ΕΘΝΙΚΟ ΚΑΠΟΔΙΣΤΡΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ ΤΜΗΜΑ ΦΥΣΙΚΗΣ ΤΟΜΕΑΣ ΦΥΣΙΚΗΣ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ Μ.Δ.Ε. ΦΥΣΙΚΗΣ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΩΚΕΑΝΟΓΡΑΦΙΑΣ

ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΔΙΑΣΠΟΡΑΣ ΤΗΣ ΣΚΟΝΗΣ ΤΗΣ ΣΑΧΑΡΑΣ ΣΤΗ ΛΕΚΑΝΗ ΤΗΣ ΜΕΣΟΓΕΙΟΥ ΜΕ ΤΗ ΒΟΗΘΕΙΑ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ ΒΕΡΒΑΤΗΣ ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ

επιβλεποντές καθηγητές **Λασκαράτος αλεξάνδρος καλλός γεωργιός**

ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2004 Αθηνα

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η διπλωματική εργασία με θέμα τη διασπορά της σκόνης της Σαχάρας στη λεκάνη της Μεσογείου, εκπονήθηκε στα πλαίσια του Μεταπτυχιακού Διπλώματος Ειδίκευσης $(M.\Delta.E.)$ Φυσικής Περιβάλλοντος, του Τομέα Φυσικής Εφαρμογών. Η ακαδημαϊκή μονάδα στην οποία λαμβάνει χώρα το αντίστοιχο Μ.Δ.Ε. είναι του Εθνικού Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών (Ε.Κ.Π.Α.), της Σχολής Θετικών Επιστημών του Τμήματος Φυσικής.

Οι συντελεστές που βοήθησαν ουσιαστικά στη διάθεση, συλλογή και μεθόδων, προκειμένου να πραγματοποιηθεί το χρήση παρών σύγγραμμα, είναι οι καθηγητές και οι ερευνητικές ομάδες των εργαστηρίων Φυσικής Ωκεανογραφίας και Φυσικής Ατμόσφαιρας αντίστοιχα. Συγκεκριμένα ευχαριστώ θερμά το K° Αλέξανδρο Λασκαράτο, Επίκουρο Καθηγητή του Ε.Κ.Π.Α., για τη δυνατότητα που παρείχε, προκειμένου να εντρυφήσω σε θέματα Φυσικής μου Ωκεανογραφίας, καθώς επίσης για τις πολύτιμες συμβουλές, τη βοήθειά του και τις διορθώσεις που πραγματοποίησε πάνω στο κείμενο. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τα άλλα δύο μέλη της επιτροπής, Κ° Γεώργιο Κάλλο, Αναπληρωτή Καθηγητή του Ε.Κ.Π.Α. και Κ^α Μαρία Τζέλλα-Τόμπρου, Επίκουρη Καθηγήτρια του Ε.Κ.Π.Α., για τις επισημάνσεις τους, προκειμένου να ολοκληρωθεί η συγκεκριμένη διπλωματική εργασία. Ιδιαίτερα ευχαριστώ θερμά το K° Σαράντη Σοφιανό, Ερευνητή Φυσικό Ωκεανογράφο της ερευνητικής ομάδας του εργαστηρίου Φυσικής Ωκεανογραφίας του Τομέα Φυσικής Εφαρμογών, για τις υποδείξεις του σε θέματα βιβλιογραφίας και την υποστήριξή του καθ'όλη τη διάρκεια της διπλωματικής εργασίας. Τέλος θα ήθελα να

ευχαριστήσω τους Κ^ο Νικόλαο Σκλήρη και Κ^α Ανίτα Μαντζιαφού, Ερευνητές Φυσικούς Ωκεανογράφους του Τομέα Φυσικής Εφαρμογών, για τη βοήθεια και την άριστη συνεργασία μας.

> Βερβάτης Δ. Βασίλειος Αθήνα 2004

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Είναι γνωστό ότι η σκόνη της Σαχάρας διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στις βιογεωχημικές διεργασίες που συμβαίνουν στη Μεσόγειο Θάλασσα (Goudie and Middleton, 2001). Το θέμα που πραγματεύεται η παρούσα διπλωματική εργασία είναι η «Μελέτη της διασποράς της σκόνης της Σαχάρας στη λεκάνη της Μεσογείου με τη βοήθεια αριθμητικού μοντέλου». Αντικειμενικός στόχος της εργασίας αυτής, είναι η ρεαλιστικότερη προσομοίωση της διασποράς και διάχυσης της σκόνης της Σαχάρας στη Μεσόγειο Θάλασσα με τη χρήση περισσοτέρων της μίας κλάσεων σωματιδίων. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιείται αριθμητικό μοντέλο, το οποίο έχει τροποποιηθεί κατάλληλα, ώστε στη προσομοίωση να περιλαμβάνονται τέσσερις κλάσεις σωματιδίων SPM (Suspended Particulate Matter), τα οποία υφίστανται τις φυσικές διεργασίες της διάχυσης και μεταφοράς με βάση τη κυκλοφορία των θαλάσσιων υδάτων. Το κύριο χαρακτηριστικό που διαφοροποιείται μεταξύ των τεσσάρων κλάσεων, είναι η κατακόρυφη ταχύτητα καθίζησης (ws), η οποία είναι μεγαλύτερη για τα βαρύτερα σωματίδια σκόνης και αναμένεται να δημιουργήσει διαφορετική γεωγραφική κατανομή κατακόρυφα και οριζόντια των συγκεντρώσεων σκόνης. Προκειμένου να διαπιστωθεί ο βαθμός της διαφοροποίησης αυτής, που οφείλεται στις διαφορετικές κατακόρυφες ταχύτητες καθίζησης (ws), πραγματοποιείται σύγκριση μεταξύ δύο διαφορετικών πειραμάτων. Στό πρώτο πείραμα προσομοιώνουμε τη διασπορά και διάχυση της μίας ελαφρύτερης κλάσης SPM στη λεκάνη της Μεσογείου, ενώ στο δεύτερο πείραμα υπάρχουν τέσσερεις κλάσεις SPM, στις οποίες περιλαμβάνεται η ελαφρύτερη (εν γένει διαφορετική ποσότητα σε σχέση με το πρώτο πείραμα) και τρείς μεγαλύτερες και βαρύτερες κλάσεις (ατμοσφαιρικά

πεδία του μοντέλου SKIRON/Eta). Το χρονικό διάστημα ολοκλήρωσης των δύο προσομοιώσεων είναι οι οκτώ πρώτοι μήνες του έτους 2003 (μόνο γι' αυτό το διάστημα υπάρχουν κοινά ατμοσφαιρικά δεδομένα, για μία και τέσσερεις κλάσεις SPM). Η εν γένει μελέτη του κύκλου της σκόνης της Σαχάρας στη Μεσόγειο Θάλασσα, η ατμοσφαιρική, η παράκτια αλλά και η εναπόθεσή της στο βυθό, ο επεισοδιακός χαρακτήρας και η εναπόθεσή της κυρίως μέσω βροχοπτώσεων, η παγίδευσή της σε κυκλώνες και αντικυκλώνες και η μεταφορά της με βάση τη γενική κυκλοφορία, είναι επιμέρους στόχοι που μελετώνται προκειμένου να προχωρήσει η σύγκριση των δύο πειραμάτων.

Στο πρώτο κεφάλαιο δίνεται έμφαση στις καταιγίδες σκόνης Σαχάρας και τις συνέπειες που αυτές προκαλούν στο φυσικό οικοσύστημα. Στην αρχή του κεφαλαίου γίνεται εισαγωγή στα φυσικά χαρακτηριστικά της σκόνης της Σαχάρας και της αλληλεπίδρασής της με το περιβάλλον. Ως εκ τούτου αναφέρονται οι σημαντικότερες πηγές φυσικών αιωρούμενων σωματιδίων, με σημαντικότερη αυτήν της ερήμου Σαχάρα, καθώς επίσης και οι τροχίες μεταφοράς της σκόνης της Σαχάρας πάνω από το Βόρειο Ατλαντικό, τη Μεσόγειο Θάλασσα και τη Μέση Ανατολή. Στη συνέχεια παρουσιάζονται πίνακες από παλαιότερες μελέτες, της ετήσιας εναπόθεσης σκόνης Σαχάρας σε περιοχές της Ευρώπης και της Μεσογείου, σε συνδυασμό με τα χαρακτηριστικά μεγέθη και τα χημικά στοιχεία που σημαντικότερα την συνθέτουν. Επίσης περιγράφεται ο βιογεωχημικός κύκλος και ο ρόλος της σκόνης της Σαχάρας στην ατμόσφαιρα και τον ωκεανό, διαχωρίζοντας την εναπόθεση των ανθρωπογενών από τους φυσικούς ρύπους στη Μεσόγειο Θάλασσα. Κλείνοντας το πρώτο κεφάλαιο η διπλωματική εργασία συνδέεται με το Ευρωπαικό πρόγραμμα ADIOS και παρουσιάζονται οι σημαντικότεροι στόχοι της.

Στο δεύτερο κεφάλαιο περιγράφεται η μέθοδος που εφαρμόστηκε για την προσομοίωση της διασποράς της σκόνης της Σαχάρας στη λεκάνη της Μεσογείου. Αρχικά αναφέρονται τα γεωφυσικά χαρακτηριστικά και η γενική κυκλοφορία της λεκάνης, παρουσιάζοντας τη βαθυμετρία της

και τους θαλάσσιους ιμάντες κυκλοφορίας της. Έπειτα περιγράφεται η βασική μέθοδος εφαρμογής του αριθμητικού μοντέλου POM (Princeton Ocean Model) στη Μεσόγειο Θάλασσα. Αναλύονται οι βασικές αρχές και οι εξισώσεις του ωκεανογραφικού μοντέλου, καθώς επίσης και η περιοχή ολοκλήρωσης και οι ανοιχτές οριακές συνθήκες που εφαρμόζονται. Στην τελευταία ενότητα του κεφαλαίου περιγράφεται η σύζευξη του ατμοσφαιρικού με το ωκεανογραφικό μοντέλο, η δράση των ατμοσφαιρικών πεδίων του μοντέλου SKIRON/Eta, οι συνθήκες θερμικών ροών, ισοζυγίου υδάτων (εξάτμιση-βροχόπτωση) και μεταφοράς ορμής στην επιφάνεια της θάλασσας.

Στο τρίτο κεφάλαιο, παρουσιάζονται αναλυτικά και συγκρίνονται τα αποτελέσματα των δύο προσομοιώσεων της περιόδου 01/01/2003 έως 31/08/2003, για μία και τεσσερις κλάσεις σωματιδίων. Για την καλύτερη αποτύπωση των χωρικών διακυμάνσεων της εναπόθεσης και διασποράς της σκόνης της Σαχάρας στη Μεσόγειο, υπολογίζονται συγκεντρώσεις και ροές στις δύο κύριες υπολεκάνες της, την Δυτική και Ανατολική Μεσόγειο. Στην αρχή του κεφαλαίου παρουσιάζονται οι χρονοσειρές ατμοσφαιρικής εναπόθεσης στη λεκάνη της Μεσογείου, όπως δίνονται από το ατμοσφαιρικό μοντέλο. Εν συνεχεία ακολουθούν οι συγκεντρώσεις SPM στη λεκάνη. Για το σκοπό αυτό μελετούνται η χρονική μεταβολή σε ενδιάμεσα θαλάσσια στρώματα, η χωρική κατανομή σε διάφορα επίπεδα, αλλά και οι ζωνικές κατατομές των συγκεντρώσεων SPM στη Μεσόγειο. Τέλος παρουσιάζονται η χρονική διακύμανση και η χωρική κατανομή της εναπόθεσης SPM στο βυθό.

Στο τέταρτο και τελευταίο κεφάλαιο αναπτύσσονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν, με βάση τη παρουσίαση των αποτελεσμάτων των δύο πειραμάτων. Η βασική εφαρμογή και καινοτομία της διπλωματικής εργασίας, ουσιαστικά επικεντρώνεται στη προσομοίωση της διασποράς με περισσότερες της μίας κλάσης SPM, δίνοντας ρεαλιστικότερα αποτελέσματα και αυξάνοντας παράλληλα τους βαθμούς ελευθερίας του προβλήματος παρακολούθησης της SPM, συνυπολογίζοντας τη φύση, το μέγεθος και το σχήμα των αιωρούμενων σωματιδίων (Stokes law).

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<u>ΠΡΟΛΟΓΟΣ</u>	2
<u>ПЕРІЛНΨН</u>	4
<u>IIEPIEXOMENA</u>	7

<u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1</u>

<u>ΚΑΤΑΙΓΙΔΕΣ ΣΚΟΝΗΣ ΣΑΧΑΡΑΣ ΚΑΙ ΣΥΝΕΠΕΙΕΣ ΣΤΟ</u> <u>ΦΥΣΙΚΟ ΟΙΚΟΣΥΣΤΗΜΑ</u>
1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΑ ΦΥΣΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΗΣ ΣΚΟΝΗΣ ΤΗΣ ΣΑΧΑΡΑΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΜΕ ΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ
1.1.1 Σημαντικότερες πηγές φυσικών SPM14
1.1.2 Τροχιές μεταφοράς σκόνης Σαχάρας
1.1.2.1 Τροχιές σκόνης Σαχάρας πάνω από το Βόρειο Ατλαντικό
1.1.2.2 Τροχιές σκόνης Σαχάρας πρός την Ευρώπη20
1.1.2.3 Τροχιές σκόνης Σαχάρας πρός την Ανατολική Μεσόγειο21
1.1.3 Ρυθμοί εναπόθεσης σκόνης Σαχάρας22
1.1.4 Χαρακτηριστικά μεγέθη σωματιδίων σκόνης Σαχάρας24
1.2 Ο ΒΙΟΓΕΩΧΗΜΙΚΟΣ ΚΥΚΛΟΣ ΚΑΙ ΡΟΛΟΣ ΤΗΣ ΣΚΟΝΗΣ ΤΗΣ ΣΑΧΑΡΑΣ ΣΤΗΝ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑ ΚΑΙ ΤΟΝ ΩΚΕΑΝΟ26

1.2.1	Εναπόθεση Μεσόγειο Θ	ανθρωπογενών)άλασσα	και	φυσικών	ρύπων	στη 26
1.2.2	Πρόγραμμα of pollutant Mediterrane	ADIOS (Atmospl s, key elements an Sea)	heric and	Deposition nutrients	and In on the	npact Open 28

<u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2</u>

ΜΕΘΟΔΟΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΤΗΣ ΔΙΑΣΠΟΡΑΣ SPM
ΣΤΗ ΛΕΚΑΝΗ ΤΗΣ ΜΕΣΟΓΕΙΟΥ
2.1 ΓΕΩΦΥΣΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΚΑΙ ΓΕΝΙΚΗ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑ ΤΗΣ ΛΕΚΑΝΗΣ ΤΗΣ ΜΕΣΟΓΕΙΟΥ
2.2 ΒΑΣΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΤΟΥ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΡΟΜ ΣΤΗ ΜΕΣΟΓΕΙΟ ΘΑΛΑΣΣΑ
2.2.1 Το αριθμητικό μοντέλο POM <i>34</i>
2.2.1.1 Οι βασικές αρχές που ακολουθεί το αριθμητικό μοντέλο ΡΟΜ
2.2.1.2 Οι βασικές εξισώσεις του αριθμητικού μοντέλου POM
2.2.2 Προσομοίωση της SPM με το POM <i>39</i>
2.2.2.1 Περιοχή ολοκλήρωσης και ανοιχτές οριακές συνθήκες
2.2.2.2 Εξίσωση μεταφοράς και διάχυσης της SPM (passive tracer) στο μοντέλο POM
2.2.3 Αριθμητικά πειράματα με διαφορετικές κλάσεις σωματιδίων
2.3 ΔΡΑΣΗ ΤΩΝ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΩΝ ΠΕΔΙΩΝ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ SKIRON/ETA (INPUT FORCING)
2.3.1 Συνθήκες θερμικών ροών στην επιφάνεια της θάλασσας.45
2.3.1.1 Ισοζύγιο ακτινοβολιών Qr
2.3.1.2 Ροές λανθάνουσας Qe και αισθητής θερμότητας Qh46

2.3.2	Οριακές συνθήκες ισοζυγίου νερού στην επιφάνεια θάλασσας	της 47
2.3.3	Οριακές συνθήκες μεταφοράς ορμής στην επιφάνεια θάλασσας	της 47
2.3.4	Αρχικές συνθήκες (Initialization)	48

<u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3</u>

<u>ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ</u>
3.1 ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗ ΕΝΑΠΟΘΕΣΗ ΣΤΗ ΜΕΣΟΓΕΙΟ50
3.2 ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΕΙΣ SPM ΣΤΗ ΛΕΚΑΝΗ ΤΗΣ ΜΕΣΟΓΕΙΟΥ58
3.2.1 Χρονική μεταβολή των συγκεντρώσεων SPM σε ενδιάμεσα θαλάσσια στρώματα της λεκάνης της Μεσογείου58
3.2.2 Χωρική συγκέντρωση SPM σε διάφορα επίπεδα της Μεσογείου
3.2.2.1 Χάρτες συγκέντρωσης SPM στο θαλάσσιο επίπεδο των 5m
3.2.2.2 Χάρτες συγκέντρωσης SPM στο θαλάσσιο επίπεδο των 50m
3.2.2.3 Χάρτες συγκέντρωσης SPM στο θαλάσσιο επίπεδο των 150m
3.2.3 Ζωνικές κατατομές συγκέντρωσεις SPM στη Δυτική (WM) και Ανατολική (EM) Μεσόγειο
3.3 ΕΝΑΠΟΘΕΣΗ ΤΗΣ SPM ΣΤΟ ΒΥΘΟ ΤΗΣ ΜΕΣΟΓΕΙΟΥ94
3.3.1 Χρονική διακύμανση της εναπόθεσης SPM στο βυθό της Μεσογείου94
3.3.2 Χωρική κατανομή της εναπόθεσης SPM στο βυθό της Μεσογείου
3.4 ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

<u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4</u>

<u>ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ</u>	
4.1 ΣΥΖΗΤΗΣΗ	
4.2 ΣΥΝΟΨΗ	110
4.3 ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΕΣ ΠΡΟΕΚΤΑΣΕΙΣ	

<u>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ</u>	112
<u>ПАРАРТНМА</u>	119
Α. ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ-ΣΧΗΜΑΤΩΝ	119
Β. ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ	

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ΚΑΤΑΙΓΙΔΕΣ ΣΚΟΝΗΣ ΣΑΧΑΡΑΣ ΚΑΙ ΣΥΝΕΠΕΙΕΣ ΣΤΟ ΦΥΣΙΚΟ ΟΙΚΟΣΥΣΤΗΜΑ

1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΑ ΦΥΣΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΗΣ ΣΚΟΝΗΣ ΤΗΣ ΣΑΧΑΡΑΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΜΕ ΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ

Η Σαχάρα είναι μία απο τις μεγαλύτερες πηγές αιωρούμενων σωματιδίων σκόνης παγκοσμίως (Schutz et al., 1981; D'Almeida, 1987; Swap et al., 1996), ενώ υπολογίζεται ότι περίπου η μισή ποσότητα αιωρούμενων σωματιδίων που εναποτίθεται στους ωκεανούς προέρχεται από την έρημο της Σαχάρας. Η μεταφορά μεγάλων ποσοτήτων σκόνης Σαχάρας, υποδεικνύει την σπουδαιότητα των γεωμορφολογικών διεργασιών λόγω της αιολικής ενέργειας, όπου μέσω της τριβής του ανέμου με το έδαφος διαμορφώνεται διαρκώς το τοπίο της ερήμου.

Οı περιβαλλοντικές συνέπειες της διασποράς και διάχυσης αιωρούμενων σωματιδίων σκόνης Σαχάρας (Suspended Particulate Matter, στο εξής SPM) στην ατμόσφαιρα και στους ωκεανούς, μπορούν να μελετηθούν μέσα από το φάσμα πιθανών φυσικών, χημικών και βιολογικών διεργασιών, οι οποίες επιφέρουν σημαντικές κλιματολογικές μεταβολές. Μία από τις φυσικές διεργασίες που συμβαίνουν στην ατμόσφαιρα είναι η απορρόφηση και σκέδαση της ηλιακής ακτινοβολίας από την SPM (Li et al., 1996; Moulin et al., 1997; Alpert et al., 1998; Miller and Tegen, 1998), η οποία μπορεί να επηρεάσει τη θερμοκρασία της ατμόσφαιρας και της θάλασσας. Η SPM τροποποιεί την μικρού μήκους κύματος ηλιακή ακτινοβολία η οποία

φτάνει στο έδαφος, καθώς επίσης και τη μεγάλου μήκους κύματος υπέρυθρη ακτινοβολία που εκπέμπεται από την γή προς το διάστημα. Η ισορροπία μεταξύ των δύο αυτών τάσεων καθορίζει κατά πόσο θα έχουμε ψύξη ή θέρμανση της ατμόσφαιρας και της θάλασσας. Καθοριστικές μεταβλητές στη ψύξη ή θέρμανση λόγω απορρόφησης και σκέδασης είναι το μέγεθος και η χημική σύσταση της SPM. Σύμφωνα με μελέτες που έγιναν (Fouquart et al., 1987) βρέθηκε ότι επεισόδια σκόνης της Σαχάρας μπορεί να προκαλέσουν ψύξη ή θέρμανση της ατμόσφαιρας, σε άμεση εξάρτηση από το πλήθος και το μέγεθος των μεταλλικών στοιχείων SPM. Επίσης σημαντικοί παράγοντες ψύξης και θέρμανσης της ατμόσφαιρας είναι τα σύννεφα και η λευκάυγεια του εδάφους (Nicholson, 2000), με τα αιωρούμενα σωματίδια να λειτουργούν ώς πυρήνες συμπύκνωσης υδρατμών και να οδηγούν στο σχηματισμό νεφών. Σε αυτή τη περίπτωση το ύψος και το οπτικό τους βάθος, καθόρίζουν σε μεγάλο βαθμό την επίδρασή τους στην άμεση ηλιακή ακτινοβολία (Quijano et al., 2000). Οι αλλαγές στις ατμοσφαιρικές θερμοκρασίες και στις συγκεντρώσεις πυρήνων δυνητικής συμπύκνωσης, εν δυνάμει δημιουργούν θερμοκρασιακές αναστροφές και σχηματισμό νεφών, με αποτέλεσμα σημαντικές διαφοροποιήσεις στα ύψη των βροχοπτώσεων (Bryson and Barreis, 1967; Maley, 1982). Για παράδειγμα κατά τη διάρκεια του ταξιδιού της SPM από το οροπέδιο Hoggar (στη περιοχη της νότιας Αλγερίας) έως το Ισραήλ, οι αέριες μάζες εμπλουτίζονται με θειούχες ανθρωπογενείς ενώσεις, καθώς και με θαλασσινό αλάτι από τη Μεσόγειο (Levin et al., 1996), λειτουργώντας παράλληλα με την SPM στη δημιουργία πυρήνων παγοκρυστάλλων συμπύκνωσης και κατ'επέκταση νεφών, διαδραματίζοντας το δικό τους ρόλο σε περιπτώσεις βροχοπτώσεων.

Η SPM μπορεί επίσης να επιδράσει σε πρωτογενείς θαλάσσιες βιολογικές διεργασίες (Jickells et al., 1998), αφού η εναπόθεσή της στην επιφάνεια και τον πυθμένα των ωκεανών, παρέχει πολύτιμα θρεπτικά άλατα για τις διεργασίες αυτές. Μελετητές προσδιόρισαν το ποσοστό συνεισφοράς αερολυμάτων της δυτικής Αφρικής (Talbot et al., 1986) (Πιν.1.1), τεσσάρων ειδών ιόντων και ριζών (Swap et al., 1996)

(Πιν.1.2), ενώ πρέπει να συνυπολογιστούν και οι σημαντικές συγκεντρώσεις σιδήρου (Zhu et al., 1997), οι οποίες συνεισφέρουν σημαντικά στην παραγωγή φυτοπλακτού μειώνοντας τα επίπεδα αζώτου, το οποίο προκαλεί «σοκ» στην κοινότητα του φυτοπλαγκτού (Gruber and Sarmiento, 1997). Τα αερολύματα σκόνης Σαχάρας επιδρούν δυναμικά στα θρεπτικά συστατικά και στο βιογεωχημικό κύκλο τόσο του γήινου όσο και του ωκεάνιου οικοσυστήματος. Είναι χαρακτηριστικό ότι η SPM μπορεί να ταξιδέψει χιλιάδες χιλιόμετρα και να φτάσει έως τους κοραλλιογενείς υφάλους της Καραϊβικής, όπου έχει παρατηρηθεί ότι σε περιόδους επεισοδίων σκόνης Σαχάρας διαδίδονται επιδημικές ασθένειες επηρεάζοντας την ζωτικότητα των κοραλλιογενών υφάλων (Shinn et al.,2000).

Οι συγκεντρώσεις της SPM μπορεί να αλλάξουν σημαντικά, ακολουθώντας κλιματικές διαταραχές, όπως το North Atlantic Oscillation (Moulin et al., 1997; Middleton, 1985; Littmann, 1991a). Επίσης η ολοένα και προστιθέμενη σκόνη της Σαχάρας πάνω στο έδαφος, είναι δυνατόν να αλλάξει τη μορφολογία του (Vine et al., 1987), ενώ όμοια η προσθήκη ιζήματος στη Μεσόγειο Θάλασσα, μπορεί να χαρακτηρίσει έως ένα σημαντικό βαθμό (>50%) την παράκτια γεωμορφολογία της λεκάνης (Guerzoni et al., 1999, p. 147).

