

ΕΝΑ ΜΟΝΤΕΛΟ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΡΟΣΟΜΙΩΣΗ ΤΟΥ ΚΥΚΛΟΥ ΣΚΟΝΗΣ ΣΤΗΝ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑ ΕΛΕΓΧΟΙ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ

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

¹Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο Αθηνών, Τμήμα Γεωγραφίας

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

³Ελληνικό Κέντρο Θαλασσιών Ερευνών, Ινστιτούτο Εσωτερικών Υδάτων

Περίληψη

Τις τελευταίες δεκαετίες έχει γίνει σαφής η σημασία της επίδρασης των σωματιδίων φυσικής προέλευσης (σκόνης από ερημικές εκτάσεις) στο κλίμα του πλανήτη. Για την πληρέστερη κατανόηση του κύκλου της σκόνης στην ατμόσφαιρα, απαιτείται η όσο το δυνατόν καλύτερη αναπαράσταση της κατανομής των σωματιδίων σκόνης και των διεργασιών μεταφοράς και εναπόθεσής τους. Το σύστημα πρόγνωσης καιρού Σκίρων, σε πλήρη σύζευξη με ένα μοντέλο προσομοίωσης του κύκλου σκόνης στην ατμόσφαιρα, μπορεί να προσφέρει αξιόπιστη πρόγνωση επεισοδίων σκόνης καθώς και παραγωγή κλιματολογικών δεδομένων σκόνης. Στην παρούσα μελέτη παρουσιάζονται οι βελτιώσεις του μοντέλου στα σχήματα παραγωγής και εναπόθεσης σκόνης. Οι μηχανισμοί παραγωγής περιλαμβάνουν μια σειρά παραμέτρων, όπως την επίδραση της υψής του εδάφους, την κατανομή της βλάστησης, της υγρασίας του εδάφους, της ταχύτητας τριβής του ανέμου και του ιξώδους υποστρώματος. Με βάση τη νέα έκδοση του μοντέλου τα σωματίδια στις πηγές χωρίζονται σε κλάσεις (bins) ανάλογα με το μέγεθός τους. Σε κάθε κλάση θεωρείται ότι η κατανομή του μεγέθους των σωματιδίων είναι λογαριθμική. Το μέγεθος των σωματιδίων δεν ξεπερνά τα 10μm ώστε η προσομοίωση της μεταφοράς να είναι περισσότερο ρεαλιστική για μεγάλης κλίμακας κινήσεις, καθώς μεγαλύτερα σωματίδια εμφανίζουν περιορισμένο χρόνο παραμονής στην ατμόσφαιρα. Αναπτύχθηκαν επίσης βελτιωμένοι μηχανισμοί ξηρής εναπόθεσης (βαρυτική καθίζηση, επιφανειακή τυρβώδης διάχυση, κίνηση Brown) και υγρής απομάκρυνσης (μέσω υετού) των σωματιδίων. Το σύστημα εφαρμόστηκε για την περίοδο 27 - 30 Απριλίου 2005 για την περίπτωση επεισοδίου σκόνης στην Κίνα από την έρημο Gobi και τα αποτελέσματα αξιολογήθηκαν με βάση επίγειες μετρήσεις PM10 από σταθμούς σε μια ευρεία περιοχή. Το μοντέλο μπόρεσε να αποδώσει σε ικανοποιητικό βαθμό την ανάπτυξη και εξέλιξη του επεισοδίου.

A MODEL TO SIMULATE THE ATMOSPHERIC DUST CYCLE: SENSITIVITY TESTS

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

¹Harokopio University of Athens, Department of Geography.

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

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

Abstract

Several studies over the past decades have shown that desert dust aerosols have a distinct effect in global climate. For a more accurate representation of the mechanisms involved in the desert dust cycle a detailed description of particle distributions, production, transport and deposition is essential. The Skiron weather forecasting system, fully coupled with a model describing the dust cycle in the atmosphere, is capable to predict dust episodes on an accurate way and it can be used to derive dust climatology as well. Model further improvements on dust production and deposition schemes are discussed in this study. The production mechanisms incorporate a series of parameters (soil texture,

vegetation cover, viscous sublayer effects and more). Based on this new version of the model dust particles are divided in bins according to their size. In each bin a lognormal sub-bin distribution of mass is considered. Particle sizes are limited to diameters up to 10 μ m thus, the modeled dust cycle is considered more realistic for long – range transports. The dry and wet removal processes have also been updated with new and more accurate algorithms (gravitational settling, surface turbulent diffusion, Brownian diffusion, incloud scavenging). The system was tested for a desert dust episode in China from the Gobi desert during the period 27-30 of April 2005. The results were evaluated using a series of data from PM10 monitoring stations at various locations in the area. The model was able to reproduce the spatiotemporal development of this dust episode.

Λέξεις κλειδιά: Κατανομή σωματιδίων σκόνης, σύστημα Σκίρων, κύκλος της σκόνης, έρημος Gobi.

Key words: Particle size distribution, dust deposition, Skiron system, dust cycle, Gobi desert.

