

1837
2017
ΧΡΟΝΙΑ



Εθνικόν και Καποδιστριακόν
Πανεπιστήμιον Αθηνών

*Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών
Ωκεανογραφίας και Διαχείρισης Θαλάσσιου Περιβάλλοντος*



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ ΜΕ ΘΕΜΑ:

**«Μεταβλητότητα των θερμοαλατικών
χαρακτηριστικών και της στρωμάτωσης της
Ερυθράς Θάλασσας»**

(μελέτη δεδομένων ωκεανογραφικών πλόων)

ΠΑΠΑΓΕΩΡΓΙΟΥ ΔΗΜΗΤΡΑ

Επιβλέπων Καθηγητής: Σοφιανός Σαράντης

Αθήνα 2017

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ ΜΕ ΘΕΜΑ:

**«Μεταβλητότητα των θερμοαλατικών χαρακτηριστικών και της στρωμάτωσης της
Ερυθράς Θάλασσας»**

(μελέτη δεδομένων ωκεανογραφικών πλόων)

Παπαγεωργίου Δήμητρα

ΑΜ : 214002

Τριμελής επιτροπή:

Σοφιανός Σαράντης (Επίκουρος Καθηγητής, Ε.Κ.Π.Α.)

Φλόκα Έλενα (Αναπληρώτρια Καθηγήτρια, Ε.Κ.Π.Α.)

Παπαδόπουλος Βασίλης (Ε.Λ.Ε. Β', ΕΛ.ΚΕ.Θ.Ε.)

Αθήνα 2017

Ευχαριστίες

Έχοντας ολοκληρώσει την παρούσα διπλωματική εργασία, αισθάνομαι την ανάγκη να ευχαριστήσω όλους όσους συνέβαλαν με οποιοδήποτε τρόπο στην πραγματοποίησή της. Τις θερμότερες ευχαριστίες μου οφείλω στον επιβλέποντα Καθηγητή μου, κύριο Σοφιανό Σαράντη, Επίκουρο Καθηγητή Φυσικής Ωκεανογραφίας στο Ε.Κ.Π.Α., για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε με την ανάθεση του συγκεκριμένου θέματος, για το ιδιαίτερο ενδιαφέρον του, καθώς και για τις πολύτιμες επιστημονικές του παρατηρήσεις και υποδείξεις.

Κρίνω απαραίτητο να εκφράσω την εκ των προτέρων εκτίμησή μου προς τα υπόλοιπα μέλη της τριμελούς επιτροπής. Ευχαριστώ θερμά τον κύριο Παπαδόπουλο Βασίλη, Ε.Λ.Ε. Β' του ΕΛ.ΚΕ.Θ.Ε., για την συνεργασία και τη δυνατότητα που μου προσέφερε στην εξέλιξη αυτής της ερευνητικής δουλειάς. Επίσης, ευχαριστώ την κυρία Φλόκα Έλενα, Αναπληρώτρια Καθηγήτρια στο Ε.Κ.Π.Α., για τη μελέτη της διπλωματικής μου εργασίας και για τις εύστοχες παρατηρήσεις της.

Βαθιά ευχαριστώ όλα τα μέλη του εργαστηρίου Φυσικής Ωκεανογραφίας τόσο για τις πολύτιμες επιστημονικές συμβουλές τους όσο και για τον τρόπο με τον οποίο με υποδέχτηκαν και με βοήθησαν να ενταχθώ στην ερευνητική ομάδα. Θα ήταν παράληψή μου να μην ευχαριστήσω ξεχωριστά, την Γιουρούκου Δήμητρα, για την πολύτιμη βοήθειά της, για το χρόνο που διέθεσε, τις συμβουλές της και για το άριστο κλίμα που χαρακτήριζε τη συνεργασία μας.

Κλείνοντας, θέλω να πω ένα μεγάλο ευχαριστώ στους γονείς μου, που είναι δίπλα μου όλα αυτά τα χρόνια και με στηρίζουν αδιάκοπα με κάθε τρόπο.

Περίληψη

Τρεις ωκεανογραφικοί πλόες που πραγματοποιήθηκαν στην Ερυθρά Θάλασσα τον Αύγουστο του 2001, το Μάρτη του 2010 και τους μήνες Σεπτέμβρη και Οκτώβρη του 2011 και περιελάμβαναν υδρογραφικές μετρήσεις, μετεωρολογικές μετρήσεις, καθώς και μετρήσεις θαλασσίων ρευμάτων, μας έδωσαν τη δυνατότητα να μελετήσουμε και να καταλάβουμε καλύτερα τη δομή των μαζών νερού, τα υδρογραφικά τους χαρακτηριστικά, καθώς και την κυκλοφορία μέσα στη λεκάνη. Αντικείμενο της παρούσας εργασίας είναι η μελέτη των υδρογραφικών δεδομένων (θερμοκρασία, αλατότητα και συγκέντρωση διαλυμένου οξυγόνου) που αποκτήθηκαν από τις παραπάνω αποστολές με σκοπό τη μελέτη της μεταβλητότητας των θερμοαλατικών χαρακτηριστικών και της στρωμάτωσης στη λεκάνη της Ερυθράς Θάλασσας κατά τη διάρκεια της δεκαετίας από το 2001 έως το 2011.

Αρχικά, μελετήθηκε η εισροή του Gulf of Aden Intermediate Water στη λεκάνη της Ερυθράς Θάλασσας κατά τους θερινούς μήνες και υπολογίστηκε η ταχύτητα εισροής ίση με 0.12 m/s, ενώ το βορειότερο άκρο της εισροής εντοπίζεται στις 24 °N. Επίσης, μελετήθηκε το Red Sea Deep Water, και από τα δεδομένα της παρούσας εργασίας προέκυψε πως η δημιουργία βαθιών νερών είναι επεισοδιακή. Η ταχύτητα με την οποία τα νερά κυκλοφορούν στο βαθύ ιμάντα κυκλοφορίας είναι ίση με $3 \cdot 10^{-3}$ m/s, μια ταχύτητα η οποία επιβεβαιώνει παλαιότερες μελέτες που υπολόγιζαν το χρόνο παραμονής κοντά στα 40 χρόνια. Επιπλέον, υπολογίστηκαν οι μέσες τιμές της θερμοκρασίας, της αλατότητας, της πυκνότητας και του διαλυμένου οξυγόνου από τα 300 m έως το μέγιστο βάθος για τους σταθμούς κατά μήκος του άξονα της λεκάνης, και προέκυψε πως από το 2001 έως το 2011 στην Ερυθρά Θάλασσα παρουσιάζεται μια τάση αύξησης της θερμοκρασίας κατά $5.4 \cdot 10^{-3}$ °C/yr, η αλατότητα μειώνεται με ένα ρυθμό $-2.1 \cdot 10^{-3}$ psu/yr και η πυκνότητα μειώνεται με ρυθμό $-2.7 \cdot 10^{-3}$ kg/m³·yr. Το οξυγόνο, παρουσιάζει ένα πιο περίπλοκη συμπεριφορά, καθώς έχουμε και χωρικές αλλά και χρονικές μεταβολές.

Στο δεύτερο μέρος αυτής της εργασίας μελετήθηκε η στρωμάτωση της λεκάνης της Ερυθράς Θάλασσας, η οποία δεν παρουσιάζει σημαντικές υπερετήσιες μεταβολές. Η ακτίνα αποδιαμόρφωσης Rossby φαίνεται να αυξάνει γραμμικά από 12 km στο βορρά μέχρι 38 km στην έξοδο της λεκάνης. Τέλος, από την σύγκριση της ταχύτητας των μακρών κυμάτων Rossby με την ταχύτητα λόγω γεωστροφίας, προέκυψε το κρίσιμο εκείνο γεωγραφικό πλάτος (θ_{cr}) βόρεια του οποίου, τα κύματα Rossby δεν μπορούν να μεταφέρουν τη διαταραχή στο δυτικό όριο, με συνέπεια η ενέργεια να συσσωρεύεται στην ανατολική πλευρά της Ερυθράς Θάλασσας. Το θ_{cr} προέκυψε ίσο με 19°N.

Λέξεις κλειδιά : Φυσική Ωκεανογραφία, υδρογραφικά δεδομένα, Ερυθρά Θάλασσα, μάζες νερού, στρωμάτωση

Abstract

Three oceanographic cruises, which were conducted in the Red Sea basin in August 2001, in March 2010 and in September and October 2011, and included observations of hydrographic characteristics, meteorological data and ocean currents, gave the opportunity to explore and better understand the structure of the water masses, their hydrographic characteristics and the circulation patterns in the basin. The aim of this study is to use the hydrographic data (temperature, salinity and dissolved oxygen concentration) which were obtained from the above cruises in order to detect interannual variability in the thermohaline characteristics and the stratification in the Red Sea basin during the decade, from 2001 to 2011.

Firstly, the intrusion of Gulf of Aden Intermediate Water in the Red Sea basin during summer was studied and the velocity of the intrusion was calculated 0.12 m/s and the northern limit of the intrusion was determined at 24 °N. Furthermore, the Red Sea Deep Water was studied and from the data of this work the result was that the formation of deep water is episodic. The velocity of the circulation of deep water in the deep cell is $3 \cdot 10^{-3}$ m/s, a velocity which is in agreement with previous studies which calculated the residue time of deep water at approximately 40 years. In addition, the mean temperature, salinity and dissolved oxygen concentration were calculated for the depths from 300 m until the maximum depth for the stations along the axis and the results showed that there is a trend of increasing temperature with a rate of $53.85 \cdot 10^{-4}$ °C/yr, the salinity is decreasing with a rate of $-20.88 \cdot 10^{-4}$ psu/yr and the density is decreasing with a rate of $-26.92 \cdot 10^{-4}$ kg/m³·yr. The oxygen reveals a more complicated pattern as it shows both temporal and spatial changes.

In the second part of this study, the stratification in the basin of Red Sea was studied, and the result was that there is no significant interannual variability. The Rossby radius of deformation is increasing linearly from 12 km in the north to 38 km at the exit of the basin. Finally, the comparison between the velocity of long Rossby waves and the geostrophic velocity revealed the critical latitude where there is a transition from western boundary current to an intensification of the eastern boundary current. This θ_{cr} is 19°N.

Keywords: Physical Oceanography, hydrographic data, Red Sea, water masses, stratification

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες.....	2
Περίληψη.....	3
Abstract.....	4
Περιεχόμενα.....	5
Κεφάλαιο 1. Βιβλιογραφική ανασκόπηση.....	7
1.1 Εισαγωγή.....	7
1.2 Γεωγραφία.....	7
1.3 Μετεωρολογικές συνθήκες.....	9
1.4 Μάζες νερού της Ερυθράς Θάλασσας.....	11
1.5 Κυκλοφορία.....	15
1.5.1 Ανεμογενής κυκλοφορία.....	16
1.5.2 Βαθεία κυκλοφορία και δημιουργία.....	16
1.6 Ανταλλαγές ανάμεσα στην Ερυθρά Θάλασσα και τον κόλπου του Aden στο στενό του Bab el Mandeb.....	21
Κεφαλαίο 2. Μεθοδολογία.....	26
2.1 Εισαγωγή.....	26
2.2 Ωκεανογραφικές αποστολές.....	26
2.2.1 Η ωκεανογραφική αποστολή του 2001.....	26
2.2.2 Η ωκεανογραφική αποστολή του 2010.....	31
2.2.3 Η ωκεανογραφική αποστολή του 2011.....	37
2.3 Επεξεργασία των δεδομένων.....	44
2.3.1 Κανονικοί τρόποι ταλάντωσης.....	45
2.3.2 Ακτίνα αποδιαμόρφωσης Rossby.....	47
Κεφάλαιο 3. Αποτελέσματα.....	48
3.1 Εισαγωγή.....	48
3.2 Μάζες νερού στην Ερυθρά Θάλασσα ανά εποχή.....	49
3.2.1 Χειμώνας (Δεδομένα 2010).....	49
3.2.2. Καλοκαίρι (Δεδομένα 2011).....	53
3.3 Θερμοαλατικά χαρακτηριστικά των επιφανειακών νερών (SW).....	56
3.4 Gulf of Aden Intermediate Water (GAIW).....	59
3.5 Red Sea Deep Water (RSDW).....	70
3.5.1 Μεταβολές κατά μήκος του άξονα.....	70
3.5.2. Χρονοσειρές των μέσων τιμών των υδρογραφικών χαρακτηριστικών.....	76

3.6 Η στρωμάτωση της Ερυθράς Θάλασσας.....	80
3.6.1 Κανονικοί τρόποι ταλάντωσης κατά μήκος της λεκάνης	82
3.6.2 Κανονικοί τρόποι ταλάντωσης σε Βορρά-Μέση-Νότο.....	87
3.7 Ακτίνα αποδιαμόρφωσης Rossby και κυκλοφορία.....	92
Κεφάλαιο 4. Συμπεράσματα.....	97
Βιβλιογραφία.....	99

Κεφάλαιο 1. Βιβλιογραφική ανασκόπηση

1.1 Εισαγωγή

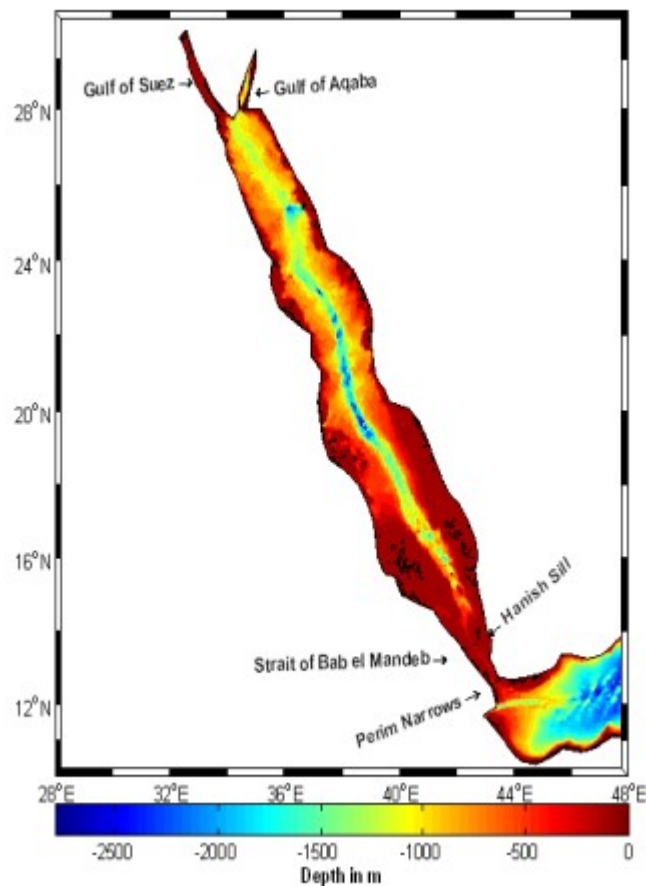
Η Ερυθρά Θάλασσα, από την άποψη ενός φυσικού ωκεανογράφου, είναι μια θαλάσσια λεκάνη, η οποία μπορεί να αντιμετωπιστεί ως πειραματική με πολλά ενδιαφέροντα χαρακτηριστικά, καθώς μοιάζει με μικρό ωκεανό στον οποίο εμφανίζονται σχεδόν όλα τα φαινόμενα σε μικρογραφία. Έχει σχετικά απλό σχήμα και μέτριο μέγεθος, ενώ δέχεται έντονη επίδραση από την ατμόσφαιρα, λόγω των ανέμων αλλά και θερμοαλατικής μορφής, με έντονη εποχική και υπερετήσια μεταβλητότητα. Επιπλέον, η Ερυθρά Θάλασσα είναι μια ημίκλειστη λεκάνη, η οποία συνδέεται με τον Ινδικό Ωκεανό μέσω του στενού του Bab el Mandeb, του οποίου η δυναμική μπορεί να επηρεάσει τις διεργασίες σε ολόκληρη τη λεκάνη.

Παρόλη την επιστημονική της σπουδαιότητα, την οικολογική και εμπορική της σημασία, η Ερυθρά Θάλασσα παραμένει ακόμα ανεξερεύνητη και πολλές διεργασίες δεν έχουν ακόμα κατανοηθεί. Κατά τη διάρκεια των τελευταίων δεκαετιών, μια σειρά αποστολών παρακολούθησης και πειράματα με αριθμητικά μοντέλα έχουν ρίξει φως σε διάφορες διεργασίες και μας έχουν επιτρέψει να κατανοήσουμε καλύτερα την κυκλοφορία σε ολόκληρη τη λεκάνη, τη δημιουργία των μαζών νερού, τη θερμοαλατική δομή της λεκάνης και την ανταλλαγή με τον Ινδικό Ωκεανό.

Σε αυτό το Κεφάλαιο περιγράφεται η τρέχουσα γνώση σε αυτά τα θέματα. Αρχικά, δίνονται γενικές εισαγωγικές πληροφορίες σχετικά με την γεωγραφία και τις μετεωρολογικές συνθήκες στην περιοχή και στη συνέχεια την υδρογραφία, τις μάζες νερού, την κυκλοφορία και τις ανταλλαγές μαζών νερού μεταξύ της Ερυθράς Θάλασσας και των γειτονικών κόλπων. Στο Κεφάλαιο 2 παρουσιάζονται τα στοιχεία της μεθοδολογίας. Περιγράφεται ο τρόπος με τον οποίο αποκτήθηκαν τα δεδομένα, ο τρόπος με τον οποίο έχει οργανωθεί η μελέτη καθώς και η απαραίτητη θεωρία για την περαιτέρω μελέτη. Στο Κεφάλαιο 3 δίνονται τα αποτελέσματα σχετικά με τις μάζες νερού (επιφανειακό στρώμα, Gulf of Aden Intermediate Water, και βαθιά νερά) καθώς και τις υπερετήσιες μεταβολές τους. Επίσης, γίνεται μελέτη της στρωμάτωσης της Ερυθράς Θάλασσας και του τρόπου που αυτή επηρεάζει τη γενική κυκλοφορία. Τέλος, στο Κεφάλαιο 4 δίνεται μια σύντομη περίληψη των αποτελεσμάτων.

1.2 Γεωγραφία

Η Ερυθρά Θάλασσα είναι μια επιμήκης, στενή ημίκλειστη λεκάνη η οποία χωρίζει την Αφρικανική και την Ασιατική ήπειρο, με προσανατολισμό από βορειο-βορειοδυτικά (NNW) προς νοτιο-νοτιοανατολικά (SSE), και βρίσκεται ανάμεσα στις $12^{\circ} 44'$ με 30°N , και 32° με 44°E . Το μήκος της λεκάνης είναι περίπου 1932 km με μέσο πλάτος 220 km (Patzert 1974a). Το βάθος κυμαίνεται από τα 3000m στο κύριο τμήμα της λεκάνης στα 160 m στο ύβωμα ($13^{\circ} 44' \text{N}$), με ένα μέσο βάθος 524 m (Patzert 1974a). Η έκταση της Ερυθράς Θάλασσας είναι $0.46 \times 10^6 \text{ km}^2$ και ο όγκος της $0.251 \times 10^6 \text{ km}^3$ (Εικόνα 1.1).



Εικόνα 1.1: Χάρτης της Ερυθράς Θάλασσας με βαθυμετρία (Smith & Sandwell, 1977).

Μορφολογικά μπορούμε να θεωρήσουμε πως η Ερυθρά Θάλασσα χωρίζεται σε τρεις περιοχές, το κύριο τμήμα της λεκάνης, το στενό του Bab el Mandeb, και τους κόλπους της Aqaba και του Suez.

1. Το κύριο τμήμα της λεκάνης, που είναι και το μεγαλύτερο, εκτείνεται από τον κόλπο του Bab el Mandeb στα νότια μέχρι τη Χερσόνησο του Σινά στα βόρεια. Η κύρια τάφρος, εκτείνεται κατά μήκος του άξονα της λεκάνης, και σε αυτήν περιέχονται οι πιο βαθιές περιοχές, με βάθη έως και 3000m.

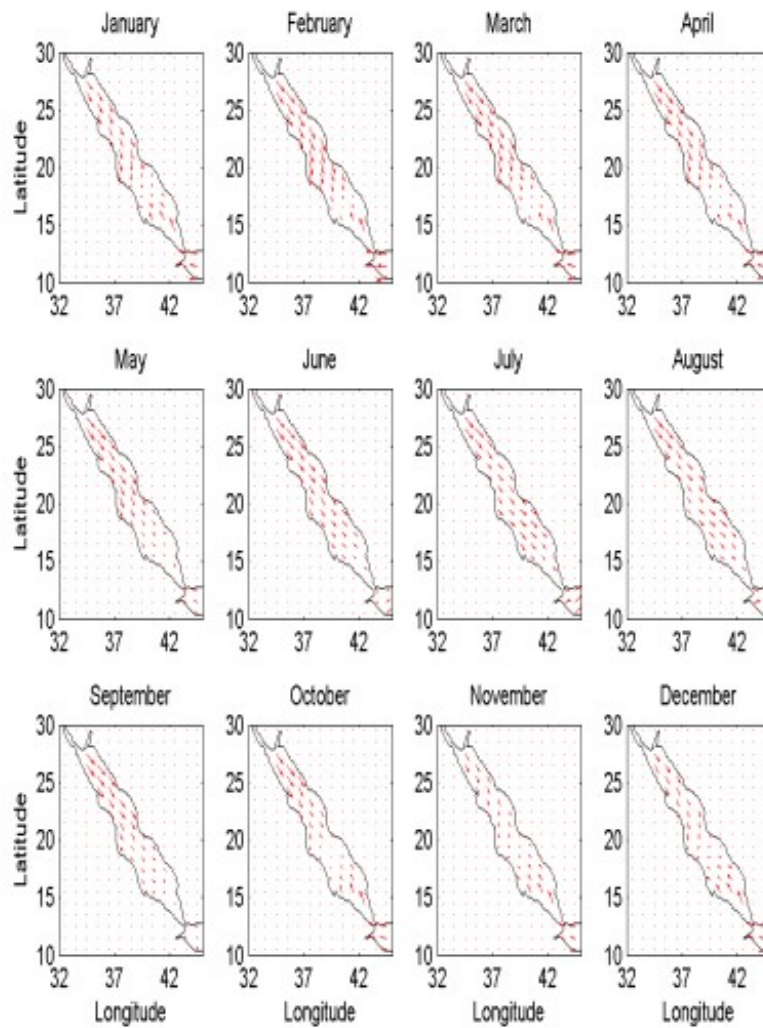
2. Στα νότια της λεκάνης, περίπου στις 15 °N, βρίσκεται το στενό του Bab el Mandeb, το οποίο ενώνει την Ερυθρά Θάλασσα με τον Ινδικό Ωκεανό μέσω του κόλπου του Aden. Εκτείνεται από το νότιο σημείο εισόδου, ανοιχτά του νησιού Perim έως τα νησιά Hanish στα βορειοδυτικά (Murray & Johns, 1997). Εκεί βρίσκεται ένα ρηχό ύψωμα στις 13° 41' N, όπου το βάθος του νερού είναι μόνο 160 m. Το στενό χωρίζεται σε δύο κανάλια γύρω από το νησί Perim, το ανατολικό κανάλι και το νοτιοδυτικό κανάλι. Το ανατολικό κανάλι είναι μικρότερο, σχεδόν 4 km πλάτος και 26 m βάθος, ενώ το δυτικό έχει πλάτος 20 km και βάθος 300 m. Μακριά από τα στενά, ο βυθός κλίνει προς τον κόλπο του Aden στη νότια πλευρά του στενού του Bab el Mandeb (Morcos, 1970) και στην Ερυθρά Θάλασσα στο βόρειο άκρο.

3. Βορειότερα από τις 28°N, η Ερυθρά Θάλασσα χωρίζεται σε δύο στενούς κόλπους: τον Κόλπο της Αqaba στα βορειοανατολικά και τον Κόλπο του Suez στα βορειοδυτικά. Ο Κόλπος της Αqaba είναι ένα βαθύ και στενό κανάλι, με βάθος 1400 m περίπου και μήκος 150 km. Χωρίζεται από το κύριο τμήμα με ένα ρηχό ύβωμα (βάθους 175m, Neumann and McGill, 1962). Ο κόλπος του Suez είναι μεγαλύτερος από τον κόλπο της Αqaba, καθώς είναι σχεδόν 250 km σε μήκος και 36 km σε πλάτος, αλλά είναι σχετικά ρηχός σε σχέση με τον κόλπο της Αqaba, με μέσο βάθος 40 m.

1.3 Μετεωρολογικές συνθήκες

Το κλίμα της Ερυθράς Θάλασσας είναι εξαιρετικά ξηρό, με μέση ετήσια βροχόπτωση μικρότερη από 250 mm. Καθώς περιβάλλεται από ερημικές και ημιορημικές εκτάσεις, η Ερυθρά Θάλασσα δέχεται το μεγαλύτερο ρυθμό εξάτμισης στον παγκόσμιο ωκεανό (Patzert, 1974b). Σε συνδυασμό με την ελάχιστη βροχόπτωση και την αμελητέα απορροή ποταμών, η εξάτμιση φθάνει το ύψος των 2m ανά έτος (Yegorov, 1950; Neumann, 1952; Privett, 1959; Tragou et al., 1999; Sofianos et al., 2002; Bower and Farrar, 2015). Αυτό σημαίνει, πως για να παραμένει σταθερή η μέση αλατότητα της Ερυθράς Θάλασσας, θα πρέπει να υπάρχει εισροή γλυκού νερού από τις γειτονικές λεκάνες. Η μεταφορά νερού μέσω της διώρυγας του Suez, η οποία ενώνει την Μεσόγειο Θάλασσα με τον Κόλπο του Suez και την Ερυθρά Θάλασσα, είναι αμελητέα, και επομένως η μόνη σημαντική σύνδεση της Ερυθράς Θάλασσας με τον παγκόσμιο ωκεανό είναι μέσω του Στενού του Bab el Mandeb.

Το πεδίο του ανέμου πάνω από την Ερυθρά Θάλασσα είναι, κατά μέσο όρο, παράλληλο με τον άξονα της λεκάνης λόγω των υψηλών βουνών και στις δύο ακτές της λεκάνης (Patzert, 1974a). Στο βόρειο τμήμα (βορειότερα από τις 20° N), ο άνεμος πνέει βόρειο-βορειοδυτικός καθ' όλη τη διάρκεια του χρόνου, καθώς επηρεάζεται από την ατμοσφαιρική κυκλοφορία της ανατολικής Μεσογείου (Pedgley 1974). Στο νότιο τμήμα (νοτιότερα από τις 20° N), οι άνεμοι επηρεάζονται από τους μουσώνες της Αραβικής Θάλασσας (βορειοανατολικοί (NE) και νοτιοδυτικοί (SW) μουσώνες), οι οποίοι αναστρέφουν την διεύθυνση τους δύο φορές το χρόνο (Quadfasel & Baudner, 1993). Κατά τη διάρκεια των SW μουσώνων (Ιούνιος-Σεπτέμβριος) κυριαρχούν NNW άνεμοι στο νότιο τμήμα της Ερυθράς Θάλασσας. Αντίθετα, κατά τη διάρκεια των NE μουσώνων και της μεταβατικής περιόδου (Οκτώβριος-Μάιος) οι άνεμοι στρέφονται από NNW σε SSE. Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 1.2, η μέση μηνιαία ένταση του ανέμου πάνω από την Ερυθρά Θάλασσα έχει διεύθυνση παράλληλη με τον κύριο άξονα της λεκάνης.



Εικόνα 1.2: Μέση μηνιαία ένταση του ανέμου πάνω από την Ερυθρά Θάλασσα (μέσος όρος 14 ετών από το 1980 έως το 1993 από το NOCS.1 (μέγιστο διάνυσμα=0.068 Nm⁻²)) (Alraddadi, 2013).

