

ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΕΠΟΧΙΑΚΩΝ ΚΑΙ ΕΤΗΣΙΩΝ ΠΟΣΩΝ ΕΝΑΠΟΘΕΣΗΣ ΣΚΟΝΗΣ ΑΠΟ ΤΗ ΣΑΧΑΡΑ ΣΤΗ ΜΕΣΟΓΕΙΟ ΚΑΙ ΤΗΝ ΕΥΡΩΠΗ

Κατσαφάδος Π.¹, Κάλλος Γ.², Σπύρου Χ.², Παπαδόπουλος Α.³

¹*Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο Αθηνών, Τμήμα Γεωγραφίας*

²*Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Τμήμα Φυσικής, Τομέας Φυσικής Εφαρμογών*

³*Ελληνικό Κέντρο Θαλασσίων Ερευνών, Ινστιτούτο Εσωτερικών Υδάτων*

Περίληψη

Η έρημος Σαχάρα αποτελεί τη σημαντικότερη περιοχή παραγωγής σκόνης. Η σκόνη φυσικής προέλευσης, η οποία παράγεται από αιολική διάβρωση ερημικών και ημι-ερημικών εκτάσεων, μπορεί διερχόμενη πάνω από τη Μεσόγειο Θάλασσα να επηρεάσει την ποιότητα του αέρα στην Ευρωπαϊκή ήπειρο. Τα ποσά εναπόθεσης σκόνης φυσικής προέλευσης στην επιφάνεια της Γης βρίσκονται σε αναλογία με την εποχιακή μεταβλητότητα του κύκλου της σκόνης στην ατμόσφαιρα. Το μέγεθος και η γεωγραφική κατανομή της εναπόθεσης σκόνης σε χερσαίες και θαλάσσιες επιφάνειες της ευρύτερης περιοχής της Μεσογείου μπορεί να ποικίλει σημαντικά λόγω του περιορισμένου δικτύου μετρητικών σταθμών. Στη συγκεκριμένη μελέτη εκτιμάται και αναλύεται η μάζα σκόνης από τη Σαχάρα που εναποτίθεται στη Μεσόγειο Θάλασσα και την Ευρωπαϊκή ήπειρο σε εποχιακή και ετήσια βάση, όπως αυτή έχει προσομοιωθεί από το σύστημα πρόγνωσης καιρού Σκίρων σε πλήρη σύζευξη με ένα μοντέλο προσομοίωσης του κύκλου της σκόνης. Το συγκεκριμένο μοντέλο περιλαμβάνει το σύνολο των παραμετροποιήσεων του κύκλου της σκόνης στην ατμόσφαιρα, όπως παραγωγή, διάχυση, μεταφορά και εναπόθεση ανάλογα με το μέγεθος της κατανομής των σωματιδίων. Το σύστημα Σκίρων βρίσκεται σε επιχειρησιακή λειτουργία από το 1998 παρέχοντας προγνώσεις 72 ωρών για την ευρύτερη περιοχή της Μεσογείου (<http://forecast.uoa.gr>). Οι πιο πρόσφατες τροποποιήσεις που αφορούν στον καθορισμό των πηγών και το μηχανισμό παραγωγής σκόνης, βελτίωσαν την προγνωστική ικανότητα του συστήματος και συνεπώς την ακρίβεια στην περιγραφή του κύκλου της σκόνης στην ατμόσφαιρα. Βασικοί μηχανισμοί απομάκρυνσης της σκόνης από το ατμοσφαιρικό περιβάλλον αποτελούν η κατακρήση λόγω βαρύτητας, η τυρβώδης ανάμιξη και ο υετός. Με βάση τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων του συστήματος Σκίρων εκτιμήθηκαν ξεχωριστά τα ποσά της ξηρής και υγρής εναπόθεσης στη Μεσόγειο Θάλασσα και την Ευρώπη για χρονική περίοδο 5 ετών (2000-2004). Η συνολική εναπόθεση σκόνης για την συγκεκριμένη περίοδο είναι της τάξης των 18*106 τόννων στην Ευρώπη ενώ στη Μεσόγειο Θάλασσα εκτιμήθηκε σε 28*106 τόννους.

GEOGRAPHICAL DISTRIBUTION OF SEASONAL AND ANNUAL AMOUNTS OF SAHARAN DUST DEPOSITION OVER MEDITERRANEAN AND EUROPE

Katsafados P.¹, Kallos G.², Spyrou C.², Papadopoulos A.³

¹*Harokopio University of Athens, Department of Geography.*

²*National and Kapodistrian University of Athens, Department of Physics, Division of Applied Physics.*

³*Hellenic Centre for Marine Research, Institute of Inland Waters.*

Abstract

Sahara desert is the most important dust source area worldwide. Mineral dust, produced by wind erosion over arid and semi-arid areas, may transport away to Mediterranean affecting the air quality in most of the European continent. The dust amounts deposited on the surface are in proportion to the seasonal variability of the dust cycle in the atmosphere.

The magnitude and the geographical distribution of the mineral dust deposited over land and sea surfaces of the Mediterranean basin may exhibit considerably variations due to the sparse network of monitoring stations. In this study, Saharan dust mass deposited over Mediterranean Sea and Europe is estimated and analyzed on seasonal and annual basis with the use of Skiron atmospheric system fully coupled with a dust cycle module. This module incorporates the state of the art parameterizations of all the major phases of the atmospheric dust life such as production, diffusion, advection and removal related to particle size distribution. Skiron system is in operational use since 1998 providing 72-hour forecasts for the Mediterranean region (<http://forecast.uoa.gr>). Latest modifications concerning the definition of the dust sources and the dust production mechanism enhance the forecast skill of the system to predict with a satisfactory accuracy the dust cycle in the atmosphere. Since dust is removed from the atmosphere due to mechanisms such as gravitational settling, turbulent mixing and/or precipitation rates, dry and wet dust deposition are estimated. Based on Skiron system simulations, the amounts of dry and wet deposition over Mediterranean Sea and Europe are discernibly estimated for a 5 year period (2000-2004). The model-estimated Saharan dust deposited over Europe during this entire period is at the order of $18 \cdot 10^6$ tons, while $28 \cdot 10^6$ tons are deposited over Mediterranean Sea.