1. Εισαγωγή

Ο κύκλος της σκόνης στην ατμόσφαιρα παρουσιάζει έντονη εποχιακή διακύμανση και συνδέεται άμεσα με την ευρύτερη ατμοσφαιρική κυκλοφορία (Kallos *et al.*, 2006). Με βάση επιτόπιες μετρήσεις, δορυφορικές εικόνες και προσομοιώσεις με τη χρήση αριθμητικών μοντέλων υπολογίζεται ότι η ποσότητα αυτή είναι της τάξης των 10⁷ τόνων το χρόνο (Guerzoni *et al.*, 1999). Παρά το γεγονός ότι η σκόνη δεν θεωρείται σημαντικός κλιματικός παράγοντας, σύγχρονες μελέτες έχουν αποδείξει το αντίθετο (Tegen and Fung, 1994). Η ύπαρξη σωματιδίων στην ατμόσφαιρα έχει σημαντική επίδραση στο κλίμα και την ποιότητα του αέρα. Μεταβάλλοντας το ισοζύγιο ακτινοβολιών στην ατμόσφαιρα και στο έδαφος, σκεδάζοντας, απορροφώντας και επανεκπέμποντας την ηλιακή ακτινοβολία, επηρεάζει την ίδια τη δυναμική της ατμόσφαιρας, καθώς και διάφορες παραμέτρους όπως την εξάτμιση, το φαινόμενο του θερμοκηπίου και την ευστάθεια (Charlson *et al.*, 1991). Έντονη είναι επίσης η επίδραση στην ποιότητα του αέρα και συνεπώς στην ανθρώπινη υγεία. Κατά την τελευταία δεκαετία μια σειρά από επιδημιολογικές μελέτες έδειξαν έντονη συσχέτιση μεταξύ σωματιδίων σκόνης και υγείας (Dockery and Pope, 1996).

Στη συγκεκριμένη εργασία παρουσιάζονται βελτιώσεις του μοντέλου προσομοίωσης των διεργασιών του κύκλου σκόνης στην ατμόσφαιρα, ως υποσύστημα του ατμοσφαιρικού μοντέλου Σκίρων, που αφορούν κυρίως τα σχήματα παραγωγής και εναπόθεσης. Αναλύθηκε επίσης η αξιοπιστία των νέων σχημάτων μέσα από μία σειρά ελέγχων ευαισθησίας για τη περίπτωση επεισοδίου σκόνης στην ευρύτερη περιοχή της Κίνας από την έρημο Gobi για την περίοδο 27 – 30 Απριλίου 2005. Η επιλογή της περιοχής μελέτης έγινε λόγω της διαθεσιμότητας δεδομένων συγκέντρωσης σωματιδίων από σταθμούς ελέγχου ποιότητας αέρα.

2. Περιγραφή νέων σχημάτων κατανομής σωματιδίων και διεργασιών εναπόθεσης

Το σύστημα Σκίρων βρίσκεται σε επιχειρησιακή λειτουργία από το 1998 παρέχοντας 72 ωρών προγνώσεις καιρού για την ευρύτερη περιοχή της Μεσογείου καθώς και μεταφοράς σκόνης από τη Σαχάρα (<http://forecast.uoa.gr/dustindx.html>). Λειτουργεί επίσης επιχειρησιακά σε μία σειρά ερευνητικών προγραμμάτων παρέχοντας προγνωστικά πεδία μεταφοράς σκόνης από τη Σαχάρα στην ευρύτερη περιοχή της Μεσογείου. Χαρακτηριστικά παραδείγματα αποτελούν τα προγράμματα POSEIDON (Monitoring, Forecasting and Information System for the Greek Seas) και ADIOS (Atmospheric Deposition and Impact of pollutants, key elements and nutrients on the Open Mediterranean Sea). Προσπάτως το μοντέλο Σκίρων αποτελεί το βασικό προγνωστικό σύστημα προειδοποίησης και διαχείρισης επεισοδίων μεταφοράς σκόνης του ΥΠΕΧΩΔΕ και αξιολογείται καθημερινά με βάση τους επίγειους σταθμούς μέτρησης ατμοσφαιρικών σωματιδίων και ποιότητας αέρα της υπηρεσίας ΕΑΡΘ.

Η κύρια συνιστώσα του συστήματος είναι το περιορισμένης περιοχής μοντέλο πρόγνωσης καιρού Eta, το οποίο περιγράφεται αναλυτικά σε πλήθος εργασιών και δημοσιεύσεων (Kallos et al. 1997; Janjic 1990; Mesinger et al. 1988; Katsafados 2003). Η πρώτη έκδοση του συστήματος πρόγνωσης καιρού Σκίρων με τη συνιστώσα για την περιγραφή του κύκλου σκόνης φυσικής προέλευσης αναπτύχθηκε στο Πανεπιστήμιο Αθηνών και περιλαμβάνει μια σειρά παραμετροποιήσεων για την προσομοίωση των διεργασιών παραγωγής, μεταφοράς και εναπόθεσης ατμοσφαιρικών σωματιδίων. Αναλυτική περιγραφή της έκδοσης αυτής υπάρχει στις εργασίες των Nickovic et al. (2001) και Kallos et al. (2006) και στην παρούσα εργασία θα αναφέρεται ως SKIRON_v1. Στη συγκεκριμένη έκδοση τα σωματίδια σκόνης χωρίζονται σε 4 διακριτές κλάσεις ανάλογα με το μέγεθός τους, όπως περιγράφεται στον Πίνακα 1:

Πίνακας 1. Διακριτές κλάσεις σωματιδίων της προηγούμενης έκδοσης του μοντέλου (SKIRON_v1). Καταγράφονται επίσης το είδος, η ακτίνα και η πυκνότητα των σωματιδίων.

| k | 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 |

Στα πλαίσια της συγκεκριμένης μελέτης πραγματοποιήθηκε περαιτέρω ανάπτυξη των αλγορίθμων προσομοίωσης με σκοπό την βελτίωση και την αναλυτικότερη περιγραφή του κύκλου σκόνης. Η έκδοση αυτή του συστήματος θα αναφέρεται εδώ ως SKIRON_v2 και οι τροποποιήσεις αναφέρονται στη συνέχεια. Στη νέα έκδοση τα σωματίδια χωρίζονται σε κλάσεις (bins) ανάλογα με το μέγεθός τους, όπως περιγράφεται στην εργασία των Zender et al. (2003). Σε κάθε κλάση η κατανομή του μεγέθους των σωματιδίων θεωρείται λογαριθμική με μέση διάμετρο μάζας (mass median diameter) $D_v = 2.524$ (Shettle, 1984) και τυπική γεωμετρική απόκλιση (geometric standard deviation) $\sigma_g = 2$ (Schulz et al., 1998). Στον Πίνακα 2 περιγράφονται αναλυτικά οι 4 νέες κλάσεις που χρησιμοποιήθηκαν.