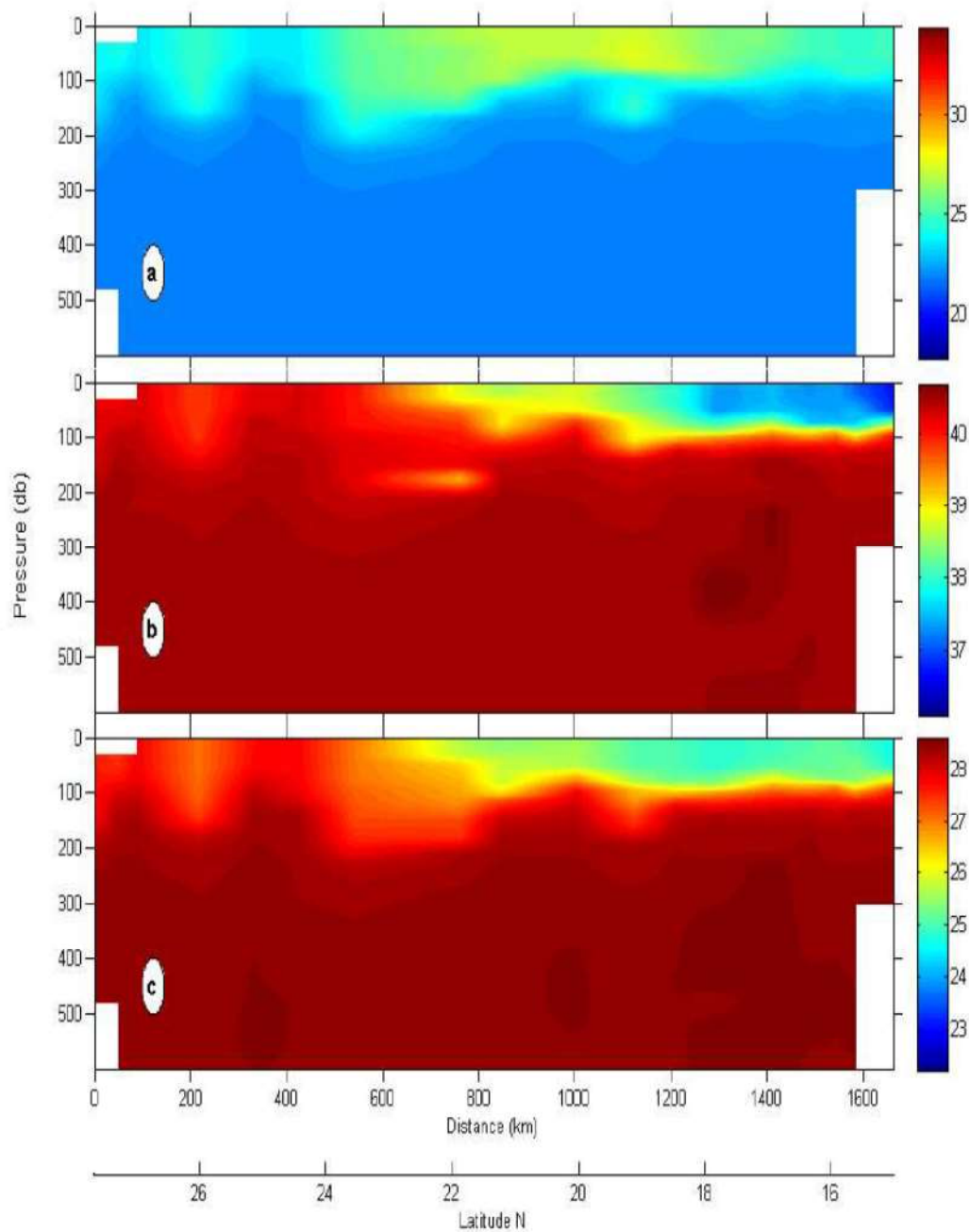
Κατά την περίοδο από τον Οκτώβρη μέχρι τον Δεκέμβρη δημιουργείται μια ενδιάμεση ζώνη ασθενών ανέμων, στο μέσο της Ερυθράς (20°N) εξαιτίας των ισχυρών SSE ανέμων (ταχύτητας 6.7 – 9.3 m/s) στο νότιο τμήμα και των ασθενών NNW ανέμων (ταχύτητας 2.4 – 4.4 m/s) στο βόρειο. Αυτή η ενδιάμεση ζώνη σύγκλισης κινείται σταδιακά προς το νότο μέχρι τον Ιούνιο, όπου σε ολόκληρη την Ερυθρά κυριαρχούν NNW άνεμοι (Patzert, 1974a) (Εικόνα 1.2). Συγκριτικά, οι άνεμοι πάνω από την περιοχή της Ερυθράς κατά τη διάρκεια του χειμώνα είναι πιο ισχυροί από τους ανέμους που πνέουν κατά τη διάρκεια των καλοκαιρινών μηνών.

1.4 Μάζες νερού της Ερυθράς Θάλασσας

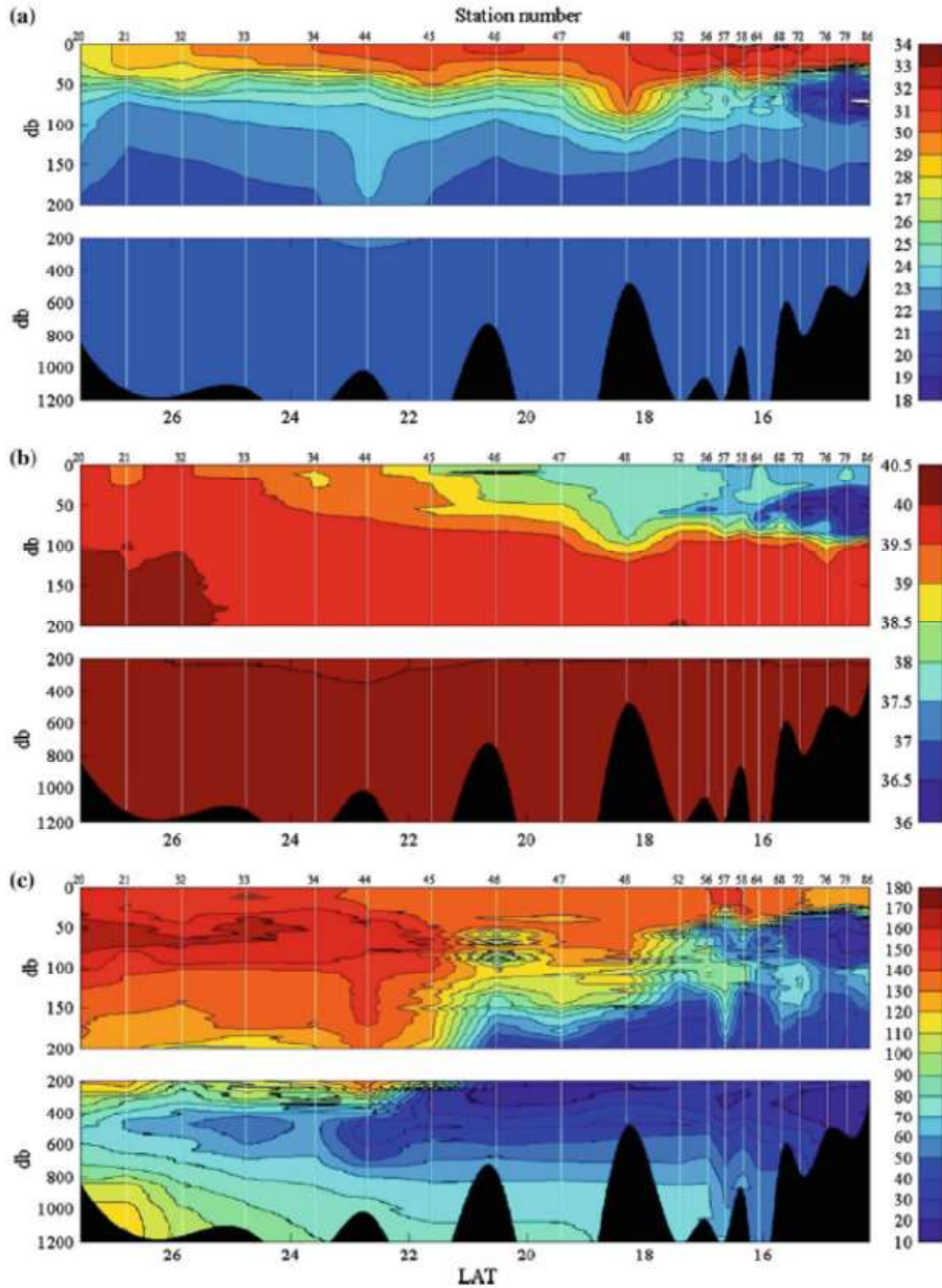
Οι περισσότερες από τις διαθέσιμες παρατηρήσεις στην Ερυθρά Θάλασσα είναι σποραδικές ως προς το χρόνο και το χώρο, κάνοντας δύσκολη τη δημιουργία μιας ξεκάθαρης εικόνας της τρισδιάστατης κατανομής των χαρακτηριστικών των μαζών νερού της Ερυθράς Θάλασσας. Μόνη εξαίρεση αποτελεί η περιοχή του στενού του Bab el Mandeb, η οποία έχει προσελκύσει το ενδιαφέρον αρκετών προσπαθειών παρατήρησης (π.χ. Vercelli, 1931a, b; Morcos, 1970; Morcos and Soliman, 1974; Maillard, 1974; Clifford et al., 1997; Murray and Johns, 1997). Μερικές πιο πρόσφατες αποστολές καλύπτουν μεγαλύτερο μέρος της υδρογραφίας της λεκάνης (Quadfasel και Baunder, 1993; Sofianos and Johns 2007; Bower et al., 2000) και μας επιτρέπουν να ανακατασκευάσουμε μια πιο ολοκληρωμένη εικόνα της δομής των μαζών νερού στην Ερυθρά Θάλασσα. Παρόλα αυτά, είναι άκρως απαραίτητη μια πιο εντατική και ευρύτερη παρατηρησιακή στρατηγική.

Η κατακόρυφη κατανομή των υδρογραφικών χαρακτηριστικών φαίνεται στις Εικόνες 1.3 και 1.4. Αυτά τα χαρακτηριστικά έχουν ληφθεί σε δύο διαφορετικούς ωκεανογραφικούς πλόες (του R/V Maurice Ewing τον Αύγουστο του 2001 και του Commandant Robert Giraud τους μήνες Ιανουάριο-Φεβρουάριο του 1963) κατά μήκος του κύριου άξονα της Ερυθράς Θάλασσας και αφορούν την δυνητική θερμοκρασία και την αλατότητα.

Στα επιφανειακά στρώματα, η κατανομή της δυνητικής θερμοκρασίας και της αλατότητας μεταβάλλεται σημαντικά μεταξύ των δύο εποχών των μουσώνων, ως αποτέλεσμα της μεταβαλλόμενης ατμοσφαιρικής επίδρασης και της κυκλοφορίας. Κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού, ένα στρώμα ψυχρών και γλυκών νερών από τον Κόλπο του Aden ρέει κάτω από το επιφανειακό, θερμό και αλμυρό στρώμα ανάμειξης και πάνω από τα αλμυρά νερά εξόδου. Αντίθετα, κατά τη διάρκεια του χειμώνα, η κατακόρυφη κατανομή της θερμοκρασίας αποτελείται από δύο στρώματα, με την εισροή σχετικά θερμού και γλυκού νερού στην επιφάνεια και την εκροή πιο ψυχρού και αλμυρού νερού στα βάθη (Quadfasel, 2001). Ολόκληρη η λεκάνη της Ερυθράς Θάλασσας, από τα 300 m ως τον πυθμένα, καταλαμβάνεται από νερό εξαιρετικά ομογενούς θερμοκρασίας, αλατότητας και δυνητικής πυκνότητας 21.5-21.6°C, 40.5-40.6 psu και 28.6 kg m⁻³ αντίστοιχα (Wyrтки, 1971; Edwards & Head, 1987).



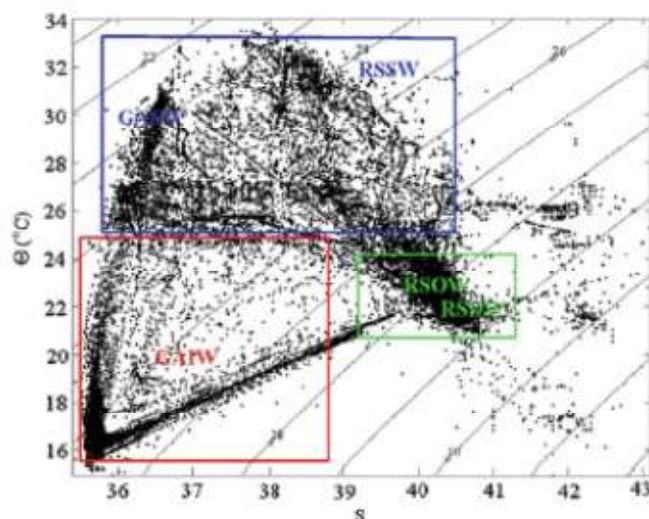
Εικόνα 1.3: Υδρογραφική τομή κατά μήκος του άξονα της Ερυθράς Θάλασσας α) δυνητική θερμοκρασία ($^{\circ}\text{C}$), β) αλατότητα (psu) και γ) δυνητική πυκνότητα σ_{θ} (kg/m^3) από την ωκεανογραφική αποστολή του *Commandant Robert Giraud* για την περίοδο Ιανουάριο-Φεβρουάριο 1963 (Alraddadi, 2013).



Εικόνα 1.4: Υδρογραφική τομή κατά μήκος του άξονα της Ερυθράς Θάλασσας α) δυνητική θερμοκρασία ($^{\circ}\text{C}$), β) αλατότητα (psu) και γ) συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου ($\mu\text{mol}/\text{m}^3$) από την ωκεανογραφική αποστολή του R/V Maurice Ewing τον Αύγουστο του 2001 (Sofianos και Johns, 2015).

Μια συλλογή όλων των ιστορικών σταθμών που έχουν συλλεχθεί από την Ερυθρά Θάλασσα παρουσιάζεται στην Εικόνα 1.5 σε ένα διάγραμμα Θ - S (θερμοκρασία-αλατότητα) με στόχο την ταυτοποίηση των διαφόρων μαζών νερού. Μπορούμε να ταυτοποιήσουμε διάφορες μάζες νερού, οι οποίες είτε δημιουργούνται μέσα στην λεκάνη και έχουν υψηλή αλατότητα λόγω του χαρακτήρα συγκέντρωσης, είτε εισέρχονται από γειτονικές λεκάνες. Μέσα στην Ερυθρά Θάλασσα μπορούμε να ταυτοποιήσουμε δύο μάζες νερού, οι οποίες προέρχονται

από τον Κόλπο του Aden: το Gulf of Aden Surface Water (**GASW**), στο επιφανειακό στρώμα, και το Gulf of Aden Intermediate Water (**GAIW**), στα ενδιάμεσα βάθη (Εικόνες 1.3 και 1.4). Τα νερά αυτά εισέρχονται στην Ερυθρά κατά τη διάρκεια του χειμώνα και του καλοκαιριού, αντίστοιχα και χαρακτηρίζονται από χαμηλή αλατότητα σε σχέση με τις μάζες νερού που δημιουργούνται μέσα στην Ερυθρά Θάλασσα.



Εικόνα 1.5: Διάγραμμα θερμοκρασίας-αλατότητας (psu) της Ερυθράς Θάλασσας από τη βάση δεδομένων NODC, με επιπρόσθετα τα δεδομένα της ερευνητικής αποστολής με το R/V Maurice Euwing, το 2001. Το κόκκινο πλαίσιο αντιστοιχεί στην GAIW, το μπλε στα επιφανειακά νερά (RSSW and GASW) και το πράσινο πλαίσιο στα βαθύτερα στρώματα (RSIW και RSDW) (Sofianos and Johns, 2015).

Το **GASW** σχηματίζει το σχετικά γλυκό επιφανειακό στρώμα που εισέρχεται στην Ερυθρά Θάλασσα μέσω του στενού του Bab el Mandeb και αποτελεί το τμήμα εισροής του “inverse estuarine” ιμάντα κυκλοφορίας που παρατηρείται από τον Οκτώβριο έως το Μάιο. Μεταφέρει στην Ερυθρά Θάλασσα νερό σχετικά γλυκό από τον Κόλπο του Aden, αναπληρώνοντας ουσιαστικά την απώλεια του γλυκού νερού από την επιφάνεια της λεκάνης, λόγω της ισχυρής εξάτμισης. Εμφανίζεται μόνο κατά τη διάρκεια του χειμώνα και η θερμοκρασία και αλατότητά του παίρνουν τιμές που κυμαίνονται από 25-30 °C σε θερμοκρασία και 36.0-36.5 psu σε αλατότητα.

Αντίθετα, το **GAIW** εμφανίζεται στη λεκάνη μόνο κατά τη διάρκεια της καλοκαιρινής περιόδου και δημιουργεί μια εισροή νερών σε ενδιάμεσα βάθη, ανάμεσα στην επιφανειακή και τη βαθειά εκροή. Εντοπίζεται στο νότιο μισό της λεκάνης, ως ένα υποεπιφανειακό ελάχιστο στη θερμοκρασία και την αλατότητα, το οποίο εισέρχεται στη λεκάνη με τιμές θερμοκρασίας και αλατότητας κοντά στους 16.5 °C και 37.5 psu, αντίστοιχα. Καθώς εισέρχεται στη λεκάνη, εμφανίζει ισχυρές κατά πλάτος βαθμίδες λόγω της οριζόντιας και κατακόρυφης ανάμιξης, με την δυνητική θερμοκρασία να φτάνει σχεδόν τους 30 °C και με τιμές αλατότητας πάνω από 38 psu (Εικόνα 1.4). Συγχρόνως, το βάθος του ελαχίστου της αλατότητας μειώνεται σταδιακά από τα 75 m σε πολύ ρηχά βάθη (Sofianos και Johns 2007). Μέχρι τις 16°N το **GAIW** εισέρχεται στη λεκάνη χωρίς να υφίσταται ιδιαίτερη ανάμιξη.

Καθώς όμως κινείται βορειότερα, όπου το πλάτος της λεκάνης αυξάνεται αισθητά, η ανάμιξη με το περιβάλλον νερό πραγματοποιείται μέσω των μεγάλων δινών στην περιοχή, οι οποίες έτσι ενισχύουν περαιτέρω τη διείδυση του στη λεκάνη. Τα θερμοαλατικά χαρακτηριστικά του **GAIW** εντοπίζονται περίπου μέχρι τις 22 °N, γεγονός που οδηγεί στην υπόθεση ότι αυτό είναι και το βορειότερο όριο της πορείας της μάζας μέσα στη λεκάνη.

Οι πιο σημαντικές, τοπικά σχηματιζόμενες μάζες νερού είναι το Red Sea Outflow Water (**RSOW**) και το Red Sea Deep Water (**RSDW**). Η πρώτη καταλαμβάνει τα ενδιάμεσα βάθη της λεκάνης, ενώ η τελευταία γεμίζει το βαθύτερο μέρος της. Και οι δύο μάζες νερού χαρακτηρίζονται από υψηλές τιμές αλατότητας (πάνω από 40 psu), αποτελώντας δύο από τις πιο αλμυρές μάζες νερού στον παγκόσμιο ωκεανό. Το **RSDW** χαρακτηρίζεται από πολύ ομογενείς τιμές θερμοκρασίας και αλατότητας (Εικόνες 1.3, 1.4 και 1.5) και γεμίζει τη λεκάνη της Ερυθράς σε βάθη κάτω από τα 150- 250 m. Αυτό το επίπεδο βαθαινει προς το βορρά και καθορίζεται από τα έντονα χαρακτηριστικά της κυκλοφορίας που εμφανίζονται στη λεκάνη. Πάνω από αυτή τη μάζα νερού βρίσκεται το **RSOW**, το οποίο ρέει προς το νότο για να σχηματίσει τον πυρήνα της βαθιάς εκροής της Ερυθράς Θάλασσας στον Κόλπο του Aden. Οι μηχανισμοί που εμπλέκονται στη δημιουργία αυτών των δύο μαζών νερού θα συζητηθούν στην επόμενη παράγραφο. Τέλος, κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού, τα επιφανειακά νερά που εξέρχονται από τη λεκάνη μέσω του στενού του Bab-el-Mandeb αποκτούν τα χαρακτηριστικά τους στην Ερυθρά Θάλασσα και συνήθως αναφέρονται ως Red Sea Surface Water (**RSSW**).

Το **RSOW** και το **RSDW** έχουν παρόμοια χαρακτηριστικά θερμοκρασίας και αλατότητας και για πολύ καιρό αντιμετωπιζόνταν ως μία μάζα νερού. Μόνο όταν σε παρατηρήσεις σε ολόκληρη τη λεκάνη μετρήθηκαν και άλλοι δείκτες, όπως οι συγκεντρώσεις του οξυγόνου, του ¹⁴C, και του ³He (πχ, Cember 1988; Quadfasel και Baunder 1993; Sofianos και Johns 2007) έγινε δυνατό να διαχωριστούν αυτές οι δύο μάζες νερού. Το **RSDW** χαρακτηρίζεται από πολύ χαμηλή συγκέντρωση οξυγόνου, λόγω της κατανάλωσης καθώς αυτό εξαπλώνεται προς το νότο και αναβλύζει για να επανακυκλοφορήσει προς το βορρά σε υψηλότερα στρώματα (Εικόνα 1.6). Το **RSOW** είναι μια σχετικά νεότερη μάζα νερού, η οποία συνεισφέρει το μεγαλύτερο μέρος των υψηλής αλατότητας νερών που εξέρχονται μέσω του Bab el Mandeb στον Ινδικό Ωκεανό. Επίσης, αυτό χαρακτηρίζεται από υψηλά επίπεδα συγκέντρωσης οξυγόνου κοντά στα 100-150 m στη νότια Ερυθρά Θάλασσα (Εικόνα 1.5).

1.5 Κυκλοφορία

Οι μετρήσεις των ρευμάτων στην Ερυθρά Θάλασσα είναι λιγιστές και τα διαθέσιμα δεδομένα αφορούν κυρίως την περιοχή των στενών (το στενό του Bab el Mandeb και την είσοδο του Κόλπου της Aqaba) (Vercelli, 1927; Maillard & Soliman, 1986; Murray & Johns, 1997). Υπάρχουν δύο σημαντικοί παράγοντες που ελέγχουν την κυκλοφορία των νερών στην Ερυθρά Θάλασσα, ο άνεμος και οι θερμοαλατικές διεργασίες. Η επίδραση του ανέμου καθορίζει την οριζόντια κυκλοφορία στο ανώτερο στρώμα (Patzert, 1974a; Ahmad & Sultan, 1987), ενώ ο ιμάντας κυκλοφορίας με την αναστροφή της κίνησης στα βαθύτερα στρώματα καθοδηγείται από θερμοαλατικές διεργασίες (ανταλλαγή θερμότητας και μάζας μεταξύ της ατμόσφαιρας και της θάλασσας) (Wyrтки, 1974).

1.5.1 Ανεμογενής κυκλοφορία

Τα επιφανειακά ρεύματα στην Ερυθρά Θάλασσα επηρεάζονται από τους ανέμους, οι οποίοι μεταβάλλονται με τους μουσώνες που πνέουν από την Αραβική Θάλασσα (Edwards & Head, 1987). Κατά τη διάρκεια των νοτιοδυτικών μουσώνων (Ιούνιος-Σεπτέμβριος) τα επιφανειακά ρεύματα κινούνται νότια προς το στενό του Bab el Mandeb. Το μέσο επιφανειακό ρεύμα κινείται νοτιοανατολικά προς τον κόλπο του Aden μέσω του στενού του Bab el Mandeb. Στο τέλος του καλοκαιριού, η ταχύτητα των νοτιο-νοτιοανατολικών ρευμάτων στα βόρεια της Ερυθράς Θάλασσας (βορειότερα από τις 26°N) αυξάνεται λόγω των βόρειο-βορειοδυτικών ανέμων. Ωστόσο, οι άνεμοι πάνω από την νότια Ερυθρά Θάλασσα γίνονται πιο ασθενείς τον Ιούλιο και τον Αύγουστο και υπάρχουν ισχυρά επιφανειακά ρεύματα που ρέουν νότια στην κεντρική Ερυθρά Θάλασσα, ανάμεσα στις 18° και 20°N. Το ισχυρότερο επιφανειακό ρεύμα εκροής έχει βρεθεί μεγαλύτερο από 20 cm/s, στις αρχές του Ιουλίου στο στενό του Bab el Mandeb (Patzert, 1974a).

Τα μέσα μηνιαία ρεύματα στην νότια Ερυθρά Θάλασσα είναι ασθενή και ευμετάβλητα κατά τη διάρκεια της μεταβατικής περιόδου των μουσώνων (Μάιος-Ιούνιος και Σεπτέμβριος-Οκτώβριος). Ως αποτέλεσμα αυτής της μείωσης στην ένταση των νότιο-νοτιοδυτικών ανέμων στις αρχές του Ιουνίου στην νότια Ερυθρά Θάλασσα, τα ρεύματα αλλάζουν διεύθυνση από νότιο-νοτιοανατολική σε βόρειο-βορειοδυτική. Αυτές οι αλλαγές στην διεύθυνση των ρευμάτων είναι σχεδόν σε φάση με τις μεταβολές στην διεύθυνση των ανέμων. Ωστόσο, τα ρεύματα στη νότια περιοχή παρουσιάζουν μια χρονική υστέρηση ενός μήνα σε σχέση με την αλλαγή στην διεύθυνση του ανέμου στις αρχές του Σεπτεμβρίου (Patzert, 1974a; Maillard & Soliman, 1986).

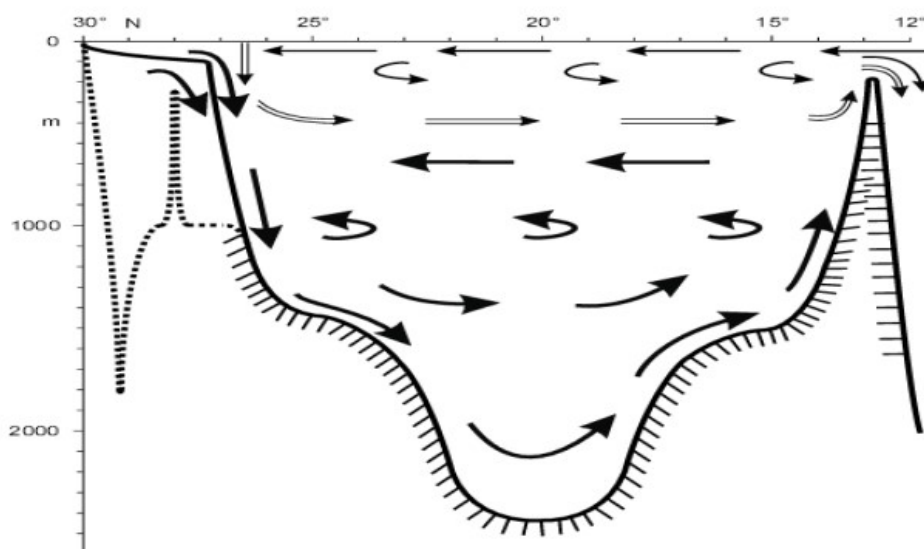
Οι νότιοι-νοτιοδυτικοί άνεμοι στη νότια περιοχή (νοτιότερα των 20°N) που επικρατούν κατά τη διάρκεια του χειμώνα οδηγούν τα επιφανειακά νερά από τον Κόλπο του Aden προς την Ερυθρά Θάλασσα, μέσω του στενού του Bab-el-Mandeb. Τα ρεύματα κινούνται προς βορρά, αντίθετα στους βόρειο-βορειοδυτικούς ανέμους που επικρατούν στη βορειότερη περιοχή (Patzert, 1974a; Bethoux, 1988; Shapiro & Meschanov, 1991).

Η κυκλοφορία στα ανώτερα στρώματα της λεκάνης θεωρείται πως οφείλεται κυρίως στην επίδραση του ανέμου. Ωστόσο, οι Neumann, McGill (1961) και ο Phillips (1966) ισχυρίστηκαν πως η κυκλοφορία των επιφανειακών στρωμάτων μπορεί να αποδοθεί σε θερμοαλατικές διεργασίες. Καθώς το γλυκό νερό ρέει μέσω του κόλπου του Aden προς την Ερυθρά Θάλασσα κινούμενο βόρεια μέσα από το στενό, ψύχεται, κυρίως λόγω της υψηλής εξάτμισης στην βόρεια περιοχή. Αυτό το νερό γίνεται πιο αλμυρό, συνεπώς γίνεται και πιο πυκνό, βυθίζεται και ρέει έξω από την Ερυθρά Θάλασσα πάνω από το ρηχό (160 m βάθος) ύβωμα του Bab el Mandeb (Εικόνα 1.6).

1.5.2 Βαθεία κυκλοφορία και δημιουργία

Υπάρχει ευρεία συμφωνία μεταξύ των ερευνητών πως η πηγή δημιουργίας του RSDW εντοπίζεται στους βόρειους κόλπους του Suez και της Aqaba. Οι περισσότερες μελέτες προτείνουν τον Κόλπο του Suez ως την κύρια πηγή των βαθιών νερών της λεκάνης της Ερυθράς Θάλασσας (Woelk and Quadfasel 1996; Cember 1988; Maillard 1974; Wyrтки 1974). Μελέτες στο στενό του Tiran (Hecht and Anati 1983; Murray et al. 1984; Manasrah et al.