Πίνακας 1.1 Συνεισφορά % θρεπτικών αλάτων από τη Σαχάρα στα αερολύματα της βόρειας Αφρικής (Talbot et al., 1986; Swap et al., 1996)

		Συνεισφορά(%)
	Μέση	Ελάχιστη	Μέγιστη
K^+	0.17	0.1	0.33
$\mathrm{NH_4}^+$	0.18	0.01	0.27
NO ₃ ⁻	0.51	0.21	1.5
PO_4^{-3}	0.037	0.017	0.071

Μέγιστη
9.5
7.8
43.1
2.1

Πίνακας 1.2 Μεταφορά μάζας κατά τη δυτική ροή (μέσες τιμές 10¹¹ g/yr για τα έτη 1989-1992) (Swap et al., 1996)

1.1.1 Σημαντικότερες πηγές φυσικών SPM

Ένας καθοριστικός παράγοντας για τη μελέτη των περιβαλλοντικών επιπτώσεων της SPM, είναι ο προσδιορισμός των σημαντικότερων πηγών παροχής φυσικών SPM στην ατμόσφαιρα. Είναι γνωστό ότι οι σημαντικότερες πηγές φυσικών αερολυμάτων στην γή είναι οι έρημοι και οι ηφαιστειογενείς περιοχές, με σαφώς σημαντικότερο ρόλο των περιοχών με εδάφη ερημικού τύπου. Οι έρημοι καλύπτουν περίπου το 20% της επιφάνειας του πλανήτη και είναι περιοχές με θερμό και ξηρό κλίμα που παρουσιάζουν μεγάλο ημερίσιο θερμοκρασιακό εύρος, το οποίο μπορεί να ξεπεράσει τους 50 °C, με αποτέλεσμα να έχουν περιορισμένη χλωρίδα και πανίδα σε αυτές τις ακραίες κλιματολογικές συνθήκες. Στο Σχ.1.1 παρουσιάζονται οι μεγαλύτερες έρημοι της Γής, οι οποίες είναι:

- Η έρημος Σαχάρα, η μεγαλύτερη στο πλανήτη, η οποία καλύπτει σχεδόν όλη τη βόρεια Αφρική
- Η έρημος που καλύπτει το μεγαλύτερο μέρος της Αραβικής χερσονήσου
- Η έρημος Ατακάμα στα δυτικά παράλια της Νότιας Αμερικής στη Χιλή

- Η έρημος που καλύπτει το μεγαλύτερο τμήμα της κεντρικής και δυτικής Αυστραλίας
- Η έρημος του Ιράν στα βορειοανατολικά της Αραβικής χερσονήσου
- Η έρημος Καλαχάρη, η οποία καλύπτει το μεγαλύτερο μέρος του νοτιοανατολικού άκρου της Αφρικής
- Η έρημος της Ναμίμπιας, κατά μήκος των νοτιοδυτικών ακτών της Αφρικής
- Η έρημος του Μεξικού στις νοτιοδυτικές ακτές της Βορείου Αμερικής
- Η έρημος της Παταγονίας στα βορειοανατολικά της Βορείου Αμερικής
- Η ηπειρωτική έρημος Takla Makan-Gobi στη Κεντρική Ασία
- Η έρημος Thar στις βορειοδυτικές Ινδίες
- Η έρημος Turkestan στη νότια Ρωσσία



Σχήμα 1.1 Οι μεγαλύτερες έρημοι στη Γή





Ο τρόπος με τον οποίο γίνεται σήμερα η ταυτοποίηση των SPM, είναι σημαντικότερων πηγών 01 δορυφορικές εικόνες ΜΕΤΕΟSΑΤ, προσδιορίζοντας το φάσμα της υπέρυθρης ακτινοβολίας και δημιουργώντας δείκτες Infra-red Difference Dust Index, στο εξής IDDI (Brooks and Legrand, 2000). Σύμφωνα με τον δείκτη IDDI, οι σημαντικότερες περιοχές-πηγές σκόνης Σαχάρας στην ατμόσφαιρα, είναι η κοιλάδα Bodèlè μεταξύ Tibesti και Lake Chad (Εικ.1.1) (Kalu et al., 1979; Herrmann, 1999) και ακολουθούν ορισμένες περιοχές της Μαυριτανίας, το Mali, η νότια Αλγερία και η έρημος της Nubian στη νότια Αίγυπτο και το Βόρειο Σουδάν. Άλλη σημαντική μέθοδος ανίχνευσης περιοχών-πηγών σκόνης Σαχάρας, είναι βάση η

δορυφορικών δεδομένων του όζοντος στην ατμόσφαιρα με τη βοήθεια φασματογράφων (Total Ozone Mapping Spectrometer, στο εξής TOMS) (Middleton and Goudie, in press). Η αρχή λειτουργίας του συστήματος TOMS, στηρίζεται στην απορρόφηση της UV ακτινοβολίας από τα αερολύματα στην ατμόσφαιρα. Από την χρωματική αντίθεση του φάσματος στα συγκεκριμένα μήκη κύματος 340 και 380 nm, προκύπτει γραμμική αναλογία της πυκνότητας των αερολύμάτων με το οπτικό τους βάθος (Aerosol Index, στο εξής AI) στην ατμόσφαιρα (Herrmann et al., 1999; Chiapello et al., 1999; Hsu et al., 1999). Οι υψηλές τιμές του AI βρίσκονται σε συμφωνία με τον IDDI και υποδεικνύουν ίδιες περιοχές, όπως το Bodèlè, την Λιβύη και την Μαυριτανία.



Σχήμα 1.2 Τύποι εδάφους της Αφρικανικής Ηπείρου

Έχουν γίνει διάφορες μελέτες για τον προσδιορισμό της μάζας SPM που προέρχεται από την έρημο Σαχάρα (Πιν.1.3), χρησιμοποιώντας ώς δεδομένα τη σύσταση του εδάφους σε συνδυασμό με αριθμητικά μοντέλα (Callot et al., 2000). Σύμφωνα με τις εκτιμήσεις αυτές παρουσιάζεται ένα ευρύ φάσμα τιμών, το οποίο μπορεί να αντανακλά τις διαφοροποιήσεις μεταξύ των εκάστοτε αριθμητικών μοντέλων και των χωροχρονικών οριακών συνθηκών. Μεγάλες διαφοροποιήσεις παρουσιάζονται και στις εκτιμήσεις εκπομπών SPM στην ατμόσφαιρα σε παγκόσμια κλίμακα (Πιν.1.4), οι οποίες οφείλονται στις υποθέσεις των αριθμητικών μοντέλων, όπως ο ρυθμός σκέδασης των SPM από τα μόρια του αέρα και στις οριακές συνθήκες (Prospero et al., 1996a) που χρησιμοποιήθηκαν.

Authorica	Ετήσια	
Author(s)	ποσότητα(10 ⁶ tons/yr)	
Jaenicke(1979)	260	
Schutz et al.(1981)	260	
Prospero(1996a,b)	170	
Swap et al.(1996)	130-460	
d'Almeida(1986)	630-710	
Marticorena and Bergametti(1996)	586-665	
Callot et al.(2000)	760	

Πίνακας 1.3 Εκτιμήσεις προσδιορισμού μάζας SPM από την έρημο της Σαχάρας (Goudie and Middleton, 2001)

Πίνακας 1.4 Εκτιμήσεις εκπομπών SPM στην ατμόσφαιρα σε παγκόσμια κλίμακα (Goudie and Middleton, 2001)

Author(s)	Ετήσια ποσότητα(10 ⁶ tons)
Schutz(1980)	>5000
Peterson and Junge(1971)	500
Andreae(1995)	1500
Duce(1995)	1000-2000
d'Almeida(1986)	1800-2000
Tegen and Fung(1994)	3000

1.1.2 Τροχιές μεταφοράς σκόνης Σαχάρας

Η σκόνη της Σαχάρας μεταφέρεται συνήθως από τις πηγές της κατά μήκος τριών διευθύνσεων:

- Πρός τα δυτικά πάνω από το Βόρειο Ατλαντικό Ωκεανό (Carlson and Prospero, 1972; Moulin et al., 1997), με προορισμό τη Βόρεια (Perry et al., 1997) και τη Νότια (Swap et al., 1992) Αμερική
- Πρός Βορρά πάνω από τη Μεσόγειο Θάλασσα (Loye-Pilot et al., 1986), με προορισμό τη Νότια Ευρώπη (Avila et al., 1997; Rodriguez et al., 2001) και μερικές φορές έως τη Σκανδιναβία (Franzen et al., 1994)
- Κατά μήκος ανατολικών τροχιών πάνω από την Ανατολική Μεσόγειο (Herut and Krom, 1996; Kubilay et al., 2000) και φτάνοντας έως τη Μέση Ανατολή (Ganor et al., 1991).

1.1.2.1 Τροχιές σκόνης Σαχάρας πάνω από το Βόρειο Ατλαντικό

Κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού σε γεωγραφικά πλάτη 15-20°N πάνω από τη Δυτική Αφρική, ξεσπούν θερμικές καταιγίδες με έντονα ανοδικά ρεύματα, λόγω πολύ μεγάλης θέρμανσης του εδάφους, μεταφέροντας πλούμια σκόνης, που φτάνει και το 50% του συνολικού όγκου της SPM (Schutz et al., 1981; D;Almeida, 1986), πάνω από το Bóρειο Ατλαντικό. Σημαντικό ρόλο παίζει και ο αντικυκλώνας των Αζορών, ο οποίος κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού είναι αρκετά εκτεταμένος και μεταφέρει SPM από τροπικές σε υποτροπικές περιοχές του Bóρειου Ατλαντικού, δικαιολογώντας έως ένα βαθμό και την εποχικότητα της υπερατλαντικής μεταφοράς SPM. Λόγω της πολύπλοκης δομής της ατμοσφαιρικής κυκλοφορίας, φλέβες SPM κινούμενες πρός Boρρά μπορει να μεταφερθούν έως τις δυτικές ακτές της Ευρώπης (Εικ.1.2). Οι πιο πιθανές πηγές για τα υπερατλαντικά πλούμια SPM, είναι η Μαυριτανία, το Μαλί (Εικ.1.1) και πιο βόρεια το Μαρόκο.



- Εικόνα 1.2 Σκόνη Σαχάρας πάνω από το Βόρειο Ατλαντικό και τη Δυτική Ευρώπη (SeaWiFS Project, NASA/Goddard Space Flight Center and ORBIMAGE)
- 1.1.2.2 Τροχιές σκόνης Σαχάρας πρός την Ευρώπη

Αρκετά συχνή είναι η εναπόθεση σκόνης Σαχάρας, μέσω υγρής εναπόθεσης, πάνω από τη νότια Ευρώπη (Εικ.1.3), γεγονός καταγεγραμένο από την αρχαιότητα (Bucher and Lucas, 1984), ενώ λιγότερο συχνή είναι η εναπόθεση SPM σε βορειότερα γεωγραφικά πλάτη, όπως στη Μεγάλη Βρετανία (Wheeler, 1986), στην Ολλανδία (Reiff et al., 1986), στη Γερμανία (Littmann, 1991b) και στη Σκανδιναβία (Franzen et al., 1994). Μεμονωμένα επεισόδια βροχοπτώσεων που μεταφέρουν μεγάλη ποσότητα σκόνης Σαχάρας είναι δυνατό να συμβούν σε αρκετά μεγάλη εκταση, όπως αυτό που καταγράφηκε το Μάρτιο του 1991, το οποίο κάλυψε μία επιφάνεια το λιγότερο 320.000 Km², από την περιοχή της Σικελίας έως τη Σουηδία και Φιλανδία (Burt, 1991a; Bucher and Dessens, 1992; Franzen et al., 1995). Στις αρχές της δεκαετίας του 1980 έγιναν εκτιμήσεις της ποσότητας SPM που μεταφέρεται πρός την Ευρώπη, με βάση φωτομετρικά δεδομένα της ηλιακής ακτινοβολίας (D'Almeida et al., 1986). Υπολογίστηκε ότι 80-120 εκατομμύρια τόνοι το χρόνο SPM, μεταφέρονται από τη Νότια Αλγερία και τη Δυτική Σαχάρα-Νότιο Μαρόκο (Molinaroli et al., 1996), πρός τη Δυτική Ευρώπη.



Εικόνα 1.3 Επεισόδιο καταιγίδας σκόνης Σαχάρας πάνω από τη κεντρική Μεσόγειο και τη νότια Ευρώπη, στις 18 Ιουλίου του 2000 (SeaWiFS Project, NASA/Goddard Space Flight Center and ORBIMAGE)

1.1.2.3 Τροχιές σκόνης Σαχάρας πρός την Ανατολική Μεσόγειο

Μεταφορά SPM από τη Βόρεια Αφρική πρός την Ανατολική Μεσόγειο (Εικ.1.4) παρατηρείται κυρίως την άνοιξη και σχετίζεται άμεσα με την ανατολική κυκλοφορία των βαρομετρικών χαμηλών και των μετώπων που τα συνοδεύουν, σε μικρά εν γένει γεωγραφικά πλάτη την συγκεκριμένη εποχή του έτους. Αντίθετα η μεταφορά SPM το φθινόπωρο προς τη Μεσόγειο από περιοχές της Μέσης Ανατολής (Dayan, 1986; Kubilay et al., 2000). Η μεταφορά SPM πρός την κεντρική Μεσόγειο χαρακτηρίζεται από επεισόδια τα οποία διαρκούν από 2 έως 4 ημέρες, σε αντίθεση με τη μέση διάρκεια των επεισοδίων που συμβαίνουν στην Ανατολική Μεσόγειο από την έρημο της Αραβίας και διαρκούν μία ημέρα (Dayan et al., 1991). Η Κεντρική Αλγερία είναι η πιο συχνή περιοχη-πηγή SPM τα οποία φτάνουν στο Ισραήλ (Ganor et al., 1991), καθώς επίσης άλλες πιθανές πήγες είναι τα βουνά Hoggar Massif και Tibesti στο βόρειο Chad (Ganor and Foner, 1996).



Εικόνα 1.4 Επεισόδιο καταιγίδας σκόνης Σαχάρας πάνω από την ανατολική Μεσόγειο, στις 4 Απριλίου του 2003 (SeaWiFS Project, NASA/Goddard Space Flight Center and ORBIMAGE)

1.1.3 Ρυθμοί εναπόθεσης σκόνης Σαχάρας

Εκτιμήσεις για το ρυθμό εναπόθεσης σκόνης Σαχάρας σε έναν αριθμό περιοχών με διαφορετικές αποστάσεις από την έρημο της Σαχάρας, παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.5. Όπως είναι αναμενόμενο υπάρχει η τάση οι ρυθμοί να είναι μικρότεροι στις πιο απομακρυσμένες περιοχές από τις πήγες SPM. Έτσι οι τιμές για τη Κεντρική Γαλλία είναι 1 g/m², ενώ στις Άλπεις είναι μικρότερες από 1 g/m². Αντίθετα στη νότια Ευρώπη εκτιμώνται μεγαλύτεροι ρυθμοί εναπόθεσης. Έτσι, στη βορειοανατολική Ισπανία οι τιμές κυμαίνονται στα 5.1 g/m² και νοτιότερα στη Σαρδινία, τη Κορσική, τη Κρήτη και τη νοτιοανατολική Μεσόγειο, οι περισσότερες τιμές κυμαίνονται από 10 έως 40 g/m².

		Annual
Source	Location	deposition
		(g/m^2)
Nihlen and Olsson(1995)	Aegean Sea	11.2-36.5
Le-Bolloch et al.(1996)	S Sardinia	6-13
Wagenbach and Geis(1989)	Swiss Alps	0.4
De Angelis and Gaudichet(1991)	French Alps	0.2
Avila et al.(1996)	NE Spain	5.1
Bergametti et al.(1989)	Corsica	12
Loyle-Pilot et al.(1986)	Corsica	12.5
Bucher and Lucas(1984)	Central France	1
Pye(1992)	Crete	10-100
Herut and Krom(1996)	Israel coast	72
Herut and Krom(1996)	SE Mediterranean	36
Measures and Brown(1996)	Gulf of Guinea	3.4-11.5
Maley(1982)	S Chad	109
McTainsh and Walker(1982)	N Nigeria	137-181
Drees et al.,(1993)	SW Niger	200

Πίνακας 1.5	Εναπόθεση	σκόνης Σαχάρα	ις σε περιοχέ	ς της Ευρώ	πης και
	της Μεσογε	είου (Goudie an	d Middleton,	2001)	

Προσπάθειες εκτίμησης του ρυθμού εναπόθεσης SPM πάνω από την επιφάνεια της Μεσογείου Θάλασσας, έγιναν με βάση αριθμητικά

μοντέλα (Prospero, 1996a), τα οποία δίνουν τιμές 3-14 g/(m²year) συγκρίσιμες με τις άμεσες μετρήσεις.

1.1.4 Χαρακτηριστικά μεγέθη σωματιδίων σκόνης Σαχάρας

Τα χαρακτηριστικά μεγέθη των σωματιδίων σκόνης Σαχάρας συνοψίζονται στο Πίνακα 1.6. Πρέπει να σημειωθεί ότι σχεδόν όλα τα χαρακτηριστικά αναφέρονται σε σωματίδια, που εναποτέθηκαν κατά τη διάρκεια επεισοδίων βροχόπτωσης, σε διαφορετικές περιοχές από τις κύριες πηγές τους, από τις οποίες ενδεχομένως προέρχονται. Και επειδή περιοχές όπως η Δυτική Αφρική, έχουν πιο ξηρό και θερμό κλίμα από τις περιοχές των βροχοπτώσεων, όπως ο Ατλαντικός, η Μεσόγειος και η Ευρώπη, είναι πιθανόν τα σωματίδια σκόνης να έχουν πιο τραχύ και ακατέργαστο σχήμα από αυτό του Πίνακα 1.6. Οι τρείς βασικές κατηγορίες ανάλογα με τη διάμετρο των σωματιδίων είναι: (1) η ιλύς, λεπτοί λασπώδεις κόκκοι ιζήματος (fine silt-mean sizes) με διάμετρο από 5 έως 30 μm, (2) ίζημα μεσαίου μεγέθους (median sizes) με διάμετρο που φτάνει έως τα 74 μm (McTainsh and Walker, 1982) και (3) χοντροί κόκκοι, ψήγματα σκόνης (modal sizes) με τις μεγαλύτερες κατά κανόνα διαμέτρους. Επίσης υπάρχει μία κατηγορία πολύ μικρών σωματιδίων σκόνης (ιχνοστοιχεία Άργιλου-clay) με διάμετρο μικρότερη των 2 μm, της οποίας τα ποσοστά στις συγκεντρώσεις της σκόνης Σαχάρας, φαίνονται στο Πίνακα 1.6.

Σύμφωνα με δειγματοληπτικά δεδομένα, από τη νότιο Σαχάρα και την Ευρώπη, προκύπτει μία εικόνα από τα σημαντικότερα χημικά στοιχεία που συνθέτουν την SPM. Από τα δεδομένα αυτά τόσο η σκόνη στην Ευρώπη, όσο και στην έρημο Σαχάρα περιέχει σε μεγάλο βαθμό SiO₂ και Al₂O₃. Τα ίδια στοιχεία συναντάμε σε SPM στη Βόρειο Αμερική και στη Κίνα, γεγονός που υποδεικνύει ότι είναι κυρίαρχα στα πετρώματα παγκοσμίως. Η πληθώρα SiO₂ πιθανών και να αντανακλά στις σημαντικές ποσότητες χαλαζία στην αιολική σκόνη (Goudie and Middleton, 2001). Η σκόνη της Σαχάρας φαίνεται να περιέχει επίσης σημαντικές ποσότητες Fe₂O₃, MgO και CaO. Το ανθρακικό ασβέστιο (CaCO₃) το οποίο συναντάται σε αρκετές περιοχές της Βορείου Αφρικής, αναγνωρίζεται από την επίδρασή του να αυξάνει το pH του νερού της βροχής σε αρκετά μεγάλο αριθμό παρατηρήσεων στη Κορσική (Loye-Pilot et al., 1986) και στη περιοχή της Τουρκίας Erdemli (Ozsoy and Saydam, 2000). Τέλος η σκόνη της Σαχάρας μπορεί να χαρακτηρισθεί ώς μία από τις σημαντικότερες πηγές φωσφόρου (P), με τον οποίο εφοδιάζεται η Μεσόγειος (Mignon and Sandroni, 1999).

Source	Logation	SPM sizes	%clay<2
Source		(µm)	μm
McTainsh and Walker(1982)	Kano,Nigeria	8.9-74.3	2.3-32
Coude-Gaussen(1981)	Tanezrouft	72	9.4
Coude-Gaussen(1991)	Maghreb	5-40	-
Mattson and Nihlen(1996)	Crete	8-30	-
Sala et al.(1996)	Spain	4-30	-
Ratmeyer et al.(1991)	Sal Island	11.9-18.6	-
Littmann(1991a,b)	W Germany	2.2-16	-
Pye(1992)	Crete	4-16	15-45
Gillies et al.(1996)	Mopti,Italy	16.8	-
Ozer et al.(1998)	Genoa,Italy	14.6	-
Bucher and Lucas(1984)	SW France	4-12.7	-
Coude-Gaussen(1991)	S France	8-11	-
Tomadin et al.(1984)	Mediterranean	2-8	-
Coude-Gaussen(1988)	Paris Basin	8	-
Wagenbach and Geis(1989)	Swiss Alps	3-6	-
Talbot et al.(1986)	Barbados	3.2	-
Arimoto et al.(1997)	Bermuda	2-2.3	-
Afeti and Resch(2000)	S Ghana	1.16	-
Perry et al.(1997)	Continental US	<1.0	-
	continentar 05	1.0	

Πίνακας 1.6 Χαρακτηριστικά μεγέθη σκόνης Σαχάρας (Goudie and Middleton, 2001)

1.2 Ο ΒΙΟΓΕΩΧΗΜΙΚΟΣ ΚΥΚΛΟΣ ΚΑΙ ΡΟΛΟΣ ΤΗΣ ΣΚΟΝΗΣ ΤΗΣ ΣΑΧΑΡΑΣ ΣΤΗΝ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑ ΚΑΙ ΤΟΝ ΩΚΕΑΝΟ

1.2.1 Εναπόθεση ανθρωπογενών και φυσικών ρύπων στη ΜεσόγειοΘάλασσα

Ο βαθμός στον οποίο η ατμόσφαιρα καθορίζεται ώς η σημαντικότερη οδός, στο να περάσουν διάφοροι ανθρωπογενείς ρύποι, σε συνδυασμό με φυσικό φορτίο που εναποτίθεται στη Μεσόγειο Θάλασσα από την Ευρώπη και τη Βόρειο Αφρική, καθώς και ο ρόλος τους στις διάφορες βιογεωχημικές διεργασίες στο θαλάσσιο περιβάλλον, παραμένει σε μεγάλο βαθμό άγνωστος. Η κατανομή SPM στον ωκεανό, παίζει σημαντικό ρόλο στους βιογεωχημικούς κύκλους, καθώς επίσης και στον καθορισμό της ποιότητας των θαλάσσιων υδάτων (Goudie and Middleton, 2001). Οι επιδράσεις ορισμένων ανθρωπογενών χημικών στοιγείων και ενώσεων, όπως ο μόλυβδος, ο υδράργυρος και οι υδρογονογλωράνθρακες, που μεταφέρονται από την ατμόσφαιρα στη θάλασσα, είναι γνωστές για τις επιβλαβείς συνέπειές τους στη θαλάσσια βιολογία. Αντίθετα άλλα στοιχεία όπως το άζωτο, ο φώσφορος και ο σίδηρος, είναι γνωστά για την ευεργετική τους δράση φυτοπλαγκτού, στις κοινότητες αυξάνοντας τη θαλάσσια παραγωγικότητα (Jickells et al., 1998). Άρα η ατμόσφαιρα στο βαθμό που αποτελεί δίοδο SPM προς τη θάλασσα, προκαλεί και διαφορετικές επιδράσεις στο περιβάλλον της Μεσογείου.

Παράδειγμα αποτελεί η Ανατολική Μεσόγειος, η οποία είναι ολιγοτροφική θάλασσα με χαμηλά επίπεδα θρεπτικών αλάτων ακόμη και στα βαθιά νερά (Kress and Herut, 2001), που όμως παρουσιάζει μία από τις σημαντικότερες ροές ατμοσφαιρικών μαζών εμπλουτισμένων με σκόνη Σαχάρας (Guerzoni et al., 1999; Herut et al., 2001). Επομένως σε αυτή τη συγκεκριμένη λεκάνη, η ατμοσφαιρική εναπόθεση SPM μπορεί να παίζει σημαντικό ρόλο στην απόδοση θρεπτικών αλάτων στα επιφανειακά ύδατα, γεγονός που επιβεβαιώνεται και από παλαιότερες μελέτες (Martin et al., 1989; Guerzoni et al., 1999; Kouvarakis et al., 2001). Τις μελέτες αυτές ενισχύουν και ένα πλήθος δορυφορικών εικόνων, μέσω των οποίων έγινε φανερή η αλληλεπίδραση αιτίουαποτελέσματος, συνδέοντας επεισόδια SPM, με πληθυσμιακή έκρηξη της κοινότητας φυτοπλαγκτού στις περιοχές εναπόθεσης (Dulac et al., 1996; Saydam and Polat, 1999; Herut et al., 2002).

Πολλά χημικά στοιχεία εναποτίθονται στην επίφάνεια της θάλασσας με ξηρή ή υγρή απόθεση από την ατμόσφαιρα, ορισμένα από τα οποία περιέχουν σημαντικές ποσότητες βιοδιαθεσίμων θρεπτικών συστατικών, κυρίως στα ανώτερα στρώματα της υδάτινης στήλης μέσα στην εύφωτη ζώνη. Η σημαντικότητα των θρεπτικών αυτών συστατικών αυξάνει σε περιπτώσεις: (1) κατά τη διάρκεια μεγάλων σποραδικών επεισοδίων υγρής κυρίως εναπόθεσης στην επιφάνεια της θάλασσας, τόσο αθρωπογενούς, όσο και φυσικής SPM (Paerl, 1997; Prospero et al., 1996; Spokes et al., 2000), (2) σε ολιγοτροφικές θάλασσες και (3) κατά τη διάρκεια εποχών μικρού στρώματος ανάμειξης (θερινή περίοδος).