Πίνακας 2. Κλάσεις σωματιδίων στην βελτιωμένη έκδοση του μοντέλου (SKIRON_v2). Καταγράφονται επίσης η μέγιστη και ελάχιστη διάμετρος κάθε κλάσης (D_{\max} , D_{\min}), η μέση διάμετρος μάζας (D_v) και η τυπική γεωμετρική απόκλιση (σ_g).

| Bins | D_{\min} (μm) | D_{\max} (μm) | D_v | σ_g |
|------|------------------------------|------------------------------|-------|------------|
| 1 | 0.1 | 1.0 | 2.524 | 2.0 |
| 2 | 1.0 | 2.5 | 2.524 | 2.0 |
| 3 | 2.5 | 5.0 | 2.524 | 2.0 |
| 4 | 5.0 | 10.0 | 2.524 | 2.0 |

Η διαδικασία της μεταφοράς περιγράφεται με την εξίσωση της συνέχειας τύπου Euler, η οποία ολοκληρώνεται χρονικά ταυτόχρονα με άλλες προγνωστικές εξισώσεις του μοντέλου. Η εξίσωση συνέχειας που χρησιμοποιείται είναι της μορφής που δίνεται παρακάτω:

$$\frac{\partial C_k}{\partial t} = -u \frac{\partial C_k}{\partial x} - v \frac{\partial C_k}{\partial y} - (w - v_{gk}) \frac{\partial C_k}{\partial z} - \nabla \cdot (K_H \nabla C_k) - \frac{\partial}{\partial z} (K_z \frac{\partial C_k}{\partial z}) + (\frac{\partial C_k}{\partial t})_{SOURCE} - (\frac{\partial C_k}{\partial t})_{SINK} \quad (1)$$

Στην παραπάνω εξίσωση, u και v είναι οι οριζόντιες συνιστώσες του ανέμου, w η κατακόρυφη ταχύτητα, v_{gk} η ταχύτητα εναπόθεσης, KH ο πλευρικός συντελεστής διάχυσης και Kz ο συντελεστής τυρβώδους διάχυσης. Ο τελευταίος όρος περιλαμβάνει τις διεργασίες ξηρής και υγρής εναπόθεσης.

Η παραμετροποίηση των διαδικασιών της ξηρής εναπόθεσης βελτιώθηκε χρησιμοποιώντας το σχήμα αντιστάσεων (resistances) των Slinn and Slinn (1980), όπου η ταχύτητα εναπόθεσης των σωματιδίων υπολογίζεται ως:

$$V_d = V_{sed} + \frac{1}{r_a + r_b + r_a r_b V_{sed}} \quad (2)$$

Όπου V_{sed} είναι η ταχύτητα βαρυτικής εναπόθεσης, r_a η αεροδυναμική αντίσταση και r_b η αντίσταση της επιφάνειας (boundary resistance). Η υγρή εναπόθεση περιλαμβάνει διεργασίες συλλογής μέσα και κάτω από το νέφος και περιγράφεται από τους Seinfeld και Pandis (1998). Στο συγκεκριμένο σχήμα, η μεταβολή της συγκέντρωσης της σκόνης περιγράφεται ως:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -4.2 \times 10^{-7} \frac{EP}{d_d} C \quad (3)$$

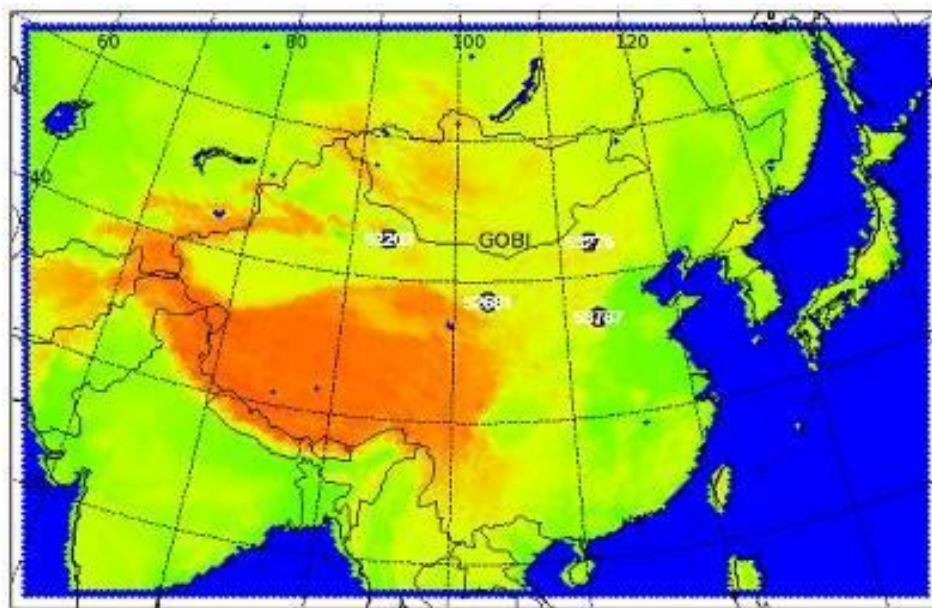
Όπου E η ικανότητα συλλογής (collection efficiency), P ο ρυθμός βροχόπτωσης (precipitation rate) και d_d η διάμετρος των υδροσταγόνων.