Λέξεις κλειδιά: Σκόνη από τη Σαχάρα, εναπόθεση σκόνης, σύστημα Σκίρων, κύκλος της σκόνης, Μεσόγειος Θάλασσα.

Key words: Saharan dust, dust deposition, Skiron system, dust cycle, Mediterranean Sea.

1. Εισαγωγή

Η σκόνη φυσικής προέλευσης που προέρχεται από ερημικές και ημιερημικές περιοχές της Βόρειας Αφρικής μπορεί κάτω από κατάλληλες συνοπτικές συνθήκες καιρού να μεταφερθεί σε μεγάλες αποστάσεις προς τη Μέση Ανατολή, τη Μεσόγειο, την Ευρώπη ή ακόμα και να διαπεράσει τον Ατλαντικό Ωκεανό (Kallou et al., 2005). Τα σωματίδια της σκόνης εμφανίζουν σημαντικές επιδράσεις σε ένα εύρος κλιμάκων επηρεάζοντας το ατμοσφαιρικό περιβάλλον και τα κλιματικά χαρακτηριστικά των περιοχών καθώς και την υγεία των πληθυσμών. Σκεδάζοντας και απορροφώντας μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας, η σκόνη μεταβάλλει την ανακλαστικότητα στα διάφορα ατμοσφαιρικά στρώματα και μειώνει το ποσό της μικρού μήκους κύματος ακτινοβολίας που φτάνει στην επιφάνεια της Γης (άμεσες επιδράσεις, Charlson et al., 1991). Έμμεσα τα σωματίδια σκόνης δρουν ως πυρήνες συμπύκνωσης (Cloud Condensation Nuclei-CCN) τροποποιώντας τα μικροφυσικά και μικροχημικά χαρακτηριστικά των νεφών και συνεπώς τις οπτικές ιδιότητες και την ακτινοβολία τους (Jones et al., 1994).

Τα ποσά της σκόνης που εναποτίθενται στην επιφάνεια της Γης εμφανίζουν εποχιακή μεταβλητότητα όπως και ο κύκλος της σκόνης στην ατμόσφαιρα. Αναλύσεις επίγειων και δορυφορικών παρατηρήσεων σε συνδυασμό με προσομοιώσεις μοντέλων προσφέρουν πολύτιμη πληροφορία σχετικά με τη χωροχρονική μεταβλητότητα της εναπόθεσης σκόνης. Η έλλειψη ικανού δείγματος παρατηρήσεων οδηγεί στην αποκλειστική χρήση αριθμητικών



Σχήμα 1. Η περιοχή ολοκλήρωσης του μοντέλου. Τα γράμματα W, Cs, Cn, και E δηλώνουν τη Δυτική, Κεντρική-Νότια, Κεντρική-Βόρεια και Ανατολική υποπεριοχή της Μεσογείου αντίστοιχα ενώ η σύντμηση Eu αντιστοιχεί στην περιοχή της Ευρώπης.

προσομοιώσεων του κύκλου της σκόνης στην ατμόσφαιρα με σκοπό την αποτύπωση του μεγέθους και της χωροχρονικής κατανομής του ποσού της σκόνης που εναποτίθεται στην επιφάνεια της Γης. Στη συγκεκριμένη μελέτη εφαρμόστηκε το σύστημα πρόγνωσης καιρού Σκίρων σε πλήρη σύζευξη με ένα μοντέλο προσομοίωσης του κύκλου της σκόνης στην ατμόσφαιρα (Nickovic et al., 2001, Papadopoulos et al., 2002, Kallos et al., 2005) με σκοπό την εκτίμηση των ποσοτήτων ξηρής και υγρής εναπόθεσης σκόνης στη Μεσόγειο Θάλασσα και την Ευρώπη για χρονική περίοδο 5 ετών (2000-2004). Το συγκεκριμένο σύστημα αναπτύχθηκε στο Πανεπιστήμιο της Αθήνας στο πλαίσιο διαφόρων Ευρωπαϊκών ερευνητικών προγραμμάτων (MEDUSE, ADIOS) και περιλαμβάνει πλήθος σχημάτων και παραμετροποιήσεων για την προσομοίωση της παραγωγής, της μεταφοράς και της ξηρής και υγρής εναπόθεσης των σωματιδίων σκόνης. Το σύστημα Σκίρων αποτέλεσε ένα από τα βασικά προγνωστικά συστήματα καιρού και σκόνης κατά τη διάρκεια των Ολυμπιακών Αγώνων της Αθήνας και εντάχθηκε σε ένα ευρύτερο σύστημα προειδοποίησης και διαχείρισης ακραίων καιρικών φαινομένων από την Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία και τη Γενική Γραμματεία Πολιτικής Προστασίας. Οι επιχειρησιακές δυνατότητες του συστήματος έχουν επίσης αξιολογηθεί στο πλαίσιο του ερευνητικού προγράμματος AUTOHAZARD-PRO για την πρόγνωση και τη διαχείριση πλημμυρών και δασικών πυρκαγιών σε πραγματικό χρόνο. Το σύστημα Σκίρων εξακολουθεί και διαθέτει υπηρεσίες σε πλήρη επιχειρησιακή βάση προσφέροντας προγνωστική πληροφορία σε οποιαδήποτε μορφή (προγνωστικοί χάρτες, διδιάστατα-τριδιάστατα δεδομένα σε μορφοποιήσεις ascii, binary, grib, netcdf) από τη σελίδα (<http://forecast.uoa.gr/dustindx.html>).