2004), το οποίο συνδέει τον κόλπο της Αqaba με την λεκάνη της Ερυθράς Θάλασσας, έδειξαν πως τα νερά του Κόλπου της Αqaba συμβάλλουν επίσης στα βαθιά στρώματα της Ερυθράς Θάλασσας.



Εικόνα 1.6: Σχηματική αναπαράσταση της κυκλοφορίας στα ανώτερα στρώματα (μονά βέλη), στα ενδιάμεσα στρώματα (διπλά βέλη) και στα βαθιά στρώματα (έντονα βέλη) στην Ερυθρά Θάλασσα (Quadfasel, 2001). Η διακεκομμένη τοπογραφία αντιπροσωπεύει τον κόλπο της Αqaba.

Τα βαθιά νερά της Ερυθράς Θάλασσας (τα πιο βαθιά από τα 600m) ανανεώνονται μέσω της βύθισης των πυκνών νερών που δημιουργούνται σε αυτούς τους βόρειους κόλπους. Ο χρόνος δημιουργίας καθώς και η ποσότητα παραγόμενων RSDW νερών δεν είναι γνωστά. Γενικά, πιστεύεται ότι συμβαίνει κατά το μέσο της χειμερινής περιόδου, όπου λαμβάνει χώρα έντονη εξάτμιση και ψύξη της επιφάνειας. Σχετικά μικρές ποσότητες από ιδιαίτερα πυκνά νερά παράγονται στους δύο αυτούς κόλπους και ύστερα από την ανάμιξη τους με τα περιβάλλοντα νερά στην είσοδο των κόλπων, βυθίζονται για να αναπληρώσουν τα βαθιά νερά της Ερυθράς Θάλασσας. Ωστόσο, και οι παράκτιες περιοχές στο βορειότερο τμήμα της λεκάνης μπορούν επίσης να συμβάλλουν στη δημιουργία βαθιών νερών, αν και περιστασιακά. Τα νερά εκεί μπορεί να γίνουν αρκετά πυκνά ώστε να βουλιάξουν και να φτάσουν στα βαθύτερα στρώματα, ακολουθώντας την κλίση του πυθμένα (Paradopoulos et al., 2015).

Για τη δημιουργία του RSOW δεν υπάρχουν διαθέσιμες παρατηρήσεις. Οι Sofianos και Johns (2003), χρησιμοποιώντας την προσέγγιση ενός αριθμητικού μοντέλου, μελέτησαν τις διαδικασίες που εμπλέκονται στη δημιουργία αυτής της μάζας νερού. Τα αποτελέσματα έδειξαν πως το RSOW δημιουργείται μέσω της ανάμιξης της ανοιχτής θάλασσας (open ocean convection), η οποία συμβαίνει στο βορειότερο τμήμα της Ερυθράς Θάλασσας κατά τη διάρκεια της χειμερινής περιόδου. Προτείνουν πως η δημιουργία σχετίζεται με έναν κυκλώνα που έχει κέντρο στις 25 °N. Αυτός ο κυκλώνας έχει παρατηρηθεί σε αρκετές

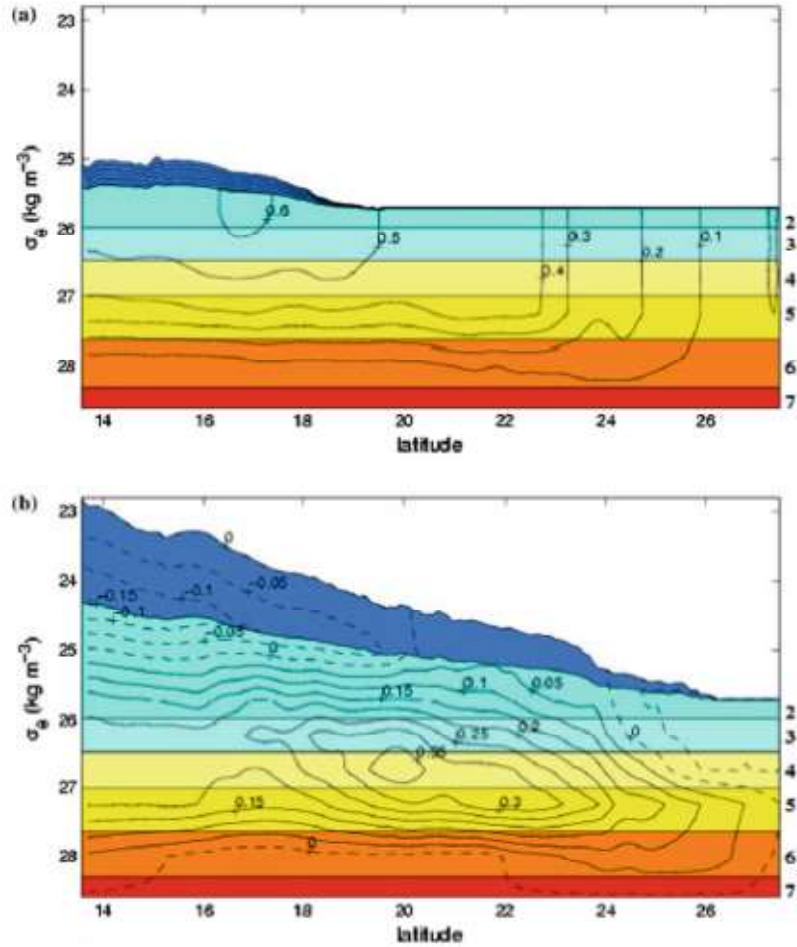
διαφορετικές μελέτες (π.χ. Clifford et al. 1997; Sofianos και Johns 2007; Papadopoulos et al. 2015) και φαίνεται πως είναι ένα μόνιμο χαρακτηριστικό της κυκλοφορίας στο βόρειο τμήμα της λεκάνης. Μέσα σε αυτόν τον κυκλώνα, το στρώμα ανάμιξης φτάνει σε πολύ υψηλές τιμές πυκνότητας καθ' όλη τη διάρκεια του χρόνου και στο μέσον της χειμερινής περιόδου, το στρώμα ανάμιξης έχει πυκνότητες πολύ κοντά σε αυτές του στρώματος της RSOW.

Άμεσες παρατηρήσεις, καθώς και αποτελέσματα μοντέλων συμφωνούν πως οι μάζες νερού που δημιουργούνται μέσα στη λεκάνη κυκλοφορούν σε δύο κύτταρα, τα οποία καλύπτουν όλο το εύρος της λεκάνης (Εικόνα 1.6): (i) ένα επιφανειακό κύτταρο, που μεταφέρει το RSOW προς το στενό του Bab-el-Mandeb για να σχηματίσει το βασικό πυρήνα της εκροής νερών από την Ερυθρά Θάλασσα και (ii) ένα βαθύτερο κύτταρο που επανακυκλοφορεί το RSDW στα βαθύτερα στρώματα της λεκάνης, όπως φαίνεται από την κατανομή του οξυγόνου στα βαθιά στρώματα στην Εικόνα 1.4. Η αλληλεπίδραση των δύο κυττάρων και οι σχετικές διεργασίες ανάμιξης δεν είναι γνωστές. Επιπλέον, σημαντική είναι και η ύπαρξη ενός πιο ρηχού κυττάρου, το οποίο δημιουργείται κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού και σχετίζεται με το GAIW (Sofianos 2000).

Οι θερμοαλατικές διεργασίες φαίνεται να είναι ο πιο σημαντικός μηχανισμός που καθορίζει την συνολική κυκλοφορία στην Ερυθρά Θάλασσα (Sofianos and Johns 2003). Η δομή του επιφανειακού θερμοαλατικού κυττάρου σχετίζεται με την απώλεια πλευστότητας, κυρίως λόγω των μεγάλων τιμών στο ρυθμό εξάτμισης, η οποία αυξάνει την πυκνότητα και παράγει μια βαθμίδα πίεσης προς βορρά.

Η απλούστερη θεωρία για τη θερμοαλατική κυκλοφορία στην Ερυθρά Θάλασσα είναι ένα δισδιάστατο μοντέλο από τον Phillips (1966), το οποίο καθοδηγείται από μια ομοιόμορφη απώλεια πλευστότητας σε όλη την επιφάνεια της λεκάνης και με την κυκλοφορία σε σταθερή κατάσταση. Η κυκλοφορία που αναπαράγεται από το μοντέλο είναι μια ροή δύο στρωμάτων, ενώ η ισχύς της ροής ανταλλαγής στο ύψωμα συμφωνεί ποιοτικά με τις παρατηρήσεις κατά τη διάρκεια του χειμώνα.

Τα βασικά εποχικά θερμοαλατικά κύτταρα αναπαράχθηκαν με επιτυχία στην προσομοίωση με αριθμητικό μοντέλο από τους Sofianos και Johns (2002) και Yao et al. (2014). Τα κύτταρα κυκλοφορίας που παράχθηκαν από τους Sofianos και Johns (2002) παρουσιάζονται στην Εικόνα 1.7, σε άξονες γεωγραφικού πλάτους- πυκνότητας (δεδομένου ότι το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε είναι ισόπυκνο). Ένα μοναδικό ευρύ κύτταρο ανακυκλοφορίας εμφανίζεται το χειμώνα (Εικόνα 1.7 (a)) με κέντρο στις 17 °N περίπου. Η κυκλοφορία του καλοκαιριού (Εικόνα 1.7 (b)) παρουσιάζει δύο κύτταρα, ένα ρηχό στο νοτιότερο τμήμα της λεκάνης και ένα βαθύτερο με κέντρο στο μέσο της λεκάνης. Το επιφανειακό κύτταρο σχετίζεται με την αναστροφή της επιφανειακής ροής και την εισροή του GAIW, κατά την οποία τα νερά που εισέρχονται στη λεκάνη αναβλύζουν ώστε να τροφοδοτήσουν τη ρηχή εκροή. Το δεύτερο, πιο ρηχό, κύτταρο συνδέει την ενδιάμεσου βάθους εισροή με την εκροή της RSOW, η οποία έχει την μισή ισχύ της το καλοκαίρι σε σύγκριση με το χειμώνα.



Εικόνα 1.7: Ζωνικές ροές μεταφοράς όγκου (σε Sv) σε συντεταγμένες γεωγραφικού πλάτους-πυκνότητας για (a) το μήνα Δεκέμβριο και (b) για τον μήνα Ιούνιο, από την προσομοίωση του MICOM (Sofianos and Johns, 2002). Τα χρώματα δείχνουν τα διαφορετικά στρώματα του ισόπυκνου μοντέλου, και οι ισοπληθείς (contours) αναπαριστούν τα κύτταρα κυκλοφορίας (σημειώστε πως τα δύο σχήματα έχουν διαφορετικά διαστήματα μεταξύ των contours). Κατά τη διάρκεια του χειμώνα (a), η RSOW δημιουργείται στη βόρεια Ερυθρά Θάλασσα βορειότερα των 23°N και κινείται νότια προς το στενό (αριστερό μέρος της εικόνας) σε πυκνότητες (σ_θ) μεταξύ 26.5 και 27.8 kg/m^3 . Κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού (b), η GAIW εισέρχεται σε ενδιάμεσες πυκνότητες ($\sigma_\theta=24.5 - 26.0 \text{ kg/m}^3$), ένα μέρος της αναβλύζει στην κινούμενη προς το νότο RSSW, νοτιότερα από τις 20°N, ενώ η υπόλοιπη συνεχίζει να κινείται προς το βορά και βυθίζεται ανάμεσα στις 22 με 26°N.

Λαμβάνοντας υπόψιν το ρυθμό δημιουργίας του RSOW, καθώς και τον όγκο του βαθύτερου κλάδου του επιφανειακού κυττάρου, ο ρυθμός ανανέωσης αυτού του στρώματος είναι της τάξης μερικών ετών. Προσομοιώσεις έχουν δείξει πως τα 2/3 της συνολικής εκροής των βαθιών νερών της Ερυθράς Θάλασσας στον Κόλπο του Aden (περίπου 0.25 Sv) δημιουργούνται στον κυκλώνα με κέντρο τις 25 °N, ενώ το υπόλοιπο δημιουργείται βορειότερα από τις 20 °N μέσω της ανάμιξης με τα περιβάλλοντα στρώματα.

Ο χρόνος ανανέωσης του βαθύτερου κυττάρου, το οποίο περιλαμβάνει το RSDW, είναι σε αντίθεση με το επιφανειακό κύτταρο της τάξης των δεκαετιών. Στον Πίνακα 1.2 δίνονται οι χρόνοι ανανέωσης που έχουν υπολογιστεί από διάφορες μελέτες. Βασισμένος σε δεδομένα ¹⁴C και ³He από το GEOSECS Indian Expedition, ο Cember (1988) εκτίμησε πως ο χρόνος παραμονής των βαθιών νερών είναι περίπου 36 χρόνια. Οι Woelk και Quadfasel (1996) χρησιμοποίησαν υδρογραφικά δεδομένα σε ένα μονοδιάστατο μοντέλο και μακράς διάρκειας ατμοσφαιρική επίδραση (κλιματολογία) για να εκτιμήσουν το χρόνο παραμονής των βαθιών νερών ανάμεσα σε 40 και 90 χρόνια. Πρότειναν, επίσης, πως η δημιουργία βαθιών νερών είναι επεισοδιακή και συμβαίνει μόνο κάτω από ακραίες μετεωρολογικές συνθήκες (“convection winters”). Αυτοί οι ακραίοι χειμώνες εμφανίζονται κάθε 4-7 χρόνια. Η επίδραση αυτής της μεταβλητότητας της χειμερινής ατμόσφαιρας στη δημιουργία της RSOW δεν έχει μελετηθεί πλήρως.

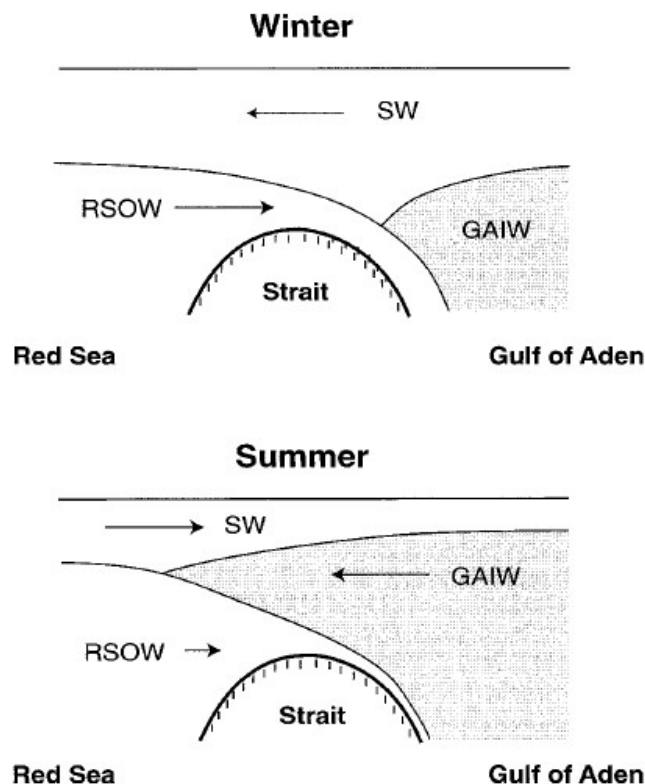
Η κυκλοφορία του RSDW είναι σχετικά αργή και μπορεί να ανιχνευθεί μόνο από την κατανάλωση του οξυγόνου (Sofianos and Johns 2007), καθώς κινείται προς το νότο σε ένα βαθύ στρώμα και επιστρέφει προς το βορρά σε ενδιάμεσα βάθη. Υπάρχουν λίγα στοιχεία που δείχνουν το RSDW να διαφεύγει από το βυθό του στενού του Bab-el-Mandeb, και ως εκ τούτου, μπορούμε να υποθέσουμε πως αυτό το στρώμα αναβλύζει στη βάση του στρώματος του RSOW με έναν ρυθμό σχεδόν ίδιο με αυτόν που δημιουργείται. Η συμβολή αυτού του κυττάρου στην εκροή της Ερυθράς Θάλασσας είναι μικρή σε σύγκριση με αυτή του RSOW που δημιουργείται σε ενδιάμεσα βάθη, ωστόσο, παίζει σημαντικό ρόλο στην ανακύκλωση των βαθιών νερών της Ερυθράς Θάλασσας.

Author	Method	Residence time (yr)	Rate of formation (Sv)
Manins, 1973	Hydrological model	320	-
Maillard, 1974	Hydrography	100	0,04
Wyrтки, 1974	Oxygen budget	72	0,06
Kuntz, 1985	Tritium, He-3 (multibox-model)	40	0,016
Cember, 1988	C-14, He-3 (box model)	36	0,16
Eshel et al., 1994	T, S, He-3 (box model)	35	0,16
Woelk & Quadfasel, 1996	Hydrography	40-90	0,05-0,08
Jean-Baptiste et al., 2004	C-14, He-3 (box model)	26-60	0,09

Πίνακας 1.1: Σύνοψη των εκτιμήσεων των χρόνων παραμονής και των ρυθμών δημιουργίας των βαθιών νερών της Ερυθράς Θάλασσας.

1.6 Ανταλλαγές ανάμεσα στην Ερυθρά Θάλασσα και τον κόλπου του Aden στο στενό του Bab el Mandeb

Η κυκλοφορία και οι διαδικασίες δημιουργίας μαζών νερού μέσα στη λεκάνη της Ερυθράς Θάλασσας αντικατοπτρίζονται στην ανταλλαγή της με τις γειτονικές λεκάνες. Όπως αναφέρθηκε ήδη, η μόνη σημαντική σύνδεση της Ερυθράς Θάλασσας με τον παγκόσμιο ωκεανό είναι το στενό του Bab el Mandeb. Υπάρχει έντονη εποχική μεταβλητότητα στην ροή ανταλλαγής μέσω του στενού (Thompson, 1939), όπως φαίνεται στην Εικόνα 1.8 από τον Smeed (2000). Κατά τη διάρκεια του χειμώνα, στην κυκλοφορία κυριαρχεί μια "inverse estuarine" ροή ανταλλαγής στο στενό του Bab-el-Mandeb, με μια επιφανειακή εισροή σχετικά γλυκού νερού και μια εκροή νερού υψηλότερης αλατότητας στα βαθύτερα στρώματα, ενώ το καλοκαίρι η στρώματωση αλλάζει σε ένα σύστημα τριών στρωμάτων με ένα γλυκό στρώμα σε ενδιάμεσα βάθη, ανάμεσα σε δύο στρώματα με πολύ υψηλότερη αλατότητα.



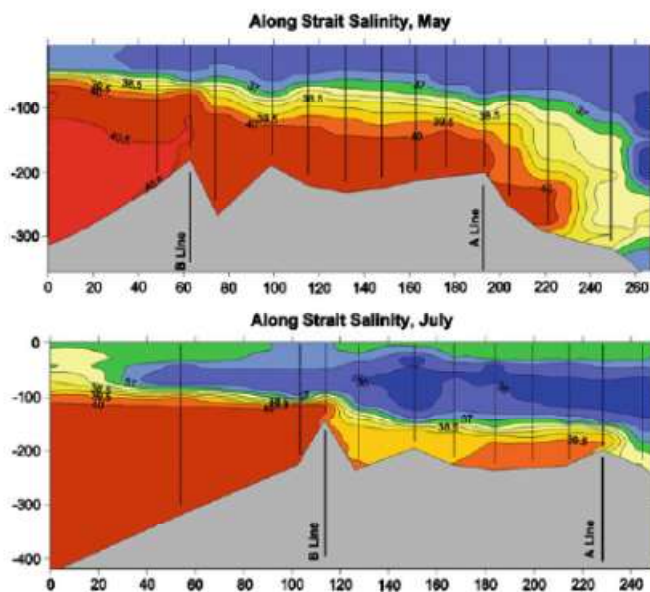
Εικόνα 1.8: Σχηματική αναπαράσταση των δύο μοτίβων κυκλοφορίας στο στενό του Bab el Mandeb κατά τη χειμερινή και καλοκαιρινή περίοδο. Το SW αντιπροσωπεύει την επιφανειακή μάζα νερού, το GAIW την Gulf of Aden Intermediate Water και το RSOW αντιπροσωπεύει την Red Sea Outflow Water (Smeed, 2000).

Μια ιταλική αποστολή με το AMIRAGLIO MAGNAGHI πραγματοποίησε μετρήσεις των ρευμάτων κατά μήκος του στενού του Bab el Mandeb κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού (Vercelli 1931a, b) και για πρώτη φορά αποδείχτηκε η παρουσία της ανταλλαγής τριών-στρωμάτων κατά την περίοδο αυτή, με μια επιφανειακή και μια βαθιά εκροή αλλά και μια

ενδιάμεση επιπλέον εισροή. Το μοτίβο αυτό της καλοκαιρινής ανταλλαγής ενισχύθηκε αργότερα και από άλλες παρατηρήσεις (Sewell 1934; Thompson 1939; Maillard and Soliman 1986) και ποσοτικοποιήθηκε από άμεσες παρατηρήσεις μακράς διάρκειας στο στενό του Bab el Mandeb (Murray and Johns 1997).

Η διαφορετική στρωμάτωση κατά τη διάρκεια της χειμερινής και της καλοκαιρινής περιόδου μπορεί εύκολα να απεικονισθεί από τα προφίλ της αλατότητας στο στενό. Στην Εικόνα 1.9 παρουσιάζονται δύο προφίλ αλατότητας που αντιστοιχούν στο χειμερινό και καλοκαιρινό μοτίβο κυκλοφορίας, από ταξίδια στο Bab el Mandeb (Murray and Johns 1997).

Το σύστημα δύο στρωμάτων (Εικόνα 1.8) στο στενό του Bab el Mandeb, το οποίο εμφανίζεται το χειμώνα (Οκτώβριος-Μάιος) αποτελείται από: ένα επιφανειακό στρώμα (θερμό, με θερμοκρασία 25°C και χαμηλή αλατότητα 36.5 psu) που εισέρχεται στην Ερυθρά Θάλασσα από τον Κόλπο του Aden, το οποίο καθοδηγείται από τους ισχυρούς SSE ανέμους και ένα βαθύ στρώμα (με χαμηλότερη θερμοκρασία 23°C και υψηλότερη αλατότητα 40.5 psu), που εξέρχεται από την Ερυθρά Θάλασσα προς τον κόλπο του Aden, ως αποτέλεσμα της υψηλότερης πυκνότητας του νερού. Αυτά τα δύο στρώματα έχουν τα φυσικά χαρακτηριστικά του Κόλπου του Aden (το επιφανειακό στρώμα) και της Ερυθράς Θάλασσας (το βαθύ στρώμα).



Εικόνα 1.9: Κατανομή της αλατότητας σε μια τομή κατά μήκος του στενού κατά τη διάρκεια του Μαΐου 1995 (πάνω) και Ιουλίου 1996 (κάτω), από τη μελέτη του στενού του Bab el Mandeb από τους Murray and Johns (1997). Οι μετρήσεις του Μαΐου έχουν ληφθεί κατά τη διάρκεια της τελικής φάσης της χειμερινής δύο-στρωμάτων ανταλλαγής, αλλά εξακολουθεί να είναι αντιπροσωπευτικές των συνθηκών του χειμώνα. Οι

μετρήσεις του Ιουλίου έχουν ληφθεί κατά τη μέγιστη εποχική εισροή του GAIW στην Ερυθρά θάλασσα. Η Γραμμή A αντιστοιχεί στην περιοχή Perim Narrows και η Γραμμή B στην περιοχή Hanish Sill.

Το καλοκαίρι (Ιούνιος-Σεπτέμβριος), στη νότια Ερυθρά Θάλασσα, όταν οι άνεμοι από SSE αντιστρέφονται σε NNW ανέμους, οι οποίοι φυσούν στον κόλπο του Aden, εμφανίζεται ένα σύστημα τριών στρωμάτων (Εικόνες 1.8 και 1.9). Τα τρία αυτά στρώματα αποτελούνται από (α) ένα επιφανειακό στρώμα εκροής προς τον κόλπο του Aden (το βάθος των 40 m περίπου, θερμό, θερμοκρασίας ~29°C, και υψηλής αλατότητας ~37.5 psu), το οποίο διέπεται από την αναστροφή των νότιων ανέμων και την ισχυρή ανάβλυση στην είσοδο της Ερυθράς

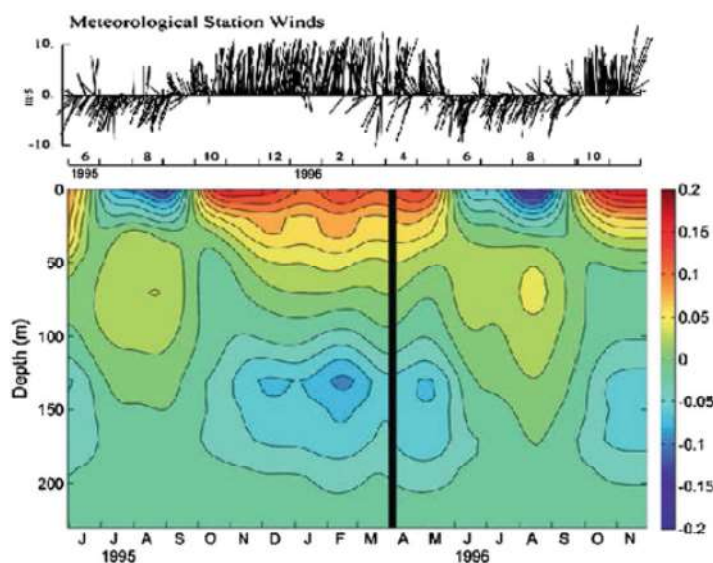
Θάλασσας, (β) ένα εισερχόμενο υποεπιφανειακό στρώμα στα ενδιάμεσα βάθη 40 m με 80 m (ψυχρό, ~18°C, χαμηλής αλατότητας ~36.0 psu) από τον κόλπο του Aden, το οποίο οφείλεται στην αναστροφή της βαθμίδας πίεσης πάνω από το ύψωμα (Patzert, 1972a) και (γ) ένα πυκνό βαθύ στρώμα εκροής από την Ερυθρά Θάλασσα (σε βάθος) κάτω από τα 180 m (ψυχρό, ~21°C, πολύ υψηλής αλατότητας ~40.0 psu).

Ο Siedler (1969) υπολόγισε τη μέση ετήσια μεταφορά νερού από την Ερυθρά Θάλασσα μέσω του στενού του Bab el Mandeb (χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις του Knudsen) στα 0.33 Sv. Επιπλέον, ο Patzert (1974a) εκτίμησε τη μέγιστη εκροή από την Ερυθρά Θάλασσα μέσω του στενού στα 0.57 Sv κατά τη χειμερινή περίοδο, μιας εκροής που μειώνεται κατά 12% στις αρχές του καλοκαιριού και κατά 6% στο τέλος του καλοκαιριού. Το βαθύ στρώμα της ροής ανταλλαγής έχει υπολογιστεί πως κυμαίνεται από μία μέση ετήσια τιμή 0.3 Sv έως ένα μέγιστο 0.6 Sv το χειμώνα (Morcos, 1970; Maillard & Soliman, 1986).

Οι πιο πρόσφατες μακράς διάρκειας ολοκληρωμένες παρατηρήσεις στο στενό του Bab el Mandeb πραγματοποιήθηκαν από τους Murray και Johns (1997) για ένα διάστημα 18 μηνών. Οι παρατηρήσεις ελήφθησαν από μια μακράς διάρκειας πόντιση ακυροβολίων ρευματογράφων και Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP) στην περιοχή του Hanish Sill και των Perim Narrows. Βρέθηκε πως το βαθύ στρώμα εκροής ήταν ισχυρό ακόμα και τον Ιούνιο με ταχύτητα 0.6 m/s και ρυθμό μεταφοράς όγκου 0.4 Sv. Κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού (Ιούλιος ως μέσα Σεπτέμβρη), η ταχύτητα της εκροής του βαθύτερου στρώματος μειώνεται στα 0.2 m/s και ο ρυθμός μεταφοράς του όγκου μειώνεται στα 0.05 Sv. Κατά τη διάρκεια του χειμώνα (Νοέμβριος-Μάρτιος), η ταχύτητα του βαθύτερου στρώματος μετρήθηκε στα 0.8-1.0 m/s και του υπερκείμενου στρώματος στα 0.4-0.6 m/s. Η μέγιστη ανταλλαγή καταγράφηκε στα μέσα Φεβρουαρίου, με τη μεταφορά να φτάνει τα 0.7 Sv.