3. Δεδομένα μετρήσεων επιφανείας

Η Κινέζικη Ακαδημία Μετεωρολογικών Επιστημών διαθέτει πλήθος μετρήσεων από την τοπική Υπηρεσία Περιβαλλοντικής Προστασίας. Οι μετρήσεις αυτές οι οποίες αφορούν συγκεντρώσεις σωματιδίων (Particulate Matter-PM10) προέρχονται από μετρητικούς σταθμούς στην ευρύτερη περιοχή της Κίνας. Στη συγκεκριμένη εργασία χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα συγκέντρωσης σωματιδίων από 4 μετρητικούς σταθμούς για την περίοδο 27-30 Απριλίου 2005. Τα δεδομένα διατέθηκαν στο πλαίσιο του διακρατικού ερευνητικού προγράμματος "Προγνωστικά συστήματα προσομοίωσης του κύκλου της σκόνης από τη Σαχάρα και την έρημο της ανατολικής Ασίας Γκόμπι στην ατμόσφαιρα. Συγκριτική αξιολόγηση δύο συστημάτων" που χρηματοδοτείται από τη Γενική Γραμματεία Έρευνας και Τεχνολογίας. Οι συντεταγμένες των σταθμών δίνονται στον Πίνακα 3 που ακολουθεί και αποτυπώνονται στο Σχήμα 1.

Πίνακας 3. Συντεταγμένες και υψόμετρο του δικτύου των μετρητικών σταθμών.

| Κωδικός Σταθμού | Γεωγραφικό Πλάτος | Γεωγραφικό Μήκος | Υψόμετρο (m) |
|-----------------|-------------------|------------------|--------------|
| 52203 | 42.82 ° | 93.52 ° | 737.2 |
| 52681 | 38.63 ° | 103.08 ° | 1367.0 |
| 53276 | 42.40 ° | 112.90 ° | 1150.8 |
| 53787 | 37.07 ° | 112.98 ° | 1041.4 |



Σχήμα 1. Οι θέσεις των σταθμών μέτρησης της επιφανειακής συγκέντρωσης σωματιδίων PM10. Στο σχήμα αποτυπώνεται επίσης και η περιοχή ολοκλήρωσης με την τοπογραφία του μοντέλου.

4. Σχεδιασμός πειραματικής διαδικασίας

Για την αξιολόγηση της βελτιωμένη έκδοσης του συστήματος (SKIRON_v2) επιλέχθηκε η περίπτωση επεισοδίου μεταφοράς σκόνης από την έρημο Gobi στην ευρύτερη περιοχή της Κίνας κατά την περίοδο 27 – 30 Απριλίου 2005. Ο χαρακτηρισμός των πηγών σκόνης πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια δεδομένων βλάστησης με ανάλυση 30x30 δευτερολέπτων, σύμφωνα με την ταξινόμηση Olson World Ecosystems. Οι απαραίτητες αρχικές και οριακές συνθήκες για την εφαρμογή του συστήματος προέρχονται από δεδομένα ανάλυσης του ECMWF (European Center for Medium-Range Weather Forecasts). Το σύστημα εφαρμόστηκε αρχικά για την περίοδο 23-27 Απριλίου, ώστε να δημιουργηθεί ένα ικανοποιητικό υπόβαθρο σκόνης στην περιοχή ολοκλήρωσης, και στη συνέχεια για την περίοδο ενδιαφέροντος.

4.1. Αξιολόγηση με βάση δορυφορικές εικόνες

Σε πρώτη φάση, με τη χρήση δορυφορικών εικόνων τύπου TOMS (Total Ozone Mapping Spectrometer) και προγνωστικών εικόνων του μοντέλου Σκίρων, εξετάστηκε και διαπιστώθηκε η ικανότητα του συστήματος να προβλέψει τη χωροχρονική εξέλιξη του επεισοδίου (Σχήμα 2). Οι εικόνες τύπου TOMS στηρίζονται στη γραμμική αναλογία μεταξύ της πυκνότητας των αερολυμάτων με το οπτικό τους βάθος (Aerosol Index, AI). Η μέτρηση του οπτικού βάθους πραγματοποιείται μέσω της μέτρησης της οπισθοσκεδαζόμενης UV ακτινοβολίας σε πολλαπλά μήκη κύματος, η οποία εξαρτάται άμεσα από τη συγκέντρωση των σωματιδίων στην ατμοσφαιρική στήλη. Οι εικόνες στην αριστερή στήλη του σχήματος 2 προέρχονται από τα αποτελέσματα του συστήματος Σκίρων και οπτικοποιήθηκαν με το λογισμικό NCAR Graphics (version 4.4.2).