2. Χαρακτηριστικά προσομοιώσεων και μεθοδολογία

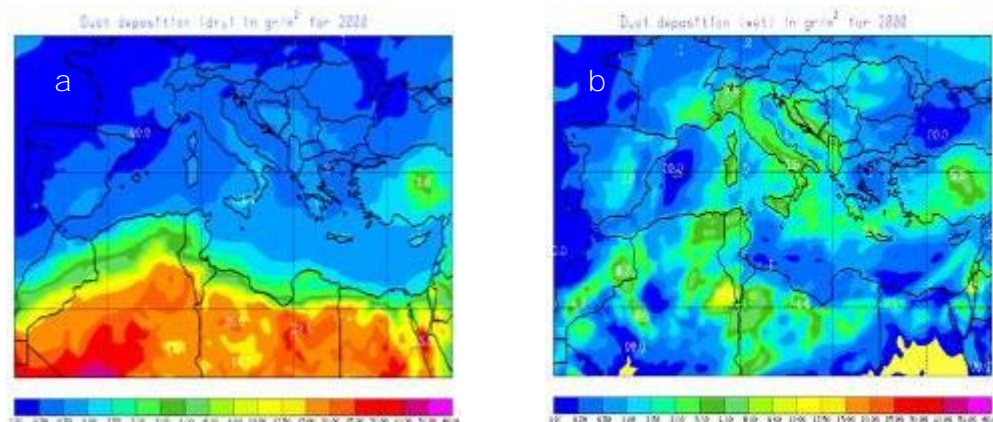
Για την εκτίμηση των ποσοτήτων σκόνης από τη Σαχάρα που εναποτίθενται στη Μεσόγειο και την Ευρώπη, το σύστημα Σκίρων εφαρμόστηκε για μία εκτεταμένη περιοχή που καλύπτει τη Βόρεια Αφρική, τη Μεσόγειο καθώς και τη Νότια Ευρώπη και τη Μέση Ανατολή. Η συγκεκριμένη περιοχή έχει χωριστεί σε 5 υποπεριοχές με σκοπό την αναλυτικότερη χωρική κατανομή σκόνης που διέρχεται από τη Μεσόγειο. Ειδικότερα, οι περιοχές αναφέρονται ως (Eu) Ευρώπη, (W) Δυτική Μεσόγειος, (E) Ανατολική Μεσόγειος, (Cn) Κεντρική-Βόρεια Μεσόγειος και (Cs) Κεντρική-Νότια Μεσόγειος και απεικονίζονται στο Σχήμα 1. Το σύστημα Σκίρων εφαρμόστηκε για την περιοχή ολοκλήρωσης που παρουσιάζεται στο Σχήμα 1 με οριζόντια ανάλυση πλέγματος $0.24^{\circ} \times 0.24^{\circ}$ και κατακόρυφη διακριτοποίηση σε 32 ασύμμετρα επίπεδα από την επιφάνεια μέχρι τα 15800 μέτρα (πάνω από την τροπόπαυση). Κάθε σημείο πλέγματος θεωρήθηκε ως αντιπροσωπευτικό της περιοχής που καλύπτει και ο υπολογισμός της ξηρής και υγρής εναπόθεσης σκόνης εφαρμόστηκε για όλα τα σημεία του πλέγματος που ανήκουν στην περιοχή ολοκλήρωσης. Για την εκτίμηση των ποσοτήτων σκόνης στις 5 υποπεριοχές λήφθηκαν υπόψη γεωγραφικά κριτήρια ώστε να εντοπιστούν τα σημεία πλέγματος που ανήκουν σε κάθε υποπεριοχή. Συνεπώς κάθε σημείο πλέγματος με βάση το γεωγραφικό μήκος και πλάτος του, κατατάχθηκε σε μία από τις παραπάνω υποπεριοχές. Η εναπόθεση που υπολογιζόταν κάθε φορά για το συγκεκριμένο σημείο αθροίστηκε μαζί με τις αντίστοιχες από τα υπόλοιπα σημεία στην επίσης αντίστοιχη υποπεριοχή. Χρησιμοποιώντας τις πρώτες 24 ώρες πρόγνωσης του συστήματος Σκίρων εκτιμήθηκε η γεωγραφική κατανομή της συνολικής μάζας σωματιδίων σκόνης που εναποτίθεται στην επιφάνεια σε μηνιαία βάση κατά την περίοδο Ιανουάριος 2000 - Δεκέμβριος 2004 (συνολικά 60 μήνες). Καθώς το μοντέλο έχει τη δυνατότητα εκτίμησης της ξηρής και υγρής εναπόθεσης ως διακριτές συνιστώσες του κύκλου της σκόνης στην ατμόσφαιρα, οι κλιματικές τιμές προέκυψαν από την άθροιση των συγκεκριμένων συνιστώσεων για κάθε 24ωρο στο σύνολο των 60 μηνών. Τα πρώτα 3 έτη οι υπολογισμοί προέκυψαν από προσομοιώσεις του συστήματος με θεώρηση 1 μεγέθους σωματιδίου σκόνης ενώ τα 2 επόμενα έτη χρησιμοποιείται η αναβαθμισμένη έκδοση του μοντέλου που προσομοιώνει 4 κλάσεις σωματιδίων σκόνης (Πίνακας 1).