Το προφίλ μεταφοράς του όγκου για το Perim Narrows, το οποίο εξάγεται από αυτές τις παρατηρήσεις, λαμβάνεται με την ολοκλήρωση της ροής σε όλο το πλάτος του στενού και παρουσιάζεται στην Εικόνα 1.10 (Johns and Sofianos 2012).

Είναι εμφανής η εναλλαγή στο προφίλ της ροής μεταξύ των εποχών, δύο στρώματα το χειμώνα (Οκτώβριος-Μάιος) και τρία το καλοκαίρι (Ιούνιος-Σεπτέμβριος). Με βάση αυτά τα δεδομένα, εκτιμήθηκε η μέση μηνιαία μεταφορά των τριών στρωμάτων (Sofianos et al. 2002). Η ισχύς της χειμερινής ανταλλαγής φτάνει στο μέγιστο της κατά τη διάρκεια του Φεβρουαρίου, όταν το στρώμα του RSOW έχει ένα ρυθμό εκροής πάνω από 0.6 Sv. Αυτή η εκροή εξασθενεί το καλοκαίρι, με ένα ελάχιστο 0.05 Sv τον Αύγουστο. Κατά τη διάρκεια του Αυγούστου, η τριών στρωμάτων ανταλλαγή είναι παρούσα στο στενό και η εισχώρηση του GAIW στην Ερυθρά Θάλασσα φτάνει ένα ρυθμό 0.3 Sv περίπου.



Εικόνα 1.10: Χρονοσειρά του ανέμου από μετεωρολογικό σταθμό που βρίσκεται στο στενό του Bab el Mandeb και το προφίλ της μεταφοράς ($10^4 \text{ m}^2/\text{s}$) συναρτήσει του βάθους στο στενό του Perim. Η εποχικότητα της ανταλλαγής είναι ενισχυμένη μετά τη χρήση του low-pass φίλτρου (60 ημέρες). Το θετικό πρόσημο στη μεταφορά αντιστοιχεί σε εισροή νερού στην Ερυθρά Θάλασσα από τον κόλπο του Aden. Η μαύρη λωρίδα αντιστοιχεί στην περίοδο κατά την οποία τα αγκυροβόλια επισκευάζονταν στα μέσα του πειράματος (Johns and Sofianos, 2012).

Οι μηχανισμοί που ελέγχουν αυτή την εποχική εναλλαγή στην ροή ανταλλαγής στο στενό του Bab-al-Mandab είναι υπό διερεύνηση. Βασιζόμενος στην σύμπτωση της αναστροφής του πεδίου του ανέμου με την αναστροφή της επιφανειακής ροής (Εικόνα 1.10), ο Patzert (1974a) υπέθεσε πως η μεταβολή στην τάση του ανέμου και οι σχετικές μεταβολές στην επιφάνεια της θάλασσας στη νότια Ερυθρά Θάλασσα και τον Κόλπο του Aden ρυθμίζουν την επιφανειακή κυκλοφορία στην περιοχή, καθ'όλη τη διάρκεια του χρόνου, καθώς και τη ροή ανταλλαγής στο στενό του Bab el Mandeb. Για να εξηγήσει το σύστημα των τριών στρωμάτων και τη σχετική εισχώρηση του GAIW στα ενδιάμεσα βάθη κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού, ο Patzert πρότεινε πως οι βορειοδυτικοί άνεμοι, καθώς και η πτώση του επιπέδου της επιφάνειας της θάλασσας στα βόρειο-βορειοδυτικά του κόλπου του Aden λόγω της ανάβλυσης που προκαλείται από τους ανέμους, αναγκάζει την εκροή ενός ρηχού επιφανειακού στρώματος από την Ερυθρά Θάλασσα. Ο ίδιος μηχανισμός μετατοπίζει τις υποεπιφανειακές ισόπυκνες προς τα πάνω, παράγοντας έτσι μια αντίθετη βαθμίδα πίεσης στα ενδιάμεσα βάθη, η οποία με τη σειρά της προκαλεί την εισχώρηση του GAIW. Ένας διαφορετικός μηχανισμός, ο οποίος ρυθμίζει την εποχική εναλλαγή της ροής ανταλλαγής ανάμεσα στην Ερυθρά Θάλασσα και τον κόλπο του Aden, βασισμένος στις ροές πλευστότητας πάνω από τη λεκάνη της Ερυθράς Θάλασσας, προτάθηκε από τον Sofianos (2000) με τη χρήση μιας τροποποιημένης εκδοχής του μοντέλου του Phillips (1996). Αυτό το μοντέλο κατάφερε να εξηγήσει την υποεπιφανειακή εισροή κατά τη διάρκεια της καλοκαιρινής περιόδου. Πειράματα με μοντέλα από τους Sofianos και Johns (2002) επαλήθευσαν την υπόθεση του Patzert για τον ανεμογενή μηχανισμό. Επίσης έδειξαν πως ο συνδυασμός των δύο μηχανισμών, της τάσης του ανέμου και της ροής πλευστότητας,

μπορούν να αναπαράγουν το εποχικό προφίλ και την ποσότητα των μαζών νερού που εισέρχονται στην Ερυθρά Θάλασσα.

Υπολογίζοντας το μέσο όρο του μεταφερόμενου όγκου από τα τρία στρώματα συνολικά, σε έναν ετήσιο κύκλο, μπορούμε να εκτιμήσουμε τη μέση ισχύ της ροής ανταλλαγής στο Bab el Mandeb. Η μέση ετήσια εκροή του RSOW, η οποία αποτελεί ένα καλό μέτρο για την συνολική ανταλλαγή, εκτιμήθηκε στα 0.36 Sv, και παρουσίασε μεγάλο εύρος κατά τη διάρκεια του ετήσιου κύκλου, και κυμαίνεται από 0.6 Sv στην μέση της χειμερινής περιόδου (Φεβρουάριος) έως τα 0.1 Sv στη μέση της καλοκαιρινής περιόδου. Η αναστροφή της επιφανειακής ροής και η είσοδος της GAIW βρέθηκε να διαρκεί 4 μήνες (Ιούνιος-Σεπτέμβριος), κατά τους οποίους 0.22 Sv του GAIW κατά μέσο όρο εισέρχονται στη λεκάνη της Ερυθράς Θάλασσας.

Επιπλέον της εποχικής μεταβλητότητας, η ανταλλαγή στο στενό παρουσιάζει έντονες διακυμάνσεις σε μικρότερες χρονικές κλίμακες, συμπεριλαμβανομένης της παλίρροιας (ημήμερησια κατά κύριο λόγο) και συνοπτικών χρονικών κλιμάκων, κλίμακες οι οποίες κυμαίνονται από λίγες μέρες μέχρι μερικές εβδομάδες. Οι μεταβολές στην μεταφορά μέσω του στενού σε συνοπτικές χρονικές κλίμακες (από μέρες μέχρι και εβδομάδες) εμφανίζονται πολύ έντονες, και φτάνουν σε τιμές σχεδόν διπλάσιες από το μέσο ρυθμό ανταλλαγής μέσω του στενού που οφείλονται στο έλλειμμα νερού λόγω της εξάτμισης στην Ερυθρά Θάλασσα (Johns and Sofianos 2012). Ένα πολύ ενδιαφέρον χαρακτηριστικό είναι το μεγάλο εύρος της μεταβλητότητας της μεταφοράς μέσω του στενού η οποία εμφανίζεται σε υψηλές συχνότητες και μπορεί να φτάσει μέχρι και 1 Sv (συγκρίσιμο σε μέγεθος με τη συνολική εισροή/εκροή μέσω του στενού). Το μεγαλύτερο μέγεθος της μεταβλητότητας παρουσιάζεται κοντά σε περιοδικότητες 5-6 ημερών, που αντιστοιχούν στην συχνότητα Helmholtz της Ερυθράς Θάλασσας, όπως καθορίζεται από την επιφάνεια της Ερυθράς Θάλασσας και τα χαρακτηριστικά του στενού (Johns and Sofianos 2012).

Η μεταβλητότητα στη συνοπτική μεταφορά φαίνεται να καθοδηγείται από δύο κυρίαρχους μηχανισμούς: τη μεταβλητότητα του ανέμου πάνω από το στενό και τη μεταβλητότητα της μεγάλης κλίμακας βαρομετρικής πίεσης πάνω από την Ερυθρά Θάλασσα. Οι Johns και Sofianos (2012) ανέπτυξαν ένα απλό, δύο-στρωμάτων μοντέλο της απόκρισης του στενού στον τοπικό άνεμο και της αλλαγής της ατμοσφαιρικής πίεσης πάνω από την Ερυθρά Θάλασσα. Το μοντέλο αυτό ήταν ικανό να αναπαράγει τα βασικά χαρακτηριστικά των παρατηρήσεων, εξηγώντας περίπου το 70% της μεταβολής στην παρατηρούμενη μεταφορά. Η απόκριση στην βαρομετρική πίεση πάνω από την Ερυθρά Θάλασσα είναι κύρια βαροτροπική, ενώ η απόκριση στον άνεμο είναι σχεδόν βαροτροπική σε υψηλές συχνότητες και τείνει σε μια ανταλλαγή δύο στρωμάτων σε χαμηλές συχνότητες.

Οι διεργασίες, οι οποίες σχετίζονται με τη δομή της πυκνότητας και τη ροή, στο στενό του Bab el Mandeb, καθώς και τα χαρακτηριστικά του στενού και οι διαδικασίες τριβής, μπορεί να περιορίσουν τη ροή ανταλλαγής και τη σχετική δυναμική μέσα στην Ερυθρά Θάλασσα.

Δεν υπάρχουν παρατηρήσεις μεγάλης διάρκειας στην είσοδο του Κόλπου του Suez και της Aqaba. Οι λίγες παρατηρησιακές μελέτες (Maillard 1974; Murray et al. 1984) διεξήχθησαν για σχετικά μικρές περιόδους, και τα μοτίβα ανταλλαγής δεν μελετήθηκαν σε λεπτομέρεια στις σχετικές χρονικές κλίμακες. Η συστηματική παρακολούθηση αυτών των δύο Κόλπων είναι ζωτικής σημασίας για την κατανόηση της απόκρισης των περιοχών αυτών στην ατμοσφαιρική επίδραση, καθώς και στην ποσοτικοποίηση της συνεισφοράς των Κόλπων στην θερμοαλατική κυκλοφορία της Ερυθράς Θάλασσας.

Κεφαλαίο 2. Μεθοδολογία

2.1 Εισαγωγή

Για την πραγματοποίηση αυτής της εργασίας χρησιμοποιήσαμε υδρογραφικά δεδομένα από τρεις διαφορετικές ωκεανογραφικές αποστολές, οι οποίες πραγματοποιήθηκαν στην λεκάνη της Ερυθράς Θάλασσας τα έτη 2001, 2010 και 2011, με σκοπό την καλύτερη περιγραφή της υδρογραφικής δομής της και της επίδρασης της στην δυναμική της θαλάσσιας λεκάνης.

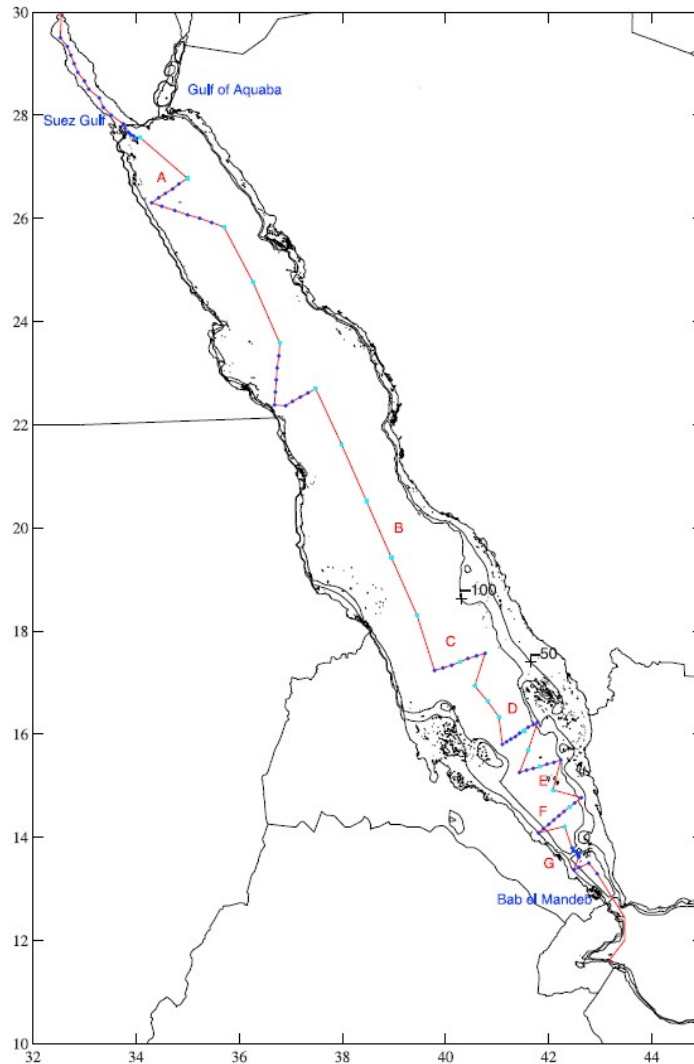
2.2 Ωκεανογραφικές αποστολές

2.2.1 Η ωκεανογραφική αποστολή του 2001

Η πρώτη ωκεανογραφική αποστολή στην Ερυθρά Θάλασσα (Red Sea experiment 2001) πραγματοποιήθηκε με το R/V Maurice Ewing από τις 4 έως τις 19 Αυγούστου του 2001. Ήταν μια αποστολή του Πανεπιστημίου του Miami Rosentiel School of Marine and Atmospheric Science. Ο σκοπός του πειράματος ήταν να γίνει παρακολούθηση της καλοκαιρινής κυκλοφορίας και της υδρογραφίας της Ερυθράς Θάλασσας. Το πείραμα χρηματοδοτήθηκε από το Office of Naval Research (ONR).

Οι κύριοι στόχοι του Red Sea Experiment 2001 ήταν:

1. Η περιγραφή των κύριων χαρακτηριστικών της καλοκαιρινής κυκλοφορίας στο εσωτερικό της Ερυθράς Θάλασσας και τον κόλπο του Suez.
2. Η μελέτη της υδρογραφικής δομής της Ερυθράς Θάλασσας κατά τη διάρκεια της θερινής περιόδου, με έμφαση στη διάδοση και την ανάμειξη του Gulf of Aden Intrusion Water (GAIW) μέσα στη λεκάνη, καθώς και τη διαδρομή που ακολουθεί η επιφανειακή εκροή μέσω του κόλπου του Aden.
3. Η διερεύνηση της ροής ανταλλαγής των τριών στρωμάτων στην περιοχή του υβώματος στο στενό του Bab el Mandeb (Hanish Sill), η οποία λαμβάνει χώρα κατά τη θερινή περίοδο.
4. Η μελέτη των ατμοσφαιρικών συνθηκών πάνω από την Ερυθρά Θάλασσα κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού και η αξιολόγηση του ρόλου της ατμοσφαιρικής επίδρασης στα χαρακτηριστικά της κυκλοφορίας και των μαζών νερού.



Εικόνα 2.1. Χάρτης της Ερυθράς Θάλασσας με τις θέσεις των σταθμών κατά την αποστολή το καλοκαίρι του 2001 (Sofianos and Johns, 2007).

Οι επιστημονικές δραστηριότητες που πραγματοποιήθηκαν πάνω στο πλοίο περιελάμβαναν υδρογραφικές παρατηρήσεις και άμεσες μετρήσεις ρευμάτων στην Ερυθρά Θάλασσα, συνοδευόμενες και από άμεσες μετρήσεις των ατμοσφαιρικών παραμέτρων. Συνολικά πραγματοποιήθηκαν 96 υδρογραφικοί σταθμοί (CTD) και σταθμοί μέτρησης του προφίλ των ρευμάτων (LADCP). Στον Πίνακα 2.1 παρουσιάζονται οι συντεταγμένες, η ημερομηνία, η ώρα και το βάθος κάθε σταθμού. Οι σταθμοί έχουν σχεδιαστεί στο χάρτη της Εικόνας 2.1. Σε κάθε σταθμό μετρήθηκαν τα προφίλ της θερμοκρασίας, της αλατότητας (μέσω της αγωγιμότητας), και η συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου με τη χρήση του συστήματος Sea-Bird-9plus CTD. Επίσης συλλέχθηκαν και δείγματα νερού για τη βαθμονόμηση της αλατότητας και του διαλυμένου οξυγόνου στο ένα τρίτο περίπου των σταθμών. Το προφίλ των ρευμάτων μετρήθηκε με τη χρήση ενός Lowered Acoustic Doppler Current Profiler (LADCP) 300 kHz.

Station No	Date	Time	Latitude	Longitude	Depth
01	Aug 05 2001	09:37:02	35,6688	26,0585	2098
02	Aug 05 2001	15:32:28	35,2652	26,6585	800
03	Aug 07 2001	21:40:53	29,5000	32,5293	61
04	Aug 08 2001	11:11:33	29,5016	32,5300	59
05	Aug 08 2001	12:55:31	29,3321	32,6675	57
06	Aug 08 2001	14:23:38	29,1635	32,7349	58
07	Aug 08 2001	15:52:30	28,9976	32,8001	58
08	Aug 08 2001	17:28:07	28,8296	32,8676	59
09	Aug 08 2001	19:17:38	28,6631	32,9970	60
10	Aug 08 2001	21:18:33	28,5042	33,0810	50
11	Aug 08 2001	23:27:29	28,3343	33,2859	55
12	Aug 09 2001	01:31:45	28,1507	33,3643	66
13	Aug 09 2001	03:13:44	27,9991	33,5197	75
14	Aug 09 2001	05:20:28	27,8290	33,7527	75
15	Aug 09 2001	06:43:04	27,7459	33,7867	56
16	Aug 09 2001	07:59:53	27,6660	33,8509	78
17	Aug 09 2001	09:13:26	27,6181	33,8988	158
18	Aug 09 2001	10:23:36	27,6003	33,9486	293
19	Aug 09 2001	12:03:31	27,5503	34,0175	895
20	Aug 09 2001	13:39:44	27,5662	34,0785	821
21	Aug 09 2001	21:50:12	26,7745	34,9951	1121
22	Aug 10 2001	02:10:03	26,6674	34,8309	1159
23	Aug 10 2001	06:17:44	26,5687	34,7058	882
24	Aug 10 2001	08:17:56	26,4833	34,5668	1019
25	Aug 10 2001	10:14:39	26,3996	34,4345	797
26	Aug 10 2001	12:19:19	26,2999	34,2999	652
27	Aug 10 2001	14:26:32	26,2324	34,4988	641
28	Aug 10 2001	16:43:30	26,1497	34,7504	678
29	Aug 10 2001	19:11:06	26,0678	34,9968	799
30	Aug 10 2001	21:33:42	26,0024	35,2311	869
31	Aug 10 2001	23:49:07	25,9186	35,4656	824
32	Aug 11 2001	02:10:02	25,8329	35,7008	1147
33	Aug 11 2001	09:49:07	24,7650	36,2628	1108
34	Aug 11 2001	17:56:41	23,5818	36,7841	1286
35	Aug 11 2001	20:41:33	23,3334	36,7678	1152
36	Aug 11 2001	23:13:20	23,1006	36,7341	743
37	Aug 12 2001	01:43:22	22,8667	36,7169	725
38	Aug 12 2001	03:56:01	22,6337	36,6990	836
39	Aug 12 2001	07:27:56	22,3818	36,6821	65
40	Aug 12 2001	09:21:50	22,3663	36,8992	667
41	Aug 12 2001	11:20:35	22,4503	37,0327	655
42	Aug 12 2001	11:20:35	22,4503	37,0327	655
43	Aug 12 2001	15:50:36	22,6162	37,3330	912

44	Aug 12 2001	18:00:25	22,6973	37,4824	1006
45	Aug 13 2001	01:29:16	21,6167	37,9845	1452
46	Aug 13 2001	09:41:16	20,5179	38,4660	747
47	Aug 13 2001	17:28:19	19,4178	38,9509	2141
48	Aug 14 2001	02:26:48	18,3001	39,4462	465
49	Aug 14 2001	09:25:02	17,2345	39,7848	201
50	Aug 14 2001	10:57:32	17,2829	39,9496	321
51	Aug 14 2001	20:02:55	17,3334	40,1166	1216
52	Aug 14 2001	22:13:17	17,3993	40,2817	1203
53	Aug 15 2001	00:31:18	17,4656	40,4345	1024
54	Aug 15 2001	02:32:26	17,5163	40,6007	516
55	Aug 15 2001	04:20:08	17,5658	40,7667	171
56	Aug 15 2001	08:31:07	16,9343	40,5655	1057
57	Aug 15 2001	12:05:22	16,6332	40,8163	1169
58	Aug 15 2001	16:15:17	16,3330	41,0332	880
59	Aug 15 2001	20:20:40	15,7994	41,1003	39
60	Aug 15 2001	21:18:47	15,8509	41,1820	44
61	Aug 15 2001	22:20:20	15,9003	41,2673	588
62	Aug 15 2001	23:43:09	15,9490	41,3516	705
63	Aug 16 2001	01:19:22	16,0165	41,4342	737
64	Aug 16 2001	02:47:12	16,0666	41,5178	1537
65	Aug 16 2001	04:56:33	16,1336	41,6000	657
66	Aug 16 2001	06:24:34	16,1835	41,6993	481
67	Aug 16 2001	07:42:04	16,2334	41,7833	51
68	Aug 16 2001	11:19:28	15,6837	41,6000	628
69	Aug 16 2001	14:59:51	15,2500	41,4332	58
70	Aug 16 2001	16:25:28	15,2998	41,5666	57
71	Aug 16 2001	17:52:06	15,3322	41,7000	65
72	Aug 16 2001	19:12:13	15,3655	41,8327	761
73	Aug 16 2001	21:05:56	15,4157	41,9659	527
74	Aug 16 2001	22:46:11	15,4486	42,0998	68
75	Aug 17 2001	00:00:05	15,4990	42,2333	51
76	Aug 17 2001	04:12:41	14,9167	42,0828	497
77	Aug 17 2001	08:15:30	14,7671	42,6337	60
78	Aug 17 2001	09:47:20	14,6670	42,5000	325
79	Aug 17 2001	12:00:27	14,5828	42,4035	528
80	Aug 17 2001	13:47:37	14,4998	42,2995	428
81	Aug 17 2001	15:23:33	14,4177	42,2004	269
82	Aug 17 2001	17:01:33	14,3339	42,1003	183
83	Aug 17 2001	18:29:03	14,2503	42,0003	60
84	Aug 17 2001	19:39:28	14,1661	41,8986	45
85	Aug 17 2001	20:44:56	14,0855	41,7990	34
86	Aug 17 2001	23:48:19	14,2085	42,3077	312
87	Aug 18 2001	02:59:11	13,7924	42,4495	186

88	Aug 18 2001	04:07:23	13,7358	42,4852	133
89	Aug 18 2001	05:08:01	13,7109	42,5399	147
90	Aug 18 2001	06:02:36	13,6863	42,5580	140
91	Aug 18 2001	06:47:39	13,6691	42,5670	134
92	Aug 18 2001	07:33:23	13,6512	42,5768	130
93	Aug 18 2001	08:16:01	13,6308	42,5813	160
94	Aug 18 2001	09:06:49	13,6118	42,5839	326
95	Aug 18 2001	11:38:45	13,3644	42,4900	150
96	Aug 18 2001	12:49:32	13,4132	42,5972	127
97	Aug 18 2001	14:21:49	13,4993	42,7766	163
98	Aug 18 2001	16:46:54	13,2918	42,9406	201

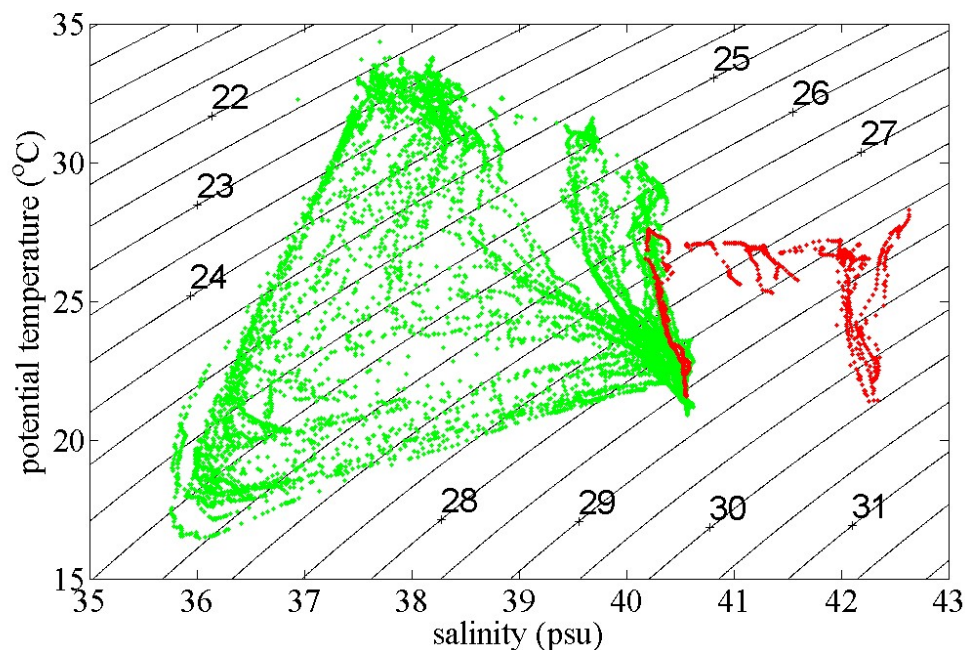
Πίνακας 2.1. Ημερομηνία, ώρα, συντεταγμένες και βάθος των σταθμών CTD/ LADCP που πραγματοποιήθηκαν κατά το Red Sea Experiment (2001).

Η ομάδα M-AERI του University of Miami κατέγραφε συνεχώς μετρήσεις υψηλής ποιότητας, τόσο μετεωρολογικές όσο και Marine – Atmospheric Emitted Radiance Interferometer (M-AERI) με τη βοήθεια των αισθητήρων που βρίσκονταν πάνω στο R/V Maurice Ewing. Στις μετρήσεις περιλαμβάνεται η επιφανειακή θερμοκρασία (από το πρώτο χιλιοστό της επιφάνειας του θαλασσινού νερού) κατά μήκος της πορείας του πλοίου, η θερμοκρασία του αέρα ακριβώς πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας, η ταχύτητα του ανέμου, η διεύθυνση του ανέμου, η θερμοκρασία του αέρα, η βαρομετρική πίεση, η σχετική υγρασία, η νεφοκάλυψη, η μικρού μήκους κύματος και η μεγάλου μήκους κύματος ακτινοβολία. Όλα τα στάνταρ μετεωρολογικά πεδία καταγράφηκαν επίσης από το πακέτο καιρού του R/V Maurice Ewing.

Οι τιμές της θερμοκρασίας της επιφάνειας και της αλατότητας μετρούνταν συνεχώς και καταγράφονταν στον υπολογιστή του πλοίου, χρησιμοποιώντας έναν καταγραφέα θερμοκρασίας-αγωγιμότητας εγκατεστημένο στην γραμμή πρόσληψης νερού του πλοίου.

Τα επιφανειακά ρεύματα μετρούνταν συνεχώς με ένα Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP). Το εύρος βάθους καλής ποιότητας δεδομένων συνήθως εκτείνεται μέχρι τα 200 m, ανάλογα με τις θαλάσσιες συνθήκες.

Κατά τη διάρκεια του πρώτου μέρους του ταξιδιού, μελετήθηκε ο Κόλπος του Suez με μετρήσεις CTD και LADCP κατά μήκος του άξονα του, με μέση χωρική ανάλυση τα 17 km (ακολουθώντας τα βαθύτερα σημεία του Κόλπου). Σε αυτή την τομή καταγράφηκαν εξαιρετικά υψηλές τιμές αλατότητας (η μέγιστη τιμή που παρατηρήθηκε ήταν 42.63 psu) μειούμενες από το βορρά προς την είσοδο του Κόλπου, παρουσιάζοντας στο μεγαλύτερο μέρος μια “inverse estuarine” στρωμάτωση. Η στρωμάτωση της θερμοκρασίας και της αλατότητας δίνουν ένα προφίλ πυκνότητας ενδεικτικό της δημιουργίας βαθιών νερών και εκροής νερών από τον κόλπο. Στην Εικόνα 2.2 δίνεται το διάγραμμα δυνητικής θερμοκρασίας-αλατότητας όλων των σταθμών της αποστολής του 2001, με τους σταθμούς στον Κόλπο του Suez να παρουσιάζονται με κόκκινο χρώμα.



