

ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟ ΟΜΟΙΩΜΑ ΤΗΣ ΕΠΟΧΙΚΗΣ ΓΕΝΙΚΗΣ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑΣ ΤΗΣ ΜΕΣΟΓΕΙΟΥ

Π.Γ. Δρακόπουλος* και Α. Λασκαράτος*

*Εργαστήριο Μετεωρολογίας, Τομέας Εφαρμογών, Πανεπιστήμιο Αθηνών

ABSTRACT

P.G. Drakopoulos & A. Lascaratos: A numerical model of the seasonal general circulation of the Mediterranean Sea.

A Princeton Ocean Model (POM) of the Mediterranean Sea has been developed in University of Athens. In this paper the results of the climatological run at a horizontal resolution of 0.25×0.25 deg. are presented. Sea Surface Temperature (SST) and Sea Surface Salinity (SSS) were restored to monthly climatology with a restoring coefficient of 1 m/day. The seasonal variability of the general circulation was found to be in a good agreement with the observed patterns and some known features have been observed for the first time. The implied surface fluxes (heat loss and salt gain) were too weak and resulted in absence of deep water formation.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Με καθαρά γεωγραφικά κριτήρια, η Μεσόγειος Θάλασσα μπορεί να θεωρηθεί μια τοπική θάλασσα. Η παρουσία όμως εκεί όλων σχεδόν των ωκεανογραφικών φυσικών διεργασιών σε συνδυασμό με την ευκολία που απορρέει από τις καλά ελεγχόμενες ροές (στην επιφάνεια και στο στενό του Γιβραλτάρ) λόγω του ημί-κλειστου σχήματός της, την κάνουν να αποτελεί ιδανική λεκάνη για ωκεανογραφικές μελέτες. Επιπλέον και ο μοντελισμός της Μεσογείου έχει πλεονεκτήματα επειδή οι χρονικές και χωρικές κλίμακες των φυσικών διεργασιών στη λεκάνη είναι μικρότερες από αυτές του παγκόσμιου ωκεανού, άρα και τα αριθμητικά ομοιώματα οικονομικότερα από άποψης χρήσης του υπολογιστή. Έτσι έχουν γίνει αρκετές προσπάθειες προσομοίωσης της κυκλοφορίας της Μεσογείου μέχρι σήμερα χωρίς όμως καμία από αυτές να πετύχει αρκετά ικανοποιητικά αποτελέσματα συνολικά (πχ Roussenov et al. 1995, Zavatarelli και Mellor 1995), με αποτέλεσμα την συνεχή ανάπτυξη νέων ομοιωμάτων.

Στο Πανεπιστήμιο Αθηνών και στα πλαίσια ενός πειράματος σύγκρισης αριθμητικών ομοιωμάτων της Μεσογείου, έχει αναπτυχθεί ένα μοντέλο γενικής κυκλοφορίας της Μεσογείου που κάνει χρήση του αλγόριθμου POM (Blumberg and Mellor 1987) και τα προκαταρκτικά αποτελέσματα του οποίου παρουσιάζονται σε αυτήν την εργασία.

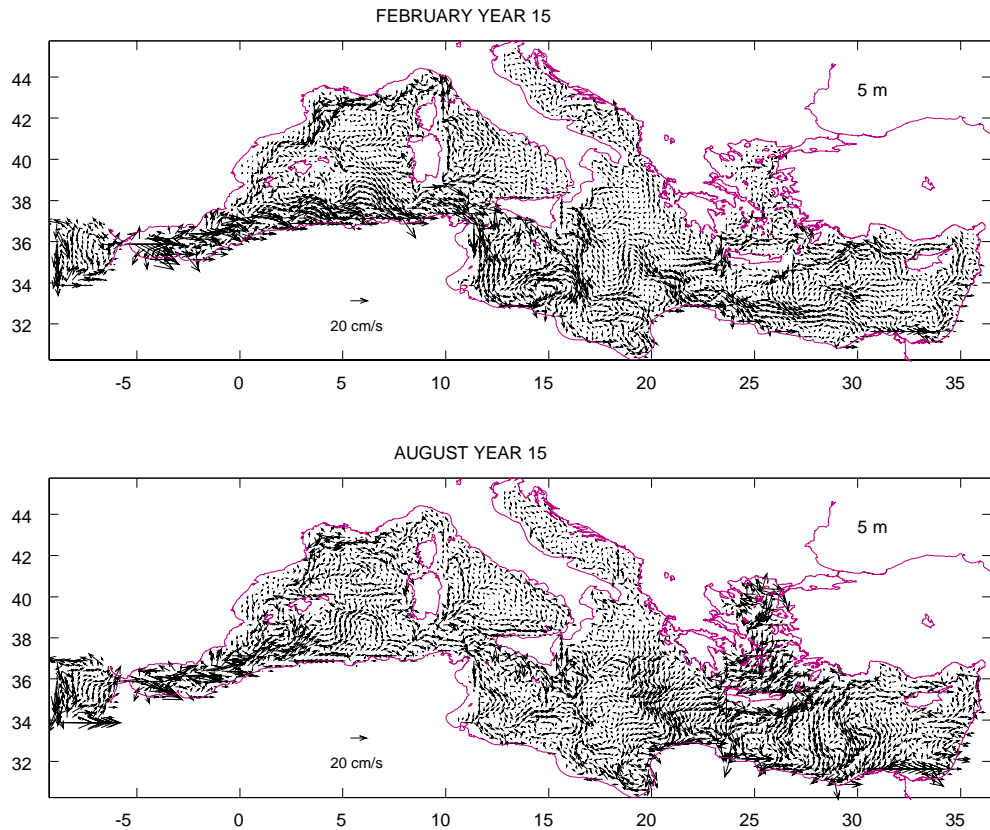
ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ

Το μοντέλο είναι τύπου αρχικών εξισώσεων, δηλαδή λύνει τις εξισώσεις ορμής, συνεχείας, διάχυσης θερμοκρασίας και αλατιού. Επιπλέον υπολογίζει προγνωστικά τη θαλάσσια στάθμη. Αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση διαφορετικών βημάτων χρόνου (βαροτροπικό - βαροκλιτικό). Οι κατακόρυφοι συντελεστές διάχυσης για την ορμή και τη θερμοότητα και την αλατότητα υπολογίζονται από το σχήμα Mellor Yamada (1982). Η οριζόντια διάχυση υπολογίζεται από το μη γραμμικό σχήμα του Smagorinsky (1963) και εξαρτάται από την ταχύτητα. Η επιφανειακές ροές θερμοότητας και αλατιού παραμετροποιούνται κάνοντας χρήση της μεθόδου της νευτώνειας επαναφοράς.

Το ομοίωμα έχει οριζόντια ανάλυση ενός τετάρτου της μοίρας, δηλαδή 0.25×0.25 βαθμούς μήκους και πλάτους και τα σημεία του κλάβου δίνονται από τις εξισώσεις $-9.25 + i * 0.25$, $i = 1, 182$ και $30 + j * 0.25$, $j = 1, 63$. Στην κατακόρυφο, χρησιμοποιούνται 32 «σίγμα» επίπεδα. Η βαθυμετρία του μοντέλου προέρχεται από το πανεπιστήμιο Harvard για βάθη μεγαλύτερα των 500 μέτρων, και από το Princeton για βάθη μικρότερα των 200 μέτρων και γραμμικό συνδυασμό αυτών για βάθη 200-500 μέτρα. Έγινε γραμμική παρεμβολή από την αρχική ανάλυση του 1/12 σε 1/4 και κατόπιν επεξεργάστηκε με φίλτρο τύπου Saphiro. Το μοναδικό ανοιχτό όριο του μοντέλου βρίσκεται στον Ατλαντικό Ωκεανό, 4 περίπου μοίρες μήκους δυτικά των στενών του Γιβραλτάρ. Ο άνεμος προέρχεται από το ECMWF και από δεδομένα της περιόδου 1986-1992. Χρησιμοποιούνται κλιματολογικές μέσες μηνιαίες τιμές (μέσος όρος ημερησίων). Η θερμοκρασία και η αλατότητα του επιφανειακού στρώματος οδηγείται από τις αντίστοιχες μέσες μηνιαίες τιμές της βάσης δεδομένων MED4 (Brasseur et al., 1996). Η σταθερά επαναφοράς είναι 1 μέτρο την ημέρα, που σημαίνει ότι ένα επιφανειακό στρώμα 50 μέτρων χρειάζεται 50 μέρες για να επανακτήσει την αρχική κλιματολογική τιμή. Τέλος σαν αρχικό πεδίο αλατότητας και θερμοκρασίας χρησιμοποιήθηκε ο χειμώνας από τη βάση δεδομένων MED4.

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Το μοντέλο έτρεξε διαγνωστικά για 3 μέρες ώστε να δημιουργηθεί οριζόντιο πεδίο ταχυτήτων και μετά



Σχήμα 1: Κυκλοφορία σε βάθος 5 μέτρων (α) τον Φεβρουάριο και (β) τον Αύγουστο.