Για τους παραπάνω λόγους είναι σημαντικό να καθοριστούν και να γίνουν κατανοητοί οι μηχανισμοί που εμπλέκονται σε φυσικές διεργασίες, όπως η διασπορά και διάχυση της SPM στον ωκεανό, καθώς και οι σημαντικότερες πηγές και καταβόθρες της. Η περίπτωση της Μεσογείου παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον, λόγω της γεωγραφικής της θέσης, η οποία βρίσκεται στο βορειότερο άκρο της μεγαλύτερης ερήμου στον κόσμο και κυριότερης πηγής SPM στην ατμόσφαιρα (Schutz et al., 1981; D'Almeida, 1987; Swap et al., 1996). Επίσης οι βόρειες ακτές της Μεσογείου συνορεύουν με πολλές βιομηχανικές και ημι-βιομηχανικές περιοχές της Νότιας Ευρώπης, οι οποίες και είναι κύριες πηγές ανθρωπογενών ρύπων στην ατμόσφαιρα. Οι καταιγίδες σκόνης Σαχάρας πάνω από τη Μεσόγειο Θάλασσα είναι συχνές, καθώς επίσης έχουν καταγραφεί υψηλοί ρυθμοί εναπόθεσης στην επιφάνειά της σε αρκετές περιοχές (Loye-Pilot and Martin, 1996; Herut and Krom, 1996; Guerzoni et al., 1997; Kubilay et al., 2000).

1.2.2 Πρόγραμμα ADIOS (Atmospheric Deposition and Impact of pollutants, key elements and nutrients on the Open Mediterranean Sea)

Η παρούσα διπλωματική εργασία έλαβε χώρα στα πλαίσια του Ευρωπαϊκού προγράμματος ADIOS, του οποίου η έρευνα εστιάζεται σε θέματα ατμοσφαιρικής εναπόθεσης ρύπων, ιχνοστοιχείων και θρεπτικών συστατικών στη Μεσόγειο Θάλασσα. Μία σημαντική πλευρά του ερευνητικού προγράμματος, είναι η εκτίμηση της χρονικής και γεωγραφικής κατανομής ατμοσφαιρικών ροών SPM προς τη θάλασσα και η κατανόηση των μηχανισμών αλληλεπίδρασής τους με το θαλάσσιο περιβάλλον. Οι σημαντικότεροι ερευνητικοί στόχοι του προγράμματος είναι:

- Η εκτίμηση του επιπέδου συγκέντρωσης και οι μεταβολές που παρουσιάζουν οι ανθρωπογενείς ρύποι σε σύγκριση με τους φυσικούς
- Η μελέτη του βαθμού επίδρασης της SPM στο βιογεωχημικό τους κύκλο στη Μεσόγειο
- Η εκτίμηση των επιπτώσεων της μόλυνσης των βαθιών νερών της
 Μεσογείου και κυρίως της βενθικής πανίδας

Το πρόγραμμα ADIOS κύριο σκοπό είχε να μελετήσει την επίδραση των ανθρωπίνων δραστηριοτήτων στους ωκεανούς, ένα από τα σημαντικότερα θέματα δημόσιου ενδιαφέροντος. Ξεκάθαρο παράδειγμα θάλασσας η οποία διατρέχει μεγάλο κίνδυνο, λόγω του αυξανόμενου ρυπαντικού φορτίου και των πιέσεων που δέχεται, αποτελεί η Μεσόγειος. Πάντως το μέγεθος του προβλήματος δεν έγει προσδιοριστεί πλήρως και προς αυτη τη κατεύθυνση στοχεύει το πρόγραμμα, δημιουργώντας μία αρχική βάση εκτίμησης των επιπέδων μόλυνσης και της κατάστασης της Μεσογείου από βιολογικής άποψης. Οι χρονικές και γεωγραφικές διακυμάνσεις των χημικών διεργασιών στην ανοιχτή θάλασσα, επηρεάζονται κύρια από φυσικούς παράγοντες,

παρά από ανθρωπογενείς δραστηριότητες. Η ανάγκη ποσοτικού ανθρωπογενούς προσδιορισμού της ρύπανσης του θαλάσσιου περιβάλλοντος, της δυναμικής του φαινομένου και της πρώιμης αντιμετώπισής του, κάνει επιτακτική την ανάγκη προσδιορίσμου πρώτα των φυσικών διεργασιών στην ανοιχτή θάλασσα και του φυσικού υποβάθρου ρύπανσης. Τα παραπάνω επιβεβαιώνει και το γεγονός ότι είναι σχεδόν αδύνατο να ανιχνευθούν ρύποι στην ανοιχτή θάλασσα, οι οποίοι να αποδοθούν αμιγώς στον άνθρωπο, όπως το άζωτο και τα μέταλα, παρόλο που είναι γνωστό πώς μέσω της ατμόσφαιρας έχουμε ανθρωπογενείς ρύπους, οι οποίοι μάλιστα επηρεάζουν τη βιολογία. Το πρόγραμμα ADIOS μελετά την επίδραση και τη μοίρα στη θάλασσα τριών ομάδων ρύπων: (1) δυνητικά βλαβερών μετάλλων (οργανικές ουσίες και τεχνητά ραδιονουκλίδια), (2) θρεπτικών στοιχείων (άζωτο, φώσφορος, σίδηρος) και (3) ιχνοστοιχείων (οργανικός και ανόργανος άνθρακας).

Προκειμένου να μελετηθούν οι φυσικές διεργασίες διασποράς της SPM στη Μεσόγειο Θάλασσα, για τις ανάγκες του προγράμματος ADIOS, εφαρμόστηκε ένα αριθμητικό μοντέλο προσομοίωσης της κυκλοφορίας στη λεκάνη της Μεσογείου, βασισμένο στο «Princeton Ocean Model», κατάλληλα τροποποιημένο ώστε να περιλαμβάνει τη φυσική της διασποράς και διάχυσης διαφόρων κλάσεων της SPM και την εναπόθεσή τους στο βυθό της Μεσογείου. Η εναπόθεση της SPM στην επιφάνεια της θάλασσας μαζί με το ατμοσφαιρικό «forcing» (δράση του ανέμου κ.λ.π. πεδία), δίνεται από το ατμοσφαιρικό μοντέλο SKIRON/Eta, το οποίο βρίσκεται σε σύζευξη με το 3D ωκεανογραφικό μοντέλο «Princeton Ocean Model».

1.3 ΣΤΟΧΟΙ ΤΗΣ ΠΑΡΟΥΣΑΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Αντικειμενικός στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας, είναι η ρεαλιστικότερη προσομοίωση της διασποράς και διάχυσης περισσοτέρων κλάσεων από μίας, της σκόνης της Σαχάρας. Για το σκοπό αυτό το ωκεανογραφικό μοντέλο έχει τροποποιηθεί κατάλληλα,

ώστε στη προσομοίωση να περιλαμβάνονται τέσσερις κλάσεις σωματιδίων SPM, τα οποία υφίστανται τις φυσικές διεργασίες της διασποράς, διάχυσης και μεταφοράς με βάση τη θερμοαλατική και ανεμογενή κυκλοφορία. Το κύριο χαρακτηριστικό που διαφοροποιείται μεταξύ των τεσσάρων κλάσεων, είναι η κατακόρυφη ταχύτητα καθίζησης (ws), η οποία είναι μεγαλύτερη για τα βαρύτερα σωματίδια σκόνης και αναμένεται να δημιουργήσει διαφορετική γεωγραφική κατανομή κατακόρυφα και οριζόντια των συγκεντρώσεων σκόνης. Προκειμένου να διαπιστωθεί ο βαθμός της διαφοροποίησης αυτής, που οφείλεται στις διαφορετικές κατακόρυφες ταχύτητες καθίζησης (ws), πραγματοποιείται σύγκριση μεταξύ δύο διαφορετικών πειραμάτων.

Στό πρώτο πείραμα προσομοιώνουμε τη διασπορά και διάχυση της μίας ελαφρύτερης κλάσης SPM στη λεκάνη της Μεσογείου, ενώ στο δεύτερο πείραμα υπάρχουν τέσσερεις κλάσεις SPM, στις οποίες περιλαμβάνεται η ελαφρύτερη (εν γένει διαφορετική ποσότητα σε σχέση με το πρώτο πείραμα) και τρείς μεγαλύτερες και βαρύτερες κλάσεις. Το χρονικό διάστημα ολοκλήρωσης των δύο προσομοιώσεων είναι οι οκτώ πρώτοι μήνες του έτους 2003 και αυτό γιατί μόνο γι' αυτό το διάστημα υπάρχουν κοινά ατμοσφαιρικά δεδομένα, για μία και τέσσερεις κλάσεις SPM, προκειμένου να πραγματοποιηθεί σύγκριση μεταξύ των δύο πειραμάτων. Τέλος, η εν γένει μελέτη του κύκλου της σκόνης της Σαχάρας στη Μεσόγειο Θάλασσα, η ατμοσφαιρική, η παράκτια αλλά και βενθική εναπόθεσή της, ο επεισοδιακός χαρακτήρας και η εναπόθεσή της κυρίως μέσω βροχοπτώσεων, η παγίδευσή της σε κυκλώνες και αντικυκλώνες και η μεταφορά της με βάση τη κυκλοφορία της θάλασσας, είναι επιμέρους στόχοι που μελετώνται προκειμένου να προχωρήσει η σύγκριση των δύο πειραμάτων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ΜΕΘΟΔΟΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΤΗΣ ΔΙΑΣΠΟΡΑΣ SPM ΣΤΗ ΛΕΚΑΝΗ ΤΗΣ ΜΕΣΟΓΕΙΟΥ

2.1 ΓΕΩΦΥΣΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΚΑΙ ΓΕΝΙΚΗ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑ ΤΗΣ ΛΕΚΑΝΗΣ ΤΗΣ ΜΕΣΟΓΕΙΟΥ

Η ημίκλειστη λεκάνη της Μεσογείου, είναι η περιοχή προσομοίωσης του ωκεανογραφικού μοντέλου και αποτελεί ένα σχεδόν απομονωμένο θαλάσσιο οικοσύστημα. Βρίσκεται σε μέσα γεωγραφικά πλάτη και συνδέεται με το Βόρειο Ατλαντικό από το στενό του Γιβραλτάρ, το οποίο έχει 13 Km ελάχιστο εύρος και 300 m βάθος στο ρηχότερο σημείο του. Επίσης χωρίζεται σε δύο επιμέρους λεκάνες, την δυτική και την ανατολική, οι οποίες συνδέονται με το σχετικά ρηχό στενό της Σικελίας. Η γεωγραφία της Μεσογείου παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.1 και η βαθυμετρία της στο Σχήμα 2.2.



Σχήμα 2.1 Στενά και υπολεκάνες της Μεσογείου (Drakopoulos and Lascaratos, 1999)

Στη Μεσόγειο η εξάτμιση (Ε) υπερτερεί της βροχόπτωσης (Ρ), καθώς επίσης και των παροχών υδάτων (R) από τις εκβολές των ποταμών. Το ισοζύγιο γλυκού νερού E-P-R, υπολογίζετε περίπου στα 0.6 m/year (Bryden and Kinder, 1991), με αποτέλεσμα να έχουμε επιφανειακή εισροή υδάτων σχετικά χαμηλής αλατότητας από το Βόρειο Ατλαντικό (North Atlantic Water, στο εξής NAW) στη Μεσόγειο. Τα επιφανειακά ΝΑΨ κινούνται ανατολικά και περνούν μέσα από μία σειρά στενών (Γιβραλταρ, Σικελίας, Οτράντο, Καρπάθου, κ.ο.κ) ακολουθώντας ρεύματα όπως αυτό της Αλγερίας, του Ιονίου και τέλος το «Mid Mediterranean Jet», όπου κατά τη διάρκεια της διαδρομής τους η αλατότητά τους αυξάνει, λόγω της επιπλέον εξάτμισης που λαμβάνει χώρα και της ανάμιξής τους με νερά μεγαλύτερης αλατότητας στη Μεσόγειο. Η έντονη εξάτμιση σε συνδυασμό με τους ψυχρούς και ξηρούς ανέμους του βόρειου τομέα (Mistral, Bora Bora, κ.ο.κ), οδηγούν στο σχηματισμό μαζών βαθιών νερών. Οι κύριες περιοχές σχηματισμού μαζών βαθιών νερών είναι:

- Στη Δυτική Μεσόγειο (Western Mediterranean Deep Water, στο εξης WMDW) στο Κόλπο του Λέοντος (Σχ.2.1)
- Στην Ανατολική Μεσόγειο (Eastern Mediterranean Deep Water, στο εξης EMDW) στην Αδριατική, όπου τα EMDW βυθίζονται και διαχέονται στα βαθιά τμήματα της Ανατολικής Μεσογείου μέσω του στενού του Οτράντο (Σχ.2.1)

Τα επιφανειακά NAW φτάνουν στη λεκάνη της Λεβαντίνης με σημαντική αύξηση στην αλατότητά τους και ακολουθώντας τον εποχιακό κύκλο, μετασχηματίζονται σε ενδιάμεσα νερά (Levantine Intermediate Water, στο εξής LIW) κατά τη διάρκεια του χειμώνα στη περιοχή του κυκλώνα της Ρόδου, τα οποία βυθίζονται στο ενδιάμεσο στρώμα των 300m έως 500m. Το LIW κυκλοφορούν στην ανατολική και τη δυτική Μεσόγειο, περνώντας το στενό της Σικελίας (net inflowoutflow 1-1.5 Sv, $1Sv=10^6m^3/s$), συμβάλοντας στη δημιουργία EMDW και WMDW, ενώ τελικά εκρέουν από το στενό του Γιβραλτάρ στο Βόρειο Ατλαντικό, όπου εντοπίζονται σε βάθος περίπου 1000m, λόγω της αυξημένης αλατότητάς τους. Η κυκλοφορία της Μεσογείου είναι πολύπλοκη, λόγω φαινομένων τοπικής και μέσης κλίμακας και κυρίως λόγω υπερετήσιας μεταβλητότητας (interannual variability) των πεδίων αλληλεπίδρασης θάλασσας-αέρα (Σχ.2.3) (Bethoux and Gentili, 1996; Roether et al., 1996; Lascaratos et al., 1999; Theocharis et al., 1999).



Σχήμα 2.2 Βαθυμετρία Μεσογείου (U.S. Navy Digital Bathymetry Data Base)



Σχήμα 2.3 Σχηματική παρουσίαση θερμοαλατικής κυκλοφορίας της Μεσογείου (Lascaratos et al., 1999)

2.2 ΒΑΣΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΤΟΥ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΡΟΜ ΣΤΗ ΜΕΣΟΓΕΙΟ ΘΑΛΑΣΣΑ

Άμεσες παρατηρήσεις της εναπόθεσης και μεταφοράς της σκόνης της Σαχάρας στη θάλασσα είναι πολύ δύσκολο να γίνουν, ενώ παράλληλα έχουν και μεγάλο κόστος. Το πρόβλημα των άμεσων παρατηρήσεων μεγενθύνεται ακόμα περισσότερο από τον επεισοδιακό χαρακτήρα της εναπόθεσης της SPM στην επιφάνεια της θάλασσας. Ειδικά στη Μεσόγειο υπολογίζεται ότι το 75% γίνεται με την υγρή εναπόθεση (Guerzoni et al., 1992) και αρκούν λίγα επεισόδια το χρόνο στα οποία παρατηρείται η μέγιστη ετήσια ροή SPM από την ατμόσφαιρα πρός τη θάλασσα (Guerzoni et al., 1997; Le Bolloch and Guerzoni, 1995). Επομένως γίνεται κατανοητό ότι η παρακολούθηση της εναπόθεσης και διασποράς της SPM στη θάλασσα, δεν μπορεί να βασίζεται μόνο σε μετρήσεις από περιορισμένους τον αριθμό σταθμούς σε αραιά χρονικά διαστήματα. Για το λόγο αυτό γρησιμοποιούνται αριθμητικά μοντέλα, τα οποία προσομοιώνουν τις φυσικές διεργασίες της SPM στη θάλασσα, είτε με Eulerian, είτε με Lagrangian μεθόδους. Στα Eulerian μοντέλα η συγκέντρωση της SPM εξαρτάται από τη μεταφορά και διάχυσή της σε κάθε σημείο του πλέγματος του μοντέλου (Segschneider and Sundermann, 1998), ενώ στα Lagrangian ακολουθείται η τροχιά του σωματιδίου κατά τη κίνησή του με Eulerian ταχύτητα (Odd and Murphy, 1992). Τα παραπάνω αριθμητικά μοντέλα παρά τις αδυναμίες που παρουσιάζουν στην χωρική ανάλυσή τους (resolution) και την περιγραφή επιμέρους διαδικασιών διασποράς και διάχυσης SPM, δίνουν τη δυνατότητα υπολογισμού των ροών SPM σε μεγάλη κλίμακα, στοχεύοντας στην παρακολούθηση των φαινομένων στο χώρο και το χρόνο και στη κατανόηση των φυσικών μηχανισμών που εμπλέκονται στη διασπορα και διάχυση της SPM.

2.2.1 Το αριθμητικό μοντέλο ΡΟΜ

Η μελέτη της κατανομής και εναπόθεσης της σκόνης της Σαχάρας στο βυθό της λεκάνης της Μεσογείου, γίνεται με τη βοήθεια ενός

τρισδιάστατου, ελεύθερης επιφάνειας, βασικών αρχικών εξισώσεων μοντέλου γενικής κυκλοφορίας, που χρησιμοποιεί στη κατακόρυφη διάσταση «sigma layers», το οποίο ονομάζεται «Princeton Ocean Model» (στο εξής POM), που μπορεί να χρησιμοποιηθεί τόσο για παράκτιες, όσο και για ανοιχτής θάλασσας εφαρμογές (Blumberg and Mellor, 1987). Το POM χρησιμοποιεί δύο υπό-μοντέλα για τον υπολογισμό της τυρβώδους ανάμειξης μέσω στροβίλων (eddy mixing) (δεύτερης τάξης σχήμα κλεισίματος της τύρβης) και του οριζόντιου μη γραμμικού κινηματικού ιξώδους (viscosity). Επίσης χρησιμοποιείται η τεχνική διαφορετικών χρονικών βημάτων (time splitting technique) για την εξωτερική-βαροτροπική (external barotropic modes) και την εσωτερική-βαροκλινική λύση (internal baroclinic modes). То αριθμητικό μοντέλο POM, έχει χρησιμοποιηθεί επανειλημμένα σε ένα μεγάλο αριθμό μελετών με επιτυχία, ορισμένες από τις οποίες είναι : South Atlantic Bight (Blumberg and Mellor, 1983), Delaware Bay (Galperin and Mellor, 1990a,b), Gulf of Mexico (Blumberg and Mellor, 1985), Gulf Stream (Ezer and Mellor, 1992), Mediterranean Sea (Zavatarelli and Mellor, 1995; Horton et al., 1997; Drakopoulos and Lascaratos, 1997; Lascaratos and Nittis, 1998), Adriatic Sea (Zavatarelli and Pinardi, 1995) και Levantine Sea (Lascaratos and Nittis, 1998).

2.2.1.1 Οι βασικές αρχές που ακολουθεί το αριθμητικό μοντέλο POM

1. Δεύτερης τάξης κλείσιμο της τύρβης, μέσω υπολογισμού του κατακόρυφου συντελεστή τυρβώδους ανάμειξης. Το υπο-μοντέλο κλεισίματος της τύρβης προτάθηκε από τον Mellor (1973) και τροποποιήθηκε σε συνεργασία με τον Tetsuji Yamada (Mellor and Yamada, 1974; Mellor and Yamada, 1982), ενώ στηρίζεται στην υπόθεση για τη τύρβη των Rotta and Kolmogorov, ανηγμένη για στρωματοποιημένη ροή (stratified flow). Έχει παρατηρηθεί ότι παρά το γεγονός της αρκετά καλής προσομοίωσης στη δυναμική του στρώματος ανάμειξης, παρουσιάζονται ενδείξεις υποεκτίμησης του βάθους του (Martin, 1985).

2. «Sigma» κατακόρυφες συντεταγμένες στην υδάτινη στήλη, οι οποίες παρουσιάζουν την πολύ σημαντική ιδιότητα να ακολουθούν την τοπογραφία του βυθού, αντιμετωπίζοντας το πρόβλημα της έντονης μεταβλητότητας του βάθους, σε υποθαλάσσιες πλαγίες με μεγάλες κλίσεις,σε παράκτιες περιοχές και εκβολές ποταμών, καθώς και στις βενθικές περιοχές γειτνίασης των ηπειρωτικών πλακών. Οι «Sigma» κατακόρυφες συντεταγμένες σε συνδυασμό με το υπο-μοντέλο της τυρβώδους ανάμειξης, αποδίδουν ρεαλιστικά οριακά στρώματα κοντά στο βυθό (Bottom Boundary Layers, στο εξής BBL), γεγονός πολύ σημαντικό για τις παράκτιες περιοχές (Mellor, 1985). Πρόσφατα βρέθηκε ότι τα BBL παίζουν σημαντικό ρόλο στη προσομοίωση σχηματισμού «βαθιών νερών» (Zavatarelli and Mellor, 1995; Jungclaus and Mellor, 1996; Baringer and Price, 1996) και στη διατήρηση της βαροκλινικότητας της ωκεάνιας λεκάνης (Mellor and Wang, 1996).

3. «Arakawa C-grid» οριζόντιο πλέγμα εναλλασόμενων σημείων (Σχ. 2.4 και 2.5) (horizontal staggered grid), το οποίο είναι διατεταγμένο πάνω σε ένα ευθύγραμμο ή καμπυλόγραμμο σύστημα συντεταγμένων (curvilinear or rectilinear orthogonal coordinates) και χρησιμοποιείται για οικονομία υπολογιστικού χρόνου και χώρου (computational efficiency).

4. Οριζόντιες χρονικές πεπερασμένες διαφορές (horizontal time differencing) «explicit», σε αντίθεση με τις κατακόρυφες «implicit» πεπερασμένες διαφορές, οι οποίες επιτρέπουν την κατακόρυφη υψηλή διακριτοποίηση (resolution) των στρωμάτων (layers) κοντά στην επιφάνεια και το βυθό.

5. Τεχνική διαφορετικών χρονικών βημάτων (time splitting technique), για την εξωτερική-βαροτροπική (external barotropic modes) και την εσωτερική-βαροκλινική λύση (internal baroclinic modes).


Σχήμα 2.4 Διάταξη πλεγματικών σημείων «Arakawa C-horizontal staggered grid» 2-D external mode (Mellor, revision users guide POM 2002)



Σχήμα 2.5 Διάταξη πλεγματικών σημείων «Arakawa C-staggered grid» 3-D internal mode (Mellor, revision users guide POM 2002)

2.2.1.2 Οι βασικές εξισώσεις του αριθμητικού μοντέλου ΡΟΜ

Στις βασικές εξισώσεις οι ανεξάρτητες μεταβλητές ορίζονται από το «sigma» σύστημα συντεταγμένων (Σχ.2.6) και εφαρμόζεται ο μετασχηματισμός (Phillips, 1957; Blumberg and Mellor, 1980,1987):

$$x^* = x, y^* = y, \sigma = \frac{(z - \eta)}{(H + \eta)}, t^* = t$$

(2.1)

όπου x,y,z είναι οι ανεξάρτητες καρτεσιανές συντεταγμένες και x*,y*,t* οι μετασχηματισμένες συντεταγμένες, D=H+η, όπου H(x,y) είναι η τοπογραφία του βυθού και η(x,y,t) είναι η ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας. Επομένως η κατακόρυφη μετασχηματισμένη συντεταγμένη σ κυμαίνεται από σ=0 για z=η έως σ=1 για z=-H. Έπειτα από το μετασχηματισμό σε «sigma» συντεταγμένες, εάν απαλοιφούν οι αστερίσκοι, είναι δυνατόν οι βασικές εξισώσεις να γραφτούν σε οριζόντιο καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων.



Σχήμα 2.6 «Sigma» σύστημα συντεταγμένων (Mellor, revision users guide POM 2002)

Οι εξαρτημένες προγνωστικές μεταβλητές στις βασικές εξισώσεις του μοντέλου POM είναι η δυνητική θερμοκρασία Τ, η αλατότητα S, οι καρτεσιανές ταχύτητες Ui=(U,V,W), όπου i=1,2,3 για το 3D σύστημα συντεταγμένων, «η» η ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας της θάλασσας και οι εξισώσεις που λύνει το μοντέλο είναι:

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(U,V) + \frac{\partial}{\partial x_i}[U_i(U,V)] + f(-V,U) = -\frac{1}{\rho_o}\left[\frac{\partial p}{\partial x}, \frac{\partial p}{\partial y}\right]$$

$$+ \frac{\partial}{\partial z}\left[K_M \frac{\partial}{\partial z}(U,V)\right] + (F_U, F_V)$$
(2.3)

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[U_i T \right] = \frac{\partial}{\partial z} \left[K_H \frac{\partial T}{\partial z} \right] + \frac{\partial R}{\partial z} + F_T + \frac{1}{r(z)} \left(T_{CLIM} - T \right)$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[U_i S \right] = \frac{\partial}{\partial z} \left[K_H \frac{\partial S}{\partial z} \right] + F_S + \frac{1}{r(z)} \left(S_{CLIM} - S \right)$$
(2.4)
$$(2.5)$$

καθώς και η υδροστατική εξίσωση σε ολοκληρωμένη μορφή:

$$\frac{p}{\rho_o} = g\left(n-z\right) + \int_{z}^{n} \frac{\rho - \rho_o}{\rho_o} g \, dz \tag{2.6}$$

όπου «η» είναι η ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας, ρ. πυκνότητα αναφοράς και $\rho = \rho(T, S, p)$ είναι η πυκνότητα που υπολογίζεται βάση της εξίσωσης UNESCO του Mellor (1991b). Οι όροι της οριζόντιας διάχυσης (F_U, F_V) , F_T και F_S στις εξισώσεις (2.3), (2.4), (2.5) υπολογίζονται από το μοντέλο χρησιμοποιώντας το σχήμα οριζόντιας διάχυσης «Smagorinsky» (1963). Ο τέταρτος διορθωτικός όρος στο δεξιό μέλος των εξισώσεων (2.4), (2.5) ωθεί τα αποτελέσματα του μοντέλου σε βάθος χρόνου προς τα κλιματολογικά χαρακτηριστικά της περιοχής προσομοίωσης (relaxation) και μπορεί να είναι συνάρτηση του βάθους της θάλασσας z. Επίσης οι συντελεστές κατακόρυφης ανάμειξης K_M και K_H στις εξισώσεις (2.3), (2.4) και (2.5) υπολογίζονται βάση του σχήματος κλεισίματος της τύρβης Mellor-Yamada 2.5 (Mellor and Yamada, 1982). Τέλος ο όρος R της εξίσωσης (2.4) είναι μέρος της μικρού μήκους κύματος ακτινοβολίας που εισχωρεί στην επιφάνεια της θάλασσας.