4.2. Αξιολόγηση με βάση επιτόπιες μετρήσεις

Η συγκεκριμένη αξιολόγηση βασίζεται στην άμεση σύγκριση διαθέσιμων πειραματικών

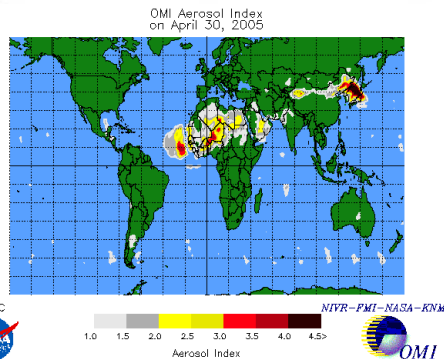
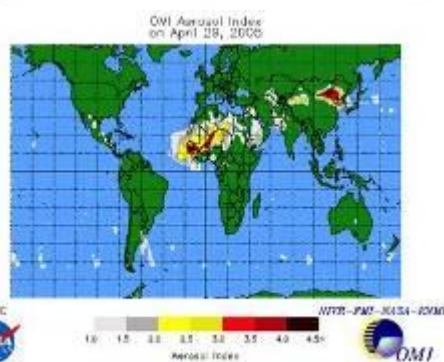
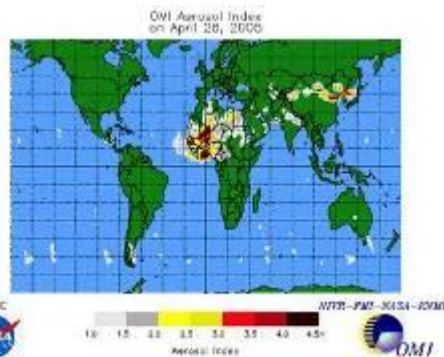
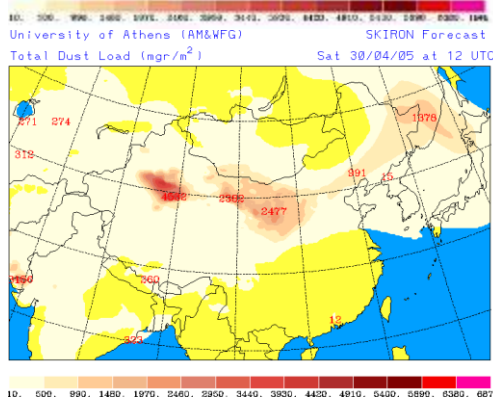
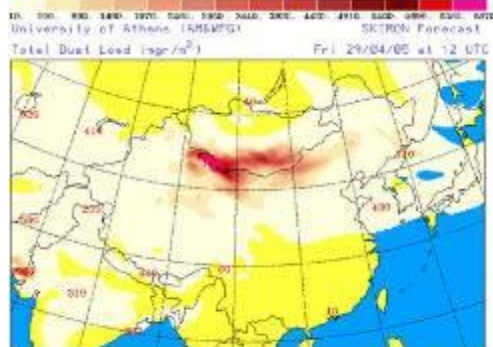
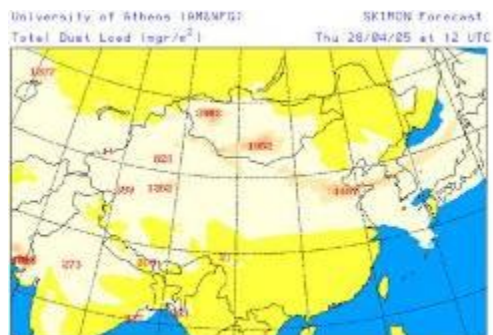
δεδομένων και αποτελεσμάτων του συστήματος και αποσκοπεί στο να ελέγξει ποσοτικά τις επιδόσεις του τελευταίου. Ακολουθεί η διαδικασία αξιολόγησης:

- Πραγματοποιήθηκε ποσοτική αξιολόγηση του συνόλου των μετρήσεων ώστε να χρησιμοποιηθούν εκείνες που θεωρήθηκαν ως οι πιο αξιόπιστες.
- Αναπτύχθηκε κατάλληλη διαδικασία για την εξαγωγή των συγκεντρώσεων σκόνης από τα προγνωστικά πεδία του μοντέλου Σκίρων στις τοποθεσίες των σταθμών ενδιαφέροντος.
- Δημιουργήθηκαν συγκριτικά διαγράμματα χρονικής εξέλιξης της συγκέντρωσης σκόνης για κάθε σταθμό (Σχήματα 3 – 6) μεταξύ των διαθέσιμων παρατηρήσεων και των προγνωστικών τιμών των δύο εκδόσεων του συστήματος.
- Για κάθε σταθμό εκτιμήθηκε το στατιστικό μέγεθος του συστηματικού σφάλματος BIAS, όπως περιγράφεται στη διεθνή βιβλιογραφία (Wilks, 1995). Ειδικότερα, ο δείκτης εκτιμά την αντιστοιχία ανάμεσα στη μέση τιμή πρόγνωσης και παρατήρησης. Το μέγεθος αυτό προκύπτει από το άθροισμα των διαφορών σε σύνολο N τιμών:

$$BIAS = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (F_i - O_i) \quad (4)$$

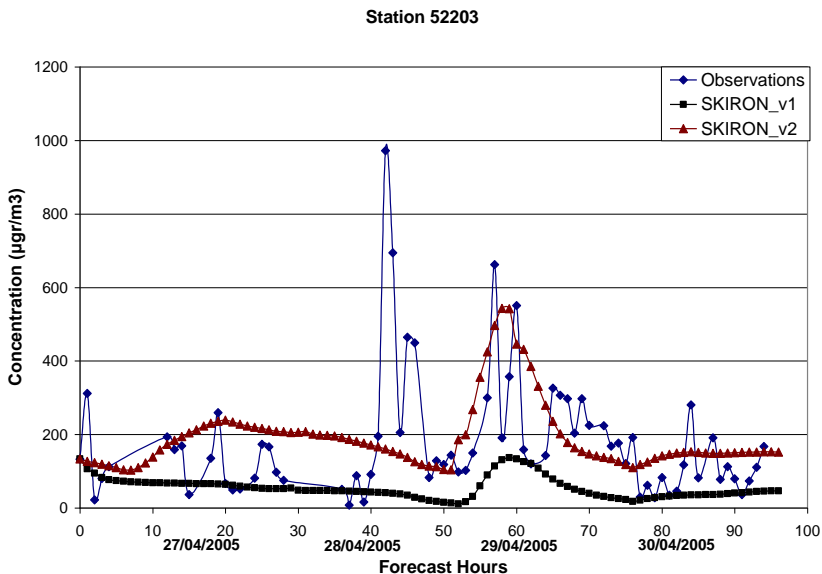
Σε περίπτωση όπου $BIAS < 0$ το μοντέλο υποεκτιμά τις μετρούμενες συγκεντρώσεις, ενώ τιμές με $BIAS > 0$ σχετίζονται με υπερεκτίμηση των αντίστοιχων τιμών παρατήρησης. Ιδανικές προγνώσεις εμφανίζουν $BIAS = 0$ (Σχήμα 7).