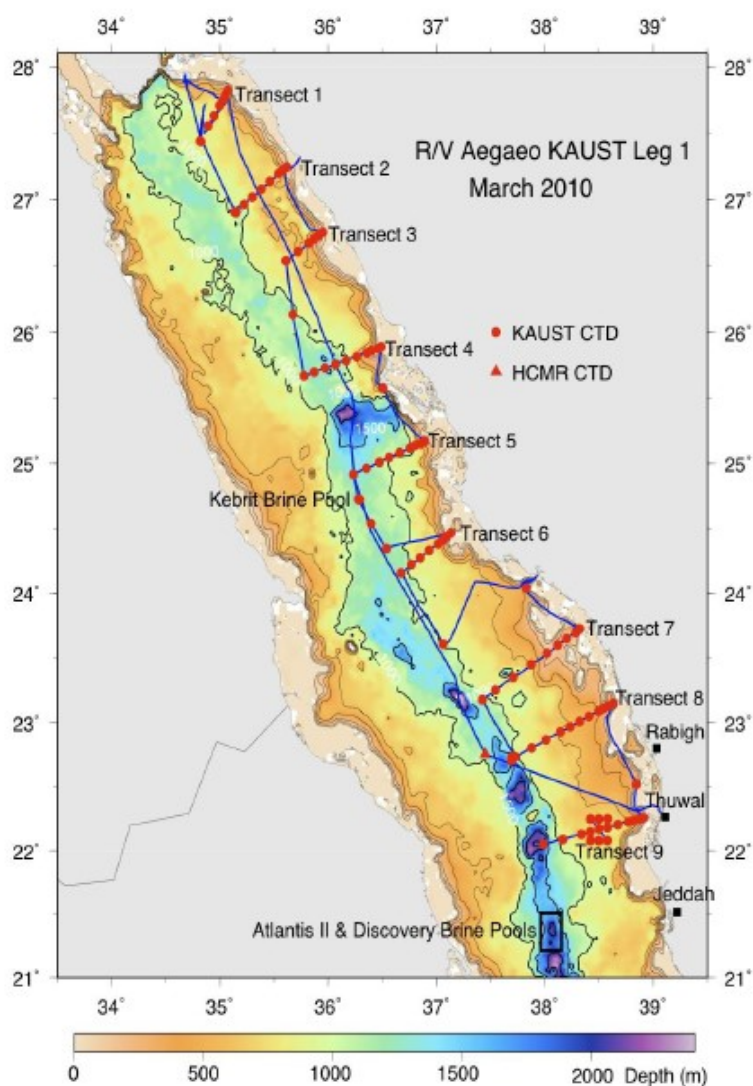
Εικόνα 2.2 Διάγραμμα θ - S όλων των σταθμών από την αποστολή του 2001. Με κόκκινο χρώμα παρουσιάζονται οι μετρήσεις στον κόλπο του Suez.

2.2.2 Η ωκεανογραφική αποστολή του 2010

Η δεύτερη ωκεανογραφική ερευνητική αποστολή διεξήχθη στην Ερυθρά Θάλασσα από τις 15 έως τις 29 Μαρτίου του 2010 με το ελληνικό ερευνητικό σκάφος ΑΙΓΑΙΟ. Ο πρωταρχικός στόχος αυτού του ταξιδιού ήταν να διεξάγει την πρώτη μεγάλης κλίμακας φυσική ωκεανογραφική έρευνα της ανατολικής Ερυθράς Θάλασσας, συμπεριλαμβανομένων των παρατηρήσεων των θαλασσίων ρευμάτων και των ιδιοτήτων του νερού, όπως η θερμοκρασία, η αλατότητα, το διαλυμένο οξυγόνο, η θολρότητα και ο φθορισμός. Οι δευτερεύοντες στόχοι ήταν η συλλογή δειγμάτων νερού από διάφορα βάθη για οργανική χημεία και μικροβιολογικές μελέτες, και η έρευνα της κατανομής των πελαγικών ψαριών χρησιμοποιώντας ακουστικές μεθόδους. Η έρευνα διεξήχθη από 19 επιστήμονες, τεχνικούς και υποψήφιους διδάκτορες που εκπροσωπούσαν το Woods Hole Oceanographic Institution, το King Abdullah University of Science and Technology, το American University of Cairo, το King Abdulaziz University και το University of Southampton.

Το αρχικό σχέδιο δειγματοληψίας περιελάμβανε την πραγματοποίηση εννέα τομών κατά μήκος της ανατολικής Ερυθράς Θάλασσας, ξεκινώντας από το βορρά στις 28 °N και τελειώνοντας στις 18 °N. Λόγω μιας εξαήμερης καθυστέρησης στην αρχή του ταξιδιού σχετικά με θέματα αδείας και μιας διήμερης καθυστέρησης εξαιτίας καιρικών συνθηκών, το αρχικό σχέδιο δειγματοληψίας άλλαξε. Το νέο σχέδιο περιελάμβανε και αυτό εννέα τομές, επικεντρωμένες όμως αποκλειστικά στο βόρειο μισό της λεκάνης (22° -28°N). Αυτό επέτρεψε μια πιο λεπτομερή μελέτη των ρευμάτων, των δινών και των μαζών νερού στα βόρεια, όπου οι επιπτώσεις των χειμερινών ατμοσφαιρικών συνθηκών είναι εντονότερες. Η αρχική ημερομηνία λήξης του ταξιδιού, 26 Μαρτίου, παρατάθηκε κατά τέσσερις ημέρες στις 30 Μαρτίου ώστε να περιλάβει το καινούριο σχέδιο.

Συνολικά πραγματοποιήθηκαν 111 υδρογραφικοί σταθμοί κατά τη διάρκεια του ταξιδιού. Στην Εικόνα 2.3 δίνεται ο χάρτης της Ερυθράς Θάλασσας με τις θέσεις των σταθμών. Αντίστοιχα, στον Πίνακα 2.1 δίνονται η ημερομηνία, η θέση και το βάθος του κάθε σταθμού. Εκτός από τις εννέα τομές, πραγματοποιήθηκαν και δύο mega-σταθμοί (mega-stations), ένας στο βόρειο και ένας στο κεντρικό τμήμα της Ερυθράς Θάλασσας. Σε κάθε έναν από αυτούς τους σταθμούς, συλλέχθηκαν μεγάλες ποσότητες νερού σε πολλαπλά βάθη για μικροβιολογικές μελέτες από τους ερευνητές του AUC. Αφιερώθηκαν περίπου 8-10 ώρες σε κάθε mega-station. Ένας τρίτος mega-station που είχε προγραμματιστεί στο νότιο τμήμα της Ερυθράς Θάλασσας αναβλήθηκε για μεταγενέστερο ταξίδι. Με το νέο σχέδιο που έχει έμφαση στο βόρειο κομμάτι της Ερυθράς Θάλασσας, προέκυψε μια απρογραμμάτιστη ευκαιρία για τη συλλογή μεγάλων όγκων νερού από το Kebrit Deer, στο οποίο αφιερώθηκαν δώδεκα ώρες δειγματοληψίας.



Εικόνα 2.3. Χάρτης της Ερυθράς Θάλασσας με τις θέσεις των σταθμών κατά την αποστολή το Μάρτιο του 2010.

Δεδομένα που συλλέχθηκαν:

I) Δεδομένα στους σταθμούς: CTD, εκτίμηση των αποθεμάτων ιχθύων, High Range CTD (HRCTD), Lowered Acoustic Doppler Current profiler, επιφανειακοί drifters, δείγματα νερού.

II) Under Way Data: Βαθυμετρία, Μετεωρολογικές Παρατηρήσεις, Ship board Doppler Current profiler, Θερμοσαλινογράφος.

Τα δεδομένα αποκτήθηκαν με χρήση του Seabird software version Seasave Win32 V 5.38 και επεξεργάστηκαν με το SBE Data Processing Version 7.17a.

Station No	Date	Latitude	Longitude	Depth
2	Mar 19 2010	27,8210	35,0755	388
3	Mar 19 2010	27,7818	35,0503	731
4	Mar 19 2010	27,7450	35,0250	630
5	Mar 19 2010	27,7070	34,9973	848
6	Mar 19 2010	27,6322	34,9463	728
7	Mar 19 2010	27,5560	34,8923	848
8	Mar 21 2010	27,4417	34,8175	10
9	Mar 21 2010	27,4377	34,8268	867
10	Mar 21 2010	26,9078	35,1422	51
11	Mar 21 2010	26,9078	35,1502	1010
12	Mar 21 2010	26,9063	35,1447	1041
13	Mar 21 2010	26,9040	35,1518	203
14	Mar 21 2010	26,9057	35,1412	1090
15	Mar 22 2010	26,9637	35,2252	1040
16	Mar 22 2010	27,0197	35,2998	794
17	Mar 22 2010	27,0798	35,3817	678
18	Mar 22 2010	27,1378	35,4625	666
19	Mar 22 2010	27,1962	35,5417	640
20	Mar 22 2010	27,2243	35,5825	710
21	Mar 22 2010	27,2465	35,6163	540
22	Mar 22 2010	26,7570	35,9507	550
23	Mar 22 2010	26,7292	35,9072	889
24	Mar 22 2010	26,7017	35,8673	818
25	Mar 22 2010	26,6738	35,8230	989
26	Mar 22 2010	26,6100	35,7200	636
27	Mar 22 2010	26,5395	35,6093	767
28	Mar 23 2010	26,1318	35,6738	1187
29	Mar 23 2010	25,6660	35,7763	1102
30	Mar 23 2010	25,6968	35,8717	1234
31	Mar 23 2010	25,7262	35,9698	1222
32	Mar 23 2010	25,7558	36,0670	1061
33	Mar 23 2010	25,7835	36,1665	1088
34	Mar 23 2010	25,8118	36,2617	691

35	Mar 23 2010	25,8423	36,3575	822
36	Mar 23 2010	25,8600	36,4032	472
37	Mar 23 2010	25,8742	36,4652	222
38	Mar 23 2010	25,8875	36,4898	160
39	Mar 23 2010	25,5745	36,5067	696
40	Mar 24 2010	25,1698	36,8883	652
41	Mar 24 2010	25,1472	36,8512	616
42	Mar 24 2010	25,1352	36,8010	611
43	Mar 24 2010	25,1165	36,7530	934
44	Mar 24 2010	25,0812	36,6605	1299
45	Mar 24 2010	25,0450	36,5648	1000
46	Mar 24 2010	25,0092	36,4743	1075
47	Mar 24 2010	24,9618	36,3522	1282
48	Mar 24 2010	24,9142	36,2320	1293
49	Mar 24 2010	24,7230	36,2777	1506
50	Mar 24 2010	24,7187	36,2888	1507
51	Mar 24 2010	24,7200	36,2897	1455
52	Mar 24 2010	24,7230	36,2812	1484
53	Mar 25 2010	24,7237	36,2775	1484
54	Mar 25 2010	24,5375	36,3962	1150
55	Mar 25 2010	24,3457	36,5385	1221
56	Mar 25 2010	24,4668	37,1342	687
57	Mar 25 2010	24,4378	37,0940	707
58	Mar 25 2010	24,4093	37,0535	797
59	Mar 25 2010	24,3810	37,0152	715
60	Mar 25 2010	24,3297	36,9317	762
61	Mar 25 2010	24,2760	36,8503	880
62	Mar 25 2010	24,2218	36,7687	938
63	Mar 25 2010	24,1558	36,6717	1283
64	Mar 26 2010	23,6082	37,0615	1080
65	Mar 26 2010	24,0408	37,8298	637
66	Mar 26 2010	23,7255	38,3230	474
67	Mar 26 2010	23,6980	38,2860	665
68	Mar 26 2010	23,6507	38,2017	433
69	Mar 26 2010	23,6008	38,1190	656
70	Mar 26 2010	23,5378	38,0210	528
71	Mar 26 2010	23,4500	37,8742	676
72	Mar 27 2010	23,3507	37,7103	726
73	Mar 27 2010	23,2503	37,5460	884
74	Mar 27 2010	23,1757	37,4242	10
75	Mar 27 2010	23,1762	37,4240	1024
76	Mar 27 2010	22,7272	37,6995	52
77	Mar 27 2010	22,7250	37,6947	1009
78	Mar 27 2010	22,7038	37,6918	1010

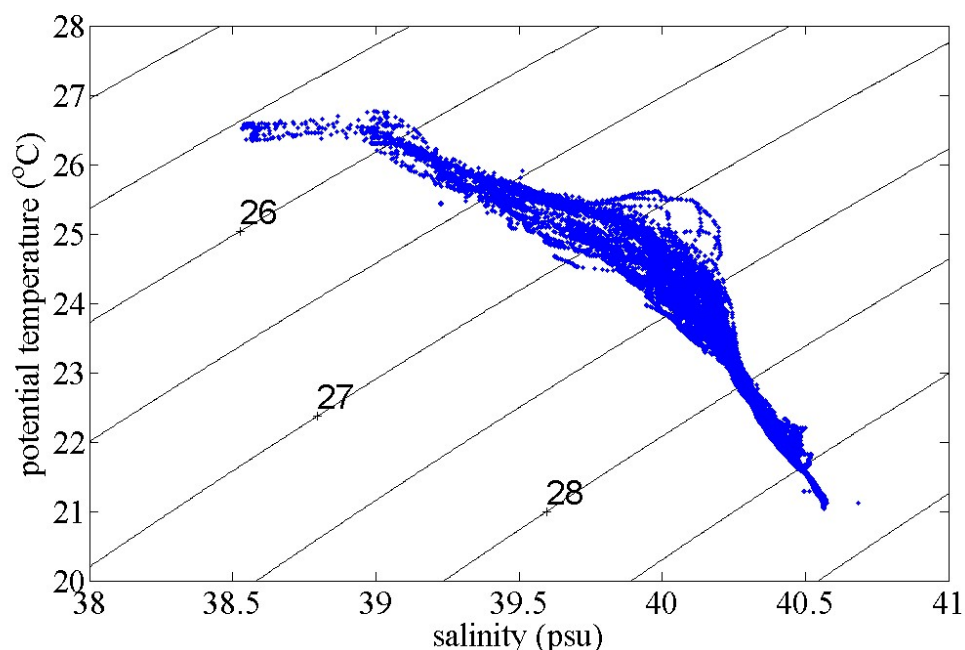
79	Mar 27 2010	22,7275	37,6997	202
80	Mar 27 2010	22,7260	37,6972	1932
81	Mar 27 2010	22,7255	37,6972	1517
82	Mar 27 2010	22,7317	37,7293	1485
83	Mar 27 2010	22,8013	37,8787	888
84	Mar 27 2010	22,8635	38,0118	717
85	Mar 27 2010	22,9240	38,1438	666
86	Mar 28 2010	22,9650	38,2342	586
87	Mar 28 2010	23,0057	38,3215	570
88	Mar 28 2010	23,0460	38,4083	570
89	Mar 28 2010	23,0868	38,4972	676
90	Mar 28 2010	23,1078	38,5418	621
91	Mar 28 2010	23,1283	38,5855	797
92	Mar 28 2010	23,1480	38,6312	782
93	Mar 28 2010	22,5202	38,8465	565
94	Mar 28 2010	22,2562	38,9155	494
95	Mar 28 2010	22,2458	38,8682	849
96	Mar 28 2010	22,2348	38,8193	867
97	Mar 28 2010	22,2237	38,7710	888
98	Mar 28 2010	22,2028	38,6748	756
99	Mar 28 2010	22,1808	38,5790	655
100	Mar 28 2010	22,2480	38,5810	616
101	Mar 28 2010	22,2465	38,5007	575
102	Mar 28 2010	22,2468	38,4220	631
103	Mar 29 2010	22,1715	38,4997	686
104	Mar 29 2010	22,0785	38,5788	676
105	Mar 29 2010	22,0780	38,4998	731
106	Mar 29 2010	22,0780	38,4220	782
107	Mar 29 2010	22,1458	38,4207	692
108	Mar 29 2010	22,1272	38,3388	783
109	Mar 29 2010	22,0885	38,1660	901
110	Mar 29 2010	22,0473	37,9845	10
111	Mar 29 2010	22,0472	37,9867	1739

Πίνακας 2.2. Ημερομηνία, τοποθεσία και βάθος των σταθμών CTD/ LADCP που πραγματοποιήθηκαν κατά την αποστολή του 2010.

Μετά την απόκτηση των δεδομένων CTD, ακολουθήθηκε η προβλεπόμενη επεξεργασία, η οποία περιλάμβανε περικοπή των προφίλ για να αφαιρεθούν οι καταγραφές έξω από το νερό, επεξεργασία των παραμέτρων ώστε να αποκλειστούν ακραίες τιμές, φιλτράρισμα της πίεσης, της θερμοκρασίας και της αγωγιμότητας, καθώς και υπολογισμός της αλατότητας και του οξυγόνου από αυτές τις επεξεργασμένες τιμές. Το αποτέλεσμα είναι ένα μέσο

προφίλ με βήμα ένα decibar σε μορφή ascii με μια μακροσκελή κεφαλίδα που περιέχει τις πληροφορίες της επεξεργασίας.

Στη συνέχεια, κατά την τελική επεξεργασία των δεδομένων εκτιμήθηκε η απόδοση των αισθητήρων και πραγματοποιήθηκε αφαίρεση των ακραίων τιμών (spikes) ή αναστροφών πυκνότητας στα χαμηλότερα τμήματα του προφίλ. Για να επιτευχθεί αυτό σχεδιάστηκαν τα διαγράμματα της αλατότητας, της θερμοκρασίας και της πυκνότητας ως προς την πίεση για κάθε σταθμό. Επίσης σχεδιάστηκε και το διάγραμμα του οξυγόνου συναρτήσει της πίεσης και της αλατότητας, ώστε να εντοπιστούν εσφαλμένες τιμές. Οι τιμές των δεδομένων που εντοπίστηκαν ως εσφαλμένες αντικαταστάθηκαν με την τιμή -9.0. Αυτό συνήθως εμφανίζεται στην επιφάνεια, κατά τη διάρκεια της πόντισης και οφείλεται είτε στην τύρβη είτε στην καταγραφή δεδομένων πριν οι αισθητήρες έρθουν σε ισορροπία με τη θερμοκρασία του νερού. Εσφαλμένες τιμές αλατότητας και οξυγόνου καταγράφηκαν επίσης στο βαθύτερο μέρος των σταθμών σε περιοχές υψηλής αλατότητας (σταθμοί 49-53), όπου τα επίπεδα του αλατιού και του οξυγόνου στο νερό ήταν έξω από το εύρος των αισθητήρων. Αυτά τα δεδομένα αντικαταστάθηκαν επίσης από την τιμή -9.0.



Εικόνα 2.4. Διάγραμμα θερμοκρασίας-αλατότητας από όλους τους σταθμούς κατά τον πλόα του Μαρτίου του 2010.

Η αλατότητα βαθμονομήθηκε με τις τιμές που μετρήθηκαν στα δείγματα νερού. Χρησιμοποιήθηκαν συνολικά 381 δείγματα νερού για την βαθμονόμηση της αλατότητας. Χρησιμοποιήθηκαν οι συντελεστές που παρήχθησαν από τις τιμές των μπουκαλιών που ήταν μέσα στα όρια (2.8 φορές την τυπική απόκλιση), και αυτοί εφαρμόστηκαν στην αγωγιμότητα που μετρήθηκε από το CTD. Για τον πρωτεύοντα αισθητήρα αγωγιμότητας, η προκύπτουσα τυπική απόκλιση ήταν 0.003, και για τον δευτερεύοντα αισθητήρα ήταν 0.0025. Και οι δυο αισθητήρες παρουσίασαν διολίσθηση κατά τη διάρκεια του ταξιδιού, αλλά αυτό διορθώθηκε. Αυτή η διόρθωση θεωρήθηκε αρκετά καλή, δεδομένου των

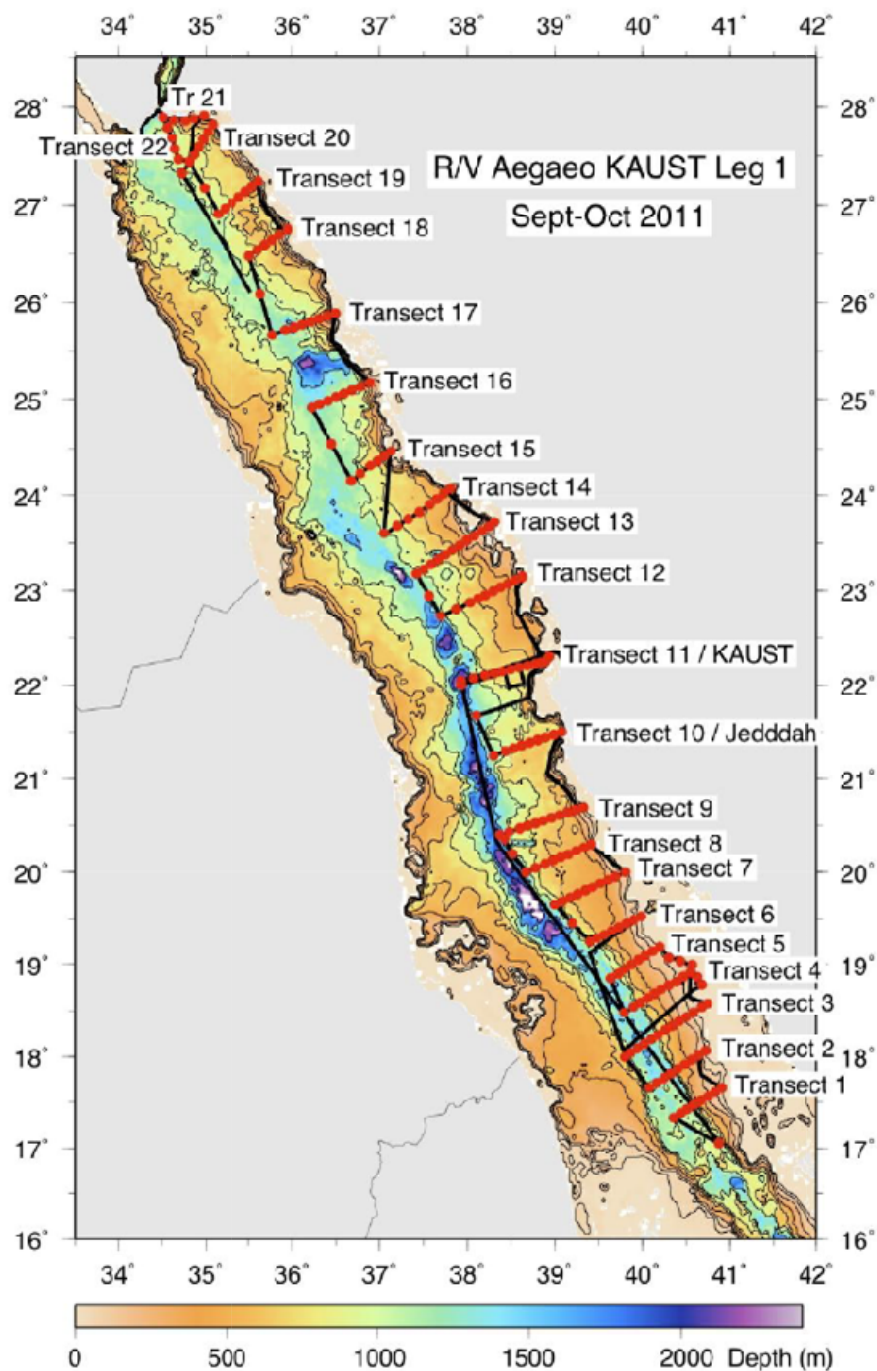
υψηλών τιμών της αλατότητας που μετρήθηκαν (περίπου 40 ml/L). Η αλατότητα και για τους δύο αισθητήρες υπολογίστηκε εκ νέου από τη βαθμονομημένη αγωγιμότητα.

Μια παρόμοια διαδικασία χρησιμοποιήθηκε και για τη βαθμονόμηση του αισθητήρα του οξυγόνου, ωστόσο οι σταθμοί είχαν χωριστεί σε επτά ομάδες με παρόμοια χαρακτηριστικά. Οι προκύπτουσες τυπικές αποκλίσεις κυμάνθηκαν μεταξύ 0.022 και 0.05.

2.2.3 Η ωκεανογραφική αποστολή του 2011

Η ωκεανογραφική αποστολή του 2011 περιλαμβάνει τις ερευνητικές δραστηριότητες και τα δεδομένα που συλλέχθηκαν κατά τη διάρκεια του R/V Aegaeo KAUST Leg 1 στην Ερυθρά Θάλασσα από τις 15 Σεπτεμβρίου έως τις 10 Οκτωβρίου 2011. Ο πρωταρχικός στόχος αυτού του ταξιδιού ήταν να διεξαχθεί μια μεγάλης κλίμακας φυσική ωκεανογραφική έρευνα στην ανατολική Ερυθρά Θάλασσα, συμπεριλαμβανομένων παρατηρήσεων των ωκεάνιων ρευμάτων και των ιδιοτήτων του νερού, όπως θερμοκρασία, αλατότητα, διαλυμένο οξυγόνο, θολερότητα και φθορισμό, σε ολόκληρη τη στήλη του νερού. Οι δευτερεύοντες στόχοι ήταν (1) η συλλογή δειγμάτων θαλασσινού νερού για μετρήσεις οργανικής χημείας, θρεπτικών, αλογονωμένων ιχνηθετών και μελέτες μικροβιακής ποικιλότητας, (2) να ερευνηθεί η κατανομή των πελαγικών ψαριών χρησιμοποιώντας ακουστικές μεθόδους, και (3) να γίνουν μετρήσεις των αερολυμάτων στην ατμόσφαιρα πάνω από την Ερυθρά Θάλασσα. Η έρευνα διεξήχθη από 19 επιστήμονες, τεχνικούς και φοιτητές που εκπροσωπούσαν το the Woods Hole Oceanographic Institution, το King Abdullah University of Science and Technology, το Saudi Arabian General Commission for Survey και το Hellenic Center for Marine Research.

Συνολικά πραγματοποιήθηκαν 262 ποντίσεις CTD σε 206 σταθμούς κατά τη διάρκεια του ταξιδιού. Στην πλειοψηφία τους οι σταθμοί ήταν χωρισμένοι σε 20 τομές από τον εξωτερικό ύφαλο έως το όριο της Αποκλειστικής Οικονομικής Ζώνης (ΑΟΖ) στο κέντρο της Ερυθράς Θάλασσας (Εικόνα 2.5). Πρόσθετοι σταθμοί πραγματοποιήθηκαν σε διάφορες θέσεις για την εντατική μελέτη τοπικών φαινομένων, συμπεριλαμβανομένου του Gulf of Aden Intermediate Water (GAIW), στην είσοδο του κόλπου της Aqaba και ένας 24-ωρος σταθμός κοντά στο KAUST. Μόνο οι 12 από τους 72 επιφανειακούς drifters χρησιμοποιήθηκαν κατά τη διάρκεια του ταξιδιού λόγω τεχνικών προβλημάτων.



Εικόνα 2.5. Χάρτης της Ερυθράς Θάλασσας με τις θέσεις των σταθμών κατά τον πλόα του Σεπτεμβρίου-Οκτωβρίου του 2011.

Στον Πίνακα 2.3 παρουσιάζονται οι σταθμοί της αποστολής του 2011. Για κάθε σταθμό, δίνεται η ημερομηνία και η ώρα δειγματοληψίας, οι συντεταγμένες και το βάθος.