2.2.2 Προσομοίωση της SPM με το POM

2.2.2.1 Περιοχή ολοκλήρωσης και ανοιχτές οριακές συνθήκες

Η περιοχή ολοκλήρωσης του μοντέλου (Σχ.2.7) είναι από 9.5W° έως 36.5 E° μοίρες κατά γεωγραφικό μήκος και από 30N° έως 46N° μοίρες

(2.5)

κατά γεωγραφικό πλάτος, με 369 και 129 κουτιά πλέγματος (grid boxes) αντίστοιχα. Επομένως η περιοχή ολοκλήρωσης του μοντέλου περιλαμβάνει ολόκληρη τη λεκάνη της Μεσογείου και εκτείνεται προς τον Ατλαντικό Ωκεανό. Με τον τρόπο αυτό δεν είναι αναγκαίο να προσδιοριστούν οι οριακές συνθήκες μεταφοράς σκόνης στο στενό του Γιβραλτάρ, οι οποίες και μας είναι άγνωστες. Η ροή της SPM στο ανοιχτό όριο (open end) του μοντέλου στον Ατλαντικό Ωκεανό καθορίζεται από τα τοπικά δυναμικά χαρακτηριστικά της Μεσογείου θάλασσας, ενώ τα υδρογραφικά χαρακτηριστικά, όπως η θερμοκρασία και η αλατότητα, στο ίδιο ανοιχτό όριο ωθούνται να ταιριάξουν με τη κλιματολογία της περιοχής (relaxation by fitting a buffer zone). Για τις ανάγκες της μελέτης της διασποράς και διάχυσης της SPM στη θάλασσα, η οριζόντια διακριτοποίηση του αριθμητικού μοντέλου POM επιλέχθηκε να είναι 1°/8x1°/8 της μοίρας, ενώ στην κατακόρυφη διάσταση χρησιμοποιήθηκαν 25 «sigma levels» με λογαριθμική κατανομή κοντά στην επιφάνεια.



Σχήμα 2.7 Περιοχή ολοκλήρωσης POM (grid domain)

Η ανταλλαγή υδάτων μεταξύ Μαύρης Θάλασσας και Αιγαίου Πελάγους είναι ένας σημαντικός παράγοντας της θερμοαλατικής κυκλοφορίας. Περίπου 300km³ υφάλμηρου νερού σε ετήσια βάση εισέρχονται στη λεκάνη του Βόρειου Αιγαίου Πελάγους. Η ανταλλαγή παραμετροποιείται στο μοντέλο με μέση ετήσια τιμή 10⁴ m³/sec (Kourafalou et al., 1996) και εποχική διακύμανση της τάξεως των 5*10³ m³/sec. Οι μέγιστες τιμές τοποθετούνται στα μέσα Ιουλίου, ενώ αντίστοιχα οι ελάχιστες στα μέσα Ιανουαρίου. Η αλατότητα των υφάλμυρων υδάτων έχει καθοριστεί στα 28.3 psu για όλη τη διάρκεια του έτους.

Η βαθυμετρία της λεκάνης της Μεσογείου που χρησιμοποιείται στο ωκεανογραφικό μοντέλο (Σχ.2.2), προκύπτει από τη βάση δεδομένων του Αμερικάνικου Ναυτικού (U.S. Navy Digital Bathymetry Data Base, DBDB5) και έχει ανάλυση 1°/12x1°/12 της μοίρας, η οποία και προσαρμόζεται στα σημεία πλέγματος του μοντέλου με γραμμική παρεμβολή (bilinear interpolation at each grid point). Προκειμένου να εξαλειφθούν τα σφάλματα βαροβαθμίδας που σχετίζονται με τα «sigma levels» πάνω από απότομη τοπογραφία βυθού, στο μοντέλο χρησιμοποιείται φίλτρο τρίτης τάξης Shapiro (1970) προκειμένου να εξομαλυνθεί η τοπογραφία.

2.2.2.2 Εξίσωση μεταφοράς και διάχυσης της SPM (passive tracer) στο μοντέλο POM

Για να προσομοιωθεί η μεταφορά και η διάχυση της σκόνης της Σαχάρας στη Μεσόγειο Θάλασσα, χρειάζεται μία επιπρόσθετη εξίσωση:

$$\frac{\partial D}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[U_i D \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[w_s D \right] = \frac{\partial}{\partial z} \left[K_H \frac{\partial D}{\partial z} \right] + F_D$$
(2.7)

όπου D η συγκέντρωση της SPM, F_D η οριζόντια διάχυση και ws η ταχύτητα καθίζησης της SPM (Stokes law), λόγω της διαφορετικής της πυκνότητας σε σχέση με τα θαλάσσια ύδατα. Ο κατακόρυφος συντελεστής τυρβώδους ανάμειξης K_H υπολογίζεται από το σχήμα κλεισίματος της τύρβης Mellor and Yamada (1982), ενώ ο όρος οριζόντιας διάχυσης F_D υπολογίζεται από το σχήμα οριζόντιας διάχυσης «Smagorinsky» (Mellor and Blumberg, 1985). Η εναπόθεση της SPM στην επιφάνεια της θάλασσας δίνεται απευθείας από το ατμοσφαιρικό μοντέλο SKIRON/Eta ανά χρονικά διαστήματα μίας ώρας (Nickovic et al., 2001). Η SPM εναποτίθεται στο ανώτερο λεπτό επιφανειακό στρώμα και έπειτα διανέμεται σε ολόκληρη την υδάτινη στήλη μέσω της μεταφοράς, της διάχυσης και της ταχύτητας καθίζησης ws, μέσω της εξίσωσης (2.7). Δεδομένου της περιορισμένης ανάλυσης του μοντέλου, είναι αδύνατο να αναλυθούν διεργασίες (όπως ρεύματα και κύματα πολύ κοντά στην ακτή ή διάβρωση απότομων κλίσεων της τοπογραφίας του βυθού) που ενδεχομένως να μεταφέρουν SPM από τη παράκτια ζώνη στα βαθιά νερά της ανοιχτής θάλασσας. Επομένως η μόνη οδός από την οποία μπορεί να εισέλθει η SPM στην θάλασσα είναι διαμέσου της ατμοσφαιρικής της εναπόθεσης.

Η SPM που φτάνει στο τελευταίο επίπεδο του μοντέλου, εκκενώνεται από την υδάτινη στήλη και εναποτίθεται μόνιμα στο βυθό. Επαναιώρηση της SPM από το βυθό δεν περιλαμβάνεται στους υπολογισμούς του μοντέλου. Οι κρίσιμες τιμές της τάσης στο βυθό ικανές να προκαλέσουν επαναιώρηση, είναι σχετικά μεγάλες (i.e. 0.41 Nm⁻² by Holt and James, 1999) για να ληφθούν υπόψη στα παρόντα πειράματα. Επιπλέον, η επαναιώρηση της SPM που εισέρχεται εκ νέου στην υδάτινη στήλη, δεν εγγυάται ότι η πηγή της είναι η Σαχάρα.

2.2.3 Αριθμητικά πειράματα με διαφορετικές κλάσεις σωματιδίων

Τα δύο πειράματα προσομοίωσης διασποράς της SPM στη Μεσόγειο, γίνονται την ίδια χρονική περίοδο από 01/01/2003 έως 31/08/2003, όπου στο πρώτο πείραμα χρησιμοποιείται μία κλάση SPM διαμέτρου 2μm, με ταχύτητα καθίζησης w_s να υπολογίζεται από το νόμο του Stokes (Εξ.2.8):

$$w_{s} = \frac{2 g \rho_{pk} R_{k}^{2}}{9 \nu}$$
(2.8)

με g τη βαρυτική επιτάχυνση, ρ_{pk} τη πυκνότητα του σωματιδίου, R_k την ακτίνα του σωματιδίου και ν το κινηματικό ιξώδες του ρευστού (θάλασσα) μέσα στο οποίο καθιζάνει το σωματίδιο. Στην εξίσωση (2.7) όταν $x_i \equiv z$ και $U_i \equiv W$ για i=3, η κατακόρυφη ταχύτητα του σωματιδίου δίνεται από την εξίσωση:

$$\mathbf{W} = \mathbf{w} \cdot \mathbf{w} \mathbf{s} \tag{2.9}$$

όπου w η προγνωστική κατακόρυφη ταχύτητα των θαλάσσιων υδάτων. Για τη συγκεκριμένη κλάση σωματιδίου είναι w_s=0.001mms⁻¹, τιμή η οποία έχει χρησιμοποιηθεί και σε παλαιότερες μελέτες (Holt and James, 1999)

Στο δεύτερο πείραμα προσομοίωσης χρησιμοποιούνται τέσσερις κλάσεις σωματιδίων, όπου στον Πίνακα 2.1 φαίνονται οι διάμετροι, οι πυκνότητες και οι ταχύτητεςκαθίζησης που δίνονται από το νόμο του Stokes (Εξ.2.8).

Πίνακας 2.1	Τέσσερις	κλάσεις	SPM	(Nickovic	et al.,	2001)

Soil Type	Diameter	Particle Density	Settling Velocity
k=1,2,3,4	$R_k (\mu m)$	$\rho_{pk} (gcm^{-3})$	w _{sk} (mm/sec)
Clay	1.46	2.50	0.001
Silt small	12.2	2.65	0.01
Silt large	36.0	2.65	0.05
Sand	76.0	2.65	0.15

Σημαντικός παράγοντας που μπορεί να επηρεάσει την ταχύτητα καθίζησης είναι η κροκίδωση (flocculation) της SPM μέσα στη θάλασσα, καθώς και η δέσμευση μεταλλικών ιχνοστοιχείων

(scavenging) της SPM από την κοινότητα του φυτοπλαγκτού, κυρίως λόγω βιολογικών διεργασιών. Το μοντέλο POM, λόγω της έλλειψης δεδομένων (biological βιολογικών data) δεν περιλαμβάνει προσομοιώσεις των τελευταίων διεργασιών. Έκτός από την επίδραση της βιολογίας, το μέγεθος της SPM και κατ'επέκταση η «settling velocity», μπορεί να μεταβληθεί και λόγω φυσικής αλληλεπίδρασης των σωματιδίων, μέσω της σύγκρουσης και συσσωμάτωσης (collision and aggregation) των σωματιδίων μεταξύ τους. Η συσσωμάτωση των σωματιδίων καθορίζεται αφενός από τον αριθμό των σωματιδίων (συγκέντρωση), και αφετέρου από το εάν υπάρχει ικανοποιητικός αριθμός ενεργών συγκρούσεων (McCave, 1984). Ωστόσο, η φυσική διαδικασία της συσσωμάτωσης, μελετάται κυρίως για οργανική ύλη (Alldrege and Jackson, 1995) και επομένως δεν είναι εφαρμόσιμη στη παρούσα μελέτη.

2.3 ΔΡΑΣΗ ΤΩΝ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΩΝ ΠΕΔΙΩΝ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ SKIRON/ETA (INPUT FORCING)

Το ατμοσφαιρικό μοντέλο SKIRON/Eta, είναι ένα επιχειρησιακό μοντέλο πρόγνωσης του καιρού. Στα παρόντα πειράματα οριζόντια ανάλυση είναι 0.24°x0.24° (Kallos et al., 1997). Οι παράμετροι που χρησιμοποιούνται στα πειράματα είναι η ταχύτητα του ανέμου στα 10m, η θερμοκρασία του αέρα στα 2m, η σχετική υγρασία, η μικρού μήκους κύματος ηλιακή ακτινοβολία και η υπέρυθρη ατμοσφαιρική ακτινοβολία, οι οποίες φτάνουν στο επίπεδο της θάλασσας. Αυτές οι ατμοσφαιρικές παράμετροι χρησιμοποιούνται από το ωκεανογραφικό μοντέλο, αφού πρώτα γίνει γραμμική παρεμβολή των τιμών τους στο χρόνο (linearly interpolated in time), προκειμένου να εκτιμηθούν τα ισοζύγια θερμότητας και νερού (E-P, Evaporation-Precipitation) στην επιφάνεια της θάλασσας, σε κάθε χρονικό βήμα προσομοίωσης. Η περιοχή ολοκλήρωσης του ατμοσφαιρικού μοντέλου, καλύπτει πλήρως αντίστοιχη περιοχή ωκεανογραφικού μοντέλου, την του ενώ πραγματοποιείται και χωρική γραμμική παρεμβολή, μεταξύ των πλεγματικών σημείων των δύο μοντέλων στην επιφάνεια της θάλασσας.

Η σύζευξη του ωκεανογραφικού και του ατμοσφαιρικού μοντέλου, είναι σχεδιασμένη ώστε να επιτρέπει τον επηρεασμό των επιφανειακών ροών (one way atmosphere-ocean interaction) από τα επιφανειακά χαρακτηριστικά του ωκεανού. Παρά το γεγονός ότι, το ισοζύγιο θερμότητας του ατμοσφαιρικού μοντέλου δεν διορθώνεται από το ωκεανογραφικό μοντέλο, το τελευταίο έχει την ελευθερία να ρυθμίζει την εξάτμιση, την προς τα πάνω μεγάλου μήκους κύματος ακτινοβολία που εκπέμπει ο ωκεανος και την ροή αισθητής θερμότητας, με βάση την επιφανειακή θερμοκρασία της θάλασσας. Η μέθοδος αυτή είναι συνήθης σε αρκετές ωκεανογραφικές εφαρμογές (Korres et al., 2000, Horton et al., 1996, Roussenov et al., 1995, Rosati and Miyakoda, 1988). Στη συνέχεια παρουσιάζονται αναλυτικά οι εξισώσεις μεταφοράς θερμότητας, νερου και ορμής στην επιφάνεια της θάλασσας, οι οποίες εκφράζουν τους θεμελιώδεις φυσικούς μηχανισμούς αλληλεπίδρασεις του ωκεανογραφικού μοντέλου με την ατμόσφαιρα.

2.3.1 Συνθήκες θερμικών ροών στην επιφάνεια της θάλασσας

Η καθαρή ροή θερμότητας στην επιφάνεια της θάλασσας, είναι το άθροισμα των ισοζυγίων ακτινοβολιών (μεγάλου και μικρου μήκους κύματος), καθώς και των ροών αισθητής και λανθάνουσας θερμότητας:

$$Q = Q_r + Q_e + Q_h$$
 (2.10)

όπου Q η καθαρή ροή θερμότητας και Q_r η ροή ακτινοβολίας που κερδίζει ο ωκεανός, Q_h η ροή αισθητής θερμότητας και Q_e λανθάνουσας θερμότητας.

2.3.1.1 Ισοζύγιο ακτινοβολιών Q_r

Ο όρος της ακτινοβολίας Q_r στην εξίσωση (2.10) συνίσταται από τρείς επιμέρους όρους (Εξ.2.11): (α) την μικρού μήκους κύματος ηλιακή

ακτινοβολία που κερδίζει ο ωκεανός Q_{rs} , (β) την προς (την ατμόσφαιρα) τα πάνω υπέρυθρη ροή ακτινοβολίας που εκπέμπει ο ωκεανός Q_{iru} και (γ) την προς (τον ωκεανο) τα κάτω υπέρυθρη ακτινοβολία που εκπέμπει η ατμόσφαιρα και φτάνει στην επιφάνεια της θάλασσας Q_{ird} .

$$Q_r = Q_{rs} + Q_{iru} + Q_{ird} \tag{2.11}$$

Η μικρού μήκους κύματος ακτινοβολία Q_{rs} δίνεται απευθείας από το SKIRON/Eta ανά χρονικά διαστήματα μίας ώρας. Ο υπολογισμός της Q_{rs} λαμβάνει υπόψη του τη κατακόρυφη δομή της ατμοσφαιρικής στήλης, περιλαμβάνοντας την επίδραση στο οπτικό της βάθος λόγω της σκόνης της Σαχάρας κ.τ.λ. Η προς (τον ωκεανο) τα κάτω υπέρυθρη ακτινοβολία Q_{ird} επίσης δίνεται απευθείας από το SKIRON/Eta ανά χρονικά διαστήματα μίας ώρας (1-hour intervals), ενώ η προς (την ατμόσφαιρα) τα πάνω υπέρυθρη ροή ακτινοβολίας Q_{iru} υπολογίζεται από το ωκεανογραφικό μοντέλο με βάση το νόμο Stefan-Boltzman:

$$Q_{iru} = \varepsilon \sigma T_s^4$$
(2.12)

όπου ε και σ ο συντελεστής εκπομπής για την θάλασσα (Bignami et al., 1995) και η σταθερα Stefan-Boltzman αντίστοιχα, ενώ T_s η επιφανειακή θερμοκρασία της θάλασσας (στο εξής SST), όπως υπολογίζεται από το ωκεανογραφικό μοντέλο.

2.3.1.2 Ροές λανθάνουσας Q_e και αισθητής θερμότητας Q_h

Οι ροές λανθάνουσας Q_e και αισθητής θερμότητας Q_h υπολογίζονται από το ωκεανογραφικό μοντέλο χρησιμοποιώντας την αεροδυναμική εξίσωση αντίστοιχα (2.13) και (2.14), καθώς επίσης οι ατμοσφαιρικές παράμετροι της ταχύτητας του ανέμου, της θερμοκρασίας και της σχετικής υγρασίας στα δύο μέτρα, δίνονται από το SKIRON/Eta:

$$Q_{e} = \rho_{A} L_{V} C_{E} \left| \vec{W} \right| \left[e_{SAT} \left(T_{S} \right) - r e_{SAT} \left(T_{A} \right) \right] \frac{0.622}{p_{A}}$$
(2.13)

$$Q_{h} = \rho_{A} c_{p} C_{H} \left| \vec{W} \left| (T_{S} - T_{A}) \right. \right.$$
(2.14)

όπου ρ_A η πυκνότητα του υγρού αέρα, c_p η ειδική θερμοχωρητικότητα του αέρα, p_A η ατμοσφαιρική πίεση, \overline{W} το άνυσμα του ανέμου στα 10m, L_v λανθάνουσα θερμότητα εξαέρωσης συναρτήση του SST (Gill, 1982).

2.3.2 Οριακές συνθήκες ισοζυγίου νερού στην επιφάνεια της θάλασσας

Η διαφορά εξάτμισης-βροχόπτωσης (Ε-Ρ) μεταφράζεται ώς εικονική ροή αλατότητας (virtual salt flux):

$$F_s = (E - P)S \tag{2.15}$$

όπου S η επιφανειακή αλατότητα στο ωκεανογραφικό μοντέλο. Ο ρυθμός βροχόπτωσης δίνεται από το SKIRON/Eta, ανά ωριαία χρονικά διαστήματα και ο ρυθμός εξάτμισης (Εξ.2.16) υπολογίζεται:

$$E = \frac{Q_e}{L_v}$$
(2.16)

2.3.3 Οριακές συνθήκες μεταφοράς ορμής στην επιφάνεια της θάλασσας

Ο υπολογισμός της τάσης του ανεμολογικού πεδίου (wind stress), βασίζεται στο μετασχηματισμό της οριζόντιας ταχύτητας, που δίνεται από το SKIRON/Eta ανά εξάωρο χρονικό διάστημα σύμφωνα με την εξίσωση (2.17):

$$\vec{\tau} = \rho_A C_D \left| \vec{W} \right| \vec{W}$$
(2.17)

όπου ρ_A είναι η πυκνότητα του αέρα, \overline{W} η ταχύτητα του ανέμου και C_D ο συντελεστής τριβής (drag coefficient). Ο συντελεστής τριβής C_D υπολογίζεται ως συνάρτηση της ταχύτητας του ανέμου και της διαφοράς θερμοκρασίας αέρα-θάλασσας με πολυωνυμική προσέγγιση (Hellerman and Rosenstein, 1983).

2.3.4 Αρχικές συνθήκες (Initialization)

Ως αρχικές συνθήκες των πειραμάτων του έτους 2003 τόσο για την μία, όσο και για τις τέσσερις κλάσεις σωματιδίων, χρησιμοποιούνται τα πεδία της 31/12/2002, τα οποία έχουν προκύψει από προγενέστερα πειράματα για τα έτη 2000-2002. Πρέπει να σημειωθεί ότι στη προσομοίωση που περιλαμβάνει τέσσερεις κλάσεις σωματιδίων, η μικρότερη από αυτές με διάμετρο 1.46 μm, έχει παραπλήσια χαρακτηριστικά και ταχύτητα καθίζησης (0.001 mm/sec) με αυτά της μίας κλάσης σωματιδίων (διαμέτρου 2μm). Για το λόγο αυτό, η μικρότερη κλάση σωματιδίων χρησιμοποιείται ως αρχική συνθήκη του πεδίου SPM της 31/12/2002 της μίας κλάσης σωματιδίων. Αντίθετα για τις τρείς μεγαλύτερες κλάσεις SPM, θεωρούμε ότι εισέρχονται στο μοντέλο κατά την 01/01/2003 για πρώτη φορά.

κεφαλαίο 3 αποτελεσματά προσομοίωσεων

Σε αυτό το κεφάλαιο, παρουσιάζονται αναλυτικά και συγκρίνονται τα αποτελέσματα των δύο προσομοιώσεων της περιόδου 01/01/2003 έως 31/08/2003, για μία και τεσσερις κλάσεις σωματιδίων. Για την καλύτερη αποτύπωση των χωρικών διακυμάνσεων της εναπόθεσης και διασποράς της σκόνης της Σαχάρας στη Μεσόγειο, υπολογίζονται συγκεντρώσεις και ροές στις δύο κύριες υπολεκάνες της, την Δυτική και Ανατολική Μεσόγειο. Στο Σχήμα 3.1 απεικονίζεται η Δυτική (red area) και Ανατολική (cyan area) Μεσόγειος, ενώ παρουσιάζονται και οι ζωνικές περιοχές (yellow lines, (a) WMED, (b) EMED), κατά μήκος των οποίων υπολογίζονται οι κατατομές συγκεντρώσεων της SPM μέσα στην υδάτινη στήλη στα πρώτα 300m.



Σχήμα3.1 Δυτική (red area) και ανατολική (cyan area) Μεσόγειος. Ζωνικές περιοχές (yellow lines, (a) WMED, (b) EMED) κατατομών συγκεντρώσεων SPM έως 300m βάθος

3.1 ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗ ΕΝΑΠΟΘΕΣΗ ΣΤΗ ΜΕΣΟΓΕΙΟ

Η σκόνη της Σαχάρας εναποτίθεται στη λεκάνη της Μεσογείου με δύο μηχανισμούς. Η ξηρή εναπόθεση αποτελεί τον έναν από τους δύο μηχανισμούς απομάκρυνσης σωματιδίων, αλλά και αερίων ουσιών, από την ατμόσφαιρα και μπορεί να οριστεί ως η μεταφορά στο έδαφος ή στην επιφάνεια της θάλασσας απουσία κατακρήμνισης (π.χ. βροχής). Οι παράγοντες από τους οποίους εξαρτάται είναι κυρίως η ατμοσφαιρική τύρβης, οι χημικές ιδιότητες των ουσιών αλλά και η ίδια η φύση της επιφάνειας. Η διαδικασία της ξηρής απόθεσης για σωματίδια αλλά και αέρια γενικά ακολουθεί τρία βήματα: (1) αεροδυναμική μεταφορά μέσα από το ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα σε ένα πολύ λεπτό στρώμα στάσιμου αέρα (quasi-laminar sublayer), (2) μεταφορά μέσω αυτού του λεπτού στρώματος στην επιφάνεια και (3) πρόσληψη από την ίδια την επιφάνεια. Η μεταφορά από το ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα προς το quasi-laminar sublayer γίνεται με τυρβώδη διάχυση, η οποία στην περίπτωση των σωματιδίων ενισχύεται από τη βαρυτική καθίζηση μεγαλύτερων σε μέγεθος σωματιδίων. Ιδιαίτερα για τα σωματίδια σημαντικό ρόλο παίζουν το μέγεθος, η πυκνότητα και το σχήμα, με το μέγεθος να αποτελεί την καθοριστική παράμετρο για τον τρόπο με τον οποίο πραγματοποιείται η ξηρή εναπόθεση στο quasi-laminar sublayer (Seinfeld and Pandis, 1998). Έτσι σωματίδια μεγέθους από 0.1 έως 0.05 μm εναποτίθενται ακολουθώντας κίνηση Brown, από 2 έως 20 μm κυριαρχούν δυνάμεις αδράνειας, ενώ για διαμέτρους μεγαλύτερες των 20 μm η εναπόθεση πραγματοποιείται μέσω βαρυτικής καθίζησης. Στην περιοχή διαμέτρων από 0.05 έως 2 μm δεν υπάρχει συγκεκριμένος μηχανισμός εναπόθεσης

Ο δεύτερος μηχανισμός απομάκρυνσης σωματιδίων από την ατμόσφαιρα είναι η υγρή εναπόθεση. Με τον όρο υγρή εναπόθεση αναφερόμαστε στις διαδικασίες απομάκρυνσης σωματιδίων και άλλων ουσιών από την ατμόσφαιρα λόγω σάρωσης (scavenging) μέσω ατμοσφαιρικών υδρομετεώρων και τη μεταφορά τους στην επιφάνεια του εδάφους ή της θάλασσας. Έχουμε:

- Σάρωση από τις σταγόνες της βροχής που φτάνουν στο έδαφος ή στην επιφάνεια της θάλασσας (Precipitation Scavenging)
- Σταγόνες νέφους που έρχονται σε επαφή με το έδαφος, κυρίως σε βουνά (Cloud Interception)
- Εναπόθεση από σταγονίδια ομίχλης που φτάνουν στο έδαφος (Fog Deposition)
- Απομάκρυνση με τη βοήθεια νιφάδων χιονιού (Snow Deposition)

Σε όλες τις παραπάνω περιπτώσεις για να πραγματοποιηθεί η υγρή απομάκρυνση πρέπει να συμβούν τα εξής: καταρχήν τα σωματίδια και οι όποιες ουσίες πρέπει να έρθουν σε επαφή με υδροσταγονίδια. Έπειτα πρέπει να συλλεχθούν από τα υδρομετέωρα και τέλος να φτάσουν στο έδαφος. Επιπλέον είναι δυνατόν κάποιες ουσίες να αντιδράσουν χημικά σε κάθε ένα από τα παραπάνω βήματα, γεγονός που καθιστά ακόμα δυσκολότερη την πλήρη περιγραφή του φαινομένου.