- Η διαδικασία αξιολόγησης επαναλήφθηκε και για την προηγούμενη έκδοση της συνιστώσας περιγραφής του κύκλου σκόνης, όπως αυτή αναφέρεται από τους Nickovic *et al.* (2001).

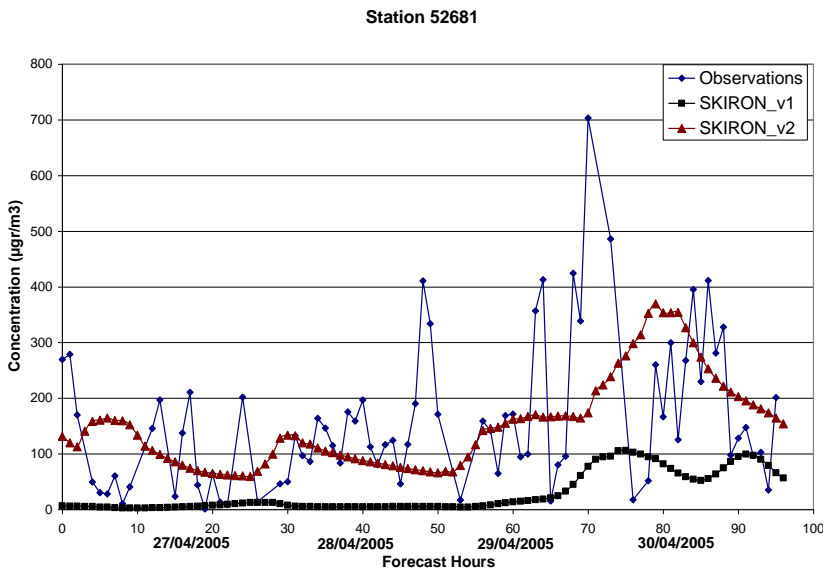


Σχήμα 2. Εικόνες φορτίου σκόνης (mgr/m^2) από το σύστημα Σκίρων (αριστερά) και Aerosol Index (δεξιά) για την περίοδο 28 - 30 Απριλίου 2005. Οι εικόνες του δημιουργήθηκαν με το λογισμικό NCAR Graphics.

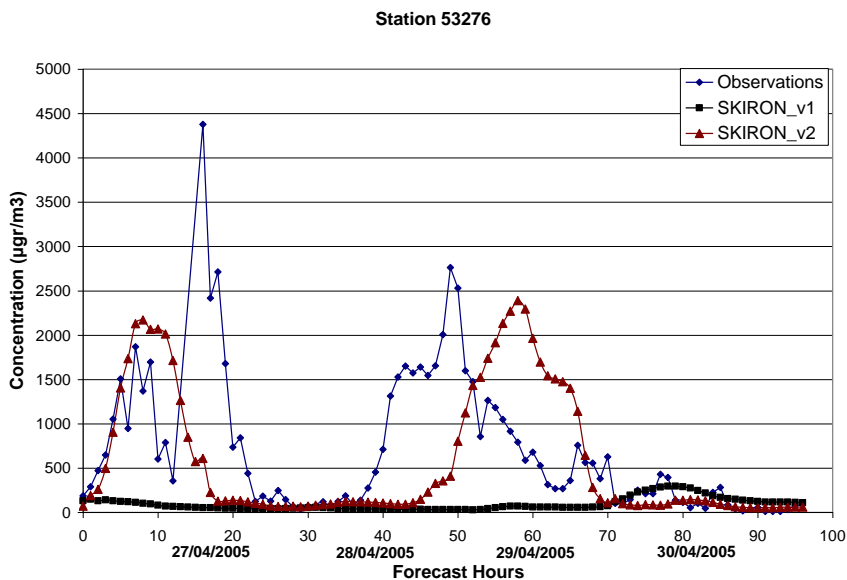
Στα Σχήματα 3-6 η βελτιωμένη έκδοση αναφέρεται ως SKIRON_v2, ενώ η προηγούμενη ως SKIRON_v1.



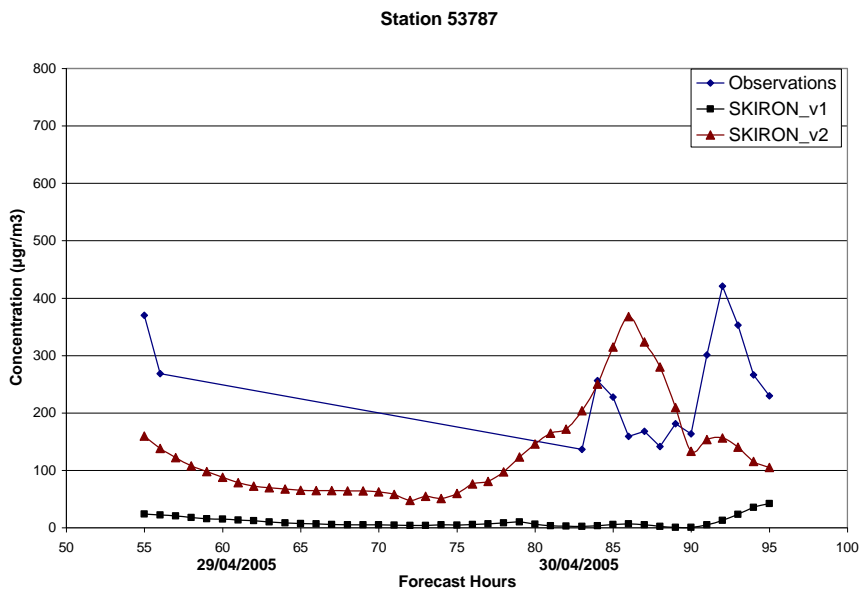
Σχήμα 3. Χρονοδιάγραμμα συγκέντρωσης σκόνης στον σταθμό 52203.