ολοκληρώθηκε για 15 έτη. Αν και η κινητική ενέργεια σταθεροποιήθηκε μετά από 50 μήνες, η θερμοκρασία και η αλατότητα της λεκάνης συνέχισαν να έχουν αυξητική και πτωτική πορεία αντίστοιχα. Η μέση επιφανειακή ροή θερμότητας κατά το τελευταίο έτος ολοκλήρωσης είναι 5.8 Wm^{-2} αν και από κλιματολογικά δεδομένα υπολογίζεται περίπου σε -7 Wm^{-2} (Garret et al. 1993). Το θετικό ισοζύγιο του μοντέλου επιβάλλεται κυρίως από περιοχές με ισχυρή ανάβλυση (π.χ. Αιγαίο) άρα και χαμηλή θερμοκρασία επιφανείας της θάλασσας και με μεγάλη κλιματολογική θερμοκρασία επαναφοράς. Η συνεπαγόμενη θερμική ροή είναι θετική και ανάλογη της διαφοράς θερμοκρασίας. Επιπλέον τα σχετικά ζεστά εισερχόμενα νερά του Ατλαντικού αυξάνουν την περιεκτικότητα της λεκάνης σε θερμότητα με ρυθμό 3.2 Wm^{-2} με αποτέλεσμα την αύξηση της θερμοκρασίας της λεκάνης. Σύμφωνα με το μοντέλο πάντα, χάνεται γλυκό νερό από την επιφάνεια της Μεσογείου λόγω εξάτμισης με ρυθμό 0.4 μέτρων το χρόνο. Από μετρήσεις πεδίου πάλι, αυτή η τιμή πιστεύεται ότι βρίσκεται περίπου μεταξύ 0.6 και 1 μέτρου το χρόνο. Η σχετικά μικρή εξάτμιση δημιουργεί τη τάση ελάττωσης της αλατότητας.

Η γενική κυκλοφορία κοντά στην επιφάνεια κατά τη διάρκεια του χειμώνα περιγράφεται ως εξής (Σχήμα 1α): Νερά από τον Ατλαντικό εισέρχονται από το Γιβραλτάρ, και εξελίσσονται σε ένα ισχυρό και με μαϊάνδρους Αλγερινό ρεύμα. Αυτό δημιουργεί μία σειρά από αντικυκλώνες κατά μήκος της ακτής της βορείου Αφρικής. Στη Βαlearική Θάλασσα διακλαδώνεται και ένα μέρος πορεύεται βόρεια. Το άλλο τμήμα αφού περάσει τη Σαρδηνία, χωρίζεται ξανά και ένα τμήμα του εισέρχεται στη Τυρρηναϊκή ενώ ο κύριος κορμός του εισέρχεται στην Ανατολική Μεσόγειο μέσω των στενών της Σικελίας. Η ροή στην Τυρρηναϊκή είναι ελαφρά κυκλωνική. Ο κυκλώνας του κόλπου των Λεόντων είναι καθαρά διαμορφωμένος και οριοθετημένος. Το Λιγυριανό ρεύμα είναι πολύ ισχυρό. Το τμήμα του Ατλαντικού νερού που εισέρχεται στην Ανατολική Μεσόγειο και δημιουργεί το Ρεύμα του Ιονίου. Στον Κόλπο της Σύρτης σχηματίζονται δύο αντικυκλώνες. Η ροή στο Ιόνιο είναι κυκλωνική και η παρουσία του κυκλώνα του Ιονίου είναι

φανερή. Ο κυκλώνας της Νότιας Αδριατικής είναι καθαρά σχηματοποιημένος. Το ρεύμα του Ιονίου στη συνέχεια εισέρχεται στη Λεβαντίνη και δημιουργεί μαϊάνδρους. Ένα τμήμα του περνάει ανατολικά της Κύπρου και το άλλο δυτικά, και στη συνέχεια ενώνονται για να δημιουργήσουν το ρεύμα της Μικράς Ασίας. Αυτό εισέρχεται στο Κρητικό πέλαγος από τα στενά της Καρπάθου και το μεγαλύτερο τμήμα του εξέρχεται από τα στενά των Κυθήρων. Στη Λεβαντίνη η κυκλοφορία είναι κυκλωνική και καθορίζεται από την παρουσία του κυκλώνα της Ρόδου.

Κατά το καλοκαίρι η γενική κυκλοφορία είναι συνολικά περισσότερο αντικυκλωνική (Σχήμα 1β). Έτσι στην Τυρρηναϊκή η ροή τώρα είναι αντικυκλωνική, όπως έχει επισημανθεί και σε άλλες εργασίες (Tziperman and Rizzoli 1991, Roussepou et al. 1995). Στο Ιόνιο το ατλαντικό ρεύμα ανεβαίνει μέχρι τα στενά του Οτράντο, με αποτέλεσμα τη αντιστροφή της κυκλοφορίας από κυκλωνική που ήταν το χειμώνα σε αντικυκλωνική. Αυτή η αναστροφή, αν και έχει παρατηρηθεί σε πεδία αντικειμενικής ανάλυσης (Tziperman and Rizzoli 1991) είναι η πρώτη φορά που προσομοιάζεται σε αριθμητικό ομοίωμα. Ο αντικυκλώνας Mersa-Matruh κοντά στις ακτές της Αιγύπτου εμφανίζεται ενισχυμένος ενώ ο κυκλώνας της Ρόδου περιορίζεται στη περιοχή νότια της νήσου.