Όπως αναφέρεται και στα προηγούμενα κεφάλαια, συνεχείς μελέτες στη Δ υτική Μεσόγειο (Bergametti et al., 1989; Loye-Pilot et al., 1989; Guerzoni et al., 1992), έδειξαν ότι περίπου τα τρία-τέταρτα της σκόνης της Σαχάρας εναποτίθενται με βροχόπτωση. Επίσης έχει παρατηρηθεί ότι μερικά επεισόδια βροχοπτώσεων αρκούν για να εναποθέσουν μεγάλο ποσοστό σκόνης στην επιφάνεια της θάλασσας σε ετήσια βάση. Συγκεκριμένα τη περίοδο 2000-02 εναποτέθηκαν συνολικά στην επιφάνεια της Μεσογείου Θάλασσας 11594*10³ τόνοι σκόνης, από τους οποίους οι 4342*10³ τόνοι έπεσαν με το μηχανισμό της ξηρής εναπόθεσης (37.5%), ενώ $7252*10^3$ τόνοι με υγρή εναπόθεση (62.5%) (Papadopoulos et al., 2003). Πρόσφατο παράδειγμα επεισοδίου υγρής εναπόθεσης, σημειώθηκε την άνοιξη του 2001 (Σχ.3.2), όπου σε δύο ημέρες (19-20/5/2001) μετρήθηκε το 44% της συνολικής ετήσιας εναπόθεσης SPM στη Μεσόγειο (Sofianos et al., in preperation). Οι απευθείας μετρήσεις της εναπόθεσης σκόνης Σαχάρας πάνω από τη Μεσόγειο είναι σποραδικές στο χρόνο και στο χώρο και οι περισσότερες εκτιμήσεις στηρίζονται σε πειράματα με μοντέλα. Άλλοι ερευνητές με τη βοήθεια αριθμητικών μοντέλων (Prospero, 1996), εκτίμησαν ρυθμούς εναπόθεσης στη Μεσόγειο τάξεως 3-14 g/(m²year), με υψηλότερες τιμές στην Ανατολική Μεσόγειο (14.12 g/(m²year)). Πάντως πρέπει να αναφερθεί ότι, σε τοπική κλίμακα δεν αποκλείονται σημαντικές ποσότητες σκόνης που οφείλονται σε ανθρώπινες δραστηριότητες, να καθιστούν κυρίαρχη την ξηρή εναπόθεση σε σχέση με την υγρή (Michalopoulos, personal communication).







Σχήμα 3.2 Αθροιστική βροχόπτωση (mm) και εναπόθεση σκόνης Σαχάρας (mg/m²), στις 19-20/2001 (Sofianos et al., in preperation)

Η ατμοσφαιρική εναπόθεση SPM, όπως προκύπτει από το ατμοσφαιρικό μοντέλο SKIRON/Eta, παρουσιάζεται με ημερίσιες και αθροιστικές χρονοσειρές, για κάθε κλάση σωματιδίου και στα δύο πειράματα. Η ημερίσια ατμοσφαιρική εναπόθεση SPM στην επιφάνεια της Μεσογείου για την μία, το άθροισμα των τεσσάρων και των τεσσάρων κλάσεων σωματιδίων ξεχωριστά, παρουσιάζεται στα Σχήματα 3.3, 3.4 και 3.5 αντίστοιχα. Ο χρόνος προσομοίωσης περιλαμβάνει περίπου τα τρίατέταρτα του εποχιακού κύκλου του έτους 2003 (λείπουν οι φθινοπωρινοί μήνες και ο χειμερινός μήνας Δεκέμβριος). Δεδομένου ότι η ατμοσφαιρική εναπόθεση SPM παρουσιάζει έντονη υπερετήσια μεταβλητότητα (Guerzoni et al., 1997), δεν μπορούν να γίνουν γενικεύσεις. Πάντως και στις τρείς χρονοσειρές, παρατηρείται εναπόθεση ισχυρότερη ατμοσφαιρική τους χειμερινούς και ανοιξιάτικους μήνες, όπως ήταν άλλωστε και αναμενόμενο λόγω των περισσότερων βρογοπτώσεων (Le Bolloch and Guerzoni, 1995).

Η ατμοσφαιρική εναπόθεση στην Ανατολική Μεσόγειο είναι κατά πολύ εντονότερη απ'ότι στη Δυτική (σχεδόν ταυτίζονται οι δύο χρονοσειρές EMED-MED, cyan-blue line), με εξαίρεση το μήνα Μαΐο. Το γεγονός αυτό οφείλεται στη γενική κυκλοφορία της ατμόσφαιρας και της γεωγραφικής θέσης της ερήμου Σαχάρα. Η ατμοσφαιρική αυτή κυκλοφορία μεταφέρει την SPM προς ανατολικότερα γεωγραφικά πλάτη πάνω από τη Μεσόγειο. Ένα σημαντικό συμπέρασμα το οποίο εξάγεται από τα Σχ. 3.3, 3.4 και 3.5 είναι ο επεισοδιακός χαρακτήρας της ατμοσφαιρικής εναπόθεσης, γεγονός που οφείλεται κυρίως στην υγρή εναπόθεση της SPM στη Μεσόγειο. Παρά τις γενικές ομοιότητες των δύο προσομοιώσεων στα Σχ. 3.3 και 3.4, όπου εμφανίζονται μέγιστα ημερίσιας εναπόθεσης εν γένει σε ίδιες χρονικές περιόδους, παρατηρούνται σημαντικές διαφοροποιήσης όσον αφορά τα ημερίσια ποσά εναπόθεσης στην επιφάνεια της θάλασσας. Το γεγονός αυτό ενδεχομένως οφείλεται στα διαφορετικά ποσοστά υγρής και ξηρής εναπόθεσης μεταξύ των δύο προσομοιώσεων. Η διαφοροποίηση αυτή μπορεί να αποδοθεί στα βαρύτερα σωματίδια, που έχουν αυξημένο ποσοστό ξηρής εναπόθεσης, λόγω μεγάλης ταχύτητας καθίζησής τους.



Σχήμα 3.3 Ημερίσια εναπόθεση της μίας κλάσης (dashed line) SPM (mgr) στην επιφάνεια της Μεσογείου (blue: Mediterranean, red: western M., cyan: eastern M.)



Σχήμα 3.4 Ημερίσια εναπόθεση του αθροίσματος των τεσσάρων κλάσεων (solid line) SPM (mgr) στην επιφάνεια της Μεσογείου (blue: Mediterranean, red: western M., cyan: eastern M.)



Σχήμα 3.5 Ημερίσια εναπόθεση των τεσσάρων κλάσεων SPM (mgr) στην επιφάνεια της Μεσογείου (blue: Mediterranean, red: western M., cyan: eastern M.)

Ένα παράδειγμα της διαφοροποίησης αυτής, είναι το μέγιστο ποσό ατμοσφαιρικής εναπόθεσης στην προσομοίωση με τέσσερις κλάσεις SPM στα μέσα Μαρτίου (σημειώνεται με βέλος στα Σχήματα 3.3, 3.4 και 3.5) με τιμή περίπου στα 2*10¹⁴ mgr, σε αντίθεση με την προσομοίωση για μία κλάση SPM, την ίδια χρονική περίοδο με τιμή περίπου στα 0.5*10¹⁴ mgr. Η διαφορά αυτή δικαιολογείται με τη συνεισφορά της δεύτερης κλάσης σωματιδίων, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.5. Επίσης από το ίδιο σχήμα παρατηρούμε ότι για την δεύτερη και την πρώτη κλάση SPM, έχουμε τη μοναδική περίπτωση ισχυρότερης ατμοσφαιρικής εναπόθεσης στη Δυτική Μεσόγειο από ότι στην Ανατολική, επεισόδιο που συμβαίνει τον μήνα Μάιο.

Στα Σχήματα 3.6 έως 3.9 παρουσιάζεται η αθροιστική εναπόθεση SPM στην Μεσόγειο και για τις δύο προσομοιώσεις, επιβεβαιώνοντας τις συνολικά μεγαλύτερες συγκεντρώσεις SPM (Σχ. 3.8) για την Ανατολική Μεσόγειο με τιμές 1.47 gr/m² (dashed cyan line) και 1.24 gr/m² (solid cyan line), σε σχέση με τη Δυτική όπου 0.49 gr/m² (dashed red line)

και 0.84 gr/m² (solid red line), συμφωνα με παλαιότερες παρατηρήσεις και προσομοιώσεις με μοντέλα (Goudie and Middleton, 2001).



Σχήμα 3.6 Αθροιστική εναπόθεση της μίας κλάσης (dashed line) και του αθροίσματος των τεσσάρων κλάσεων (solid line) SPM (mgr) στην επιφάνεια της Μεσογείου (blue: Mediterranean, red: western M., cyan: eastern M.)

Παρά το γεγονός ότι και στις δύο προσομοιώσεις δεν ολοκλήρώνεται ο ετήσιος κύκλος και μάλιστα απουσιάζουν οι τελευταίοι τέσσερις μήνες του 2003 (οι οποίοι είναι σημαντικοί λόγω υγρής εναπόθεσης), θα μπορούσε κανείς να παρατηρήσει την εξαιρετικά ασθενή εκτίμηση των ροών SPM για όλη την επιφάνεια της Μεσογείου (Σχ. 3.8) με τιμές 1.13 gr/m² (dashed blue line) και 1.10 gr/m² (solid blue line), σε σχέση με παλαιότερα αποτελέσματα που παρουσιάζουν ετήσιες τιμές ροών 3-14 gr/m² ανά έτος (Prospero, 1996). Όσον αφορά τη σύγκριση των δύο προσομοιώσεων (Σχ. 3.8), οι ροές SPM για όλη την επιφάνεια της Μεσογείου διαφοροποιούνται ελάχιστα (dashed and solid blue line). Μικρή αύξηση της συνολικής ροής SPM του αθροίσματος των τεσσάρων κλάσεων παρατηρείται τη χειμερινή και εαρινή περίοδο, ενώ τη θερινή έχουμε αντίστοιχα μικρή μείωση του οροπεδίου των ροών σε σχέση με τη μία κλάση SPM.



Σχήμα 3.7 Αθροιστική εναπόθεση των τεσσάρων κλάσεων SPM (mgr) στην επιφάνεια της Μεσογείου (blue: Mediterranean, red: western M., cyan: eastern M.)



Σχήμα 3.8 Αθροιστική ροή της μίας κλάσης (dashed line) και του αθροίσματος των τεσσάρων κλάσεων (solid line) SPM (mgr/m²) στην επιφάνεια της Μεσογείου (blue: Mediterranean, red: western M., cyan: eastern M.)



Σχήμα 3.9 Αθροιστική ροή των τεσσάρων κλάσεων SPM (mgr/m²) στην επιφάνεια της Μεσογείου (blue: Mediterranean, red: western M., cyan: eastern M.)

3.2 ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΕΙΣ SPM ΣΤΗ ΛΕΚΑΝΗ ΤΗΣ ΜΕΣΟΓΕΙΟΥ

3.2.1 Χρονική μεταβολή των συγκεντρώσεων SPM σε ενδιάμεσα θαλάσσια στρώματα της λεκάνης της Μεσογείου

Στα Σχήματα 3.10 έως 3.17 παρουσιάζονται χρονοσειρές συγκέντρωσης SPM για όλη τη Μεσόγειο, αλλά και για επιμέρους περιοχές της, την Δυτική και Ανατολική και σε τρία θαλάσσια στρώματα: 0-100m, 100-400m και 400m-bottom. Σημειώνεται ότι το υπόβαθρο των συγκεντρώσεων SPM και στα δύο πειράματα, με μία και τέσσερις κλάσεις σωματιδίων, οφείλεται στη πρώτη (ελαφρύτερη) κλάση, της οποίας η αρχική τιμή συγκέντρωσης είναι ίδια και στις δύο προσομοιώσεις σε όλα τα θαλάσσια στρώματα.

Στο Σχήμα 3.10 παρατηρούμε ότι οι διαφοροποιήσεις σε όλη τη Μεσόγειο για τη μία (dashed blue line) και το άθροισμα των τεσσάρων

(solid blue line) κλάσεων SPM, είναι μικρές στο τέλος της χρονικής $(2.46 m gr/m^3)$ προσομοιώσεων και 2.39 mgr/m³ διάρκειας των αντίστοιχα). Η σημαντικότερη διαφορά παρουσιάζεται (Σχ. 3.10) στις ιδιαίτερα αυξημένες συγκεντρώσεις SPM στη Δυτική Μεσόγειο (solid red line), οι οποίες αντισταθμίζονται στο άθροισμά τους, από τις μειωμένες τιμές της Ανατολικής Μεσογείου (solid cyan line), σε συμφωνία με την ατμοσφαιρική εναπόθεση των δύο προσομοιώσεων (Σχ. 3.6 και 3.8). Από το Σχήμα 3.11 διαπιστώνεται ότι η τάξη μεγέθους της συγκέντρωσης του αθροίσματος των τεσσάρων κλάσεων διαμορφώνεται ουσιαστικά από το υπόβαθρο σκόνης που υπάρχει στη λεκάνη της Μεσογείου και ουσιαστικά οφείλεται στη πρώτη κλάση SPM (Sofianos et al., in preperation), με μικρές διαφοροποιήσεις να αποδίδονται στη δεύτερη κλάση σωματιδίων, όπου όπως και οι υπόλοιπες δεν έχουν φτάσει σε κατάσταση ισορροπίας. Η συνεισφορά της τρίτης και τέταρτης κλάσης SPM στη συνολική συγκέντρωση είναι σχεδόν μηδαμινή, αφού είναι δύο και τρείς τάξης μεγέθους μικρότερη, αντίστοιχα.



Σχήμα 3.10 Χρονική μεταβολή των συγκεντρώσεων για τη μία κλάση (dashed line) και του αθροίσματος των τεσσάρων κλάσεων (solid line) SPM (mgr/m³) στη λεκάνη της Μεσογείου (blue: Mediterranean, red: western M., cyan: eastern M.)



Σχήμα 3.11 Χρονική μεταβολή των συγκεντρώσεων των τεσσάρων κλάσεων SPM (mgr/m³) στη λεκάνη της Μεσογείου (blue: Mediterranean, red: western M., cyan: eastern M.)

То επιφανειακό θαλάσσιο στρώμα 0-100m περιέχει σημαντική πληροφορία από την ατμοσφαιρική εναπόθεση. Το γεγονός αυτό επιβεβαιώνεται από την υψηλή συχνότητα υγρής εναπόθεσης SPM τους χειμερινούς και εαρινούς μήνες (Σχ. 3.3 και 3.4). Τη θερινή περίοδο, όπου υπάρχει περιορισμένη ατμοσφαιρική εναπόθεση, παρουσιάζεται έντονη αρνητική κλίση στις καμπύλες συγκέντρωσης (Σχ. 3.12) για το άθροισμα των τεσσάρων κλάσεων (blue-red-cyan solid lines) σε σχέση με αυτές για τη μία κλάση SPM. Η σημαντική διαφοροποίηση μεταξύ των δύο πειραμάτων, οφείλεται στα βαρύτερα σωματίδια με μεγάλες κατακόρυφες ταχύτητες καθίζησης (ws), που απομακρύνουν την SPM από τα πρώτα 100m της υδάτινης στήλης σε βαθύτερα στρώματα. Αυτές που είναι σημαντικές στη παραπάνω διαδικασία, είναι η πρώτη και η δεύτερη κλάση SPM που έχουν έως και τρείς τάξεις μεγέθους μεγαλύτερες συγκεντρώσεις από την τρίτη και τέταρτη κλάση (Σχ. 3.13). Η μείωση της συγκέντρωσης της πρώτης κλάσης SPM (Σχ. 3.13) με το χρόνο, δεδομένου ότι δεν αλλάζει η κατακόρυφη ταχύτητα ws μεταξύ των δύο πειραμάτων, οφείλεται στη μειωμένη ατμοσφαιρική

εναπόθεσή της στο πείραμα με τις τέσσερεις κλάσεις (Σχ. 3.6 και 3.7). Η δεύτερη κλάση SPM παρουσιάζει αυξητική τάση στη συγκέντρωσή της, τους πρώτους μήνες της ισχυρής ατμοσφαιρικής εναπόθεσης (Σχ. 3.13), δεδομένου και του γεγονότος ότι δεν υπάρχει υπόβαθρο για τη συγκεκριμένη κλάση. Αντίθετα τους θερινούς μήνες μειωμένης ατμοσφαιρικής εναπόθεσης, η συγκέντρωσή της μειώνεται, λόγω της σχετικά μεγάλης ταχύτητας καθίζησήςτης. Η τρίτη και τέταρτη κλάση SPM (Σχ. 3.13), παρουσιάζουν εξαιρετικά μικρές συγκεντρώσεις στο θαλάσσιο στρώμα των 0-100m. Το γεγονός αυτό οφείλεται κατα κύριο λόγο σε δύο παράγοντες. Ο πρώτος παράγοντας είναι η μικρή επιφανειακή ροή SPM από την ατμόσφαιρα στη θάλασσα καθόλη τη διάρκεια των οκτώ μηνών της προσομοίωσης. Ο δεύτερος παράγοντας είναι οι εξαιρετικά μεγάλες ταχύτητες καθίζησής τους, οι οποίες τα βυθίζουν σε μεγαλύτερα βάθη από αυτό των 100m.



Σχήμα 3.12 Χρονική μεταβολή των συγκεντρώσεων για τη μία κλάση (dashed line) και το άθροισμα των τεσσάρων κλάσεων (solid line) SPM (mgr/m³) στο θαλάσσιο στρώμα 0-100m της Μεσογείου (blue: Mediterranean, red: western M., cyan: eastern M.)



Σχήμα 3.13 Χρονική μεταβολή των συγκεντρώσεων των τεσσάρων κλάσεων SPM (mgr/m³) στο θαλάσσιο στρώμα 0-100m της Μεσογείου (blue: Mediterranean, red: western M., cyan: eastern M.)

Στο ενδιάμεσο θαλάσσιο στρώμα 100-400m οι έντονες διακυμάνσεις, λόγω ατμοσφαιρικής εναπόθεσης έχουν εξομαλυνθεί (Σχ. 3.14), αφήνοντας μία τάση αύξησης για τους χειμερινούς μήνες και για τους υπόλοιπους μήνες μία κατάσταση ισορροπίας στις συγκεντρώσεις SPM. Η αύξηση αυτή, ενδεχομένως να οφείλεται και στο γεγονός ότι το στρώμα ανάμιξης κατά τη διάρκεια του χειμώνα είναι μεγαλύτερο. Έτσι για παράδειγμα μια τυπική τιμή του στρώματος ανάμιξης το χειμώνα είναι περίπου τα 100m, επιτρέποντας επομένως στην SPM να φτάσει τουλάχιστον σε αυτό το βάθος ευκολότερα και πιο γρήγορα από ότι το καλοκαίρι. Η συγκέντρωση σκόνης στο θαλάσσιο στρώμα 100-400m, ακολουθεί το υπόβαθρο συγκέντρωσης της πρώτης κλάσης SPM. Η αύξηση του οροπεδίου των συγκεντρώσεων (Σχ.3.14), στο πείραμα με τις τέσσερις κλάσεις SPM, οφείλεται κυρίως στη δεύτερη κλάση (Σχ. 3.15). Αντίθετα η τρίτη και τέταρτη κλάση, βυθίζονται γρήγορα σε βάθος μεγαλύτερο από τα 400m, επομένως έχουμε μείωση των συγκεντρώσεων και σε περιόδους σημαντικής ατμοσφαιρικής ροής.



Σχήμα 3.14 Χρονική μεταβολή των συγκεντρώσεων για τη μία κλάση (dashed line) και το άθροισμα των τεσσάρων κλάσεων (solid line) SPM (mgr/m³) στο θαλάσσιο στρώμα 100-400m της Μεσογείου (blue: Mediterranean, red: western M., cyan: eastern M.)



Σχήμα 3.15 Χρονική μεταβολή των συγκεντρώσεων των τεσσάρων κλάσεων SPM (mgr/m³) στο θαλάσσιο στρώμα 100-400m της Μεσογείου (blue: Mediterranean, red: western M., cyan: eastern M.)



Σχήμα 3.16 Χρονική μεταβολή των συγκεντρώσεων για τη μία κλάση (dashed line) και το άθροισμα των τεσσάρων κλάσεων (solid line) SPM (mgr/m³) στο θαλάσσιο στρώμα 400mbottom της Μεσογείου (blue: Mediterranean, red: western M., cyan: eastern M.)



Σχήμα 3.17 Χρονική μεταβολή των συγκεντρώσεων των τεσσάρων κλάσεων SPM (mgr/m³) στο θαλάσσιο στρώμα 400mbottom της Μεσογείου (blue: Mediterranean, red: western M., cyan: eastern M.)

Σύμφωνα με τα Σχήματα 3.16 και 3.17, από τα 400m βάθος και έως το βυθό, παρατηρείται αυξητική τάση των συγκεντρώσεων της SPM. Εξαίρεση αποτελεί η τέταρτη και μεγαλύτερη κλάση σωματιδίων, λόγω της μεγάλης ταχύτητας καθίζησης (ws) που έχει και απομακρύνει την σκόνη από την υδάτινη στήλη, εναποθέτωντάς την (Σχ. 3.17) στο βυθό. Τέλος, η αύξηση της συγκέντρωσης σκόνης στο πείραμα με τις τέσσερεις κλάσεις SPM, οφείλεται στις μεγαλύτερες κατακόρυφες ταχύτητες καθίζησης των τριών βαρύτερων κλάσεων. Σημαντικότερη είναι η συνεισφορά της δεύτερης κλάσης (Σχ. 3.17).

3.2.2 Χωρική συγκέντρωση SPM σε διάφορα επίπεδα της Μεσογείου

3.2.2.1 Χάρτες συγκέντρωσης SPM στο θαλάσσιο επίπεδο των 5m

Προκειμένου να απεικονισθεί η γεωγραφική κατανομή της σκόνης της Σαχάρας σε θαλάσσια επίπεδα της λεκάνης της Μεσογείου, παρουσιάζονται χάρτες συγκέντρωσης της SPM για τρείς χρονικές περιόδους: την χειμερινή (07/01/2003), την εαρινή (07/04/2003) και τη θερινή (05/08/2003). Η SPM εναποτείθεται στην επιφάνεια της Μεσογείου και έπειτα με βάση τις φυσικές διεργασίες μεταφοράς και διάχυσης ανακατανέμεται στη θάλασσα. Εκτός της οριζόντιας μεταφοράς, η SPM υφίσταται και κατακόρυφη μεταφορά λόγω της θερμοαλατικής κυκλοφορίας, αλλά και λόγω των ταχυτήτων καθίζησης.

Στο θαλάσσιο επίπεδο των 5m εξαιρετικά ισχυρό είναι το σήμα της ατμοσφαιρικής εναπόθεσης. Εξίσου σημαντικός είναι ο ρόλος στις συγκεντρώσεις SPM της οριζόντιας μεταφοράς στην επιφάνεια, κατά την γενική ανατολική κυκλοφορία της Μεσογείου, λόγω των ισχυρότερων ρευμάτων κοντά στην επιφάνεια, σε σχέση με τα βαθύτερα στρώματα. Στη διάρκεια της θερινής περιόδου, όπου έχουμε μικρή ατμοσφαιρική εναπόθεση, παρατηρείται σημαντική μείωση της συγκέντρωσης SPM στην επιφάνεια για τις τέσσερις κλάσεις (Σχ. 3.23) σε σχέση με τη μία κλάση SPM (Σχ. 3.20). Το γεγονός αυτό αποδίδεται στις μεγάλες ταχύτητες καθίζησης w_s των τριών νέων κλάσεων, οι

οποίες συνεισφέρουν σημαντικά στις κατακόρυφες κινήσεις στην υδάτινη στήλη.

Οι διαφορές στα δύο πειράματα παρουσιάζονται με τον πιό παραστατικό τρόπο στα Σχήματα 3.24 έως 3.26, όπου με θετικές τιμές έχουμε πλεόνασμα συγκέντρωσης για τις τέσσερις κλάσεις SPM και με αρνητικές για τη μία κλάση. Στην αρχή της προσομοίωσης (Σχ. 3.24) οι διαφορές στις τιμές των συγκεντρώσεων είναι ασήμαντες και περιορίζονται κυρίως στη βαθμίδα Βορρά-Νότου, που δημιουργείται λόγω των βαρύτερων σωματιδίων, τα οποία δεν μεταφέρονται στα βόρεια γεωγραφικά πλάτη της λεκάνης.

