopoulos, 1995: Statistical evaluation of selected air pollutants in Athens, Greece. *Environmetrics*, 6, 349-361.
- Kaskaoutis D.G., H.D. Kambezidis, N. Hatzianastassiou, P. Kosmopoulos and Badarinath K.V.S., 2007: Aerosol climatology: On the discrimination of the aerosol types over four AERONET sites. *Atmospheric Chemistry and Physics*, Discuss, (submitted).
- Masmoudi M., M. Chaabane, D. Tanré, P. Gouloup, L. Blarel and F. Elleuch, 2003: Spatial and temporal variability of aerosol: size distribution and optical properties. *Atmospheric Research*, 66, 1-19.

Moulin C., C.E., Lambert, U. Dayan, et al., 1998: Satellite climatology of African dust transport in Mediterranean atmosphere. *Journal of Geophysical Research*, 103, 13137-13144.

Pandis S., A. Wexler and J. Seinfeld, 1995: Dynamics of tropospheric aerosol. *Journal of Physics and Chemistry*, 99, 9646-9659.

Papayannis A., D. Balis, V. Amiridis, G. Chourdakis, G. Tsaknakis, C.S. Zerefos, A.D.A. Castanho, S. Nickovic, S. Kazadzis and J. Grabowski, 2005: Measurements of Saharan dust aerosols over the Eastern Mediterranean using elastic backscatter-Raman lidar, spectrophotometric and satellite observations in the frame of the EARLINET project. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 5, 2065-2079.

Quijano A., I.N. Sokolik and O.B. Toon, 2000: Radiative heating rates and direct radiative forcing by mineral dust in cloudy atmospheric conditions. *Journal of Geophysical Research*, 105, 12207-12219.

Remer L.A. and Y.J. Kaufman, 1998: Dynamic aerosol model: urban/industrial aerosol. *Journal of Geophysical Research*, 103, 13859-13871.

Smirnov A., B.N. Holben, Y.J. Kaufman, O. Dubovic, T.F. Eck, I. Slutsker, C. Pietras and R.N. Halthore, 2002: Optical properties of atmospheric aerosol in Maritime Environments. *Journal of Atmospheric Sciences*, 59, 501-523.

Sokolik I.N. and O.B. Toon, 1999: Incorporation of mineralogical composition into models of the radiative properties of mineral aerosol from UV to IR wavelengths. *Journal of Geophysical Research*, 104, 9423-9444.