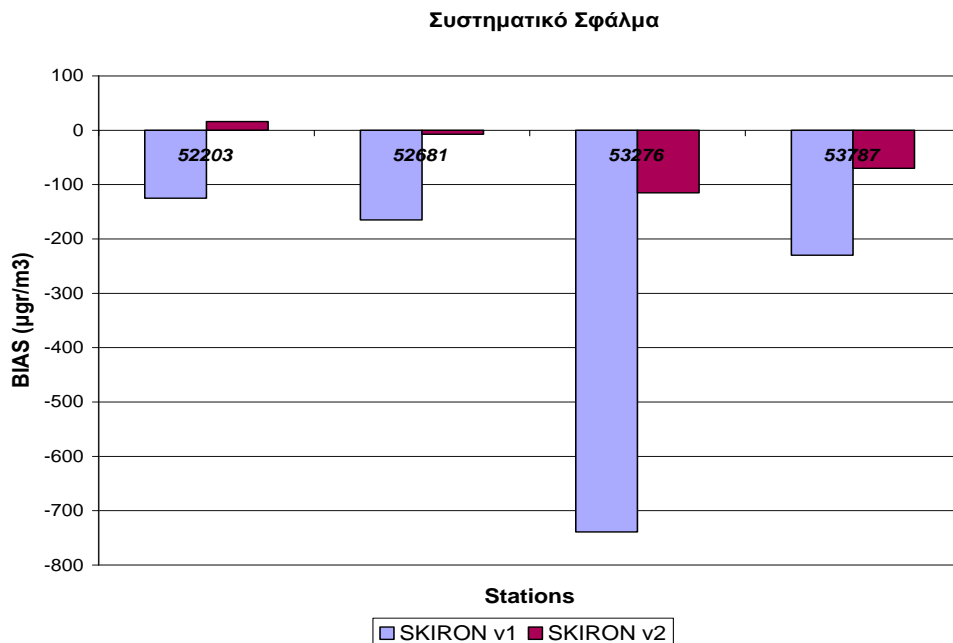
Σχήμα 4. Χρονοδιάγραμμα συγκέντρωσης σκόνης στον σταθμό 52681.



Σχήμα 5. Χρονοδιάγραμμα συγκέντρωσης σκόνης στον σταθμό 53276.



Σχήμα 6. Χρονοδιάγραμμα συγκέντρωσης σκόνης στον σταθμό 53787.



Σχήμα 7. Συστηματικό σφάλμα BIAS για κάθε σταθμό για τις δύο εκδόσεις του συστήματος Σκίρων. Η βελτιωμένη έκδοση αναφέρεται ως SKIRON_v2, ενώ η προηγούμενη ως SKIRON_v1.

Όπως φαίνεται από τα χρονοδιαγράμματα και το συστηματικό σφάλμα, η νέα έκδοση του συστήματος εμφανίζει σημαντική βελτίωση στην αποτύπωση του κύκλου σκόνης στην ατμόσφαιρα. Ιδιαίτερα στους σταθμούς 52203, 52681 και 53276 το μοντέλο καταφέρνει να περιγράψει με αρκετά καλή ακρίβεια την εξέλιξη του επεισοδίου. Αξίζει να σημειωθεί ότι η αξιοπιστία των διαθέσιμων μετρήσεων δεν είναι δεδομένη, καθώς η επίδραση τοπικών πηγών ρύπανσης και ανθρωπογενών διεργασιών εισάγει σφάλματα στις μετρήσεις των PM10.

5. Συμπεράσματα

Στη συγκεκριμένη εργασία παρουσιάστηκε μια βελτιωμένη έκδοση ενός συστήματος για την προσομοίωση του κύκλου σκόνης φυσικής προέλευσης στην ατμόσφαιρα. Η συνιστώσα για την περιγραφή των διεργασιών παραγωγής, μεταφοράς και εναπόθεσης σωματιδίων τροποποιήθηκε για να λειτουργεί στη δομή του ατμοσφαιρικού μοντέλου Σκίρων. Τα νέα σχήματα ενσωματώθηκαν στο μοντέλο σκόνης και αξιολογήθηκαν με ελέγχους ευαισθησίας για την περίπτωση επεισοδίου σκόνης στην Κίνα από την έρημο Gobi κατά την περίοδο 27 – 30 Απριλίου 2005. Η προσαρμοστικότητα του μοντέλου σε οποιαδήποτε περιοχή του κόσμου σε συνδυασμό με την αξιοπιστία των αριθμητικών σχημάτων του επέτρεψαν την πρωτότυπη εφαρμογή του για μία απομακρυσμένη περιοχή της Ανατολικής Ασίας. Το σύστημα Σκίρων αξιολογήθηκε με τη βοήθεια δορυφορικών εικόνων τύπου TOMS και αναλύθηκαν ποιοτικά οι δυνατότητες του στην πρόγνωση ενός επεισοδίου σκόνης. Η συγκεκριμένη αξιολόγηση ανέδειξε τη δυνατότητα του μοντέλου να προσομοιώνει τη μεγάλης κλίμακας μεταφορά σκόνης από ερημικές περιοχές καθώς και τη χωροχρονική εξέλιξή της. Για την ποσοτική αξιολόγηση του συστήματος εφαρμόστηκαν συγκριτικά διαγράμματα χρονικής εξέλιξης της συγκέντρωσης σκόνης σε συνδυασμό με στατιστική μέθοδο. Με βάση τα αποτελέσματα της