Στο Σχήμα 3.25 παρατηρείται μεγάλη βαθμίδα συγκέντρωσης στη διεύθυνση Ανατολής-Δύσης για γειτονικά γεωγραφικά μήκη στη περιοχή 11°E έως 17°E. Αυτή οφείλεται, στο γεγονός ότι τα ελαφρύτερα σωματίδια μπορούν να ακολουθήσουν τη γενική κυκλοφορία της ατμόσφαιρας για μεγαλύτερα χρονικά διαστήματα και αποστάσεις και να εναποτεθούν στην επιφάνεια της θάλασσας ανατολικότερα απ'ότι τα βαρύτερα. Τέλος στο Σχήμα 3.26 την θερινή περίοδο με μικρή ατμοσφαιρική εναπόθεση, δημιουργείται βαθμίδα στις συγκεντρώσεις, κυρίως λόγω της μεγάλης ταχύτητας καθίζησης (w_s) των τριών βαρύτερων σωματιδίων, τα οποία βυθίζονται γρηγορότερα μέσα στην υδάτινη στήλη. Έτσι η μία (ελαφριά) κλάση σωματιδίων που εναποτείθεται και μεταφέρεται στη θάλασσα ανατολικότερα, υπερτερεί σε συγκέντρωση στην επιφάνεια έναντι του αθροιστικού συνόλου των τεσσάρων, γεγονός που φαίνεται από τις αρνητικές τιμές της διαφοράς των συγκεντρώσεων.





Σχήμα 3.18 Χάρτης συγκέντρωσης μίας κλάσης SPM (mgr/m³) σε βάθος 5m στις 07/01/2003



Σχήμα 3.19 Χάρτης συγκέντρωσης μίας κλάσης SPM (mgr/m³) σε βάθος 5m στις 07/04/2003





Σχήμα 3.20 Χάρτης συγκέντρωσης μίας κλάσης SPM (mgr/m³) σε βάθος 5m στις 05/08/2003



Σχήμα 3.21 Χάρτης συγκέντρωσης αθροίσματος των τεσσάρων κλάσεων SPM (mgr/m³) σε βάθος 5m στις 07/01/2003





Σχήμα 3.22 Χάρτης συγκέντρωσης αθροίσματος των τεσσάρων κλάσεων SPM (mgr/m³) σε βάθος 5m στις 07/04/2003



Σχήμα 3.23 Χάρτης συγκέντρωσης αθροίσματος των τεσσάρων κλάσεων SPM (mgr/m³) σε βάθος 5m στις 05/08/2003



Σχήμα 3.24 Χάρτης διαφοράς συγκέντρωσης της μίας κλάσης από το άθροισμα των τεσσάρων κλάσεων SPM (mgr/m³) σε βάθος 5m στις 07/01/2003



Σχήμα 3.25 Χάρτης διαφοράς συγκέντρωσης της μίας κλάσης από το άθροισμα των τεσσάρων κλάσεων SPM (mgr/m³) σε βάθος 5m στις 07/04/2003



Σχήμα 3.26 Χάρτης διαφοράς συγκέντρωσης της μίας κλάσης από το άθροισμα των τεσσάρων κλάσεων SPM (mgr/m³) σε βάθος 5m στις 05/08/2003

3.2.2.2 Χάρτες συγκέντρωσης SPM στο θαλάσσιο επίπεδο των 50m

Η γεωγραφική διανομή της SPM και το πεδίο ταχυτήτων για το επίπεδο των 50m, παρουσιάζεται στα Σχήματα 3.27 έως 3.32, για τις τρείς χρονικές περιόδους χειμερινή, εαρινή και θερινή όπως παρουσιάστηκαν για το βάθος των 5m. Οι σχετικά υψηλές τιμές των συγκεντρώσεων στο επίπεδο των 50m και στα δύο πειράματα, οφείλεται στο υπόβαθρο σκόνης μίας κλάσης SPM, το οποίο δημιουργήθηκε από την προσομοίωση των ετών 2000-2002 (Sofianos et al., in preperation).

Στους χάρτες του επιπέδου των 50m παρουσιάζεται ταυτόχρονα και το πεδίο των ταχυτήτων u,v. Με αυτόν το τρόπο, δύναται να μελετηθεί και η οριζόντια μεταφορά της SPM με ταχύτητες που σε πολλές περιοχές ξεπερνούν τα 0.5 m/s, καθώς και η παγίδευσή της σε κυκλωνικές και αντικυκλωνικές κυκλοφορίες. Σε αρκετές περιπτώσεις η συγκέντρωση SPM καθορίζεται από την οριζόντια κυκλοφορία και δεν επηρεάζεται άμεσα από το σήμα της ατμοσφαιρικής εναπόθεσης. Όπως φαίνεται και στα Σχήματα 3.27 έως 3.29 η οριζόντια κυκλοφορία κυριαρχεί των κατακόρυφων κινήσεων για τη μία κλάση SPM. Αυτό φαίνεται από τα επιφανειακά ύδατα που εισέρχονται μέσω του στενού του Γιβραλτάρ από τον Ατλαντικό και είναι φτωχά σε συγκεντρώσεις SPM. Κατά την είσοδό τους στη λεκάνη ακολουθούν την διεύθυνση της ανατολικής ροής κατά μήκος της Αφρικανικής ακτής και εντέλει εμπλουτίζονται με σκόνη. Το ίδιο παρατηρείται και στη μεταφορά σκόνης Σαχάρας από την Δυτική στην Ανατολική Μεσόγειο. Σε περιόδους περιορισμένης ατμοσφαιρικής εναπόθεσης (Σχ. 3.29) οι συγκεντρώσεις της Ανατολικής Μεσογείου αυξάνουν σε σχέση με αυτές της Δυτικής.

Υπάρχουν επίσης περιοχές με υψηλές τιμές συγκέντρωσης σκόνης Σαχάρας, που σχετίζονται με ισχυρή ατμοσφαιρική εναπόθεση. Επιπρόσθετα, η σκόνη Σαχάρας παγιδεύεται σε περιοχές κυκλωνικής και αντικυκλωνικής κυκλοφορίας. Ένα τέτοιο παράδειγμα αποτελεί η λεκάνη του κεντρικού Ιονίου και ο αντικυκλώνας Mersa-Marthur στη νοτιοανατολική λεκάνη της Λεβαντίνης. Για την περίπτωση των αντικυκλώνων, η προς τα κάτω κλίση των ισοπύκνων αυξάνει το επιφανειακό στρώμα, ενώ το αντίθετο είναι αληθές στην περίπτωση του κυκλώνα της Ρόδου στη βορειοδυτική λεκάνη της Λεβαντίνης.

Εκτός από την βαθμίδα ανατολής-δύσης των συγκεντρώσεων SPM, η οποία αποδίδεται στους διαφορετικούς ρυθμούς εναπόθεσης και στη γενική επιφανειακή ροή προς την ανατολή, όπως αναφέρθηκε προηγούμενα, υπάρχει επίσης και βαθμίδα νότου-βορρά με πολύ υψηλότερες τιμές κοντά στις Αφρικανικές ακτές για την Ανατολική Μεσόγειο και μία αντίθετη βαθμίδα για την Δυτική Μεσόγειο (Σχ. 3.27 έως 3.32). Αυτές οι περιοχές είναι κοντα στη πηγή της SPM, όπου τόσο η υγρή όσο και η ξηρή εναπόθεση είναι σημαντικές, προσθέτοντας ποσότητες SPM στην επιφάνεια της θάλασσας. Από την άλλη πλευρά, τα νερά του Ατλαντικού έχουν σχετικά χαμηλές συγκεντρώσεις SPM, ενισχύοντας τη βαθμίδα βορρά-νότου. Η επίδραση της ανταλλαγής θαλάσσιων μαζών με μικρές συγκεντρώσεις SPM, παρατηρείται και στο
Αιγαίο Πέλαγος, όπου θαλάσσια ύδατα από τη Μαύρη θάλασσα με σχετικά χαμηλές συγκεντρώσεις SPM παρατηρούνται στο Βόρειο Αιγαίο (Σχ. 3.28, 3.29, 3.31, 3.32).

Τα δύο πειράματα με μία και τέσσερις κλάσεις SPM, παρουσιάζουν εν γένει ίδιες οριζόντιες βαθμίδες συγκέντρωσης στα 50m κατά τη διεύθυνση Ανατολή-Δύση και κατα τη διεύθυνση Βορρά-Νότου, περιόδους (χειμώνας, τουλάχιστον για τις άνοιξη) ισχυρής ατμοσφαιρικής εναπόθεσης (Σχ. 3.27, 3.28, 3.30, 3.31). Τη θερινή περίοδο, στο πείραμα με μία κλάση σωματιδίων η ατμοσφαιρική εναπόθεση εξασθενεί, ενώ η βαθμίδα συγκέντρωσης Ανατολής-Δύσης (Σχ. 3.29) κυριαρχεί, με σχετικά υψηλότερες συγκεντρώσεις ανατολικά. Αντίθετα στις τέσσερις κλάσεις SPM (Σχ. 3.32) η βαθμίδα αυτή εξασθενεί, λόγω των μεγαλύτερων ταχυτήτων καθίζησης, που οδηγούν την SPM σε βαθύτερα στρώματα, μειώνοντας τις συγκεντρώσεις στα επιφανειακά στρώματα.

Στους χάρτες των Σχημάτων 3.33 έως 3.35 για τα 50m, παρουσιάζονται οι διαφορές μεταξύ των δύο πειραμάτων. Με θετικές τιμές απεικονίζονται οι συγκεντρώσεις στις οποίες πλεονάζουν οι τέσσερις κλάσεις SPM, ενώ το αντίθετο συμβαίνει για τις αρνητικές τιμές. Οι διαφορές που παρατηρούνται στους χάρτες, αποκαλύπτουν αντιστοιχία της οριζόντιας συγκέντρωσης στις διευθύνσεις Ανατολής-Δύσης και Βορρά-Νότου, που οφείλονται στο διαφορετικό βάρος της SPM μεταξύ των δύο πειραμάτων. Τα ελαφρύτερα σωματίδια παρουσιάζουν την τάση να μεταφέρονται ευκολότερα βόρεια και ανατολικά, τόσο στην ατμόσφαιρα όσο και στη θάλασσα, σε αντίθεση με τα βαρύτερα σωματίδια, όπου όπως αποκαλύπτουν οι χάρτες αλλά και οι χρονοσειρές επιδρούν περισσότερο στις νοτιοδυτικές περιοχές της Μεσογείου, κοντά στη πηγή της SPM.

73



max tracer concentration=40.1075 mgr/m³, at depth=50m, max vel=0.74435 m/s



Σχήμα 3.27 Χάρτης πεδίου οριζόντιων ταχυτήτων u, v (m/sec) και συγκέντρωσης μίας κλάσης SPM (mgr/m³) σε βάθος 50m στις 07/01/2003



max tracer concentration=32.7383 mgr/m³,at depth=50m, max vel=0.67657 m/s



Σχήμα 3.28 Χάρτης πεδίου οριζόντιων ταχυτήτων u, v (m/sec) και συγκέντρωσης μίας κλάσης SPM (mgr/m³) σε βάθος 50m στις 07/04/2003



max tracer concentration=35.0074 mgr/m³,at depth=50m, max vel=0.80314 m/s



Σχήμα 3.29 Χάρτης πεδίου οριζόντιων ταχυτήτων u, v (m/sec) και συγκέντρωσης μίας κλάσης SPM (mgr/m³) σε βάθος 50m στις 05/08/2003



max tracer concentration=40.1066 mgr/m³, at depth=50m, max vel=0.7409 m/s



Σχήμα 3.30 Χάρτης πεδίου οριζόντιων ταχυτήτων u, v (m/sec) και συγκέντρωσης του αθροίσματος των τεσσάρων κλάσεων SPM (mgr/m³) σε βάθος 50m στις 07/01/2003



max tracer concentration=32.8971 mgr/m³,at depth=50m, max vel=0.62926 m/s



Σχήμα 3.31 Χάρτης πεδίου οριζόντιων ταχυτήτων u, v (m/sec) και συγκέντρωσης του αθροίσματος των τεσσάρων κλάσεων SPM (mgr/m³) σε βάθος 50m στις 07/04/2003



max tracer concentration=25.0041 mgr/m³, at depth=50m, max vel=0.7651 m/s



Σχήμα 3.32 Χάρτης πεδίου οριζόντιων ταχυτήτων u, v (m/sec) και συγκέντρωσης του αθροίσματος των τεσσάρων κλάσεων SPM (mgr/m³) σε βάθος 50m στις 05/08/2003



Σχήμα 3.33 Χάρτης διαφοράς συγκέντρωσης της μίας κλάσης από το άθροισμα των τεσσάρων κλάσεων SPM (mgr/m³) σε βάθος 50m στις 07/01/2003



Σχήμα 3.34 Χάρτης διαφοράς συγκέντρωσης της μίας κλάσης από το άθροισμα των τεσσάρων κλάσεων SPM (mgr/m³) σε βάθος 50m στις 07/04/2003



Σχήμα 3.35 Χάρτης διαφοράς συγκέντρωσης της μίας κλάσης από το άθροισμα των τεσσάρων κλάσεων SPM (mgr/m³) σε βάθος 50m στις 05/08/2003

3.2.2.3 Χάρτες συγκέντρωσης SPM στο θαλάσσιο επίπεδο των 150m

Στους χάρτες συγκέντρωσης (Σχ. 3.36 έως 3.41) μίας και τεσσάρων κλάσεων SPM στα 150m, παρατηρούνται σε συμφωνία με τα προηγούμενα, οι οριζόντιες βαθμίδες που οφείλονται κυρίως στην θερμοαλατική κυκλοφορία και στις ανταλλαγές μαζών υδάτων με διαφορετικές συγκεντρώσεις. Γενική διαπίστωση (η οποία συνεπικουρείται και από τις επιφανειακές συγκεντρώσεις) είναι ότι η SPM εμφανίζεται χωρικά και χρονικά το μεγαλύτερο διάστημα στις παράκτιες περιοχές, ενώ ένα σχετικά μικρό ποσοστό της μεταφέρεται στην ανοιχτή θάλασσα. Το φαινόμενο αυτό ισχύει και στα δύο πειράματα με διαφορετικές κλάσεις SPM, εντονότερο όμως είναι στην πιο ρεαλιστική περίπτωση με τις τέσσερις κλάσεις, λόγω των βαρύτερων σωματιδίων που περιλαμβάνονται. Όσον αφορά τους χάρτες διαφοράς συγκεντρώσεων στα 150m (Σχ. 3.42 έως 3.44), προκύπτουν τα ίδια συμπεράσματα με όσα περιγράφησαν στην προηγούμενη ενότητα για τα 50m (Σχ. 3.33 έως 3.35).





Σχήμα 3.36 Χάρτης συγκέντρωσης μίας κλάσης SPM (mgr/m³) σε βάθος 150m στις 07/01/2003



Σχήμα 3.37 Χάρτης συγκέντρωσης μίας κλάσης SPM (mgr/m³) σε βάθος 150m στις 07/04/2003





Σχήμα 3.38 Χάρτης συγκέντρωσης μίας κλάσης SPM (mgr/m³) σε βάθος 150m στις 05/08/2003



Σχήμα 3.39 Χάρτης συγκέντρωσης του αθροίσματος των τεσσάρων κλάσεων SPM (mgr/m³) σε βάθος 150m στις 07/01/2003





Σχήμα 3.40 Χάρτης συγκέντρωσης του αθροίσματος των τεσσάρων κλάσεων SPM (mgr/m³) σε βάθος 150m στις 07/04/2003



Σχήμα 3.41 Χάρτης συγκέντρωσης του αθροίσματος των τεσσάρων κλάσεων SPM (mgr/m³) σε βάθος 150m στις 05/08/2003



Σχήμα 3.42 Χάρτης διαφοράς συγκέντρωσης της μίας κλάσης από το άθροισμα των τεσσάρων κλάσεων SPM (mgr/m³) σε βάθος 150m στις 07/01/2003



Σχήμα 3.43 Χάρτης διαφοράς συγκέντρωσης της μίας κλάσης από το άθροισμα των τεσσάρων κλάσεων SPM (mgr/m³) σε βάθος 150m στις 07/04/2003



Σχήμα 3.44 Χάρτης διαφοράς συγκέντρωσης της μίας κλάσης από το άθροισμα των τεσσάρων κλάσεων SPM (mgr/m³) σε βάθος 150m στις 05/08/2003

3.2.3 Ζωνικές κατατομές συγκέντρωσεις SPM στη Δυτική (WM) και Ανατολική (EM) Μεσόγειο

Για μία ολοκληρωμένη εικόνα της τρισδιάστατης γεωγραφικής κατανομής των συγκεντρώσεων SPM στη λεκάνη της Μεσογείου, παρουσιάζονται οι ζωνικές κατατομές SPM στη Δυτική και Ανατολική Μεσόγειο (Σχ. 3.1, yellow lines). Στη πρώτη προσομοίωση για μία κλάση SPM, η ταχύτητα καθίζησης είναι μικρή (0,001 mm/sec) και συνεισφέρει πολύ λίγο στην κατακόρυφη κατανομή της σκόνης στην υδάτινη στήλη. Τα Σχήματα 3.45 έως 3.47 παρουσιάζουν τις ζωνικές κατατομές της Δυτικής Μεσογείου. Υπάρχει ξεκάθαρη ένδειξη ότι η προς τα κάτω ροή της σκόνης είναι εξαιρετικά ασθενής και επομένως οι μεγαλύτερες ποσότητες «παγιδεύονται» στα πρώτα 100m. Άλλος ένας παράγοντας που συμβάλλει σε αυτή τη διαδικασία είναι ο σχηματισμός κυκλώνων, προκαλώντας άνοδο των ισοπύκνων και περιορίζοντας το επιφανειακό στρώμα. Το αντίθετο συμβαίνει στους αντικυκλώνες, όπου σημαντικός είναι ο ρόλος του στρώματος ανάμιξης με μεγάλο βάθος το χειμώνα.



Σχήμα 3.45 Ζωνική κατατομή συγκέντρωσης μίας κλάσης SPM (mgr/m³) στις 40°N από 0°E έως 16°E (WM) στα 0-300m βάθος στις 07/01/2003



Σχήμα 3.46 Ζωνική κατατομή συγκέντρωσης μίας κλάσης SPM (mgr/m³) στις 40°N από 0°E έως 16°E (WM) στα 0-300m βάθος στις 07/04/2003



Σχήμα 3.47 Ζωνική κατατομή συγκέντρωσης μίας κλάσης SPM (mgr/m³) στις 40°N από 0°E έως 16°E (WM) στα 0-300m βάθος στις 05/08/2003

Στις ζωνικές κατατομές της Δυτικής Μεσογείου (Σχ. 3.48 έως 3.50), παρουσιάζονται συγκεντρώσεις του αθροίσματος των τεσσάρων κλάσεων. Η προς τα κάτω ροή της σκόνης, είναι σαφώς ενισχυμένη σε σχέση με τη προσομοίωση για μία κλάση. Το βάθος μεγάλων συγκεντρώσεων σκόνης στο τέλος της προσομοίωσης σχεδόν τριπλασιάζεται, φτάνοντας έως και τα 300m. Επίσης λόγω των μεγάλων ταχυτήτων καθίζησης ws σημαντικές ποσότητες σκόνης βυθίζονται, σχηματίζοντας σε μεγαλύτερα βάθη κηλίδες σκόνης με υψηλές συγκεντρώσεις. Όπως στους χάρτες, έτσι και στις ζωνικές κατατομες, παρουσιάζονται οι διαφορές των δύο προσομοιώσεων για μία και τέσσερις κλάσεις σωματιδίων. Οι αρνητικές τιμές δηλώνουν πλεόνασμα για τη μία κλάση σωματιδίων, σε αντίθεση με τις θετικές, όπου δηλώνουν μεγαλύτερες συγκεντρώσεις των τεσσάρων κλάσεων. Στα Σχήματα 3.51 έως 3.53 παρουσιάζονται οι ζωνικές κατατομές διαφορας των δύο πειραμάτων της Δυτικής Μεσογείου, όπου είναι εμφανής η κατακόρυφη βαθμίδα συγκεντρώσεων, με τη μία κλάση να περιορίζεται σε βάθη μικρότερα των 50m, ενώ τα βαρύτερα σωματίδια να ξεπερνούν τα 150m στο τέλος της προσομοίωσης (Σχ. 3.53).

85



Σχήμα 3.48 Ζωνική κατατομή συγκέντρωσης αθροίσματος τεσσάρων κλάσεων SPM (mgr/m³) στις 40°N από 0°E έως 16°E (WM) στα 0-300m βάθος στις 07/01/2003



Σχήμα 3.49 Ζωνική κατατομή συγκέντρωσης αθροίσματος τεσσάρων κλάσεων SPM (mgr/m³) στις 40°N από 0°E έως 16°E (WM) στα 0-300m βάθος στις 07/04/2003



Σχήμα 3.50 Ζωνική κατατομή συγκέντρωσης αθροίσματος τεσσάρων κλάσεων SPM (mgr/m³) στις 40°N από 0°E έως 16°E (WM) στα 0-300m βάθος στις 05/08/2003



Σχήμα 3.51 Ζωνική κατατομή διαφοράς συγκεντρώσεων μίας κλάσης από το άθροισμα τεσσάρων κλάσεων SPM (mgr/m³) στις 40°N, 0°-16°E (WM) στα 0-300m βάθος στις 07/01/2003



Σχήμα 3.52 Ζωνική κατατομή διαφοράς συγκεντρώσεων μίας κλάσης από το άθροισμα τεσσάρων κλάσεων SPM (mgr/m³) στις 40°N, 0°-16°E (WM) στα 0-300m βάθος στις 07/04/2003



Σχήμα 3.53 Ζωνική κατατομή διαφοράς συγκεντρώσεων μίας κλάσης από το άθροισμα τεσσάρων κλάσεων SPM (mgr/m³) στις 40°N, 0°-16°E (WM) στα 0-300m βάθος στις 05/08/2003

Τα ίδια χαρακτηριστικά παρατηρούνται και στην Ανατολική Μεσόγειο και για τα δύο πειράματα (Σχ. 3.54 έως 3.59), με τη διαφορά ότι στην Ανατολική λεκάνη έχουμε υψηλότερες τιμές συγκεντρώσεων από ότι στη Δυτική λεκάνη. Το γεγονός αυτό βρίσκεται σε συμφωνία με την εναπόθεση, σύμφωνα ατμοσφαιρική με τις γρονοσειρές που παρουσιάστηκαν σε προηγούμενη ενότητα. Στα Σχήματα 3.60 έως 3.62 παρουσιάζονται οι ζωνικές κατατομές διαφορας των δύο πειραμάτων, για την Ανατολική Μεσόγειο. Όμοια με τη Δυτική Μεσόγειο τα βαρύτερα σωματίδια βρίσκονται σε μεγαλύτερα βάθη από αυτά της μίας κλάσης. Η διαφορά είναι ότι στην Ανατολική υπολεκάνη έχουμε πολύ μεγαλύτερες τίμες συγκεντρώσεων, με αποτέλεσμα να δημιουργούνται έντονες κατακόρυφες βαθμίδες διαφοράς συγκεντρώσεων. Στο Σχήμα 3.62 στους οκτώ μήνες της προσομοίωσης με τέσσερις κλάσεις SPM, παρουσιάζεται έντονη κατακόρυφη βαθμίδα διαφοράς συγκεντρώσεων, η οποία αποδίδεται κυρίως στο μέγεθος των SPM. Συγκεκριμένα τα βαρύτερα σωματίδια βρίσκονται σε βάθη μεταξύ 200m και 300m, σε αντίθεση με τη μία κλάση SPM, η οποία περιορίζεται στο επιφανειακό στρώμα των πρώτων 100m.



Σχήμα 3.54 Ζωνική κατατομή συγκέντρωσης μίας κλάσης SPM (mgr/m³) στις 34°N από 10°E έως 36°E (EM) στα 0-300m βάθος στις 07/01/2003



Σχήμα 3.55 Ζωνική κατατομή συγκέντρωσης μίας κλάσης SPM (mgr/m³) στις 34°N από 10°E έως 36°E (EM) στα 0-300m βάθος στις 07/04/2003



Σχήμα 3.56 Ζωνική κατατομή συγκέντρωσης μίας κλάσης SPM (mgr/m³) στις 34°N από 10°E έως 36°E (EM) στα 0-300m βάθος στις 05/08/2003



Σχήμα 3.57 Ζωνική κατατομή συγκέντρωσης αθροίσματος τεσσάρων κλάσεων SPM (mgr/m³) στις 34°N από 10°E έως 36°E (EM) στα 0-300m βάθος στις 07/01/2003



Σχήμα 3.58 Ζωνική κατατομή συγκέντρωσης αθροίσματος τεσσάρων κλάσεων SPM (mgr/m³) στις 34°N από 10°E έως 36°E (EM) στα 0-300m βάθος στις 07/04/2003



Σχήμα 3.59 Ζωνική κατατομή συγκέντρωσης αθροίσματος τεσσάρων κλάσεων SPM (mgr/m³) στις 34°N από 10°E έως 36°E (EM) στα 0-300m βάθος στις 05/08/2003



Σχήμα 3.60 Ζωνική κατατομή διαφοράς συγκέντρωσης μίας κλάσης από το άθροισμα τεσσάρων κλάσεων SPM (mgr/m³) στις 34°N, 10°-36°E (EM) στα 0-300m βάθος στις 07/01/2003



Σχήμα 3.61 Ζωνική κατατομή διαφοράς συγκέντρωσης μίας κλάσης από το άθροισμα τεσσάρων κλάσεων SPM (mgr/m³) στις 34°N, 10°-36°E (EM) στα 0-300m βάθος στις 07/04/2003



Σχήμα 3.62 Ζωνική κατατομή διαφοράς συγκέντρωσης μίας κλάσης από το άθροισμα τεσσάρων κλάσεων SPM (mgr/m³) στις 34°N, 10°-36°E (EM) στα 0-300m βάθος στις 05/08/2003

3.3 ΕΝΑΠΟΘΕΣΗ ΤΗΣ SPM ΣΤΟ ΒΥΘΟ ΤΗΣ ΜΕΣΟΓΕΙΟΥ

3.3.1 Χρονική διακύμανση της εναπόθεσης SPM στο βυθό της Μεσογείου

Ένας από τους βασικούς στόχους της μελέτης αυτής, είναι η εκτίμηση της εναπόθεσης της σκόνης Σαγάρας στο βυθό της Μεσογείου, για διαφορετικές κλάσεις SPM και οι διαφορές που παρουσιάζουν στην γεωγραφική κατανομή τους. Στα Σχήματα 3.63 έως 3.69 παρουσιάζονται οι χρονοσειρές ημερίσιας και αθροιστικής εναπόθεσης SPM στο βυθό. Στις ημερίσιες χρονοσειρές η ελαφρύτερη κλάση (μοναδική στο πρώτο πείραμα) SPM (Σχ. 3.63 και 3.65) ξεκινάει από το υπόβαθρο που δημιουργηθηκε σε παλαιότερα πειράματα (Sofianos et al., in preperation). Οι μεγαλύτερες τιμές τον χειμώνα, οφείλονται αφενός στο μεγαλύτερο βάθος του στρώματος ανάμιξης και αφετέρου στην ατμοσφαιρική εναπόθεση. Όπως αναμένεται στο βυθό της Ανατολικής Μεσογείου (cyan line) η εναπόθεση είναι εντονότερη σε σχέση με τη Δυτική. Το γεγονός ότι η αυξητική τάση των συγκεντρώσεων (Σχ. 3.68, red line) στο βυθό της Δυτικής Μεσογείου δεν είναι ίδιας τάξης με την επιφάνεια, οφείλεται στην κυκλοφορία και τη μεταφορά SPM προς τα ανατολικά. Τέλος, πρέπει να επισημανθεί ότι οι δύο ελαφρύτερες κλάσεις αποτελούν το σημαντικότερο ποσοστό εναπόθεσης στο βυθό της Μεσογείου.