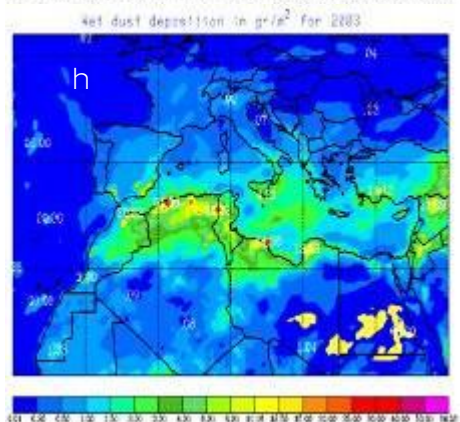
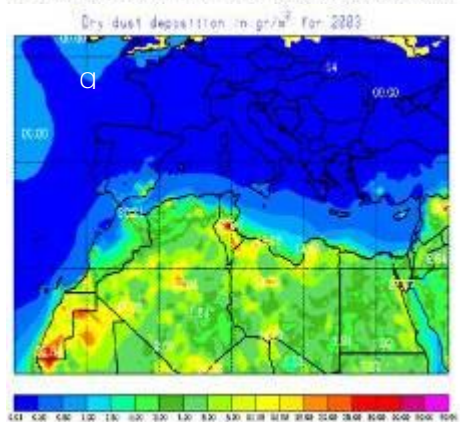
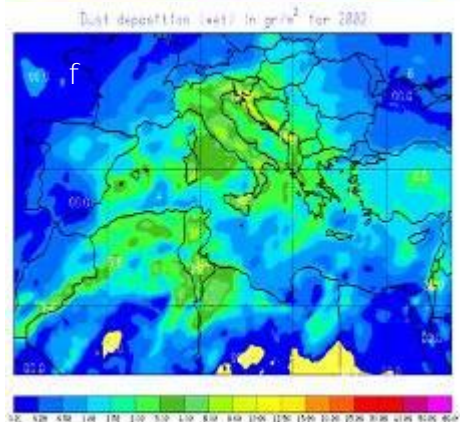
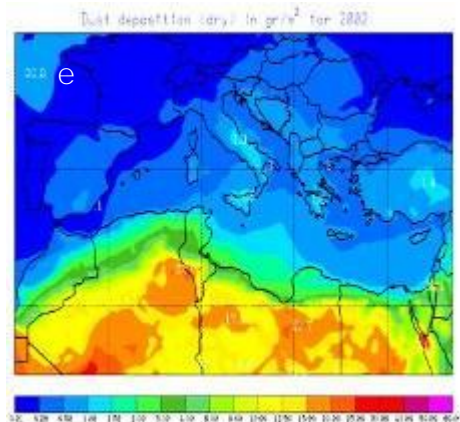
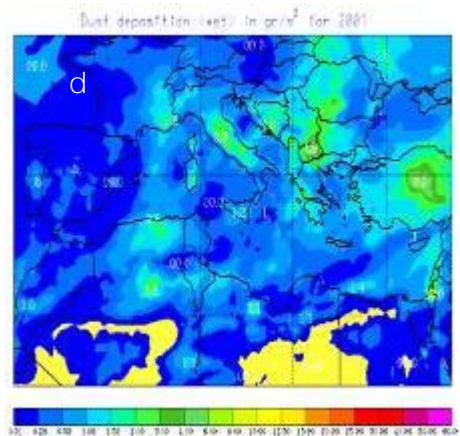
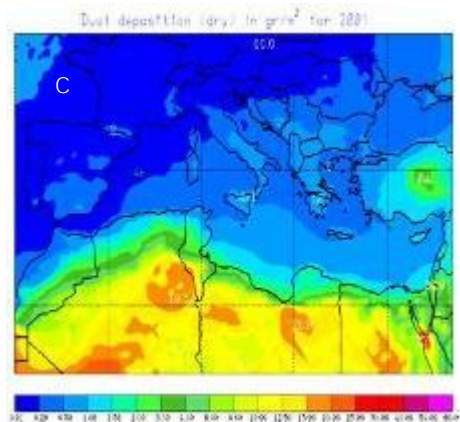
Πίνακας 1. Κλάσεις σωματιδίων σκόνης. Καταγράφονται επίσης το είδος, η ακτίνα και η πυκνότητα των σωματιδίων (Nickovic et al., 2001)

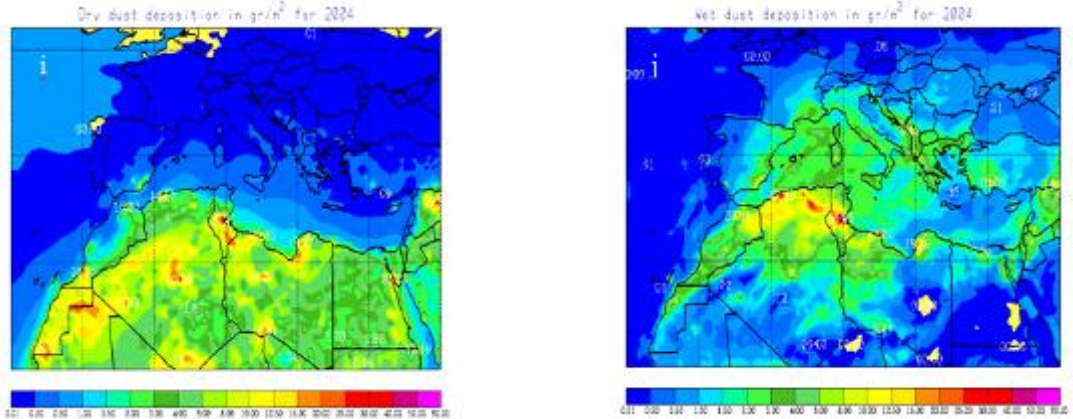
κ	Είδος	Τυπική Ακτίνα R_k (μm)	Πυκνότητα ρ_k (g/cm^3)
1	πηλός (clay)	0.73	2.50
2	ιλύς, μικρή (silt, small)	6.10	2.65
3	ιλύς, μεγάλη (silt, large)	18.00	2.65
4	άμμος (sand)	38.00	2.65