Station No	Date	Time	Latitude	Longitude	Depth
1	Sept 15 2011	18:56	22,3020	38,9387	313
2	Sept 16 2011	4:03	21,9833	37,8713	1009
3	Sept 17 2011	13:23	17,0527	40,8713	1160
4	Sept 17 2011	21:48	17,3287	40,3570	1076
5	Sept 18 2011	1:13	17,3763	40,4357	1139
6	Sept 18 2011	2:46	17,4213	40,5087	1012
7	Sept 18 2011	4:15	17,4695	40,5882	823
8	Sept 18 2011	5:29	17,4938	40,6287	569
9	Sept 18 2011	6:31	17,5173	40,6687	340
10	Sept 18 2011	7:58	17,5658	40,7488	214
11	Sept 18 2011	9:14	17,6142	40,8275	77
12	Sept 18 2011	10:26	17,6623	40,9047	48
13	Sept 18 2011	14:20	18,0657	40,7250	154
14	Sept 18 2011	15:25	18,0165	40,6440	187
15	Sept 18 2011	16:23	17,9667	40,5650	293
16	Sept 18 2011	17:24	17,9168	40,4853	426
17	Sept 18 2011	18:32	17,8673	40,4065	484
18	Sept 18 2011	21:04	17,8170	40,3278	1382
19	Sept 18 2011	23:04	17,7683	40,2480	965
20	Sept 19 2011	0:33	17,7173	40,1657	1057
21	Sept 19 2011	2:28	17,6643	40,0807	1149
22	Sept 19 2011	7:47	17,9970	39,7987	680
23	Sept 19 2011	10:09	18,0420	39,8655	1128
24	Sept 19 2011	12:14	18,0898	39,9448	1208
25	Sept 19 2011	14:07	18,1393	40,0237	1298
26	Sept 19 2011	16:08	18,1877	40,1038	1068
27	Sept 19 2011	17:40	18,2367	40,1840	816
28	Sept 19 2011	19:07	18,2850	40,2618	618
29	Sept 19 2011	21:53	18,3343	40,3405	449
30	Sept 19 2011	23:04	18,3840	40,4212	351
31	Sept 19 2011	0:14	18,4328	40,5010	304
32	Sept 20 2011	1:22	18,4813	40,5825	264
33	Sept 20 2011	2:27	18,5403	40,6780	230
34	Sept 20 2011	3:18	18,5803	40,7435	260
35	Sept 20 2011	7:14	18,9160	40,5483	186
36	Sept 20 2011	8:59	18,8705	40,4653	220
37	Sept 20 2011	10:19	18,8165	40,3897	323
38	Sept 20 2011	11:24	18,7785	40,3022	291
39	Sept 20 2011	12:37	18,7353	40,2197	300
40	Sept 20 2011	14:48	18,6865	40,1387	371
41	Sept 20 2011	16:10	18,6400	40,0580	557
42	Sept 20 2011	17:25	18,5898	39,9777	684
43	Sept 20 2011	18:48	18,5418	39,8965	1510
44	Sept 20 2011	20:58	18,4780	39,7917	1633
45	Sept 21 2011	2:04	18,8520	39,6368	1302

46	Sept 21 2011	3:57	18,8993	39,7193	958
47	Sept 21 2011	5:31	18,9505	39,7975	684
48	Sept 21 2011	6:48	19,0005	39,8772	458
49	Sept 21 2011	7:57	19,0507	39,9560	309
50	Sept 21 2011	9:01	19,0985	40,0370	300
51	Sept 21 2011	10:11	19,1425	40,1197	292
52	Sept 21 2011	11:26	19,1918	40,1993	263
53	Sept 21 2011	13:11	19,0728	40,3055	254
54	Sept 21 2011	14:28	19,0347	40,4340	182
55	Sept 21 2011	15:36	18,9980	40,5693	187
56	Sept 21 2011	16:54	18,8685	40,6252	259
57	Sept 21 2011	18:08	18,7845	40,6815	229
58	Sept 22 2011	11:05	19,5255	39,9878	335
59	Sept 22 2011	13:11	19,4883	39,9020	305
60	Sept 22 2011	14:12	19,4480	39,8172	326
61	Sept 22 2011	15:19	19,4083	39,7310	357
62	Sept 22 2011	16:32	19,3670	39,6462	380
63	Sept 22 2011	17:34	19,3268	39,5625	516
64	Sept 22 2011	18:42	19,2895	39,4828	752
65	Sept 22 2011	20:06	19,2487	39,4012	947
66	Sept 22 2011	23:48	19,4512	39,1993	845
67	Sept 23 2011	1:59	19,6503	39,0003	505
68	Sept 23 2011	4:55	19,6867	39,0857	667
69	Sept 23 2011	6:13	19,7255	39,1720	546
70	Sept 23 2011	7:21	19,7617	39,2570	502
71	Sept 23 2011	8:24	19,8008	39,3452	460
72	Sept 23 2011	9:24	19,8393	39,4317	468
73	Sept 23 2011	10:38	19,8775	39,5197	397
74	Sept 23 2011	11:58	19,9152	39,6062	380
75	Sept 23 2011	13:05	19,9525	39,6925	368
76	Sept 23 2011	14:19	19,9995	39,8043	371
77	Sept 23 2011	18:31	20,2983	39,4195	467
78	Sept 23 2011	20:48	20,2612	39,3335	486
79	Sept 23 2011	22:01	20,2268	39,2455	524
80	Sept 23 2011	23:08	20,1922	39,1570	539
81	Sept 24 2011	0:21	20,1567	39,0682	565
82	Sept 24 2011	1:28	20,1223	38,9788	570
83	Sept 24 2011	2:43	20,0868	38,8907	639
84	Sept 24 2011	4:09	20,0437	38,7810	763
85	Sept 24 2011	5:39	19,9992	38,6700	1263
86	Sept 24 2011	9:24	20,1977	38,5207	1096
87	Sept 24 2011	12:57	20,4000	38,3697	1590
88	Sept 24 2011	15:59	20,4347	38,4837	998
89	Sept 24 2011	17:50	20,4712	38,6002	845
90	Sept 24 2011	19:13	20,4975	38,6895	831
91	Sept 25 2011	20:54	20,5253	38,7805	609

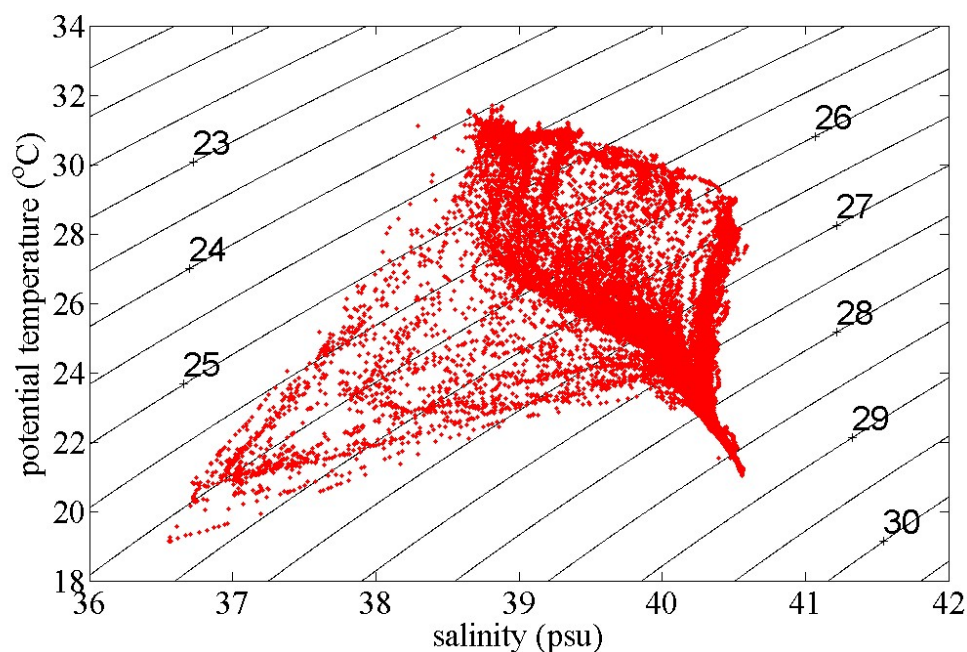
92	Sept 25 2011	23:09	20,5518	38,8722	682
93	Sept 25 2011	0:29	20,5802	38,9648	635
94	Sept 25 2011	1:31	20,6072	39,0550	603
95	Sept 25 2011	2:42	20,6345	39,1460	683
96	Sept 25 2011	3:58	20,6620	39,2378	811
97	Sept 25 2011	5:15	20,6888	39,3232	699
98	Sept 25 2011	12:57	21,5000	39,0813	661
99	Sept 25 2011	15:34	21,4707	38,9893	630
100	Sept 25 2011	16:58	21,4415	38,8977	673
101	Sept 25 2011	18:11	21,4122	38,8060	649
102	Sept 25 2011	19:23	21,3825	38,7135	690
103	Sept 25 2011	20:41	21,3538	38,6225	725
104	Sept 25 2011	21:52	21,3233	38,5315	860
105	Sept 25 2011	23:10	21,2947	38,4398	1002
106	Sept 26 2011	0:53	21,2493	38,2978	1152
107	Sept 26 2011	6:11	21,6675	38,0977	1436
108	Sept 27 2011	21:03	22,0458	37,9290	505
109	Sept 28 2011	0:14	22,0768	38,0712	1345
110	Sept 28 2011	1:43	22,1043	38,2037	856
111	Sept 28 2011	3:06	22,1268	38,3075	712
112	Sept 28 2011	4:16	22,1475	38,4032	719
113	Sept 28 2011	5:26	22,1682	38,4982	683
114	Sept 28 2011	7:18	22,1877	38,5915	660
115	Sept 28 2011	8:21	22,2082	38,6865	683
116	Sept 28 2011	9:37	22,2283	38,7808	928
117	Sept 28 2011	10:58	22,2415	38,8423	868
118	Sept 28 2011	12:20	22,2502	38,8903	852
119	Sept 28 2011	20:49	23,1482	38,6337	504
120	Sept 28 2011	23:00	23,1150	38,5572	497
121	Sept 29 2011	0:06	23,0762	38,4683	613
122	Sept 29 2011	1:12	23,0360	38,3815	642
123	Sept 29 2011	2:11	22,9968	38,2937	560
124	Sept 29 2011	4:31	22,9562	38,2057	579
125	Sept 29 2011	5:36	22,9170	38,1172	658
126	Sept 29 2011	7:38	22,8770	38,0295	704
127	Sept 29 2011	9:08	22,8053	37,8738	863
128	Sept 29 2011	11:17	22,7292	37,6960	2030
129	Sept 29 2011	17:12	22,9472	37,5647	1201
130	Sept 29 2011	19:53	23,1770	37,4225	504
131	Sept 29 2011	22:15	23,2252	37,5067	1005
132	Sept 29 2011	23:35	23,2758	37,5887	856
133	Sept 30 2011	0:50	23,3262	37,6692	741
134	Sept 30 2011	2:02	23,3758	37,7500	723
135	Sept 30 2011	3:12	23,4248	37,8318	639
136	Sept 30 2011	4:20	23,4757	37,9127	653
137	Sept 30 2011	6:18	23,5258	37,9942	520

138	Sept 30 2011	7:19	23,5757	38,0773	570
139	Sept 30 2011	8:18	23,6267	38,1595	708
140	Sept 30 2011	9:25	23,6762	38,2398	629
141	Sept 30 2011	10:44	23,7177	38,3083	640
142	Sept 30 2011	16:01	24,0747	37,8072	505
143	Sept 30 2011	18:08	24,0182	37,7302	527
144	Sept 30 2011	19:20	23,9642	37,6520	578
145	Sept 30 2011	20:28	23,9072	37,5757	618
146	Sept 30 2011	22:51	23,8292	37,4550	615
147	Oct 01 2011	0:22	23,7588	37,3285	780
148	Oct 01 2011	1:43	23,6870	37,2037	875
149	Oct 01 2011	3:17	23,6038	37,0540	1064
150	Oct 01 2011	10:48	24,4653	37,1325	504
151	Oct 01 2011	12:55	24,4138	37,0548	791
152	Oct 01 2011	14:12	24,3605	36,9770	729
153	Oct 01 2011	15:30	24,3075	36,8960	799
154	Oct 01 2011	17:20	24,2270	36,7772	909
155	Oct 01 2011	18:48	24,1543	36,6718	508
156	Oct 01 2011	23:29	24,5413	36,4485	1158
157	Oct 02 2011	2:42	24,9132	36,2250	1240
158	Oct 02 2011	5:36	24,9478	36,3168	1270
159	Oct 02 2011	6:57	24,9818	36,4093	1273
160	Oct 02 2011	8:20	25,0205	36,4995	1056
161	Oct 02 2011	9:47	25,0547	36,5915	992
162	Oct 02 2011	12:21	25,0897	36,6805	1291
163	Oct 02 2011	14:34	25,1285	36,7833	698
164	Oct 02 2011	15:21	25,1685	36,8898	505
165	Oct 02 2011	22:35	25,8875	36,4958	148
166	Oct 03 2011	0:05	25,8603	36,3997	452
167	Oct 03 2011	1:11	25,8312	36,3053	728
168	Oct 03 2011	2:23	25,8015	36,2102	902
169	Oct 03 2011	3:45	25,7720	36,1163	1255
170	Oct 03 2011	6:01	25,7423	36,0210	1393
171	Oct 03 2011	7:37	25,7140	35,9260	1170
172	Oct 03 2011	9:31	25,6635	35,7743	1052
173	Oct 03 2011	14:29	26,0898	35,6353	1067
174	Oct 03 2011	17:35	26,4747	35,5108	506
175	Oct 03 2011	20:36	26,5383	35,6033	776
176	Oct 03 2011	22:02	26,5900	35,6863	682
177	Oct 03 2011	23:40	26,6412	35,7683	586
178	Oct 04 2011	0:55	26,6938	35,8512	789
179	Oct 04 2011	2:19	26,7535	35,9498	537
180	Oct 04 2011	7:14	27,2487	35,6213	530
181	Oct 04 2011	9:33	27,1932	35,5403	665
182	Oct 04 2011	10:58	27,1368	35,4623	663
183	Oct 04 2011	23:26	27,0808	35,3833	676

184	Oct 04 2011	13:52	27,0255	35,3053	788
185	Oct 04 2011	15:15	26,9683	35,2253	997
186	Oct 04 2011	16:57	26,9082	35,1438	506
187	Oct 04 2011	20:55	27,1763	34,9800	905
188	Oct 04 2011	3:49	27,9140	34,9748	498
189	Oct 05 2011	5:00	27,8815	34,8608	586
190	Oct 05 2011	6:11	27,8623	34,7628	663
191	Oct 05 2011	7:32	27,8693	34,6330	635
192	Oct 05 2011	8:52	27,8973	34,5073	1071
193	Oct 05 2011	12:22	27,7913	34,5607	999
194	Oct 05 2011	14:18	27,6828	34,6137	1044
195	Oct 05 2011	16:09	27,5737	34,6420	946
196	Oct 05 2011	17:49	27,4647	34,6875	886
197	Oct 05 2011	19:23	27,4410	34,8108	506
198	Oct 06 2011	1:22	27,8205	35,0773	388
199	Oct 05 2011	3:25	27,7445	35,0225	667
200	Oct 06 2011	4:39	27,6685	34,9707	819
201	Oct 06 2011	5:59	27,5912	34,9180	826
202	Oct 06 2011	7:16	27,5135	34,8677	868
203	Oct 06 2011	8:31	27,4385	34,8110	860
204	Oct 06 2011	10:17	27,3238	34,7295	1059
205	Oct 07 2011	16:51	22,7280	37,6940	2032
206	Oct 08 2011	12:31	22,1633	38,4937	686

Πίνακας 2.3. Ημερομηνία, ώρα, τοποθεσία και βάθος των σταθμών CTD/ LADCP που πραγματοποιήθηκαν κατά την ωκεανογραφική αποστολή το 2011.

Η μέθοδος συλλογής των δεδομένων κατά την αποστολή του 2011 καθώς και η περαιτέρω επεξεργασία τους είναι ίδια με αυτή του 2010. Στην εικόνα 2.6 παρουσιάζεται το διάγραμμα δυνητικής θερμοκρασίας-αλατότητας όλων των σταθμών. Τα σημεία στην κάτω αριστερή πλευρά του διαγράμματος, τα οποία αντιστοιχούν στην GAIW είναι χαρακτηριστικά της θερινής περιόδου στην Ερυθρά Θάλασσα.



Εικόνα 2.6. Διάγραμμα δυνητικής θερμοκρασίας-αλατότητας από όλους τους σταθμούς κατά την αποστολή του 2011.

Στις μετρήσεις από την αποστολή του 2011, στα πολύ επιφανειακά νερά ορισμένων σταθμών, παρατηρήθηκαν ασυνήθιστες τιμές αλατότητας και οξυγόνου. Το πρώτο κύτταρο υψηλού οξυγόνου εμφανίζεται στους σταθμούς με γεωγραφικό πλάτος $19.4^{\circ}\text{N} - 20.4^{\circ}\text{N}$ σε βάθος μέχρι τα 15 m και έχει πολύ υψηλές τιμές στην συγκέντρωση του οξυγόνου ($>8\text{ ml/l}$). Ένα δεύτερο κύτταρο εμφανίζεται στους σταθμούς με γεωγραφικό πλάτος $24^{\circ}\text{N} - 25.6^{\circ}\text{N}$, όπου μαζί με τις πολύ υψηλές τιμές του οξυγόνου (επίσης $>8\text{ ml/l}$) οι οποίες έφταναν μέχρι τα 35m βάθος, παρουσιάστηκαν και πολύ χαμηλές τιμές αλατότητας ($<10\text{ psu}$!) μέχρι τα 10 m βάθος. Οι τιμές αυτές είναι έξω από τα όρια τιμών που παρατηρούνται στην Ερυθρά Θάλασσα και οφείλονται σε κάποιο σφάλμα του αισθητήρα κατά τις μετρήσεις. Σε κάθε περίπτωση είναι επιφανειακές τιμές που δεν επηρεάζουν τους στόχους της συγκεκριμένης μελέτης, για το λόγο αυτό τις έχουμε παραλείψει από την επεξεργασία των δεδομένων στη συνέχεια.

2.3 Επεξεργασία των δεδομένων

Στην εργασία αυτή αναλύθηκαν τα δεδομένα που αποκτήθηκαν από τις αποστολές που περιγράφονται παραπάνω. Αρχικά δημιουργήσαμε τα διαγράμματα κατανομής θερμοκρασίας, αλατότητας, δυνητικής πυκνότητας και οξυγόνου κατά μήκος του άξονα της Ερυθράς Θάλασσας, με σκοπό την ανίχνευση των μαζών νερού που συμμετέχουν κάθε εποχή στην κυκλοφορία και των τιμών που λαμβάνουν τα υδρογραφικά τους χαρακτηριστικά. Στη συνέχεια μελετήσαμε ξεχωριστά κάθε μάζα νερού, ξεκινώντας από τα επιφανειακά νερά (**SW**), το πώς μεταβάλλονται τα υδρογραφικά τους χαρακτηριστικά κατά μήκος της λεκάνης, ποιες είναι οι μέγιστες και ελάχιστες τιμές που λαμβάνουν και πως

αυτές οι τάσεις εξηγούνται. Η επόμενη μάζα νερού που μελετήσαμε είναι το **GAIW**, η οποία εισέρχεται στην Ερυθρά Θάλασσα από τον κόλπο του Aden μέσω του στενού του Bab el Mandeb. Το **GAIW** εμφανίζεται κατά τους θερινούς μόνο μήνες, γι' αυτό το λόγο για τη μελέτη του χρησιμοποιήσαμε μόνο τα δεδομένα του 2001 και 2011. Γι' αυτή τη μάζα νερού πέρα από τις τιμές που λαμβάνουν τα υδρογραφικά της χαρακτηριστικά, μας ενδιαφέρει να μελετήσουμε το πόσο γρήγορα εισέρχεται στην Ερυθρά Θάλασσα και ποια πορεία ακολουθεί μέσα στην λεκάνη. Η τελευταία μάζα νερού που μελετήσαμε είναι το **RSDW**, η οποία γεμίζει τη λεκάνη της Ερυθράς Θάλασσας από το βάθος των 300 m περίπου έως τον πυθμένα. Τα υδρογραφικά χαρακτηριστικά του **RSDW** δεν επηρεάζονται από τις εποχικές μεταβολές και για το λόγο αυτό μπορούμε να ελέγξουμε τις υπερετήσιες μεταβολές του. Μας ενδιαφέρει να εξετάσουμε αν υπάρχει τάση αύξησης της θερμοκρασίας και της αλατότητας εξαιτίας της παγκόσμιας κλιματικής αλλαγής και κατά πόσο αυτή έχει επηρεάσει την Ερυθρά Θάλασσα, γεγονός ζωτικής σημασίας για το οικοσύστημα της περιοχής.

Η μελέτη συνεχίζεται με την ανάλυση των κανονικών τρόπων ταλάντωσης (normal modes) της Ερυθράς Θάλασσας. Αρχικά, σχεδιάσαμε την κατανομή των δύο πρώτων βαροκλινικών τρόπων ταλάντωσης, κατά μήκος του άξονα της λεκάνης, η οποία μας δίνει μια εικόνα της στρωμάτωσης της περιοχής. Στη συνέχεια, χωρίσαμε τη λεκάνη σε τρεις περιοχές (Βόρεια, Κεντρική, Νότια) και για κάθε περιοχή υπολογίσαμε ένα μέσο προφίλ πυκνότητας από όλους τους σταθμούς κάθε περιοχής για την κάθε αποστολή. Από αυτό το μέσο προφίλ πυκνότητας, υπολογίσαμε τους κανονικούς τρόπους ταλάντωσης και τους συγκρίναμε για να δούμε τις μεταβολές στη στρωμάτωση της Ερυθράς Θάλασσας κατά τη διάρκεια των δέκα ετών (2001-2010).

Τέλος, υπολογίσαμε την ακτίνα αποδιαμόρφωσης Rossby για τον βαροτροπικό, καθώς και για τους δύο πρώτους βαροκλινικούς τρόπους ταλάντωσης στους σταθμούς που βρίσκονται κατά μήκος του άξονα της λεκάνης. Η ακτίνα αποδιαμόρφωσης Rossby είναι ενδεικτική της στρωμάτωσης της περιοχής και μέσω αυτής μπορούμε να υπολογίσουμε την ταχύτητα των μακρών κυμάτων Rossby. Στις επόμενες παραγράφους δίνονται τα απαραίτητα στοιχεία της θεωρίας που χρησιμοποιήσαμε για τη μελέτη μας.

2.3.1 Κανονικοί τρόποι ταλάντωσης

Οι κινήσεις μικρού πλάτους, χωρίς τριβές σε έναν ωκεανό συνεχούς στρωμάτωσης μπορούν να γραφούν ως το άθροισμα διαφόρων κατακόρυφων τρόπων ταλάντωσης (vertical modes) $\psi_n(z)$, οι οποίοι ονομάζονται κανονικοί ("normal") τρόποι ταλάντωσης, καθώς αποδεικνύεται πως είναι ορθογώνιοι μεταξύ τους. Η κατακόρυφη δομή κάθε τρόπου ταλάντωσης καθορίζεται από μια ιδιοσυνάρτηση $\psi_n(z)$ και η εξίσωση που την διέπει είναι:

$$\frac{d}{dz} \left(\frac{1}{N^2} \frac{d\psi_n}{dz} \right) + \frac{1}{c_n^2} \psi_n = 0 \quad (2.1)$$

όπου N είναι η συχνότητα πλευστότητας.

Η εξίσωση αυτή έχει την λεγόμενη μορφή Sturm-Liouville, για την οποία οι διάφορες λύσεις είναι ορθογώνιες.

Σε μια στρωματωμένη ροή κάθε τρόπος ταλάντωσης (που έχει σταθερή κατακόρυφη δομή) συμπεριφέρεται, στην οριζόντια διάσταση και στο χρόνο, ακριβώς όπως ένα ομοιογενές στρώμα, με ένα ισοδύναμο βάθος H_e που ορίζεται από την εξίσωση:

$$c_n^2 \equiv gH_e \quad (2.2)$$

Οι οριακές συνθήκες για την ψ_n είναι για $z=-H$:

$$\frac{d\psi_n}{dz} = 0 \quad (2.3)$$

και στο $z=0$:

$$\frac{d\psi_n}{dz} + \frac{N^2}{g}\psi_n = 0 \quad (2.4)$$

Για ένα μέσο ομοιόμορφης N , μπορεί να βρεθεί μια απλή λύση για την ψ_n . Από τις εξισώσεις (2.1), (2.3), και (2.4), η κατακόρυφη δομή των κανονικών τρόπων δίνεται από την

$$\frac{d^2\psi_n}{dz^2} + \frac{N^2}{c_n^2}\psi_n = 0 \quad (2.5)$$

με τις οριακές συνθήκες (2.3) και (2.4). Το σύνολο των σχέσεων (2.3) έως (2.5) ορίζει ένα πρόβλημα ιδιοτιμών, με την ψ_n ως την ιδιοσυνάρτηση και την c_n ως την ιδιοτιμή.

Η ανάλυση σε κανονικούς τρόπους ταλάντωσης είναι δυνατή μόνο στην περίπτωση απουσίας τοπογραφικών μεταβολών και μέσων ρευμάτων με διάτμηση (shear). Ισχύει είτε με την παρουσία ή την απουσία της δύναμης Coriolis ή του "β-effect". Ωστόσο, η υδροστατική προσέγγιση εδώ σημαίνει ότι οι συχνότητες είναι πολύ μικρότερες από την N . Υπό αυτές τις συνθήκες, οι ιδιοσυναρτήσεις είναι ανεξάρτητες από την συχνότητα, όπως δείχνει η (2.1). Χωρίς την υδροστατική προσέγγιση οι ιδιοσυναρτήσεις ψ_n εξαρτώνται από τη συχνότητα ω .

Στις περιπτώσεις στις οποίες η οριζόντια κλίμακα των κυμάτων είναι πολύ μεγαλύτερη από την κατακόρυφη κλίμακα, οι εξισώσεις που διέπουν την οριζόντια διάδοση του κάθε τρόπου ταλάντωσης είναι πανομοιότυπες με εκείνες ενός ρηχού ομοιογενούς στρώματος, με το βάθος του στρώματος H να αντικαθιστάται από το ισοδύναμο βάθος H_e που ορίζεται από τη σχέση $c_n^2 = gH_e$. Για ένα μέσο με σταθερό N , οι βαροκλιτικές ($n \geq 1$) ιδιοτιμές δίνονται από τη σχέση

$$c_n = \frac{NH}{n\pi} \quad (2.6)$$

ενώ η βαροτροπική ιδιοτιμή είναι

$$c_0 = \sqrt{gH} \quad (2.7).$$

2.3.2 Ακτίνα αποδιαμόρφωσης Rossby

Η ακτίνα αποδιαμόρφωσης Rossby του πρώτου βαροκλιτικού τρόπου ταλάντωσης είναι ένα μέγεθος θεμελιώδους σημασίας για την δυναμική της ατμόσφαιρας και του ωκεανού. Αποτελεί ένα μέτρο της οριζόντιας κλίμακας στην οποία θα γίνει σημαντική η γεωστροφική ισορροπία, η ισορροπία δηλαδή μεταξύ της δύναμης Coriolis και της οριζόντιας δύναμης βαροβαθμίδας. Όταν μια ωκεάνια λεκάνη είναι πολύ μεγαλύτερη από την ακτίνα αποδιαμόρφωσης Rossby, η κυκλοφορία στο εσωτερικό της θα είναι γεωστροφική. Διαφορετικά, η ακτίνα αποδιαμόρφωσης μας δίνει την κλίμακα των φαινομένων, όπως τα μέτωπα, οι δίνες και το πλάτος των ωκεάνιων ρευμάτων. Η ακτίνα αποδιαμόρφωσης εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη στρωμάτωση και την παράμετρο Coriolis.

Η ακτίνα αποδιαμόρφωσης Rossby για κάθε τρόπο ταλάντωσης n σε γεωγραφικό πλάτος ϕ είναι:

$$R_n = \frac{c_n}{|f(\phi)|}, \text{ αν } |\phi| \geq 5^\circ \quad (2.8\alpha)$$

και

$$R_n = \left[\frac{c_n}{2\beta(\phi)} \right]^{1/2}, \text{ αν } |\phi| \leq 5^\circ \quad (2.8\beta)$$

όπου $f = 2\Omega \sin\phi$, $\beta = \frac{\partial f}{\partial y} = \alpha^{-1} \frac{\partial f}{\partial \phi} = 2\Omega \alpha^{-1} \cos\phi$, Ω είναι η γωνιακή ταχύτητα της Γης,

α είναι η ακτίνα της Γης. Από τις Εξισώσεις (2.8α) και (2.8β) μπορούμε να συμπεράνουμε πως, έξω από τους τροπικούς, η γεωγραφική μεταβλητότητα των R_n είναι αντιστρόφως ανάλογη του $|f(\phi)|$, π.χ., μειώνεται καθώς αυξάνεται το γεωγραφικό πλάτος λόγω του β -effect, ενώ μέσα στη ζώνη του Ισημερινού, η R_n είναι αντιστρόφως ανάλογη του $[2\beta(\phi)]^{1/2}$, π.χ., μειώνεται καθώς μειώνεται το γεωγραφικό πλάτος.