3.3.2 Χωρική κατανομή της εναπόθεσης SPM στο βυθό της Μεσογείου

Όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενες παραγράφους, η κατακόρυφη ροή της σκόνης είναι εξαιρετικά ασθενής, κυρίως για την πιο ελαφριά κλάση SPM και επομένως μόνο σε ρηχές λεκάνες και περιοχές ισχυρής ατμοσφαιρικής εναπόθεσης παρουσιάζονται υψηλές τιμές ρυθμού εναπόθεσης.



Σχήμα 3.63 Ημερίσια εναπόθεση μίας κλάσης (dashed line) SPM (mgr) στο βυθό της Μεσογείου (blue: Mediterranean, red: western M., cyan: eastern M.)



Σχήμα 3.64 Ημερίσια εναπόθεση του αθροίσματος των τεσσάρων κλάσεων (solid line) SPM (mgr) στο βυθό της Μεσογείου (blue: Mediterranean, red: western M., cyan: eastern M.)



Σχήμα 3.65 Ημερίσια εναπόθεση των τεσσάρων κλάσεων SPM (mgr) στο βυθό της Μεσογείου (blue: Mediterranean, red: western M., cyan: eastern M.)



Σχήμα 3.66 Αθροιστική εναπόθεση μίας κλάσης (dashed line) και του αθροίσματος των τεσσάρων κλάσεων (solid line) SPM (mgr) στο βυθό της Μεσογείου (blue: Mediterranean, red: western M., cyan: eastern M.)



Σχήμα 3.67 Αθροιστική εναπόθεση των τεσσάρων κλάσεων SPM (mgr) στο βυθό της Μεσογείου (blue: Mediterranean, red: western M., cyan: eastern M.)



Σχήμα 3.68 Αθροιστικός ρυθμός εναπόθεσης μίας κλάσης (dashed line) και αθροίσματος των τεσσάρων κλάσεων (solid line) SPM (mgr/m²) στο βυθό της Μεσογείου (blue: Mediterranean, red: western M., cyan: eastern M.)



Σχήμα 3.69 Αθροιστικός ρυθμός εναπόθεσης των τεσσάρων κλάσεων SPM (mgr/m²) στο βυθό της Μεσογείου (blue: Mediterranean, red: western M., cyan: eastern M.)

Οι υψηλότερες τιμές εναπόθεσης σκόνης Σαχάρας στο βυθό, παρατηρούνται στην ηπειρωτική υφαλοκρηπίδα των Αφρικανικών ακτών, των νότιων παράλιων της Αδριατικής, στο πλάτωμα των Κυκλάδων του Αιγαίου πελάγους, στον κόλπο του Λέοντος και στις βορειοανατολικές ακτές της Ισπανίας. Ορισμένες περιοχές έντονης τοπικής εναπόθεσης στο βυθό σχετίζονται με ισχυρά ατμοσφαιρικά επεισόδια εναπόθεσης σε παράκτιες και εν γένει ρηχές περιοχές. Η θερμοαλατική κυκλοφορία, είναι επίσης ένας σημαντικός παράγοντας που επιδρά στην οριζόντια κατανομή και εναπόθεση στο βυθό της σκόνης Σαχάρας. Υπάρχουν ρηχές περιοχές οι οποίες δεν παρουσιάζουν έντονους ρυθμούς εναπόθεσης SPM στο βυθό, λόγω της τοπικής κυκλοφορίας, η οποία δρά ως φράγμα στη μεταφορά της SPM. Από τα Σχήματα 3.70, 3.71 και 3.72 παρατηρείται ότι οι μεγαλύτεροι ρυθμοί εναπόθεσης σκόνης στο βυθό, οφείλονται στις δύο πρώτες κλάσεις SPM. Η τρίτη και η τέταρτη κλάση συνεισφέρουν ελάχιστα, με μόνη αξιόλογη παρατήρηση την μικρή αύξηση των συγκεντρώσεων στο στενό του Γιβραλτάρ λόγω της τρίτης κλάσης SPM. Τέλος, επιβεβαιώνεται το

γεγονός ότι η πρώτη κλάση παρουσιάζει ευρύτερη οριζόντια γεωγραφική διασπορά, σε αντίθεση με τον έντονο τοπικό χαρακτήρα των υπόλοιπων σωματιδίων κατα μήκος των Αφρικανικών ακτών.



Σχήμα 3.70 Χάρτης εναπόθεσης στο βυθό της Μεσογείου μίας κλάσης SPM (mgr/m²) από 01/01/2003 έως 31/08/2003



Σχήμα 3.71 Χάρτης εναπόθεσης στο βυθό της Μεσογείου αθροίσματος των τεσσάρων κλάσεων SPM (mgr/m²) από 01/01/2003 έως 31/08/2003





Σχήμα 3.72 Χάρτες εναπόθεσης στο βυθό της Μεσογείου των τεσσάρων κλάσεων SPM (mgr/m²) από 01/01/2003 έως 31/08/2003



Σχήμα 3.73 Χάρτης διαφοράς εναπόθεσης μίας κλάσης από το άθροισμα των τεσσάρων κλάσεων SPM (mgr/m²) στο βυθό της Μεσογείου από 01/01/2003 έως 31/08/2003

3.4 ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Στα παρακάτω Σχήματα 3.74 έως 3.80 παρουσιάζονται τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα των χρονοσειρών τόσο για την ατμοσφαιρική όσο και για την εναπόθεση στο βυθό. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν τα Σχήματα 3.78 και 3.80. Η συνολική εναπόθεση της πρώτης κλάσης στο βυθό είναι μεγαλύτερη από την ατμοσφαιρική εναπόθεση, λόγω του υποβάθρου σκόνης που προυπάρχει στην υδάτινη στήλη από παλαιότερα πειράματα (Sofianos et al., in preparation). Επίσης, οι κλίσεις των καμπύλων τείνουν συμπτωτικά όσο αυξάνει το μέγεθος του σωματιδίου και τέλος ως συνέπεια του τελευταίου επειχηρήματος, στους οκτώ μήνες προσομοίωσης, όλη σχεδόν η ποσότητα της τέταρτης κλάσης SPM εναποτίθεται στο βυθό. Τέλος στο Πίνακα 3.1 παρουσιάζονται οι συγκεντρώσεις της σκόνης της Σαχάρας (mgr/m³) σε διαφορετικά επίπεδα της Μεσογείου Θάλασσας και των υπολεκανών της, για τους οκτώ πρώτους μήνες του 2003 (τελικές τιμές συγκεντρώσεων στα Σχ. 3.10 έως 3.17).



Σχήμα 3.74 Συνολική ημερήσια εναπόθεση (dashed line) μίας κλάσης SPM (mgr) στην επιφάνεια (blue) και στο βυθό (red) της Μεσογείου



Σχήμα 3.75 Συνολική ημερήσια εναπόθεση (solid line) αθροίσματος τεσσάρων κλάσεων SPM (mgr) στην επιφάνεια (blue) και στο βυθό (red) της Μεσογείου



Σχήμα 3.76 Συνολική ημερήσια εναπόθεση των τεσσάρων κλάσεων SPM (mgr) στην επιφάνεια (blue) και στο βυθό (red) της Μεσογείου



Σχήμα 3.77 Αθροιστική εναπόθεση μίας κλάσης (dashed line) και αθροίσματος των τεσσάρων κλάσεων (solid line) SPM (mgr) στην επιφάνεια (blue) και στο βυθό (red) της Μεσογείου



Σχήμα 3.78 Αθροιστική εναπόθεση των τεσσάρων κλάσεων (solid line) SPM (mgr) στην επιφάνεια (blue) και στο βυθό (red) της Μεσογείου



Σχήμα 3.79 Αθροιστικός ρυθμός εναπόθεσης μίας κλάσης (dashed line) και αθροίσματος των τεσσάρων κλάσεων (solid line) SPM (mgr/m²) στην επιφάνεια (blue) και στο βυθό (red) της Μεσογείου



Σχήμα 3.80 Αθροιστικός ρυθμός εναπόθεσης των τεσσάρων κλάσεων (solid line) SPM (mgr/m²) στην επιφάνεια (blue) και στο βυθό (red) της Μεσογείου

Ολοκληρώνοντας το Κεφάλαιο 3 με τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα των δύο προσομοιώσεων (Πίν. 3.1), πρέπει να αναφέρουμε ότι κατά τη φάση ολοκλήρωσης της παρούσας διπλωματικής εργασίας, δεν υπήρχαν διαθέσιμα πειραματικά δεδομένα από ιζηματοπαγίδες που είχαν τοποθετηθεί στη λεκάνη της Μεσογείου. Οι γεωλογικές αναλύσεις που αφορούν την εκτίμηση των ποσοτήτων σκόνης Σαχάρας από τις ιζηματοπαγίδες, είναι εξαιρετικά χρονοβόρες. Παρόλα ταύτα οι πρώτες ενδείξεις των γεωλογικών δεδομένων είναι ενθαρρυντικές, όσον αφορά σύγκρισή αποτελέσματα την τους με τα των αριθμητικών προσομοιώσεων που πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια της εργασίας αυτής.

Πίνακας 3.1 Μέση συγκέντρωση σκόνης Σαχάρας (mgr/m³) σε διαφορετικά επίπεδα της Μεσογείου Θάλασσας και των υπολεκανών της, για τους οκτώ πρώτους μήνες του έτους 2003

	1 st experiment Class1			2 nd experiment Sum four classes			2 nd experiment Class1			2 nd experiment Class2			2 nd experiment Class3			2 nd experiment Class4		
LAYER	WM	EM	MED	WM	EM	MED	WM	EM	MED	WM	EM	MED	WM	EM	MED	WM	EM	MED
0-100m	9.85	19.11	15.92	8.49	12.27	10.97	7.09	11.3	9.84	1.39	0.98	1.12	0.015	0.005	0.008	1*10 ⁻⁴	2*10 ⁻⁴	2*10 ⁻⁴
100- 400m	4.52	9.34	7.56	5.83	9.84	8.36	4.42	7.87	6.60	1.40	1.96	1.76	0.017	0.009	0.012	1*10 ⁻⁴	4*10 ⁻⁴	3*10 ⁻⁴
400- bottom	0.42	0.63	0.56	0.55	0.77	0.69	0.46	0.66	0.58	0.07	0.10	0.09	0.021	0.013	0.016	4*10 ⁻⁴	19*10 ⁻⁴	14*10 ⁻⁴
Whole basin	1.54	2.99	2.46	1.74	2.76	2.39	1.39	2.32	1.98	0.34	0.43	0.40	0.020	0.011	0.015	3*10 ⁻⁴	16*10 ⁻⁴	11*10 ⁻⁴

κεφαλαίο 4 Συμπερασματά

4.1 ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Η προσομοίωση του κύκλου της σκόνης της Σαχάρας στη Μεσόγειο Θάλασσα, για μία και τέσσερις κλάσεις σωματιδίων, πραγματοποιήθηκε χρησιμοποιώντας την εξίσωση μεταφοράς και διάχυσης της SPM, η οποία περιλαμβάνεται στο ωκεανογραφικό μοντέλο Princeton Ocean Model. Η είσοδος της SPM στη λεκάνη της Μεσογείου, γίνεται με βάση την ατμοσφαιρική εναπόθεση, η οποία δίνεται από το ατμοσφαιρικό SKIRON\Eta. Τα πραγματοποιήθηκαν μοντέλο πειράματα χρησιμοποιώντας ατμοσφαιρικά πεδία για τους οκτώ πρώτους μήνες του έτους 2003. Παρά το γεγονός ότι μόνο από πειράματα μεγαλύτερου χρόνου ολοκλήρωσης, μπορούν να παρατηρηθούν εποχιακά και υπερετήσια χαρακτηριστικά της ατμοσφαιρικής εναπόθεσης, διασποράς και εναπόθεσης στο βυθό της σκόνης της Σαχάρας, η συγκεκριμένη εργασία βοηθά στην ρεαλιστικότερη απεικόνιση των παραπάνω διεργασιών, προσομοιώνοντας για περισσότερες κλάσεις από μία αιωρούμενων σωματιδίων. Επίσης αποκαλύπτονται δυναμικοί παράγοντες που εμπλέκονται στην κατανομή της SPM στη Μεσόγειο Θάλασσα.

Όπως είναι ήδη γνωστό από παλαιότερες μελέτες, η ατμοσφαιρική εναπόθεση της SPM έχει εξαιρετικά επεισοδιακό και τοπικό χαρακτήρα. Το γεγονός αυτό επηρεάζει με τη σειρά του την κατανομή της SPM, δημιουργώντας κηλίδες υψηλής συγκέντρωσης και έντονης εναπόθεσης στο βυθό. Σύμφωνα με τα παραπάνω είναι πολύ δύσκολο

107

να μελετηθεί παρατηρησιακά η γεωγραφική κατανομή της SPM σε εκτεταμένη χωρική και χρονική κλίμακα. Η τοποθέτηση και συντήρηση πειραματικών οργάνων για in-situ μετρήσεις στην ατμόσφαιρα και στον ωκεανό κοστίζει αρκετά, ένω οι μετρήσεις αυτές δεν μπορεί να είναι αντιπροσωπευτικές για μεγάλες περιοχές. Για το λόγο αυτό είναι σημαντικό να συνδυαστούν οι παρατηρήσεις με τεχνικές προσομοίωσης αριθμητικών μοντέλων, προκειμένου να βελτιωθούν και να αποκτήσουν μεγαλύτερη ακρίβεια οι εκτιμήσεις μας.

Η επίδραση της γενικής κυκλοφορίας της Μεσογείου στην κατανομή της σκόνης της Σαχάρας και εναπόθεσής της στο βυθό παρουσιάζεται αρκετά σημαντική. Στο πρώτο πείραμα με τη μία κλάση SPM η συγκέντρωση κυρίως καθορίζεται από τη μεταφορά και τη διάχυση, αφού η ταχύτητα καθίζησης είναι μικρή και συνεισφέρει ελάχιστα στη διασπορά της σκόνης μέσα στην υδάτινη στήλη. Στο δεύτερο πείραμα με τις τέσσερις κλάσεις σωματιδίων η συνεισφορά της κατακόρυφης ταχύτητας είναι μείζονος σημασίας, ιδιαίτερα για τα βαρύτερα σωματίδια, τα οποία εναποτίθονται και βυθίζονται γρήγορα κοντά στα παράλια των Αφρικανικών ακτών. Στη διάρκεια της θερινής περιόδου, όπου έχουμε μικρή ατμοσφαιρική εναπόθεση, παρατηρείται σημαντική μείωση της συγκέντρωσης SPM στην επιφάνεια για τις τέσσερις κλάσεις σε σχέση με τη μία κλάση SPM. Το γεγονός αυτό αποδίδεται στις μεγάλες ταχύτητες καθίζησης ws των τριών νέων κλάσεων. Οι διαφορές στις τιμές των συγκεντρώσεων περιορίζονται κυρίως στη βαθμίδα Βορρά-Νότου, που δημιουργείται λόγω των βαρύτερων σωματιδίων, τα οποία δεν μεταφέρονται στα βόρεια γεωγραφικά πλάτη της λεκάνης. Επίσης μεγάλη βαθμίδα συγκέντρωσης παρατηρείται στη διεύθυνση Ανατολής-Δύσης. Τα ελαφρύτερα σωματίδια παρουσιάζουν την τάση να μεταφέρονται ευκολότερα βόρεια και ανατολικά, τόσο στην ατμόσφαιρα όσο και στη θάλασσα, σε αντίθεση με τα βαρύτερα σωματίδια, όπου όπως αποκαλύπτουν οι χάρτες αλλά και οι χρονοσειρές επιδρούν περισσότερο στις νοτιοδυτικές περιοχές της Μεσογείου, κοντά στη πηγή της SPM.
Στις ζωνικές κατατομές της Μεσογείου η προς τα κάτω ροή της σκόνης του αθροίσματος των τεσσάρων κλάσεων, είναι σαφώς ενισχυμένη σε σχέση με τη προσομοίωση για μία κλάση. Το βάθος μεγάλων συγκεντρώσεων σκόνης στο τέλος της προσομοίωσης σχεδόν τριπλασιάζεται, φτάνοντας έως και τα 300m. Αντίθετα στη πρώτη προσομοίωση για μία κλάση SPM, υπάρχει ξεκάθαρη ένδειξη ότι η προς τα κάτω ροή της σκόνης είναι εξαιρετικά ασθενής και επομένως οι μεγαλύτερες ποσότητες «παγιδεύονται» στα πρώτα 100m. Άλλος ένας παράγοντας που συμβάλλει σε αυτή τη διαδικασία είναι ο σχηματισμός κυκλώνων, προκαλώντας άνοδο των ισοπύκνων και περιορίζοντας το επιφανειακό στρώμα. Το αντίθετο συμβαίνει στους αντικυκλώνες, όπου σημαντικός είναι ο ρόλος του στρώματος ανάμιξης με μεγάλο βάθος το χειμώνα.

Ένας από τους βασικούς στόχους της μελέτης αυτής, είναι η εκτίμηση της εναπόθεσης της σκόνης Σαχάρας στο βυθό της Μεσογείου, για διαφορετικές κλάσεις SPM και οι διαφορές που παρουσιάζουν στην γεωγραφική κατανομή τους. Στις ημερίσιες χρονοσειρές η ελαφρύτερη κλάση (μοναδική στο πρώτο πείραμα) SPM ξεκινάει από το υπόβαθρο που δημιουργηθηκε σε παλαιότερα πειράματα (Sofianos et al., in preperation). Οι μεγαλύτερες τιμές τον χειμώνα, οφείλονται αφενός στο μεγαλύτερο βάθος του στρώματος ανάμιξης και αφετέρου στην ατμοσφαιρική εναπόθεση. Όπως αναμένεται στο βυθό της Ανατολικής Μεσογείου η εναπόθεση είναι εντονότερη σε σχέση με τη Δυτική. Όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενες παραγράφους, η κατακόρυφη ροή της σκόνης είναι εξαιρετικά ασθενής, κυρίως για την πιο ελαφριά κλάση SPM και επομένως μόνο σε ρηχές λεκάνες και περιοχές ισχυρής ατμοσφαιρικής εναπόθεσης παρουσιάζονται υψηλές τιμές ρυθμού εναπόθεσης. Οι υψηλότερες τιμές εναπόθεσης σκόνης Σαχάρας στο βυθό, παρατηρούνται στην ηπειρωτική υφαλοκρηπίδα των Αφρικανικών ακτών, των νότιων παράλιων της Αδριατικής, στο πλάτωμα των Κυκλάδων του Αιγαίου πελάγους, στον κόλπο του Λέοντος και στις βορειοανατολικές ακτές της Ισπανίας. Τέλος, ορισμένες περιοχές έντονης τοπικής εναπόθεσης στο βυθό σχετίζονται με ισχυρά

ατμοσφαιρικά επεισόδια εναπόθεσης σε παράκτιες και εν γένει ρηχές περιοχές.

4.2 ΣΥΝΟΨΗ

Συνοπτικά τα κυριότερα συμπεράσματα είναι:

- Η ατμοσφαιρική εναπόθεση της SPM έχει εξαιρετικά επεισοδιακό και τοπικό χαρακτήρα, δημιουργώντας κηλίδες υψηλής συγκέντρωσης σε υποεπιφανειακά βάθη και έντονη εναπόθεση στο βυθό.
- Κυρίαρχος είναι ο μηχανισμός υγρής εναπόθεσης SPM σε σχέση με αυτόν της ξηρής, ακολουθώντας τον εποχιακό κύκλο των βροχοπτώσεων της χειμερινής, εαρινής και θερινής περιόδου.
- Εναπόθεση στο βυθό σε παράκτιες περιοχές, κυρίως στην ηπειρωτική υφαλοκρηπίδα των Αφρικανικών ακτών για τις τρείς βαρύτερες κλάσεις SPM. Το γεγονός αυτό συνδέεται με την υγρή εναπόθεση λόγω βροχοπτώσεων (μέτωπα λόγω εναλλαγής ξηράςθάλασσας), αλλά και με τις μεγάλες ταχύτητες καθίζησης (ws), οι οποίες περιορίζουν τη γεωγραφική διανομή των βαρύτερων κλάσεων σκόνης στις νότιες περιοχές της λεκάνης. Αντίθετα η ελαφρύτερη κλάση SPM μεταφέρεται και εναποτίθεται σε βορειότερα γεωγραφικά πλάτη στην ανοιχτή θάλασσα.
- Επίδραση της γενικής ανατολικής κυκλοφορίας της Μεσογείου στην κατανομή της σκόνης της Σαχάρας, κυρίως για την ελαφρύτερη κλάση SPM. Η γεωγραφική διανομή των βαρύτερων σωματιδίων σκόνης παρουσιάζεται δυτικότερα σε σχέση με τη μία κλάση SPM.
- Ασθενής κατακόρυφη ροή και «παγίδευση» της σκόνης σε περιοχές κυκλωνικής κυκλοφορίας, λόγω ανόδου των ισοπύκνων και περιορισμού του επιφανειακού στρώματος. Αντίθετα στους αντικυκλώνες αυξάνει το βάθος του στρώματος ανάμειξης, ιδιαίτερα το χειμώνα, διευκολύνοντας τη βύθιση της SPM.

4.3 ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΕΣ ΠΡΟΕΚΤΑΣΕΙΣ

Η διασπορά της σκόνης της Σαχάρας στην ατμόσφαιρα και τον ωκεανό και οι συνέπειες που επιφέρει στο φυσικό οικοσύστημα, είναι ένα από τα σημαντικότερα θέματα που έχει κεντρίσει το ενδιαφέρον της διεθνούς επιστημονικής κοινότητας. Η προσομοίωση της διασποράς με περισσότερες μίας κλάσης SPM. δίνει ρεαλιστικότερα της αποτελέσματα, αυξάνοντας τους βαθμούς ελευθερίας των πειραμάτων με αριθμητικά μοντέλα. Παρόλα ταύτα, πέρα των φυσικών διεργασιών, πολλές απλοποιήσεις έχουν πραγματοποιηθεί όσον αφορά τις βιογεωχημικές συνιστώσες του προβλήματος παρακολούθησης της SPM. Επομένως πολλά αναπάντητα ερωτήματα μένουν ακόμη, προκειμένου να γίνουν αντικείμενα περαιτέρω έρευνας.

Ένα από τα ερωτήματα αυτά είναι η επίδραση της βιολογίας στα αιωρούμενα σωματίδια, τα οποία όπως είναι γνωστό, περιέχουν σημαντικές ποσότητες βιοδιαθεσίμων θρεπτικών συστατικών και ευνοούν την βιολογική παραγωγή, κυρίως στα ανώτερα στρώματα της υδάτινης στήλης μέσα στην εύφωτη ζώνη. Επίσης σημαντική είναι και η συσσωμάτωση της SPM, είτε συμβαίνει εξαιτίας βιολογικών, είτε φυσικών διεργασιών. Σύμφωνα με αυτή, η ταχύτητα καθίζησης του συσσωματώματος αλλάζει, με αποτέλεσμα να έχουμε διαφορετικούς ρυθμούς εναπόθεσης στο βυθό και διαφοροποιήσης στους χάρτες παράκτιας και βενθικής εναπόθεσης. Αυξάνοντας τους βαθμούς ελευθερίας του προβλήματος, προκειμένου να γίνουν ρεαλιστικότερες οι αριθμητικές προσομοιώσεις, θα μπορούσε να εισαχθεί η έννοια της επαναιώρησης της σκόνης στο βυθό και την εισαγωγή της εκ νέου στην υδάτινη στήλη, αλλάζοντας την γεωγραφική κατανομή της στο βυθό. Ολοκληρώνοντας τις ερευνητικές προεκτάσεις του θέματος, κρίνεται αναγκαία η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων των συγκεντρώσεων SPM, όπως αυτά προκύπτουν από τις αριθμητικές προσομοιώσεις. Για το σκοπό αυτό απαιτούνται πειράματα, των οποίων τα αποτελέσματα θα συγκριθούν με in-situ μετρήσεις, οι οποίες προκύπτουν από ιζηματοπαγίδες σε συγκεκριμένους σταθμούς μέσα στη Μεσόγειο.