3. Εκτίμηση των ετήσιων και εποχιακών ποσοτήτων σκόνης

Η γεωγραφική κατανομή της ξηρής και υγρής εναπόθεσης σε μονάδες μάζας ανά μονάδα επιφάνειας (gr/m^2) για το έτος 2000 απεικονίζεται στα Σχήματα 2a και 2b αντίστοιχα. Ανάλογα στα Σχήματα 2c έως 2j, για τα έτη 2001, 2002, 2003 και 2004. Τα δεδομένα των σχημάτων προέρχονται από τις πρώτες 24 ώρες πρόγνωσης του μοντέλου Σκίρων ακολουθώντας τη μεθοδολογία που έχει περιγραφεί στην παράγραφο (2) ενώ η γεωγραφική κατανομή των προγνωστικών δεδομένων έχει οπτικοποιηθεί μέσω του πακέτου NCAR Graphics. Με βάση τα συγκεκριμένα αποτελέσματα είναι φανερό πως τα ποσά σκόνης που εναποτίθενται στην Ευρώπη και τη Μεσόγειο εμφανίζουν σημαντική ετήσια διακύμανση που οφείλεται κυρίως στις συνοπτικές συνθήκες ατμοσφαιρικής κυκλοφορίας καθώς και στα κλιματικά χαρακτηριστικά των περιοχών. Η ένταση και η συχνότητα επεισοδίων σκόνης από τη Σαχάρα επηρεάζουν την ετήσια εναπόθεση καθώς η μάζα που εναποτίθεται κατά τη διάρκεια ενός μόνο επεισοδίου σε μία περιοχή μπορεί να μεταβάλλει σημαντικά τις αντίστοιχες ποσότητες σε μηνιαία και ετήσια βάση για τη συγκεκριμένη περιοχή. Η γεωγραφική κατανομή της εναπόθεσης εμφανίζει επίσης τις περιοχές που δέχονται τα σημαντικότερα ποσά σκόνης από τη Σαχάρα. Το έτος 2000 η μεγαλύτερη μάζα σκόνης εναποτέθηκε στην Ευρώπη με τοπικό μέγιστο τη Νότια Ιταλία κυρίως από συνεισφορά της υγρής εναπόθεσης (Σχήμα 2a και 2b). Το 2001 οι ποσότητες σκόνης στην Ευρώπη (όπως επίσης και στη Βόρεια Αφρική) εμφανίζονται μειωμένες με τα τοπικά μέγιστα να τοποθετούνται ανατολικότερα (Σχήμα 2c και 2d). Συνολικά οι περιοχές της ΝοτιοΑνατολικής Ιβηρικής, της Νότιας Ιταλίας καθώς και η ΝοτιοΔυτική Ελλάδα με την Κρήτη και την Κύπρο είναι οι περιοχές της Μεσογείου που εμφανίζουν τα σημαντικότερα ποσά εναπόθεσης. Αξίζει πάντως να σημειωθεί πως ο υψηλός βαθμός χωροχρονικής μεταβλητότητας των ποσοτήτων εναπόθεσης σε συνδυασμό με τη ραγδιαιότητα των επεισοδίων σκόνης εγείρουν αβεβαιότητες σχετικά με τον ακριβή εντοπισμό και το μέγεθος των μεγίστων και σε κάθε περίπτωση απαιτούνται χρονοσειρές μεγαλύτερης διάρκειας για την εξαγωγή οριστικών συμπερασμάτων.

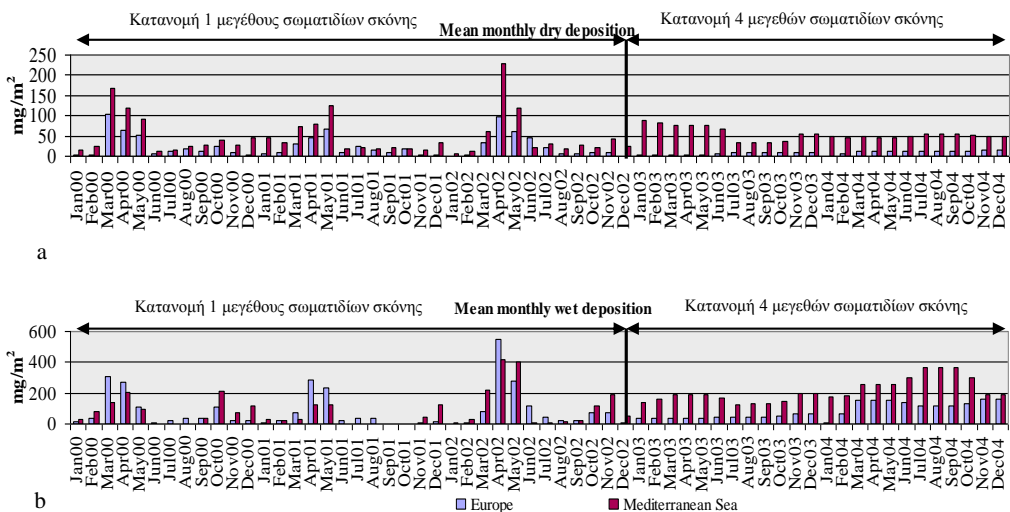






Σχήμα 2. Γεωγραφική κατανομή μέσης ετήσιας εναπόθεσης (ξηρής και υγρής) σκόνης από τη Σαχάρα για την περίοδο 2000-2004 (κλίμακα 0-60 gr/m^2). Τα σχήματα δημιουργήθηκαν με το πακέτο NCAR Graphics (4-4-2).

Τα Σχήματα 3α και 3β απεικονίζουν τα διαγράμματα της μέσης μηνιαίας ξηρής και υγρής εναπόθεσης σκόνης αντίστοιχα για την Ευρώπη και τη Μεσόγειο Θάλασσα. Όπως είναι αναμενόμενο εμφανίζεται περιοδικότητα των μέγιστων ποσοτήτων που εντοπίζονται κατά τους εαρινούς μήνες. Δευτερεύον μέγιστο παρατηρείται κατά τους φθινοπωρινούς μήνες. Η μάζα που εναποτίθεται στην επιφάνεια υπό μορφή ξηρής εναπόθεσης εμφανίζεται συστηματικά μεγαλύτερη πάνω από τη Μεσόγειο Θάλασσα ενώ στην περίπτωση της υγρής εναπόθεσης δεν υπάρχει σαφές συμπέρασμα. Ο μηχανισμός της υγρής εναπόθεσης είναι σαφώς πιο πολύπλοκος καθώς σημαντικό ρόλο διαδραματίζει και η κατανομή του υετού πάνω από την Ευρώπη και τη Μεσόγειο. Επίσης τον Απρίλιο 2002 εμφανίζονται οι μέγιστες ποσότητες πενταετίας πάνω από την Ευρώπη και τη Μεσόγειο ενώ και οι υπόλοιποι εαρινοί μήνες του 2002 χαρακτηρίζονται από ιδιαίτερα σημαντική δραστηριότητα μεταφοράς σκόνης από τη Σαχάρα.