Για $n=0$ υπολογίζουμε τη βαροτροπική ακτίνα αποδιαμόρφωσης Rossby, όπου $c_0 = \sqrt{gH}$ για βάθος νερού H και g η επιτάχυνση της βαρύτητας g . Οι ανώτεροι τρόποι ταλάντωσης είναι βαροκλιτικοί. Ο πρώτος βαροκλιτικός τρόπος, για $n=1$, είναι ο πιο σημαντικός όσον αφορά τις κινήσεις μεσαίας κλίμακας.

Η φασική ταχύτητα του πρώτου βαροκλιτικού κύματος Rossby στην προσέγγιση των μακρών κυμάτων, C_{R1} , είναι (Gill, 1982):

$$C_{R1} = -\beta R_1^2 \quad (2.9)$$

Κεφάλαιο 3. Αποτελέσματα

3.1 Εισαγωγή

Η Ερυθρά Θάλασσα ξεχωρίζει από τους ωκεανούς και τις υπόλοιπες θάλασσες του κόσμου, λόγω των ιδιαίτερων φυσικών και βιοχημικών διεργασιών που λαμβάνουν χώρα σε αυτή. Ένα από τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά που παρουσιάζει είναι η πολύ υψηλή επιφανειακή αλατότητα, μια από τις υψηλότερες στον παγκόσμιο ωκεανό. Επιπλέον, η υδάτινη μάζα που εξέρχεται από το Στενό του Bab el Mandeb θεωρείται μία από τις σημαντικότερες ενδιάμεσες μάζες νερού (υψηλής θερμοκρασίας και εξαιρετικά υψηλής αλατότητας νερό) στον Ινδικό Ωκεανό εξαιτίας των επιπτώσεων της στην θερμοαλατική κυκλοφορία του Ινδικού Ωκεανού (Plaehn et al., 2002). Έχει χαρτογραφηθεί ανατολικά στον Ινδικό Ωκεανό πέρα από τις 50°E προς τις ακτές της Σουμάτρα, προς τα νότια μέσω του στενού της Μοζαμβίκης μέσα στο Agulhas Current (Wyrtki, 1971; Shapiro & Meschanov, 1991; Beal et al., 2000) και μέσα στο Cape Basin και τον Νότιο Ατλαντικό Ωκεανό (Valentine et al., 1993).

Κύριος σκοπός αυτού του Κεφαλαίου είναι η παρουσίαση της επεξεργασίας των δεδομένων που αποκτήθηκαν στις ωκεανογραφικές αποστολές του 2010 και 2011 όπως αυτή περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 2. Η μελέτη μας θα επικεντρωθεί στις μάζες νερού της περιοχής, στα υδρογραφικά τους χαρακτηριστικά και πως αυτά μεταβάλλονται με το χρόνο. Τα δεδομένα του 2001 θα τα χρησιμοποιηθούν ως έχουν με στόχο τη σύγκριση τους με τα παραπάνω δεδομένα, καθώς η επεξεργασία τους έχει γίνει ήδη από τους Sofianos and Johns (2007).

Στο πρώτο μέρος του Κεφαλαίου αυτού, αρχικά παρουσιάζουμε την κατανομή των θερμοαλατικών χαρακτηριστικών σε μια τομή κατά μήκος του άξονα της λεκάνης και στη συνέχεια μελετάμε την κάθε μάζα νερού χωριστά. Η πρώτη μάζα νερού που μελετάμε είναι τα επιφανειακά νερά και πως αυτά μεταβάλλονται κατά μήκος της λεκάνης κάθε εποχή. Συνεχίζουμε με το GAIW που εμφανίζεται στην Ερυθρά Θάλασσα τους καλοκαιρινούς μήνες, για το οποίο μας ενδιαφέρει η χρονική του εξέλιξη και το πώς διαδίδεται μέσα στη λεκάνη. Τέλος, μελετάμε το RSDW και τις υπερετήσιες μεταβολές του. Καθώς αυτή η μάζα νερού δεν επηρεάζεται από τις εποχικές μεταβολές, όποια μεταβολή στα χαρακτηριστικά της πιθανώς οφείλονται σε κάποια γενική τάση.

Στο δεύτερο μέρος του Κεφαλαίου αυτού μελετάμε τη στρωμάτωση της Ερυθράς Θάλασσας και την επίδραση που έχει αυτή η στρωμάτωση στην δυναμική της λεκάνης. Αρχικά, από τα προφίλ της πυκνότητας, αναλύουμε σε κανονικούς τρόπους ταλάντωσης και μελετάμε τις υπερετήσιες μεταβολές τους. Στη συνέχεια υπολογίζουμε την ακτίνα αποδιαμόρφωσης Rossby για κάθε τρόπο ταλάντωσης και την ταχύτητα των μακρών κυμάτων Rossby. Τέλος, την ταχύτητα αυτή την συγκρίνουμε με την γεωστροφική ταχύτητα λόγω της κλίσης της επιφάνειας της θάλασσας. Η σύγκριση μας δίνει μια ένδειξη για την δυναμική της περιοχής και μια ερμηνεία για την παρατηρούμενη κυκλοφορία.

3.2 Μάζες νερού στην Ερυθρά Θάλασσα ανά εποχή

Τα διαθέσιμα δεδομένα μας δίνουν την δυνατότητα να μελετήσουμε τα χαρακτηριστικά της Ερυθράς Θάλασσας και τις δύο εποχές του έτους (χειμώνας και καλοκαίρι). Μας δίνεται έτσι η δυνατότητα να μελετήσουμε κατά πόσο τα αποτελέσματα μας συμφωνούν με τις ήδη γνωστές/ δημοσιευμένες παρατηρήσεις.

3.2.1 Χειμώνας (Δεδομένα 2010)

Η στρωμάτωση και οι μάζες νερού, οι οποίες σχετίζονται με την κυκλοφορία στην Ερυθρά Θάλασσα κατά τη διάρκεια του χειμώνα, αποτυπώνονται στις μετρήσεις του Μάρτιου του 2010 στους 14 σταθμούς που βρίσκονται κατά μήκος του κεντρικού άξονα της λεκάνης. Στις εικόνες 3.1-3.4 παρουσιάζεται η κατανομή της θερμοκρασίας, της αλατότητας, της δυνητικής πυκνότητας και της συγκέντρωσης του διαλυμένου οξυγόνου. Σε όλες τις τομές, κατά μήκος του άξονα της λεκάνης, έχουν επιλεγεί τα ίδια όρια στους άξονες, ώστε να είναι δυνατή η άμεση σύγκριση.

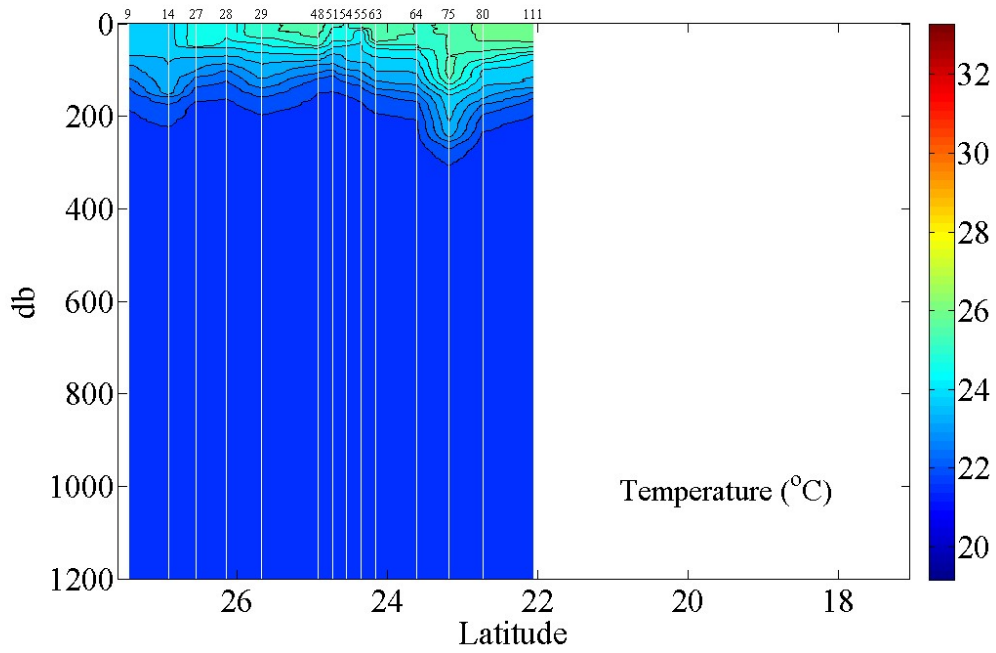
Κατά τη χειμερινή περίοδο, στα επιφανειακά στρώματα της Ερυθράς Θάλασσας εμφανίζεται το **GASW** (Gulf of Aden Surface Water), το οποίο εισέρχεται στην Ερυθρά Θάλασσα από τον κόλπο του Aden, ως ένα σχετικά γλυκό επιφανειακό στρώμα και αποτελεί το ανώτερο στρώμα της “inverse estuarine” ανταλλαγής. Εμφανίζεται μόνο κατά τη διάρκεια του χειμώνα, η θερμοκρασία του κυμαίνεται από τους 26 °C και μειώνεται έως τους 24 °C, προς το βορρά. Η αλατότητα ξεκινάει από τα 38.5 και φτάνει στα 39 psu, ενώ η συγκέντρωση του οξυγόνου είναι περίπου 4 ml/lt. Καθώς το **GASW** εισέρχεται στη λεκάνη παρατηρείται μια μείωση στη θερμοκρασία του και μια αύξηση στην αλατότητα του, λόγω της επίδρασης των ατμοσφαιρικών συνθηκών που επικρατούν στην Ερυθρά Θάλασσα αυτή την εποχή. Κάτω από το **GASW**, βρίσκεται το **RSOW**, το οποίο αποτελεί την εξερχόμενη μάζα νερού από την Ερυθρά Θάλασσα προς τον Ινδικό Ωκεανό. Στο βόρειο τμήμα της λεκάνης και την συγκεκριμένη εποχή, οι χαρακτηριστικές τιμές του **RSOW** είναι 23-26°C για τη θερμοκρασία, 40.2 psu για την αλατότητα και 2.5-3 ml/lt για τη συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου.

Το RSDW αποτελεί τα βαθιά νερά της Ερυθράς Θάλασσας που γεμίζουν την λεκάνη από ένα βάθος περίπου 300 m έως το πυθμένα. Είναι μία πολύ ομοιογενής μάζα νερού, με θερμοκρασία 21.5°C και αλατότητα 40.5 psu. Η συγκέντρωση του οξυγόνου παρουσιάζει ένα ελάχιστο στα 500 m, ενώ στα πιο βαθιά στρώματα παίρνει υψηλότερες τιμές. Η κατανομή του οξυγόνου στα RSDW σχετίζεται με την υπόθεση του Cember (1988), ο οποίος βασισμένος στις συγκεντρώσεις ^{14}C και ^3He , πρότεινε ότι τα βαθιά νερά βουλιάζουν στο βυθό στο βορειότερο τμήμα της λεκάνης, κινούνται προς τα νότια και καθώς φτάνουν στη ρηχή περιοχή κοντά στο στενό του Bab el Mandeb, αναβλύζουν και ακολουθούν μια αργή πορεία σε ενδιάμεσα βάθη προς βορρά. Η σχετικά υψηλή τιμή στη συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου που παρατηρείται στα βαθιά νερά του βορειότερου άκρου της Ερυθράς Θάλασσας είναι χαρακτηριστικό των “νέων” βαθιών νερών που δημιουργούνται στους κόλπους του Suez και της Aqaba και καθώς ακολουθούν την αργή προς τα νότια κίνηση η συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου μειώνεται.

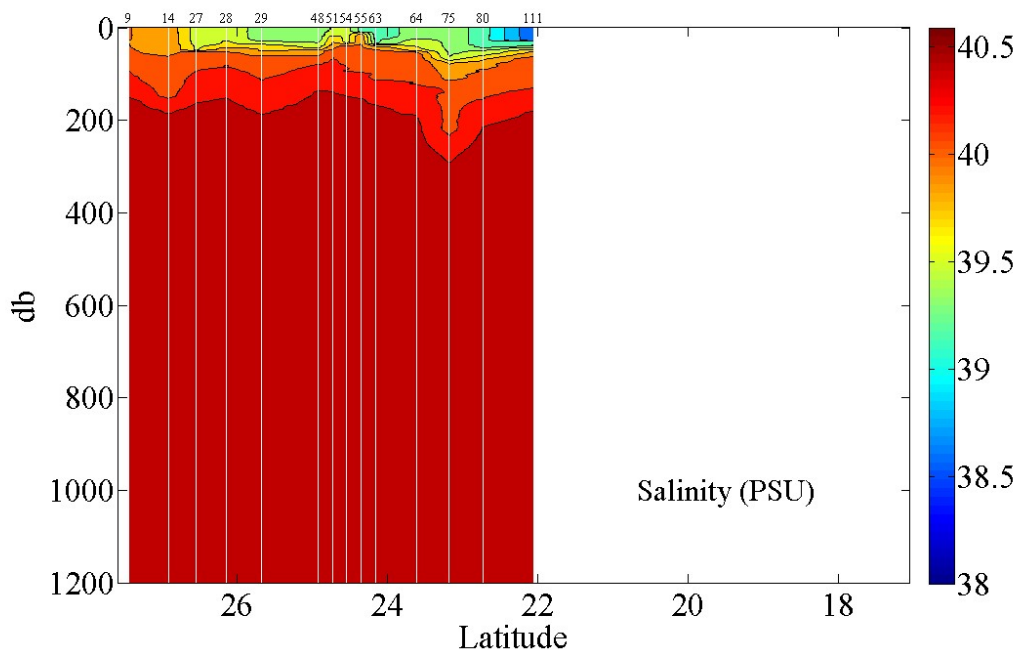
Από τις Εικόνες 3.1 και 3.3, παρατηρώντας της βυθίσεις ή τις ανυψώσεις των ισόθερμων και των ισόπυκνων καμπύλων στο θερμοκλινές, μπορούμε να κάνουμε κάποιες υποθέσεις σχετικά με την επιφανειακή κυκλοφορία. Το πιο έντονο χαρακτηριστικό που μπορεί να παρατηρηθεί είναι η βύθιση του θερμοκλινούς στις 23.2°N, η οποία φτάνει σε βάθος τα 300 m. Φαίνεται να συνδέεται με την ύπαρξη ενός αντικυκλώνα στην περιοχή, ο οποίος πιθανώς αποτελεί μόνιμο χαρακτηριστικό της κυκλοφορίας της Ερυθράς Θάλασσας καθώς έχει περιγραφεί σε προηγούμενες παρατηρήσεις (Morcos, 1970; Morcos and Soliman, 1974; Quadfasel and Baunder, 1993; Sofianos and Johns, 2007) και μελέτες με αριθμητικά μοντέλα (Sofianos and Johns, 2003).

Στις 26°N και στις 24.5°N παρατηρούμε μια ανύψωση στο θερμοκλινές, η οποία πιθανώς να οφείλεται στην ύπαρξη κυκλωνικών δομών στην επιφάνεια. Ο κυκλώνας με κέντρο τις 26°N έχει αναφερθεί και σε παλαιότερες παρατηρήσεις στην περιοχή (Morcos, 1970; Morcos and Soliman, 1974; Maillard, 1974; Clifford et al., 1997; Sofianos and Johns, 2007) και σε αποτελέσματα από αριθμητικά μοντέλα (Sofianos and Johns, 2003; Yao et al., 2014). Οι διαθέσιμες μελέτες δείχνουν πως αυτός ο κυκλώνας είναι χαρακτηριστικό της κυκλοφορίας καθ' όλη τη διάρκεια του χρόνου, με πιθανή εποχική διακύμανση, και διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στη διαδικασία σχηματισμού της RSOW. Σύμφωνα με τους Sofianos and Johns (2003), ένα μεγάλο ποσοστό (περίπου 65%) της υπεράλμυρης εκροής στο στενό του Bab el Mandeb παράγεται σε αυτή τη κυκλωνική δίνη κατά τη διάρκεια του χειμώνα, όταν το ισχυρό buoyancy forcing παρέχει ένα ευνοϊκό περιβάλλον για ενδιάμεσου βάθους μεταφορά. Ο κυκλώνας που παρατηρούμε στις 24.5°N δεν αναφέρεται σε παλαιότερες μελέτες αλλά στα συγκεκριμένα δεδομένα εμφανίζεται ως ένα έντονο χαρακτηριστικό, πιο εμφανές ακόμα και από αυτόν στις 26°N.

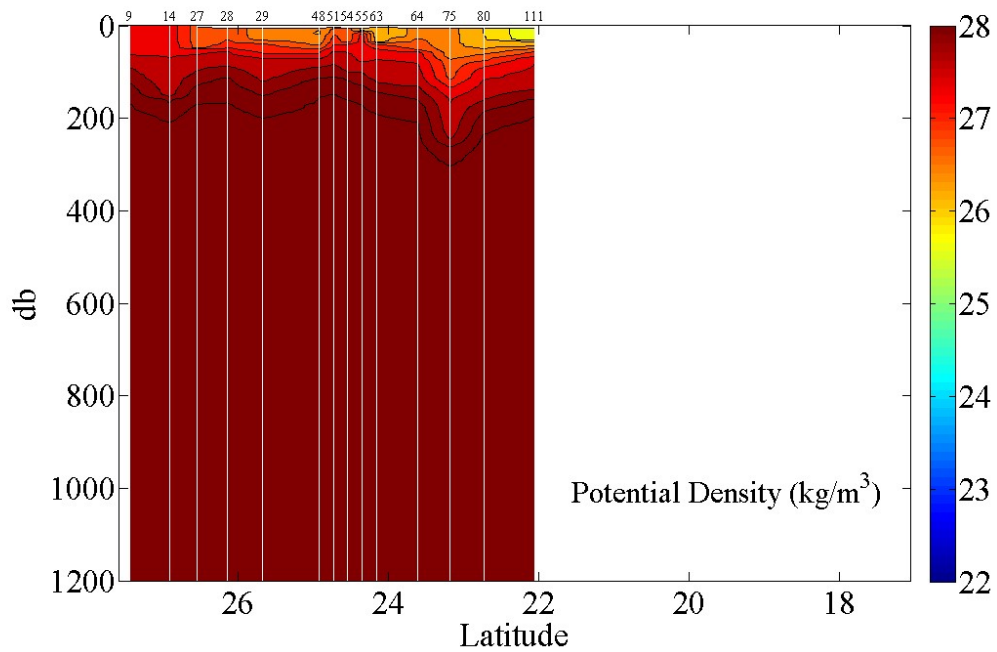
Η αποστολή του Commandant Robert Giraud στην Ερυθρά Θάλασσα πραγματοποιήθηκε τους μήνες Ιανουάριο και Φεβρουάριο του 1963 και αποτελεί μια πρώτη ένδειξη της κατανομής των υδρογραφικών χαρακτηριστικών κατά μήκος του άξονα της λεκάνης τη χειμερινή περίοδο (Εικόνα 1.4). Σε σύγκριση με τα αποτελέσματα των μετρήσεων του 2010 παρατηρούνται μικρές μεταβολές. Η επιφανειακή θερμοκρασία παρουσιάζει τις ίδιες τιμές ξεκινώντας από τους 26°C στις 22°N μειούμενη έως τους 24°C στο βόρειο τμήμα της λεκάνης. Αντίθετα, η επιφανειακή αλατότητα είναι μεγαλύτερη το 1963 καθώς παίρνει τιμές από 39 psu έως και μεγαλύτερες από 40 psu. Επίσης, παρατηρούμε πως υπάρχει αντιστοιχία στις βαθύνσεις και τις ανυψώσεις των ισόπυκνων, γεγονός που υποδεικνύει την ύπαρξη σταθερών δομών στην επιφάνεια της Ερυθράς Θάλασσας, οι οποίες παρουσιάζουν μόνο μικρές χωρικές μεταβολές. Τα βαθειά νερά φαίνεται να έχουν ίδιες τιμές αλατότητας και θερμοκρασίας.



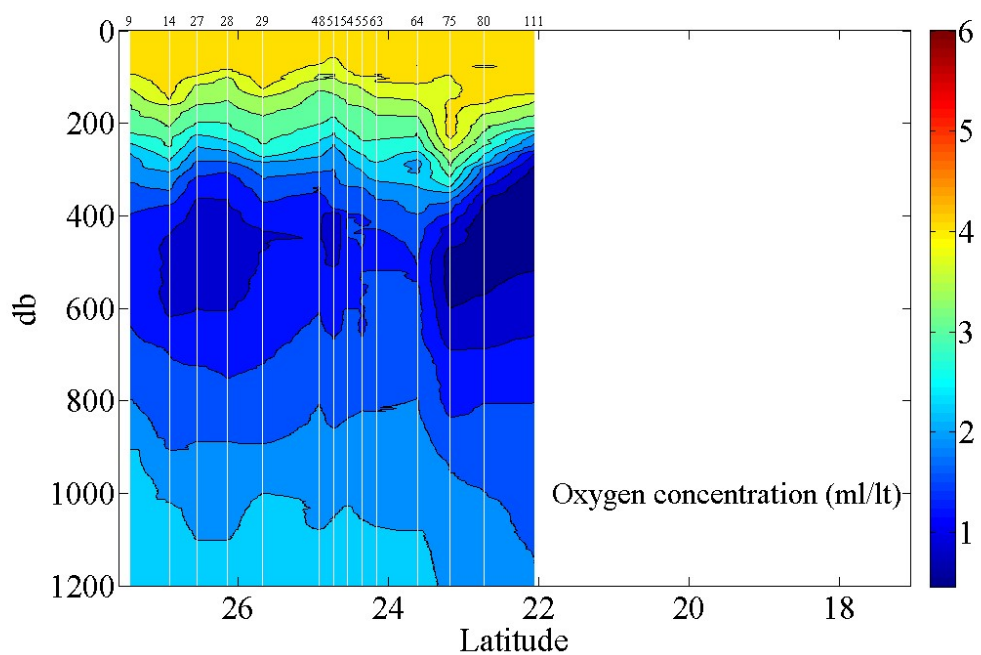
Εικόνα 3.1. Η κατανομή της θερμοκρασίας κατά μήκος του άξονα της Ερυθράς Θάλασσας από τα δεδομένα του 2010. Στον οριζόντιο άξονα είναι το γεωγραφικό πλάτος και στον κατακόρυφο το βάθος.



Εικόνα 3.2. Η κατανομή της αλατότητας κατά μήκος του άξονα της Ερυθράς Θάλασσας από τα δεδομένα του 2010.



Εικόνα 3.3. Η κατανομή της δυνητικής πυκνότητας κατά μήκος του άξονα της Ερυθράς Θάλασσας από τα δεδομένα του 2010.



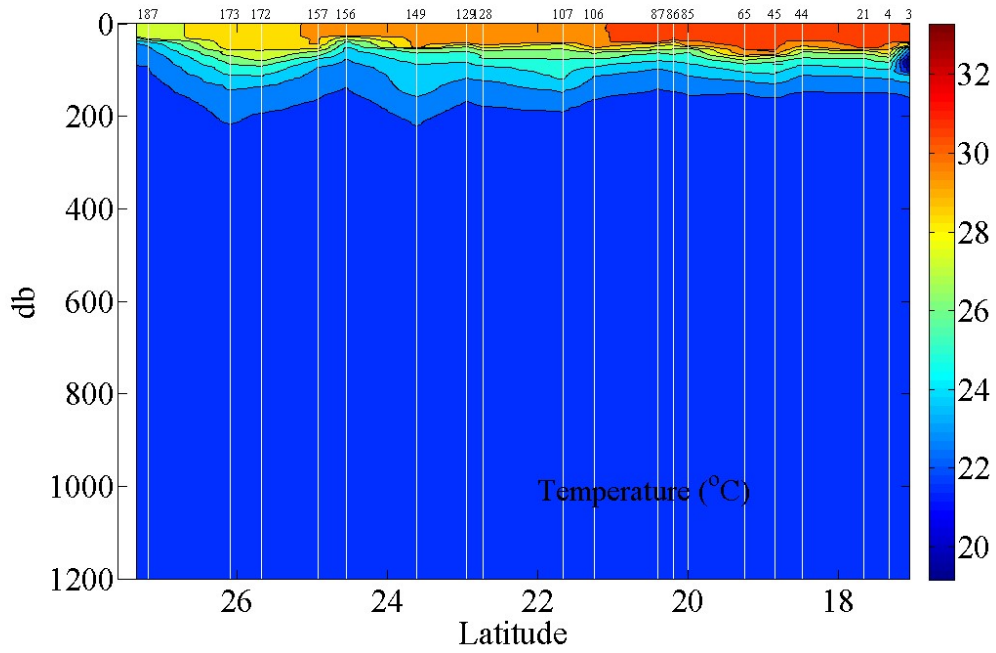
Εικόνα 3.4. Η κατανομή της συγκέντρωσης του οξυγόνου κατά μήκος του άξονα της Ερυθράς Θάλασσας από τα δεδομένα του 2010.

3.2.2. Καλοκαίρι (Δεδομένα 2011)

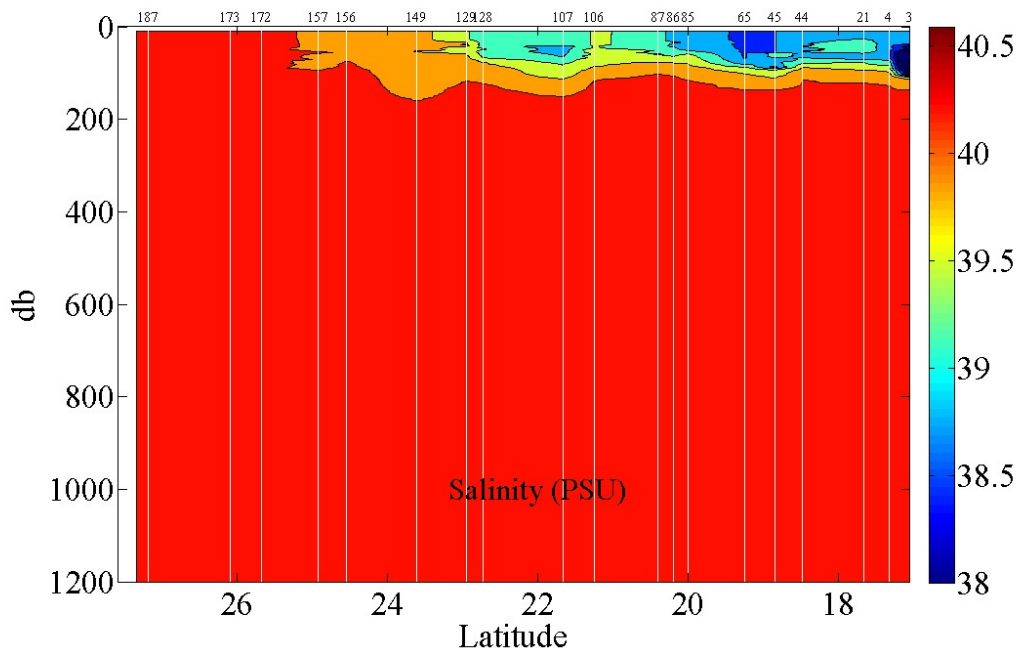
Χαρακτηριστική της θερινής κυκλοφορίας στην Ερυθρά Θάλασσα είναι η κατανομή των υδρογραφικών χαρακτηριστικών κατά μήκος του άξονα της Ερυθράς Θάλασσας από τα δεδομένα του 2011, όπως αυτά αποτυπώνονται στις μετρήσεις στους 20 σταθμούς, οι οποίοι ακολουθούν τον κεντρικό άξονα της λεκάνης. Η θερμοκρασία, η αλατότητα, η δυνητική πυκνότητα και η συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου κατά μήκος της τομής φαίνονται στις Εικόνες 3.5 -3.8. Το πιο εμφανές στοιχείο, χαρακτηριστικό της θερινής κυκλοφορίας και ανταλλαγής με τον Ινδικό Ωκεανό, αποτελεί το ελάχιστο της θερμοκρασίας, της αλατότητας και του οξυγόνου σε βάθος 80 m περίπου στο νοτιότερο άκρο της λεκάνης. Σχετίζεται με το Gulf of Aden Intermediate Water (**GAIW**), το οποίο εισρέει από τον κόλπο του Aden, κατά την καλοκαιρινή περίοδο, ως ένα υποεπιφανειακό στρώμα. Πάνω από το **GAIW** βρίσκεται το **RSSW** (Red Sea Surface Water), το οποίο είναι πιο θερμό και με υψηλότερη αλατότητα από το **GAIW**, αλλά τα χαρακτηριστικά του μεταβάλλονται κατά μήκος της λεκάνης. Σε αντίθεση με την κατάσταση που επικρατεί το χειμώνα, το **RSSW** κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού κινείται προς το νότο κατά μήκος της λεκάνης και εξέρχεται ως ένα λεπτό επιφανειακό στρώμα μέσω του Bab el Mandeb (Murray και Johns, 1997). Κάτω από το **GAIW** βρίσκονται άλλες δύο μάζες νερού: (1) το Red Sea Outflow Water (**RSOW**), το οποίο δημιουργείται το χειμώνα στο βόρειο τμήμα της Ερυθράς Θάλασσας και εμφανίζει αλατότητα 40 psu, και (2) το Red Sea Deep Water (**RSDW**). Τα χαρακτηριστικά της τελευταίας ως προς την θερμοκρασία και την αλατότητα μοιάζουν πολύ με αυτά του **RSOW** και την διακρίνουμε κυρίως από την χαμηλότερη συγκέντρωση σε οξυγόνο.