 $1\,1\,1$

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Alldrege and Jackson, 1995, Topical studies in oceanography: aggregation in marine systems, *Deep-Sea Res.*, **42**, 1-273.

Bergametti, G., L. Gomez, E. Remoudaki, M. Desbois, D. Martin, and P. Buat-Menard, 1989, Present transport and deposition patterns of African dusts to the north-western Mediterranean, In: *Palaeoclimatology and Palaeometeorology: Modern and Past pattern* of Global Atmospheric Transport, Eds. M. Leinen and M. Sarnthein, NATO ASI Series, C, vol. **282**, 227-252.

Bethoux, J. P., 1979, Budgets of the Mediterranean Sea: Their dependence on the local climate and on the characteristics of the Atlantic waters, *Oceanol. Acta*, **2**, 157-163.

Bethoux, J. P., and B. Gentili, 1996, The Mediterranean Sea, coastal and deep-sea signatures of climatic and environmental changes, *J. Mar. Sys.*, 7, 383-394.

Bignami, F., Marullo, S., Santoleri, R. and M.E. Schiano, 1995: Longwave radiation budget in the Mediterranean Sea, *J. Geophys. Res.*, **100**, 2501-2514.

Blumberg, A.F., and G.L.Mellor, 1987: A description of a threedimensional coastal ocean circulation model, In: *Three-Dimensional Coastal Ocean Circulation Models*, Coastal Estuarine Sci., vol. 4, edited by N.S.Heaps, pp. 1-16, AGU, Washington, D.C. Bryden, H. L., and T. H. Kinder, 1991, Recent progress in strait dynamics, *Rev. Geophys.*, **30**, 617-631.

Bücher, A., 1989, Fallout of Saharan dust in the northern Mediterranean Sea, In: *Palaeoclimatology and Palaeometeorology: Modern and Past Patterns of Global Atmospheric Transport*, Eds. M. Leinen and M. Sarnthein, NATO ASI Series, C, vol. **282**, 565-584.

D'Almeida, G. A., 1987, Desert aerosol characteristics and effects on climate, In: *Palaeoclimatology and Palaemeteorlogy: Modern and Past Patterns of Global Atmospheric Transport*, Eds. M. Leinen and M. Sarnthein, NATO ASI Series, C, vol. **282**, 311-338.

Flather, R.A., 1976, A tidal model of the north-west European continental shelf, *Mem. Soc. R. Sci. Liege*, **6**, 141–164.

Gill, A.E., 1982: Atmosphere-Ocean Dynamics. Academic Press, New York, 662 pp.

Goudie and Middleton, 2001, Saharan dust storms: nature and consequences, *Earth-Science Rev.*, **56**, 179-204.

Guerzoni, S., W. Landuzzi, R. Lenaz, G. Quarantotto, G. Cesari, D. Ranmpazzo, and E. Molinaroli, 1992, Mineral atmospheric particulate from south to northwest Mediterranean: seasonal variations and characteristics, *Water Pollution Res. Rep.*, **28**, 483-493.

Guerzoni, S., E. Molinaroli, and R. Chester, 1997, Saharan dust inputs to the western Mediterranean Sea: depositional patterns, geochemistry and sedimentological implications, *Deep-Sea Res. II*, **44**, 631-654.

Hellermann, S., Rosenstein, M., 1983, Normal wind stress over the world ocean with error estimates, J. Phys. Oceanogr., 13, 1093-1104.

Herut, B., and M. Krom, 1996, Atmospheric input of nutrients and dust to the SE Mediterranean, In: *The Impact of Desert Dust Across the Mediterranean*, Eds. S. Guerzoni, and R. Chester, Kluwer Academic Publishing, Dordrecht, 349-358.

Holt, J. T. and I. D. James, 1999, A simulation of the southern North Sea in comparison with measurements from the North Sea Project. Part 2: Suspended Particulate Matter, *Cont. Shelf. Res.*, **19**, 1617-1642.

Horton, C., M. Clifford, J. Schmitz, and L. H. Kantha, 1997, A realtime oceanographic nowcast/forecast system for the Mediterranean Sea, J. Geophys. Res., **102** (C11), 25123-25156.

Jerlov, N. G., 1976: Marine Optics, 231 pp., Elsevier Sci., New York.

Kallos, G., S. Nickovic, A. Papadopoulos, D. Jovic, O. Kakaliagou, N. Misirlis, L. Boukas, N. Mimikou, G. Sakellaridis, J. Papageorgiou, E. Anadranistakis and M. Manousakis, 1997, *The regional weather forecasting system Skiron: An overview, Proc. Symp. On Regional Weather Prediction on Parallel Computer Environments*, Athens, Greece, 109-122.

Korres, G., N. Pinardi and A. Lascaratos, 2000, The ocean response to low frequency interannual atmospheric variability in the Mediterranean Sea. Part I: Sensitivity experiments and energy analysis, *Journal of Climate*, **13**, 705-731.

Korres, G., A. Lacaratos, E. Hatziapostolou, and P. Katsafados, 2002, Towards an ocean forecasting system for the Aegean Sea, *The Global Atmosphere and Ocean System*, **8**, 191-218.

Kourafalou V.H., L. Oey, J. D. Wang, T. N. Lee, 1996, The fate of river discharge on the continental shelf: 1. Modelling the river plume

and the inner shelf coastal current, J. Geophys. Res., 101 (C2), 3415-3434.

Kubilay, N., S. Nickovic, C. Moulin, and F. Dulac, 2000, An illustration of the transport and deposition of mineral dust onto the Eastern Mediterranean, *Atmospheric Environment*, **34**, 1293-1303.

Lascaratos, A., and K. Nittis, 1998, A high resolution threedimensional numerical study of intermediate water formation in the Levantine Sea, J. Geophys. Res., **103** (C9), 18497-18511.

Lascaratos, A., W. Roether, K. Nittis, B. Klein, 1999, Recent changes in deep water formation and spreading in the eastern Mediterranean Sea: a review, *Prog. Ocenogr.*, **44**(1), 5-36.

Le Bolloch, O., and S. Guerzoni, 1995, Acid and alkaline deposition in precipitation on the western coast of Sardinia, Central Mediterranean (40°N, 8°E), *Water Air and Soil Pollution*, **85**, 2155-2160.

Löye-Pilot, M. D., J. M. Martin, and J. Morelli, 1989, Atmospheric input of particulate matter and inorganic nitrogen to the northwestern Mediterranean, *Water Pollution Res. Rep.*, **13**, 368-376.

Löye-Pilot, M. D., and J. M. Martin, 1996, Saharan dust input to the western Mediterranean: an eleven year record in Corsica, In: *The Impact of Desert Dust Across the Mediterranean*, Eds. S. Guerzoni, and R. Chester, Kluwer Academic Publishing, Dordrecht, 191-199.

McCave, I. N., 1975, Vertical flux of particles in the ocean, *Deep-Sea* Res., 22, 491-502.

McCave, I. N., 1984, Size spectra and aggregation of suspended particles in the deep ocean, *Deep-Sea Res.*, **31**, 329-352.

Mellor, G.L., and T. Yamada, 1982, Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems, *Rev. Geophys.*, **20**, 851-875.

Mellor, G. L., and A. F. Blumberg, 1985, Modeling vertical and horizontal diffusivities with the sigma coordinate system, *Mon. Wea. Rev.*, **113**, 1379-1383.

Mellor G.L., 1998, Users guide for a three-dimensional, primitive equation, numerical ocean model (July 1998 version), *Prog. in Atmos. and Ocean. Sci*, Princeton University, 38 pp.

Nickovic, S., G. Kallos, O. Kakaliagou and D. Jovic, 1997, Aerosol production/transport/deposition processes in the Eta model: Desert cycle simulations, *Proc. Symp. On Regional Weather Prediction on Parallel Computer Environments*, Athens, Greece, 137-135.

Nickovic, S., G. Kallos, A. Papadopoulos, and O. Kakaliagou, 2001, A model for prediction of desert dust cycle in the atmosphere, J. *Geophys. Res.*, **106**, D16, 18113-18129, [SPM-ATMOS-0748].

Odd, N. V. M., and D. G. Murphy, 1992, Particulate pollutants in the North Sea, *Hydraulics Research Wallingford Report*, SR292.

Papadopoulos, A., P. Katsafados and G. Kallos, 2001, Regional weather forecasting for marine application, *GAOS*, **8**, 219-237.

Papadopoulos, A., P. Katsafados, G. Kallos, S. Nickovic, S. Rodriguez, and X. Querol, 2003, Contribution of desert dust transport to air quality degradation of urban environments, recent model developments, 26th NATO/CCMS International Technical Meeting on Air Pollution Modelling and its Application, May 26-30, 2003 in Istanbul, Turkey, pp. 8. Prospero, J. M., 1996, Saharan dust transport over the North Atlantic Ocean and Mediterranean: an overview. In: Guerzoni, S., Chester, R. (Eds.), *The Impact of Desert Dust Across the Mediterranean*. Kluwer Academic Publishing, Dordrecht, 133-151.

Roether, W., B. B. Manca, B. Klein, D. Bregant, D. Georgopoulos, V. Beitzel, V. Kovac; evic, A. Luchetta, 1996, Recent changes in Eastern Mediterranean Deep Waters, *Science* **271**, 333-335.

Rosati, A., and K. Miyakoda, 1988, A general circulation model for upper ocean simulation, J. Phys. Oceanogr., **18** (11), 1601-1626.

Roussenov, V., E. Stanev, V. Artale, and N. Pinardi, 1995, A seasonal model of the Mediterranean Sea general circulation, *J. Geophys. Res.*, **100** (C7), 13515-13538.

Schütz, L., R. Jaenicke, and H. Pietrek, 1981, Saharan dust transport over the North Atlantic Ocean, In: *Desert Dust*, Ed. T. L. Péwé, Geological Society of America, Special Paper, vol. **186**, 87-100.

Segschneider, J., and J. Sündermann, 1998, Simulating large scale transport of suspended matter, J. Mar. Sys., 14, 81-97.

Shapiro, R., 1970, Smoothing, Filtering and Boundary Effects, *Reviews* of Geophysics and Space Physics, **8** (2), 359-387.

Stokes, G. G., 1851, On the effect of the internal friction of fluids on the motion of pendulums, *Trans. Gambridge Philos. Soc.*, **9**, 8-106.

Swap, R., S. Ulanski, M. Gobbett, and M. Garstang, 1996, Temporal and spatial characteristics of Saharan dust outbreaks, *J. Geophys. Res.*, **101**, D2, 4205-4220.

Theocharis, A., K. Nittis, H. Kontoyiannis, E. Papageorgiou, E. Balopoulos, 1999, Climatic changes in the Aegean Sea influence the Eastern Mediterranean thermohaline circulation (1986–1997), *Geophys. Res. Lett.*, **26** (11), 1617–1620.

Tsidulko, M., S. O. Krichak, P. Alpert, O. Kakaliagou, G. Kallos, and A. Papadopoulos, 2002, Numerical study of a very intensive eastern Mediterranean dust storm, 13-16 March 1998, *J. Geophys. Res.*, **107**, D21, 4581, 10.1029/2001JD001168.

Zavatarelli, M., Mellor, G.L., 1995, A numerical study of the Mediterranean sea circulation, J. Phys. Oceanogr., 25 (6) 1384-1414.

ПАРАРТНМА

Α. ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ-ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Εικόνα 1	.1 Γεωφυσικός χάρτης της Αφρικής, όπου στις φωτισμένες περιοχές έχουμε ερήμους και στις υπόλοιπες εκτείνεται η Αφρικανική Σαβάνα
Εικόνα 1	.2 Σκόνη Σαχάρας πάνω από το Βόρειο Ατλαντικό και τη Δυτική Ευρώπη (SeaWiFS Project, NASA/Goddard Space Flight Center and ORBIMAGE)
Εικόνα 1	.3 Επεισόδιο καταιγίδας σκόνης Σαχάρας πάνω από τη κεντρική Μεσόγειο και τη νότια Ευρώπη, στις 18 Ιουλίου του 2000 (SeaWiFS Project, NASA/Goddard Space Flight Center and ORBIMAGE)
Εικόνα 1	.4 Επεισόδιο καταιγίδας σκόνης Σαχάρας πάνω από την ανατολική Μεσόγειο, στις 4 Απριλίου του 2003 (SeaWiFS Project, NASA/Goddard Space Flight Center and ORBIMAGE)
Σχήμα 1.1	Οι μεγαλύτερες έρημοι στη Γή15
Σχήμα 1.2	2 Τύποι εδάφους της Αφρικανικής Ηπείρου17
Σχήμα 2.	1 Στενά και υπολεκάνες της Μεσογείου (Drakopoulos and Lascaratos, 1999)
Σχήμα 2.2	2 Βαθυμετρία Μεσογείου (U.S. Navy Digital Bathymetry Data Base)
Σχήμα 2.	3 Σχηματική παρουσίαση θερμοαλατικής κυκλοφορίας της Μεσογείου (Lascaratos et al., 1999)
Σχήμα 2.	4 Διάταξη πλεγματικών σημείων «Arakawa C-horizontal staggered grid» 2-D external mode (Mellor, revision users guide POM 2002)

- Σχήμα 2.7 Περιοχή ολοκλήρωσης POM (grid domain).....40
- Σχήμα3.1 Δυτική (red area) και ανατολική (cyan area) Μεσόγειος. Ζωνικές περιοχές (yellow lines, (a) WMED, (b) EMED) κατατομών συγκεντρώσεων SPM έως 300m βάθος.....49
- Σχήμα 3.3 Ημερίσια εναπόθεση της μίας κλάσης (dashed line) SPM (mgr) στην επιφάνεια της Μεσογείου (blue: Mediterranean, red: western M., cyan: eastern M.)......54

- Σχήμα 3.6 Αθροιστική εναπόθεση της μίας κλάσης (dashed line) και του αθροίσματος των τεσσάρων κλάσεων (solid line) SPM (mgr) στην επιφάνεια της Μεσογείου (blue: Mediterranean, red: western M., cyan: eastern M.)......56
- Σχήμα 3.8 Αθροιστική ροή της μίας κλάσης (dashed line) και του αθροίσματος των τεσσάρων κλάσεων (solid line) SPM (mgr/m²) στην επιφάνεια της Μεσογείου (blue: Mediterranean, red: western M., cyan: eastern M.)......57

- Σχήμα 3.10 Χρονική μεταβολή των συγκεντρώσεων για τη μία κλάση (dashed line) και του αθροίσματος των τεσσάρων κλάσεων (solid line) SPM (mgr/m³) στη λεκάνη της Μεσογείου (blue:Mediterranean, red:western M., cyan:eastern M.)..59
- Σχήμα 3.11 Χρονική μεταβολή των συγκεντρώσεων των τεσσάρων κλάσεων SPM (mgr/m³) στη λεκάνη της Μεσογείου (blue:Mediterranean, red:western M., cyan:eastern M.).60

- **Σχήμα 3.18** Χάρτης συγκέντρωσης μίας κλάσης SPM (mgr/m³) σε βάθος 5m στις 07/01/2003......67
- Σχήμα 3.19 Χάρτης συγκέντρωσης μίας κλάσης SPM (mgr/m³) σε βάθος 5m στις 07/04/2003......67

Σχήμα	3.21	Χάρτης α κλάσεων 07/01/200	συγκέντρ SPM 03	ωσης (mgr/	αθροί m ³)	σματο σε	ος των βάθος	τεσσ 5m	άρων στις 68
Σχήμα	3.22	2 Χάρτης ο κλάσεων 07/04/200	συγκέντρ SPM)3	ωσης (mgr/	αθροί m ³)	σματο σε	ος των βάθος	τεσσ 5m	άρων στις 69
Σχήμα	3.23	Ο Χάρτης κλάσεων 05/08/200	συγκέντρ SPM 03	ωσης (mgr/	αθροί m ³)	σματο σε	ος των βάθος	τεσσ 5m	άρων στις 69
Σχήμα	3.24	Χάρτης διαφ άθροισμα τα 5m στις 07/0	ροράς συ ον τεσσά 01/2003	ογκέντρ ρων κλ	ωσης άσεων	της μ SPM	ίας κλά (mgr/n	άσης απ 1 ³) σε β	τό το δάθος 70
Σχήμα	3.25	Χάρτης διας άθροισμα τα 5m στις 07/(ροράς συ ον τεσσά 04/2003	ογκέντρ ρων κλ	ωσης άσεων	της μ SPM	ίας κλά (mgr/m	άσης απ 1 ³) σε β	τό το δάθος 70
Σχήμα	3.26	Χάρτης διαφ άθροισμα τα 5m στις 05/(ροράς συ ον τεσσά 08/2003	ογκέντρ ρων κλ	ωσης άσεων	της μ SPM	ίας κλά (mgr/m	ασης απ 1 ³) σε β	τό το δάθος 71
Σχήμα	3.27	Χάρτης πεδ συγκέντρωσ στις 07/01/2	δίου οριζ σης μίας 2003	ζόντιων κλάσηα	ν ταχυ ς SPM	τήτων (mgr/ 	u, v /m³) σε	(m/sec) βάθος) και 50m 74
Σχήμα	3.28	Χάρτης πεδ συγκέντρωσ στις 07/04/2	δίου οριζ σης μίας 2003	ζόντιων κλάσηα	ν ταχυ ς SPM	τήτων (mgr/ 	u, v /m³) σε	(m/sec) βάθος) και 50m 74
Σχήμα	3.29	Χάρτης πεδ συγκέντρωσ στις 05/08/2	δίου οριζ σης μίας 2003	ζόντιων κλάσηα	ν ταχυ ς SPM	τήτων (mgr/	u, v /m³) σε	(m/sec) βάθος) кал 50m 75
Σχήμα	3.30	Χάρτης πεδ συγκέντρωσ SPM (mgr/r	δίου οριζ σης του (n ³) σε βά	ζόντιων αθροί σ ιθος 50	ν ταχυ ματος m στις	τήτων των 1 ; 07/0	u, v εσσάρα 1/2003.	(m/sec) ων κλά) και σεων 75
Σχήμα	3.31	Χάρτης πεδ συγκέντρωσ SPM (mgr/r	δίου οριζ σης του (n ³) σε βά	ζόντιων αθροί σ ιθος 50	ν ταχυ ματος m στις	τήτων των 1 ; 07/04	u, v εεσσάρα 4/2003.	(m/sec) ων κλά) και σεων 76
Σχήμα	3.32	Χάρτης πεδ συγκέντρωσ SPM (mgr/r	δίου οριζ σης του (n ³) σε βά	ζόντιων αθροίσ ιθος 50	ν ταχυ ματος m στις	τήτων των 1 ; 05/03	u, v εσσάρο 8/2003.	(m/sec) ων κλά) και σεων 76

Σχήμα	3.33	Χάρτης διαφοράς συγκέντρωσης της μίας κλάσης από το άθροισμα των τεσσάρων κλάσεων SPM (mgr/m ³) σε βάθος 50m στις 07/01/200377
Σχήμα	3.34	Χάρτης διαφοράς συγκέντρωσης της μίας κλάσης από το άθροισμα των τεσσάρων κλάσεων SPM (mgr/m ³) σε βάθος 50m στις 07/04/200377
Σχήμα	3.35	Χάρτης διαφοράς συγκέντρωσης της μίας κλάσης από το άθροισμα των τεσσάρων κλάσεων SPM (mgr/m ³) σε βάθος 50m στις 05/08/2003
Σχήμα	3.36	Χάρτης συγκέντρωσης μίας κλάσης SPM (mgr/m ³) σε βάθος 150m στις 07/01/200379
Σχήμα	3.37	Χάρτης συγκέντρωσης μίας κλάσης SPM (mgr/m ³) σε βάθος 150m στις 07/04/200379
Σχήμα	3.38	Χάρτης συγκέντρωσης μίας κλάσης SPM (mgr/m ³) σε βάθος 150m στις $05/08/2003$ 80
Σχήμα	3.39	Χάρτης συγκέντρωσης του αθροίσματος των τεσσάρων κλάσεων SPM (mgr/m ³) σε βάθος 150m στις 07/01/2003
Σχήμα	3.40	Χάρτης συγκέντρωσης του αθροίσματος των τεσσάρων κλάσεων SPM (mgr/m ³) σε βάθος 150m στις 07/04/200381
Σχήμα	3.41	Χάρτης συγκέντρωσης του αθροίσματος των τεσσάρων κλάσεων SPM (mgr/m ³) σε βάθος 150m στις 05/08/200381
Σχήμα	3.42	Χάρτης διαφοράς συγκέντρωσης της μίας κλάσης από το άθροισμα των τεσσάρων κλάσεων SPM (mgr/m ³) σε βάθος 150m στις 07/01/200382
Σχήμα	3.43	Χάρτης διαφοράς συγκέντρωσης της μίας κλάσης από το άθροισμα των τεσσάρων κλάσεων SPM (mgr/m ³) σε βάθος 150m στις 07/04/200382
Σχήμα	3.44	Χάρτης διαφοράς συγκέντρωσης της μίας κλάσης από το άθροισμα των τεσσάρων κλάσεων SPM (mgr/m ³) σε βάθος 150m στις 05/08/200383
Σχήμα	3.45	Σωνική κατατομή συγκέντρωσης μίας κλάσης SPM (mgr/m ³) στις 40°N από 0°E έως 16°E (WM) στα 0-300m βάθος στις 07/01/200384

- Σχήμα 3.48 Ζωνική κατατομή συγκέντρωσης αθροίσματος τεσσάρων κλάσεων SPM (mgr/m³) στις 40°N από 0°E έως 16°E (WM) στα 0-300m βάθος στις 07/01/2003......86
- Σχήμα 3.49 Ζωνική κατατομή συγκέντρωσης αθροίσματος τεσσάρων κλάσεων SPM (mgr/m³) στις 40°N από 0°E έως 16°E (WM) στα 0-300m βάθος στις 07/04/2003......86
- Σχήμα 3.50 Ζωνική κατατομή συγκέντρωσης αθροίσματος τεσσάρων κλάσεων SPM (mgr/m³) στις 40°N από 0°E έως 16°E (WM) στα 0-300m βάθος στις 05/08/2003......87

- Σχήμα 3.54 Ζωνική κατατομή συγκέντρωσης μίας κλάσης SPM (mgr/m³) στις 34°N από 10°E έως 36°E (EM) στα 0-300m βάθος στις 07/01/2003......89
- Σχήμα 3.55 Ζωνική κατατομή συγκέντρωσης μίας κλάσης SPM (mgr/m³) στις 34°N από 10°E έως 36°E (EM) στα 0-300m βάθος στις 07/04/2003.....90
- Σχήμα 3.56 Ζωνική κατατομή συγκέντρωσης μίας κλάσης SPM (mgr/m³) στις 34°N από 10°E έως 36°E (EM) στα 0-300m βάθος στις 05/08/2003.....90
- Σχήμα 3.57 Ζωνική κατατομή συγκέντρωσης αθροίσματος τεσσάρων κλάσεων SPM (mgr/m³) στις 34°N από 10°E έως 36°E (EM) στα 0-300m βάθος στις 07/01/2003.....91

- Σχήμα 3.58 Ζωνική κατατομή συγκέντρωσης αθροίσματος τεσσάρων κλάσεων SPM (mgr/m³) στις 34°N από 10°E έως 36°E (EM) στα 0-300m βάθος στις 07/04/2003......91
- Σχήμα 3.59 Ζωνική κατατομή συγκέντρωσης αθροίσματος τεσσάρων κλάσεων SPM (mgr/m³) στις 34°N από 10°E έως 36°E (EM) στα 0-300m βάθος στις 05/08/2003.....92

- Σχήμα 3.64 Ημερίσια εναπόθεση του αθροίσματος των τεσσάρων κλάσεων (solid line) SPM (mgr) στο βυθό της Μεσογείου (blue:Mediterranean, red:western M., cyan:eastern M.)..95

- Σχήμα 3.68 Αθροιστικός ρυθμός εναπόθεσης μίας κλάσης (dashed line) και αθροίσματος των τεσσάρων κλάσεων (solid line) SPM (mgr/m²) στο βυθό της Μεσογείου (blue: Mediterranean, red: western M., cyan: eastern M.)......97

- Σχήμα 3.69 Αθροιστικός ρυθμός εναπόθεσης των τεσσάρων κλάσεων SPM (mgr/m²) στο βυθό της Μεσογείου (blue: Mediterranean, red: western M., cyan: eastern M.)......98
- **Σχήμα 3.70** Χάρτης εναπόθεσης στο βυθό της Μεσογείου μίας κλάσης SPM (mgr/m²) από 01/01/2003 έως 31/08/2003......99
- Σχήμα 3.71 Χάρτης εναπόθεσης στο βυθό της Μεσογείου αθροίσματος των τεσσάρων κλάσεων SPM (mgr/m²) από 01/01/2003 έως 31/08/2003......99
- Σχήμα 3.73 Χάρτης διαφοράς εναπόθεσης μίας κλάσης από το άθροισμα των τεσσάρων κλάσεων SPM (mgr/m²) στο βυθό της Μεσογείου από 01/01/2003 έως 31/08/2003.101

Β. ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

- Πίνακας 1.2 Μεταφορά μάζας κατά τη δυτική ροή (μέσες τιμές 10¹¹ g/yr για τα έτη 1989-1992) (Swap et al., 1996).....14
- Πίνακας 1.3 Εκτιμήσεις προσδιορισμού μάζας SPM από την έρημο της Σαχάρας (Goudie and Middleton, 2001)......18
- Πίνακας 1.4 Εκτιμήσεις εκπομπών SPM στην ατμόσφαιρα σε παγκόσμια κλίμακα (Goudie and Middleton, 2001)..18
- Πίνακας 1.5 Εναπόθεση σκόνης Σαχάρας σε περιοχές της Ευρώπης και της Μεσογείου (Goudie and Middleton, 2001).....23
- Πίνακας 1.6 Χαρακτηριστικά μεγέθη σκόνης Σαχάρας (Goudie and Middleton, 2001)......25
- Πίνακας 2.1 Τέσσερις κλάσεις SPM (Nickovic et al., 2001)......43