Κάτω από το θερμοκλινές και στα στενά της Σικελίας, η ροή είναι από ανατολή προς δύση με μικρές εποχικές διακυμάνσεις. Τα νερά που προέρχονται από τη Λεβαντίνη εισέρχονται στην Τυρρηναϊκή, και ακολουθώντας κυκλωνική πορεία φθάνουν στην Κορσική. Εκεί διακλαδίζονται και ένα τμήμα εισέρχεται στο στενό της Κορσικής ενώ το άλλο ακολουθεί πορεία γύρω από την Κορσική και τη Σαρδηνία και ξανασυναντά το πρώτο σκέλος στο κόλπο των Λεόντων. Στην Ανατολική Μεσόγειο γίνεται εμφανής ο αντικυκλώνας Mersa-Matruh στις ακτές τις Αφρικής και της Αντάλλυας στον ομώνυμο κόλπο.

Τέλος, οι ροές μέσω των σημαντικότερων στενών (Γιβραλτάρ, Κορσικής, Σικελίας, Κρητικού Τόξου) παρατίθενται στον Πίνακα 1.

Πίνακας 1: Ετήσια μεταφορά όγκου, θερμότητας και αλατιού μέσω των σπουδαιότερων στενών της Μεσογείου. Στην παρένθεση η φορά της ροής.

| ΣΤΕΝΑ | ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΟΓΚΟΥ Sv | ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ $\times 10^{12} \text{ Js}^{-1}$ | ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΑΛΑΤΙΟΥ psu Sv |
|-----------|----------------------|---|----------------------------|
| ΓΙΒΡΑΛΤΑΡ | 1.19 (-) | 7.5 (A) | 1.45 (Δ) |
| ΚΟΡΣΙΚΗ | 0.77 (B) | 47.5 (B) | 29.13 (B) |
| ΣΙΚΕΛΙΑ | 1.96 (-) | 3.2 (A) | 0.51 (Δ) |
| ΚΟΤΡΑΝΤΟ | 0.44 (-) | 1.3 (B) | 0.01 (N) |
| ΚΥΘΗΡΑ | 1.23 (N) | 81.7 (N) | 47.36 (N) |
| ΑΡΠΑΘΟΣ | 1.23 (B) | 81.0 (B) | 47.91 (B) |

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σε αυτήν την εργασία παρουσιάστηκαν τα προκαταρκτικά αποτελέσματα της εποχικής διακύμανσης της κυκλοφορίας της Μεσογείου, όπως αυτή μορφοποιείται από τα αποτελέσματα αριθμητικού ομοιώματος. Σε γενικές γραμμές βρίσκεται σε πολύ καλή συμφωνία με την εικόνα που έχει σχηματισθεί από μετρήσεις πεδίου. Η μη ρεαλιστική προσομοίωση των θερμικών ροών στην επιφάνεια της λεκάνης πιστεύεται ότι είναι αποτέλεσμα του συνδυασμού της ανάβλυσης και πιθανών ανακριβειών στις τιμές του πεδίου επαναφοράς.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- BLUMBERG, A. F., AND G. L. MELLOR (1987): A description of a three-dimensional coastal ocean circulation model three-dimensional coastal ocean models, coastal estuarine science, N.S. Heaps, Ed., *agu*, 1-16.
- BRASSEUR, P., J.M. BECKERS, J.M. BRANKART, AND R. SCHOENAUEN (IN PRESS): Seasonal temperature and salinity field in the Mediterranean Sea: Climatological analyses of a historical data set, Deep Sea Res.
- GARRETT, C., R. OUTERBRIDGE, AND K. THOMSON (1993): Interannual variability in Mediterranean heat and buoyancy fluxes, J. Clim., 6, 900-910.
- MELLOR G. L., AND A. F. BLUMBERG (1985): Modeling vertical and horizontal diffusivities with the sigma coordinate system, Mon.

Weather Rev., 113,1279-1383.

MELLOR G. L., AND T. YAMADA (1982): *Development of a turbulent closure model for geophysical fluid problems*, Rev. Geophys., 20, 851-875.

ROUSSENOV, V., E. STANEV, V. ARTALE, AND N. PINARDI (1995): *A seasonal model of the Mediterranean Sea general circulation*, J. Geophys. Res., 100, 13515-13538.

SMAGORINSKY, J. (1963) *General circulation experiments with the primitive equations. I. The basic experiment*, Monthly Weather Review, 99-164.

TZIPERMAN, E., AND P. MALANOTTE-RIZZOLI (1991): *The climatological seasonal circulation of the Mediterranean Sea*, J. Mar. Res., 49, 411-434.