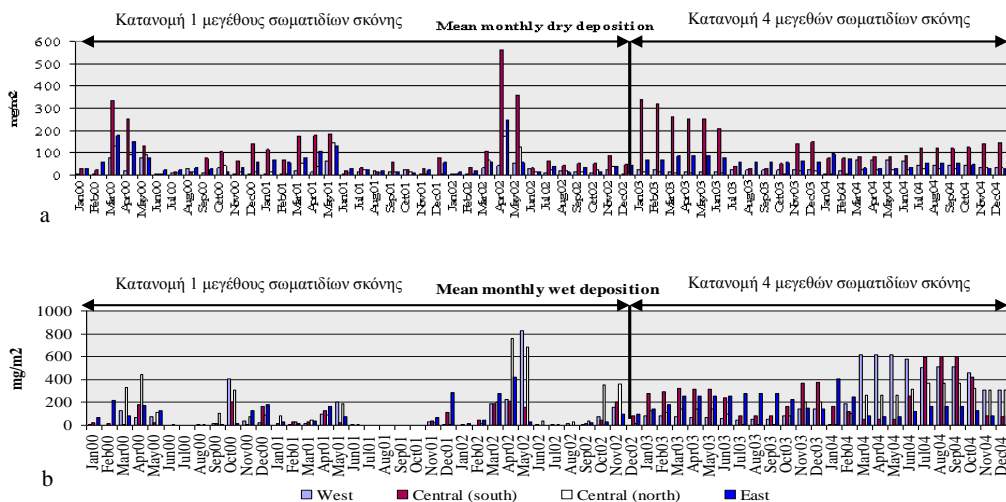
Σχήμα 3. Μέση μηνιαία εναπόθεση σκόνης (ξηρή και υγρή) κατά την περίοδο 2000-2004 για την Ευρώπη και τη Μεσόγειο Θάλασσα (μονάδες σε mgr/m^2)

Αξίζει να σημειωθεί πως στους συγκεκριμένους υπολογισμούς λαμβάνονται υπόψη οι ποσότητες σκόνης που εναποτίθενται μόνο πάνω από σημεία του πλέγματος που θεωρούνται ξηρά για την περιοχή της Ευρώπης, ενώ μόνο τα θαλάσσια σημεία πλέγματος προσμετρώνται για την περίπτωση της Μεσογείου Θάλασσας και των τεσσάρων υποπεριοχών της. Το πλήθος των σημείων πλέγματος που χρησιμοποιούνται για κάθε υποπεριοχή παρουσιάζονται στον Πίνακα 2. Δεδομένου ότι κάθε υποπεριοχή εμφανίζει διαφορετικό πλήθος σημείων πλέγματος θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη και η κατανομή των σημείων στα οποία έχει υπολογιστεί το ποσό της εναπόθεσης για την ορθή εξαγωγή των τελικών συμπερασμάτων.

Πίνακας 2. Πλήθος σημείων πλέγματος κάθε υποπεριοχής που χρησιμοποιήθηκαν για την εκτίμηση των ποσοτήτων σκόνης που εναποτίθενται στη Μεσόγειο και την Ευρώπη.

Ευρώπη		Μεσόγειος				
		Συνολικά	Δυτικά	Κεντρικά-Νότια	Κεντρικά Βόρεια	Ανατολικά
Πλήθος σημείων ξηράς	5783	-	-	-	-	-
Πλήθος σημείων θάλασσας	-	4344	1105	694	1000	1545

Τα διαγράμματα της ξηρής και υγρής εναπόθεσης σε μέση μηνιαία βάση για τις τέσσερις υποπεριοχές της Μεσογείου απεικονίζονται στο Σχήμα 4. Κάθε υποπεριοχή εμφανίζει σημαντική μεταβλητότητα στις ποσότητες εναπόθεσης, γεγονός που κυρίως οφείλεται στις συνοπτικές συνθήκες καθώς και στα ιδιαίτερα γεωγραφικά και κλιματικά χαρακτηριστικά των συγκεκριμένων περιοχών. Ειδικότερα, κατά τη διάρκεια των χειμερινών και εαρινών περιόδων η Μεσόγειος επηρεάζεται από δύο συστήματα ανώτερης ατμόσφαιρας: τον πολικό αεροχείμαρρο που τοποθετείται πάνω από την Ευρώπη και τον υποτροπικό αεροχείμαρρο που συνήθως εντοπίζεται πάνω από τη Βόρεια Αφρική. Ο συνδυασμός των συγκεκριμένων συστημάτων κατά τους χειμερινούς και εαρινούς μήνες ευνοεί τη διάδοση κυκλωνικών συστημάτων μέσω πλατών προς ανατολικές και νοτιοανατολικές διευθύνσεις με αποτέλεσμα τη μεταφορά σκόνης στη Μεσόγειο. Επίσης, κατά τη διάρκεια των μεταβατικών εποχών οι θαλάσσιες επιφάνειες στην περιοχή είναι σχετικά ψυχρότερες, περιορίζοντας τη δημιουργία συστημάτων κατακόρυφης ανάπτυξης που σχετίζονται με βροχή και συνεπώς με διαδικασίες υγρής απομάκρυνσης των σωματιδίων σκόνης από το ατμοσφαιρικό περιβάλλον. Η Κεντρική-Νότια περιοχή της Μεσογείου επιδεικνύει τα σημαντικότερα ποσά ξηρής εναπόθεσης στο σύνολο των πέντε ετών σε σχέση με τις υπόλοιπες περιοχές ακολουθούμενη από τις Ανατολικές περιοχές. Η γεινίαση των συγκεκριμένων περιοχών με εκτεταμένες ερημικές εκτάσεις της Λιβύης, της Αιγύπτου και της Μέσης Ανατολής έχει ως αποτέλεσμα την αυξημένη μεταφορά σωματιδίων σκόνης και την τελική απομάκρυνσή τους από την ατμόσφαιρα υπό μορφή ξηρής εναπόθεσης. Η Δυτική Μεσόγειος εμφανίζει αυξημένη δραστηριότητα υγρής εναπόθεσης, κυρίως κατά τη διάρκεια εαρινών μηνών, γεγονός που αποδίδεται στη συνεργετική δράση των σωματιδίων σκόνης και της έντονης υφειακής δραστηριότητας στην περιοχή. Κατά την περίοδο Μαρτίου-Μαΐου η περιοχή επηρεάζεται από τη διέλευση χαμηλών που δημιουργούνται από ορογραφικά αίτια σε περιοχές νότια της οροσειράς του Άτλαντα (Thorncroft and Flocas 1997). Επίσης, η περιοχή επηρεάζεται από την ανάπτυξη θερμικών χαμηλών στην Ιβηρική χερσόνησο με μέγιστη δραστηριότητα τους εαρινούς και θερινούς μήνες (Triggo et al., 1999). Η Ανατολική Μεσόγειος δέχεται σημαντικά ποσά υγρής εναπόθεσης καθώς το μεγαλύτερο μέρος του υετού στην περιοχή προέρχεται κυρίως από το χαμηλό της Κύπρου καθώς και από κυκλωνικά συστήματα που κινούνται κατά μήκος των ακτών της Βόρειας Αφρικής. Τα συστήματα αυτά δημιουργούν ευνοϊκές συνθήκες παραγωγής σκόνης σε περιοχές της Ανατολικής Αλγερίας και της Λιβύης η οποία μεταφέρεται προς την Ανατολική Μεσόγειο και τη Μέση Ανατολή.