αξιολόγησης, το μοντέλο γενικά υποεκτιμά τις μέγιστες τιμές των μετρούμενων συγκεντρώσεων, ενώ παρατηρήθηκε σημαντική βελτίωση στην προγνωστική ικανότητα του συστήματος με την εφαρμογή των νέων σχημάτων παραγωγής και εναπόθεσης. Αν ληφθούν υπόψη η αβεβαιότητα που υπάρχει στις μετρήσεις σκόνης (περιορισμένος δειγματικός χώρος, επίδραση τοπικών πηγών) καθώς και η σχετικά αραιή χωρική ανάλυση πλέγματος των προσομοιώσεων (περίπου 25 χιλιόμετρα), τότε η απόδοση του συστήματος μπορεί να θεωρηθεί ικανοποιητική. Συνολικά, η ευελιξία του και η αξιοπιστία του το καθιστούν ένα χρήσιμο εργαλείο σε εφαρμογές πραγματικού χρόνου για την υποστήριξη συστημάτων προειδοποίησης και λήψης αποφάσεων περιβαλλοντικού χαρακτήρα σε οποιαδήποτε περιοχή του πλανήτη. Πρόγνωσης του κύκλου της σκόνης στην ατμόσφαιρα για την περιοχή της Ανατολικής Ασίας σε επιχειρησιακή βάση είναι διαθέσιμες στην ιστοσελίδα <http://forecast.uoa.gr/meteo-envi.html>.

Ευχαριστίες

Η συγκεκριμένη εργασία εκπονήθηκε στο πλαίσιο του ερευνητικού προγράμματος "Προγνωστικά συστήματα προσομοίωσης του κύκλου της σκόνης από τη Σαχάρα και την έρημο της ανατολικής Ασίας Γκόμπι στην ατμόσφαιρα. Συγκριτική αξιολόγηση δύο συστημάτων". Πρόγραμμα Ε+Τ Συνεργασίας Ελλάδας-Κίνας, ΓΓΕΤ 120-γ, ΕΠΑν Μ. 4.3.6.1.γ.

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.

Dockery, D., Pope, A., 1996: Epidemiology of acute health effects: summary of time-series studies. In: Wilson, R., Spenger, J.D. (Eds), *Particles in our Air: Concentration and Health Effects*. Harvard University Press, Cambridge, MA, USA, pp. 123-147.

Guerzoni, S., R. Chester, F. Dulac, B. Herut, M. D. Loye-Pilot, C. Measures, C. Migon, C. Molinaroli, C. Moulin, P. Rossini, C. Saydam, A. Soudine, P. Zivery, 1999: The role of atmospheric deposition in the biochemistry of the Mediterranean Sea, *Prog. Oceanogr.*, 44, 147-190.

Janjic, Z. I., 1990: The step-mountain coordinate: Physical package. *Mon. Wea. Rev.*, 118, 1429-1443.

Kallos, G., A. Papadopoulos, P. Katsafados and S. Nickovic, 2006: Transatlantic Saharan dust transport: Model simulation and results, *Journal of Geophysical Research*, 111, D09204, doi:10.1029/2005JD006207,

Kallos, G., S. Nickovic, A. Papadopoulos, D. Jovic, O. Kakaliagou, N. Misirlis, L. Boukas, N. Mimikou, G. Sakellaris, J. Papageorgiou, E. An dranistakis, and M. Manousakis, 1997: The regional weather forecasting system SKIRON: An overview, in: *Proceedings of the International Symposium on Regional Weather Prediction on Parallel Computer Environments*.

Katsafados, P., 2003: Factors and parameterizations contributing the medium range forecast skill of limited area models, PhD Thesis, University of Athens, Greece.

Mesinger, F., T.L Black, and Z. I. Janjic, 1988: A summary of the NMC step-mountain (ETA) coordinate model. *Proc. Workshop on Limited-area Modeling Intercomparison*, Boulder, Colorado, NCAR, 91-98.

Nickovic, S., G. Kallos, A. Papadopoulos, O. Kakaliagou, 2001: A model for prediction of desert dust cycle in the atmosphere, *Journal of Geophysical Research*, 106, 18,113-18,129.

Schulz, M., Y. J. Balkanski, W. Guelle, and F. Dulac, 1998 : Role of aerosol size distribution and source location in a three-dimensional simulation of a Saharan dust episode tested against satellite-derived optical thickness, *Journal of Geophysical Research*, 103, 10,579– 10,592, 1998.

Seinfeld, J.H., and S.N. Pandis. 1998. *Atmospheric Chemistry and Physics, From Air Pollution to Climate Change*. John Wiley and Sons, Inc., NY.

Shettle, E. P., 1984: Optical and radiative properties of a desert aerosol model, in *IRS '84: Current Problems in Atmospheric Radiation*, edited by G. Fiocco, pp. 74– 77, A. Deepak, Hampton, Va.

Slinn S.A. and W.G.N. Slinn. 1980. Predictions for particle deposition on natural waters. *Atmos. Environ.*, 24, 1013-1016.

Tegen, I, and I Fung, 1994: Modeling of mineral dust in the atmosphere: Sources, transport and optical thickness, *Journal of Geophysical Research*, 99,22,987-22,914.

Wilks, D.S., 1995: *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*, Academic Press NY, pp 233-283.

Zender, C. S., H. Bian, and D. Newman 2003, Mineral Dust Entrainment and Deposition (DEAD) model: Description and 1990s dust climatology, *Journal of Geophysical Research*, 108(D14), 4416, doi:10.1029/2002JD002775.