Σχήμα 4. Μέση μηνιαία εναπόθεση σκόνης (ξηρή και υγρή) κατά την περίοδο 2000-2004 για τις 4 υποπεριοχές της Μεσογείου (μονάδες σε mgr/m^2)

Με βάση τα μηνιαία ποσά ξηρής και υγρής εναπόθεσης, εκτιμήθηκε η συνολική μάζα σκόνης (σε μονάδες 103 τόννους) που συσσωρεύτηκε στην επιφάνεια της Ευρώπης και της Μεσογείου Θάλασσας κατά την περίοδο 2000-2004. Οι ποσότητες αυτές παρουσιάζονται στον Πίνακα 3 ενώ η συνολική εναπόθεση αναφέρεται στο άθροισμα ξηρής και υγρής εναπόθεσης. Τα αποτελέσματα καταδεικνύουν σημαντική χωροχρονική μεταβλητότητα των ποσοτήτων και εμφανίζουν έτη με περιορισμένη δραστηριότητα μεταφοράς σκόνης (όπως το 2001) που ακολουθούνται συνήθως από περιόδους με αυξημένη δραστηριότητα (2002). Συνολικά η εναπόθεση σκόνης για την περίοδο 2000-2004 είναι της τάξης των $18 \cdot 10^6$ τόννων στην Ευρώπη ενώ στη Μεσόγειο Θάλασσα εκτιμάται σε $28 \cdot 10^6$ τόννους. Σε αντίστοιχη μελέτη οι Guerzoni et al. (1999) εκτίμησαν τη συνολική ποσότητα σκόνης που εναποτίθεται στη Μεσόγειο σε περίπου $40 \cdot 10^6$ τόννους. Οι τιμές που προέκυψαν στην παρούσα μελέτη φαίνεται να υπολείπονται περίπου κατά μία τάξη μεγέθους. Όμως η ακολουθούμενη μεθοδολογία στην περίπτωση της πρώτης μελέτης χαρακτηρίζεται από χαμηλή χωρική ανάλυση, καθώς τα αποτελέσματα προέκυψαν από 9 παράκτιους μετρητικούς σταθμούς. Επίσης, δεν είναι σαφής η διάκριση ανάμεσα στη μεγάλη κλίμακα μεταφορά σκόνης από τη Σαχάρα και τη συνεισφορά των τοπικών ανθρωπογενών πηγών στις συγκεκριμένες μετρήσεις. Οι εκτιμώμενες ποσότητες σκόνης όπως προέκυψαν από την εφαρμογή του συστήματος Σκίρων προσφέρουν σαφώς υψηλότερη χωρική ανάλυση και συνεπώς περισσότερη παρεχόμενη πληροφορία για τις υποπεριοχές της Μεσογείου και της Ευρώπης. Η πρόσφατη έκδοση του μοντέλου που περιλαμβάνει την προσομοίωση 4 κατηγοριών σωματιδίων σκόνης προσφέρει σημαντικά βελτιωμένες δυνατότητες ανάλυσης και πρόγνωσης όλων των συστατικών του κύκλου της σκόνης στο ατμοσφαιρικό περιβάλλον με περισσότερο ομογενοποιημένα χαρακτηριστικά εναπόθεσης. Οι προγνωστικές δυνατότητες του συστήματος έχουν συνολικά αξιολογηθεί τόσο στην ευρύτερη περιοχή της Μεσογείου (Kishcha et al., in press) όσο και σε περιπτώσεις μακρινής μεταφοράς σκόνης από τη Σαχάρα προς τις ΗΠΑ (Kallos et al. 2005).

Πίνακας 3. Κατανομή ετήσιας εναπόθεσης σκόνης (σε 103 τόννους) στην Ευρώπη και τη Μεσόγειο Θάλασσα.

	Ευρώπη			Μεσόγειος Θάλασσα		
	Συνολικά	Ξηρή	Υγρή	Συνολικά	Ξηρή	Υγρή
2000	3914	936	2978	3962	1541	2421
2001	2909	725	2184	2500	1255	1245
2002	4723	883	3840	5132	1546	3586
2003	1999	256	1743	6752	1828	4924
2004	4933	398	4535	9306	1504	7802

4. Συμπεράσματα

Ο ρόλος της σκόνης φυσικής προελεύσεως στην ατμόσφαιρα θεωρείται ιδιαίτερα σημαντικός λόγω των ποικίλων επιδράσεων στο παγκόσμιο και περιοχικό κλίμα, την ποιότητα του αέρα, τα οικοσυστήματα, τον καιρό και τον υετό. Με την εφαρμογή του συστήματος Σκίρων σε πλήρη σύζευξη με μοντέλο προσομοίωσης του κύκλου της σκόνης στην ατμόσφαιρα δημιουργήθηκε βάση δεδομένων των ετήσιων και εποχιακών ποσοτήτων σκόνης από τη Σαχάρα που εναποτίθενται μέσω των μηχανισμών της ξηρής και υγρής εναπόθεσης στην Ευρώπη και τη Μεσόγειο Θάλασσα. Καθώς τα χαρακτηριστικά της μεταφοράς και εναπόθεσης σκόνης από τη Σαχάρα στη Μεσόγειο μεταβάλλονται σε σημαντικό βαθμό με βάση τις επικρατούσες κλιματικές και συνοπτικές συνθήκες, ανάλογη ετήσια και εποχιακή μεταβλητότητα παρουσιάζουν και οι εκτιμώμενες ποσότητες σκόνης που εναποτίθενται στην Ευρώπη και την υδάτινη επιφάνεια της Μεσογείου. Η ένταση και η συχνότητα επεισοδίων σκόνης καθορίζουν την ετήσια και εποχιακή συμπεριφορά της εναπόθεσης ενώ σε ακραίες περιπτώσεις η μάζα που εναποτίθεται σε ένα μεμονωμένο επεισόδιο μπορεί να μεταβάλλει σημαντικά τις συνολικές ποσότητες ακόμα και σε ετήσια βάση. Παρά τη σημαντική μεταβλητότητα, και με βάση την ανάλυση των αποτελεσμάτων, εντοπίζεται εποχικότητα των μεγίστων ποσών εναπόθεσης σκόνης στη Μεσόγειο και την Ευρώπη με τους εαρινούς μήνες κάθε έτους να αποτελούν την περίοδο της μέγιστης δραστηριότητας. Οι περιοχές της ΝοτιοΑνατολικής Ιβηρικής Χερσονήσου, της Νότιας Ιταλίας καθώς και η ΝοτιοΔυτική Ελλάδα με την Κρήτη και την Κύπρο είναι οι περιοχές της Μεσογείου που εμφανίζουν τα σημαντικότερα ποσά εναπόθεσης. Ειδικότερα, τα μέγιστα της ξηρής εναπόθεσης εντοπίζονται στις Κεντρικές-Νότιες περιοχές της Μεσογείου ενώ η Ανατολική Μεσόγειος εμφανίζει αυξημένη δραστηριότητα ξηρής και υγρής εναπόθεσης κατά τη διάρκεια της περιόδου 2000-2004. Συνολικά η εναπόθεση σκόνης για την συγκεκριμένη περίοδο είναι της τάξης των 107 τόννων για την Ευρώπη και την Μεσόγειο Θάλασσα. Οι αβεβαιότητες που προκύπτουν κατά την εκτίμηση των ποσοτήτων εναπόθεσης οδηγούν στο συμπέρασμα πως απαιτούνται χρονοσειρές μεγαλύτερης διάρκειας σε συνδυασμό με ένα πυκνό δίκτυο μετρήσεων για την εξαγωγή οριστικών συμπερασμάτων. Το σύστημα Σκίρων εμφανίζει ιδιαίτερες δυνατότητες στην ανάλυση και πρόγνωση όλων των συνιστωσών του κύκλου της σκόνης στην ατμόσφαιρα και μπορεί να αποτελέσει ένα χρήσιμο εργαλείο για την προσομοίωση και παραγωγή κλιματολογικής πληροφορίας σε περιπτώσεις έλλειψης μετρητικών δεδομένων.

Βιβλιογραφία

Charlson, R. J., J. Langner, H. Rodhe, C. Leovt, S. Warren, 1991: Perturbation of the Northern Hemisphere radiative balance by backscattering from anthropogenic sulfate aerosols. Tellus, 43AB, 152-163.

Guerzoni, S., R. Chester, F. Dulac, B. Herut, M.-D. Loye-Pilot, C. Measures, C. Migon, E. Molinaroli, C. Moulin, P. Rossini, C. Saydam, A. Soudine, and P. Ziveri, 1999, The role of atmosphere deposition in the biogeochemistry of the Mediterranean Sea, Prog. Oceanogr.

44: 147-190.

Jones, A., D. L. Roberts, A. Slingo, 1994: A climate model study of the indirect radiative forcing by anthropogenic sulfate aerosols. *Nature*, 370, 450-453.

Kallos, G., A. Papadopoulos, P. Katsafados and S. Nickovic, 2005: Trans-Atlantic Saharan dust transport: Model simulation and results, *Journal of Geophysical Research-Atmosphere*, 111, D09204, doi: 10.1029/2005JD006207.

Kishcha P., P. Alpert, A. Shtivelman, S.O. Krichak, J.H. Joseph, G. Kallos, P. Katsafados, C. Spyrou, G.P. Gobbi, F. Barnaba, S. Nickovic, C. Perez, and J.M. Baldasano, 2006: **"Forecast errors in dust vertical distributions over Rome (Italy): Multiple particle size representation and cloud contributions"**. *Journal of Geophysical Research-Atmosphere* (in press).

Nickovic, S., G. Kallos, A. Papadopoulos, and O. Kakaliagou, 2001: A model for prediction of desert dust cycle in the atmosphere, *Journal of Geophysical Research-Atmosphere*, 106:18113-18129.

Papadopoulos A., G. Kallos, P. Katsafados, and S. Nickovic, 2002: The Poseidon weather forecasting system: An overview, *Global Atmospheric-Ocean System*, 8:219-237.

Thorncroft, C. D., and H. A. Flocas, 1997: A case study of Saharan cyclogenesis. *Monthly Weather Review*, 125, 1147-1165.

Trigo, I., Davies, T., and Bigg, G., 1999: Objective Climatology of Cyclones in the Mediterranean Region, *Journal of Climate*, 12, 1685-1696.