Τα χαρακτηριστικά του στρώματος του **GAIW** εξασθενούν πολύ γρήγορα, καθώς αυτό κινείται προς το βορρά ανάμεσα στα πιο θερμά, αλμυρά και πιο οξυγονωμένα νερά των **RSSW** και **RSOW**. Τα τελευταία ίχνη αυτής της μάζας νερού, όπως θα αναλυθεί παρακάτω, μπορεί να φτάσουν ως τις 24°N. Στο νοτιότερο τμήμα της λεκάνης μπορούμε να παρατηρήσουμε δύο ελάχιστα του οξυγόνου, το ένα σε βάθος 80 m και το δεύτερο σε βάθος 400m. Το πρώτο ελάχιστο σχετίζεται με το **GAIW** και η ελάχιστη τιμή που παρουσιάζει είναι 0.8 ml/l. Το δεύτερο ελάχιστο σχετίζεται με το **RSDW**, και πιο συγκεκριμένα με τα "παλαιά" βαθειά νερά, καθώς αυτά ανακυκλώνονται προς το βορρά. Πάνω από αυτό το ελάχιστο του οξυγόνου βρίσκεται το στρώμα του **RSOW**, το οποίο χαρακτηρίζεται από σχετικά υψηλή συγκέντρωση διαλυμένου οξυγόνου, η οποία κοντά στην περιοχή του Bab el Mandeb παρατηρείται στα 140 m βάθος.

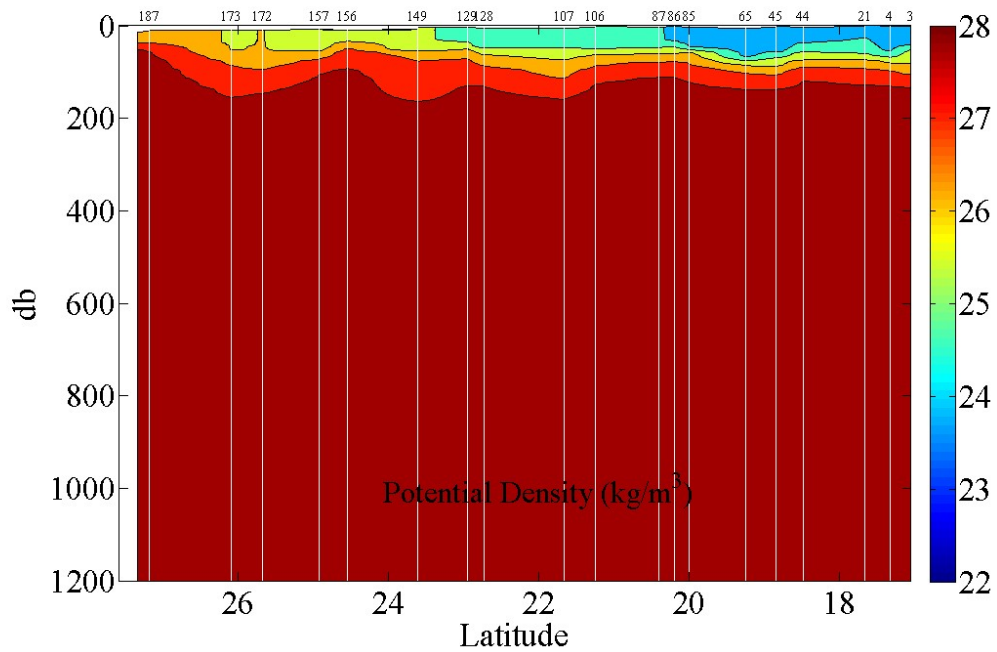
Παρατηρώντας τις ανυψώσεις και τις βυθίσεις των ισόπυκνων στο θερμοκλινές, μπορούμε να υποθέσουμε την ύπαρξη αντικυκλώνων στις 26°N, στις 23.6°N, στις 21.7°N και στις 19°N, ενώ κυκλωνικές δομές μπορούν να προβλεφθούν για τις 27°N και για τις 24.5°N. Ο αντικυκλώνας στις 23.6°N, όπως φαίνεται και στα δεδομένα του 2010, είναι μόνιμο χαρακτηριστικό της κυκλοφορίας. Επίσης, σε συμφωνία με τα δεδομένα του 2010 είναι και ύπαρξη του κυκλώνα στις 24.5°N, ενώ ο κυκλώνας που το 2010 είχε κέντρο στις 26°N, φαίνεται το καλοκαίρι (2011) να έχει μετακινηθεί στις 27°N. Τέλος, οι αντικυκλώνες στις 21.7°N και 19°N συμφωνούν με τα αποτελέσματα των Sofianos και Johns (2007), και των Quadfasel και Baunder (1993), οι οποίοι διαπίστωσαν την ύπαρξη ενός σχεδόν μόνιμου αντικυκλώνα κοντά στις 21°N και ενός δεύτερου, ο οποίος εμφανίζεται πιο ενισχυμένος κατά την καλοκαιρινή περίοδο, κοντά στις 18°N.



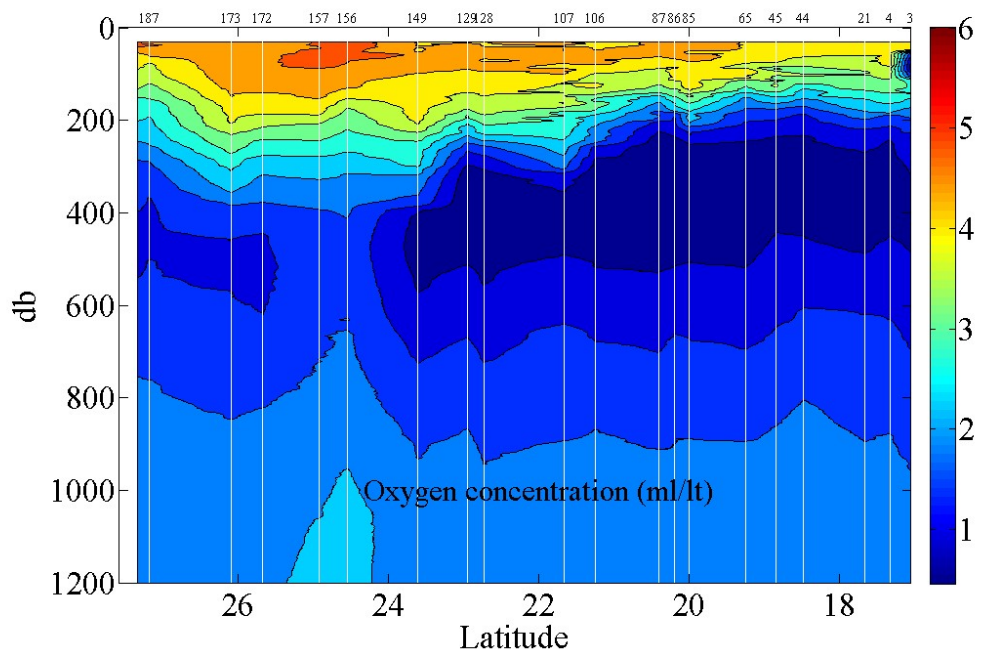
Εικόνα 3.5. Η κατανομή της θερμοκρασίας κατά μήκος του άξονα της Ερυθράς Θάλασσας από τα δεδομένα του 2011.



Εικόνα 3.6. Η κατανομή της αλατότητας κατά μήκος του άξονα της Ερυθράς Θάλασσας από τα δεδομένα του 2011.



Εικόνα 3.7. Η κατανομή της δυνητικής πυκνότητας κατά μήκος του άξονα της Ερυθράς Θάλασσας από τα δεδομένα του 2011.



Εικόνα 3.8. Η κατανομή της συγκέντρωσης του οξυγόνου κατά μήκος του άξονα της Ερυθράς Θάλασσας από τα δεδομένα του 2011.

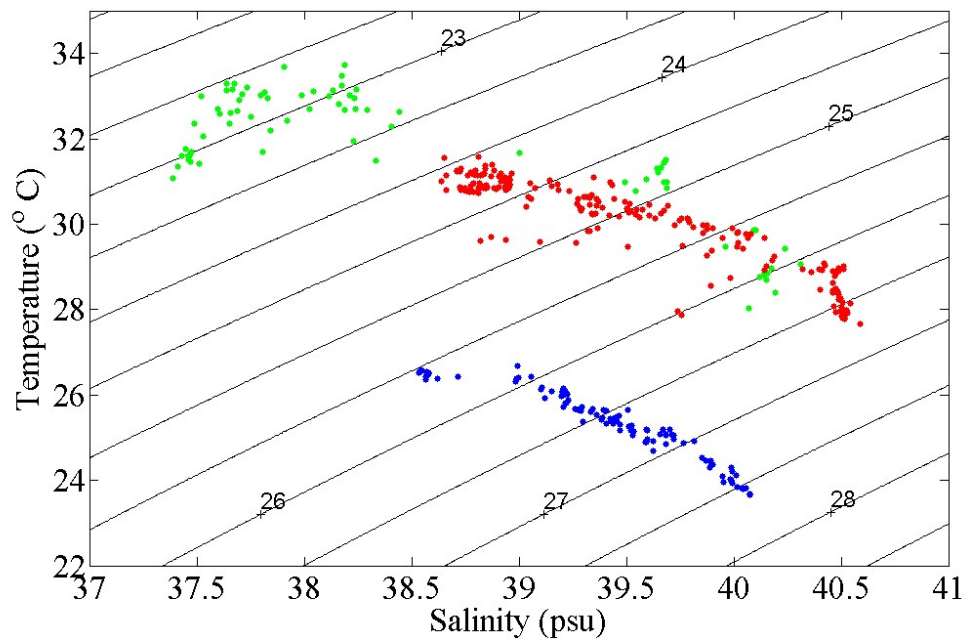
3.3 Θερμοαλατικά χαρακτηριστικά των επιφανειακών νερών (SW)

Στα επιφανειακά νερά παρατηρούνται ισχυρές βαθμίδες των υδρογραφικών χαρακτηριστικών, (συναρτήσεσι του γεωγραφικού πλάτους), οι οποίες οφείλονται στην αλληλεπίδραση θάλασσας-ατμόσφαιρας, καθώς και σε διαδικασίες ανάμιξης μέσα στην λεκάνη. Στην εικόνα 3.9, σε ένα διάγραμμα θερμοκρασίας-αλατότητας (Θ-S) παρουσιάζονται οι μέσες τιμές της θερμοκρασίας και της αλατότητας των επιφανειακών νερών της Ερυθράς Θάλασσας (στα πρώτα 10m) όπως αυτές προκύπτουν από τα δεδομένα των τριών αποστολών. Το πράσινο χρώμα αντιπροσωπεύει τους σταθμούς του 2001, το μπλε χρώμα τους σταθμούς του 2010 και το κόκκινο χρώμα τους σταθμούς του 2011. Παρατηρούμε πως οι τιμές της θερμοκρασίας από τους σταθμούς του 2001 και του 2011 κυμαίνονται στα ίδια επίπεδα, καθώς αποτελούν μετρήσεις της ίδιας εποχής του χρόνου. Επιπλέον, όπως είναι αναμενόμενο, οι θερμοκρασίες στους σταθμούς του 2010 είναι χαμηλότερες από τις θερμοκρασίες που μετρήθηκαν στις άλλες δύο αποστολές, αφού αντιστοιχούν σε μετρήσεις κατά τη χειμερινή περίοδο. Αντίθετα, οι τιμές της αλατότητας δεν παρουσιάζουν ιδιαίτερες διαφορές ανάμεσα στις τρεις αποστολές.

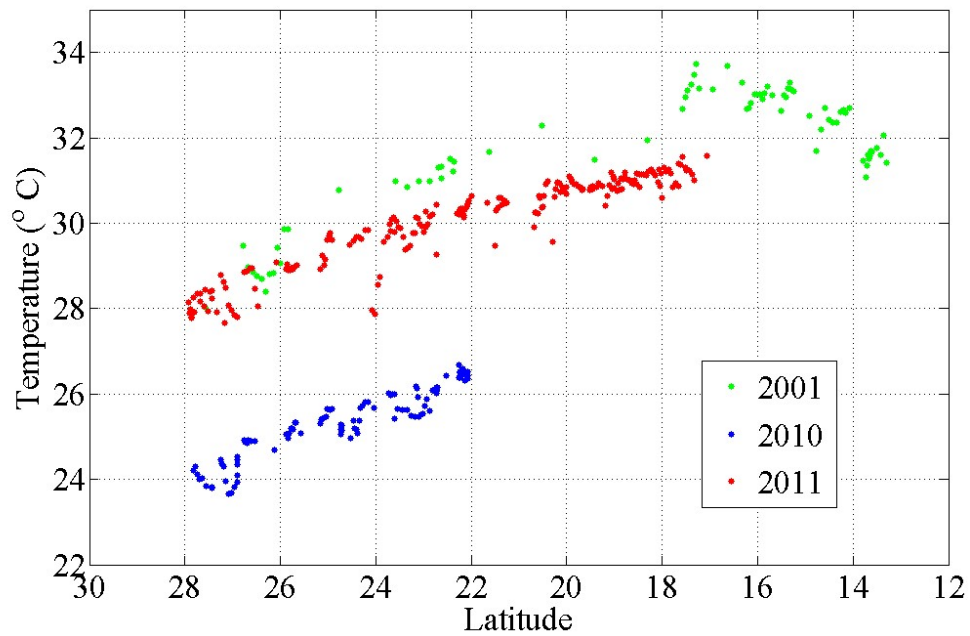
Στις εικόνες 3.10 και 3.11 παρουσιάζεται η κατανομή της θερμοκρασίας και της αλατότητας, αντίστοιχα, των επιφανειακών νερών συναρτήσεσι του γεωγραφικού πλάτους. Στις μετρήσεις του 2001, οι τάσεις της θερμοκρασίας και της αλατότητας στο επιφανειακό στρώμα (εικόνες 3.10 και 3.11) δείχνουν πως, ακολουθώντας τη διεύθυνση βορρά-νότου, η θερμοκρασία αρχικά αυξάνει, προς το νότο, από τους 28°C σε ένα μέγιστο στους 33.7°C, κοντά στις 17.3°N. Από αυτό το γεωγραφικό πλάτος και προς το νότο, παρατηρείται μια πτωτική τάση στη θερμοκρασία, με την επιφανειακή θερμοκρασία στην έξοδο της λεκάνης να φτάνει περίπου τους 31.4°C, γεγονός που υποδεικνύει την έντονη επίδραση που δέχεται το επιφανειακό στρώμα από το υποκείμενο στρώμα του GAIW. Η επιφανειακή αλατότητα παρουσιάζει συνεχή πτωτική τάση προς το νότο, με την τιμή της να κυμαίνεται από τα 40.1 psu στο βόρειο άκρο της λεκάνης στα 37.5 psu στο στενό του Bab el Mandeb.

Για την αποστολή του 2011, η επιφανειακή θερμοκρασία παρατηρούμε πως αυξάνεται από βορρά προς νότο από τους 28.14°C στους 31.6°C στις 17.05°N και η αλατότητα για την ίδια περιοχή μειώνεται από τα 40.5 psu στα 38.8 psu. Συγκριτικά με τις τιμές από την κοινή περιοχή με το 2001, φαίνεται πως τα επιφανειακά νερά το 2011 έχουν χαμηλότερη θερμοκρασία και υψηλότερη αλατότητα. Ο ρυθμός αύξησης της θερμοκρασίας κατά μήκος της λεκάνης είναι μεγαλύτερος το 2001 και αντίστοιχα, η μέγιστη θερμοκρασία τον Αύγουστο του 2001 είναι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη μέγιστη το Σεπτέμβριο του 2011.

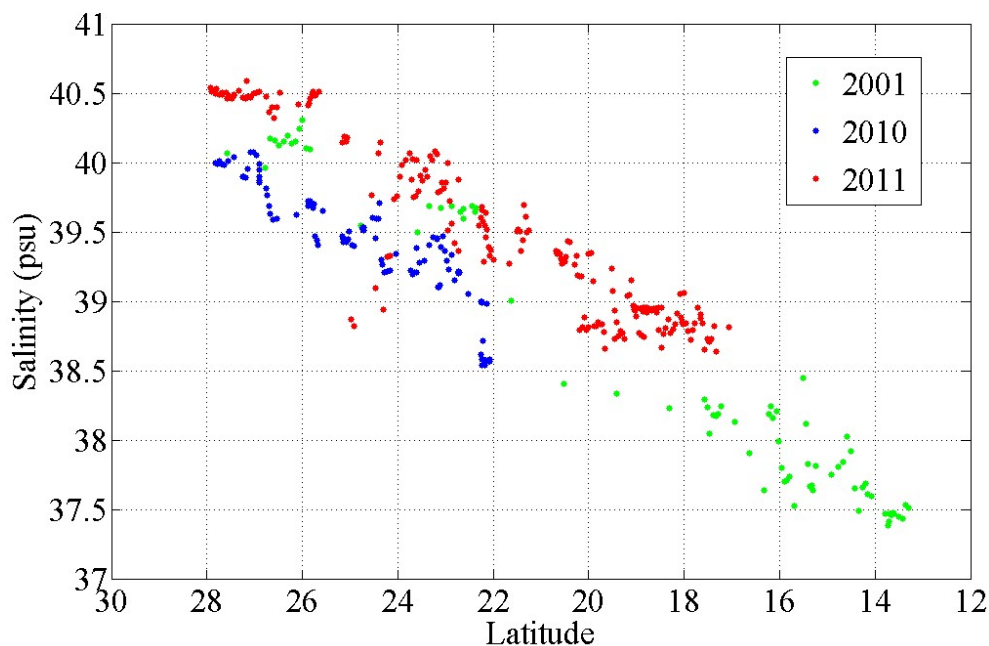
Από τις μετρήσεις του 2010, παρατηρούμε πως ακολουθώντας τη διεύθυνση βορρά-νότου η θερμοκρασία αυξάνει από 24.2°C σε 26.5°C κοντά στις 22.1°N. Τα διαθέσιμα δεδομένα από την αποστολή του 2010 δεν αρκούν για να έχουμε εικόνα νοτιότερα από τις 22.1°N. Η επιφανειακή αλατότητα παρουσιάζει πτωτική τάση προς τα νότια, από τα 40 psu στο βόρειο άκρο της λεκάνης στα 38.6 psu στις 22.1°N. Τα δεδομένα του 2010 αντιστοιχούν σε χειμερινή περίοδο, οπότε είναι αναμενόμενο οι τιμές της θερμοκρασίας να είναι μικρότερες από τις αντίστοιχες του 2001. Αξίζει να σημειωθεί πως η αλατότητα, αντιθέτως, κυμαίνεται στις ίδιες περίπου τιμές με τις καλοκαιρινές.



Εικόνα 3.9. Το διάγραμμα θ - S των επιφανειακών νερών (μέση τιμή των πρώτων 10 m) από τις τρεις αποστολές. Το πράσινο χρώμα αντιπροσωπεύει τους σταθμούς του 2001, το μπλε τους σταθμούς του 2010 και το κόκκινο τους σταθμούς του 2011.



Εικόνα 3.10. Η θερμοκρασία των επιφανειακών νερών της Ερυθράς Θάλασσας από τις τρεις αποστολές.



Εικόνα 3.11. Η αλατότητα των επιφανειακών νερών της Ερυθράς Θάλασσας στις τρεις αποστολές.

Οι οριζόντιες κατανομές της θερμοκρασίας και της αλατότητας στις βόρειες και κεντρικές περιοχές της Ερυθράς Θάλασσας φαίνεται να σχετίζονται με τις τάσεις των ροών θερμότητας και γλυκού νερού μεταξύ θάλασσας και ατμόσφαιρας, οι οποίες εμφανίζουν τις μεγαλύτερες απώλειες στο βόρειο άκρο της λεκάνης, καθ' όλη τη διάρκεια του έτους. Το καλοκαίρι, η παρουσία αυτών των βαθμίδων εντατικοποιείται από το πεδίο του ανέμου, το οποίο έχει μέγιστη τιμή στο βόρειο και μεσαίο τμήμα της λεκάνης. Στο νότιο τμήμα της λεκάνης παρατηρούνται βόρειοι άνεμοι μεταβλητής έντασης. Στη νότια Ερυθρά Θάλασσα, το επιφανειακό στρώμα φαίνεται να επηρεάζεται έντονα από το υποκείμενο στρώμα του GAIW, με αποτέλεσμα να παρατηρείται μείωση της θερμοκρασίας και της αλατότητας. Νότια από τις 22°N, η αλατότητα μειώνεται απότομα, παρόλο που η θερμοκρασία εξακολουθεί να αυξάνεται μέχρι και τις 17.3°N. Η αυξητική τάση της θερμοκρασίας στη συνέχεια αναστρέφεται μέχρι την έξοδο της λεκάνης, όπως φαίνεται στα δεδομένα του 2001 (Εικόνα 3.10).

Το χειμώνα, καθώς τα θερμά και γλυκά επιφανειακά νερά που εισέρχονται από τον κόλπο του Αδεν κινούνται προς το βορρά, υφίστανται έντονη εξάτμιση και ψύξη, λόγω των ατμοσφαιρικών συνθηκών που επικρατούν στην περιοχή. Αυτό αποτυπώνεται στις κατανομές της θερμοκρασίας και αλατότητας κατά μήκος του άξονα της λεκάνης, όπου παρατηρείται έντονη μείωση της θερμοκρασίας και αύξηση της αλατότητας (ακολουθώντας τη διεύθυνση από νότο προς βορρά).

Μπορούμε επίσης να παρατηρήσουμε αυτές τις τάσεις στο διάγραμμα Θ-S (Εικόνα 3.9), με τις τιμές που αντιστοιχούν στο νότο να καταλαμβάνουν την επάνω αριστερή γωνία του διαγράμματος και τις τιμές που αντιστοιχούν στο βορά, νερά με υψηλότερη πυκνότητα, να καταλαμβάνουν την κάτω δεξιά γωνία. Μια μικρότερης κλίμακας χωρική μεταβολή που παρατηρείται στα χαρακτηριστικά της επιφάνειας του νερού είναι ενσωματωμένη στις τάσεις και μπορεί να εξηγηθεί από τις τοπικές ιδιαιτερότητες της κυκλοφορίας.

3.4 Gulf of Aden Intermediate Water (GAIW)

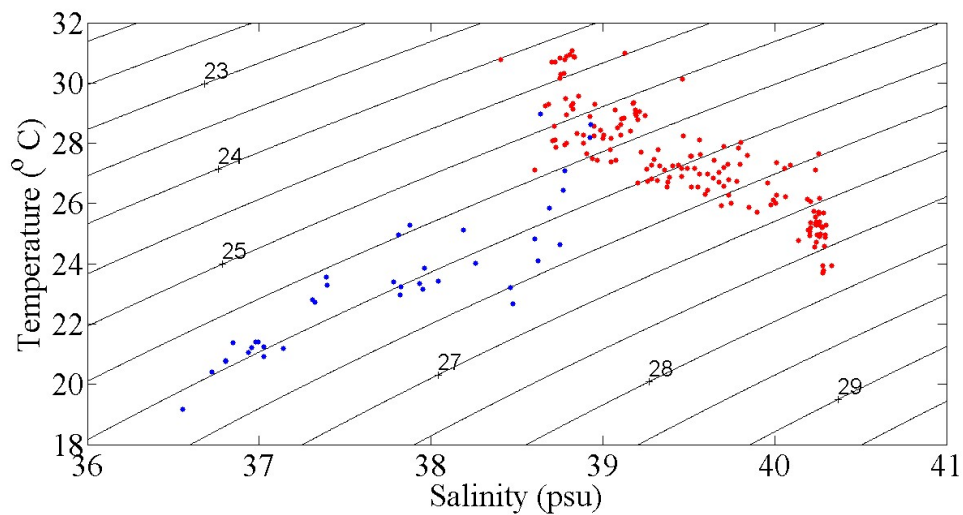
Το GAIW είναι μία μάζα νερού που εισέρχεται στην Ερυθρά Θάλασσα από τον Κόλπο του Aden, μέσω του στενού του Bab el Mandeb, κατά τη διάρκεια της θερινής περιόδου (Ιούνιος-Σεπτέμβριος). Αυτή η εποχιακή εισροή είναι αποτέλεσμα της ανάβλυσης που προκαλείται από τους μουσώνες που πνέουν πάνω από το δυτικό κόλπο του Aden, η οποία ανυψώνει το GAIW πάνω από το βάθος του υβώματος του Bab el Mandeb, παράγοντας έτσι μια βαθμίδα υδροστατικής πίεσης, η οποία οδηγεί το GAIW προς το βορρά μέσω του Στενού (Patzert, 1974a). Ανάμεσα στα δύο στρώματα νερού που εξέρχονται από την Ερυθρά Θάλασσα, το Red Sea Surface Water (RSSW) και το Red Sea Overflow Water (RSOW), το GAIW εισρέει μέσω του Bab el Mandeb σε ένα βάθος εύρους 30-120 m (Patzert, 1974; Murray and Johns, 1997) και με ένα ρυθμό 0.22-0.36 Sv (Maillard and Soliman, 1986; Murray and Johns, 1997; Sofianos et al., 2002). Εισέρχεται στην Ερυθρά Θάλασσα ως μια σχετικά ψυχρή (17.4°C στα 75 m στο Bab el Mandeb έναντι των 31.4°C στα επιφανειακά 10m), και χαμηλής αλατότητας (35.8 έναντι 37.4 psu) μάζα νερού (Poisson et al., 1984; Maillard and Soliman, 1986; Souvermezoglou et al., 1989).

Η πιο λεπτομερής μελέτη της εισροής του GAIW μέχρι σήμερα είναι αυτή των Sofianos και Johns (2007), οι οποίοι χρησιμοποιώντας δεδομένα CTD από την ερευνητική αποστολή τον Αύγουστο του 2001 στην Ερυθρά Θάλασσα βρήκαν πως το GAIW συγκεντρώνεται κυρίως στην ανατολική πλευρά της Ερυθράς Θάλασσας, με τις διαφορές στις ιδιότητες της, σε σχέση με τα γειτονικά νερά, να μειώνονται σημαντικά ανάμεσα στο Bab el Mandeb και τις 16°N . Η μόνη μελέτη σχετικά με το ρυθμό με τον οποίο το GAIW κινείται προς το βορρά είναι αυτή του Smeed (1997). Χρησιμοποιώντας προφίλ θερμοκρασίας που συλλέχθηκαν από το 1967 έως το 1989, ο Smeed εντόπισε την εποχική κίνηση προς το βορρά, μέσω του ελάχιστου της θερμοκρασίας του GAIW. Με βάση το χρόνο και την θέση του ελάχιστου της θερμοκρασίας που παρατηρείται σε ένα σύνολο δεδομένων 23 ετών, εκτιμήθηκε πως η εισροή πρωτοεμφανίζεται στο Στενό τον Ιούνιο και διαδίδεται με μια μέση ταχύτητα 5.5 km/day και περίπου στα μέσα του Οκτωβρίου φτάνει σχεδόν 800 km μέσα στην Ερυθρά Θάλασσα. Η θερμοκρασία της μάζας που εισέρχεται αυξάνεται καθώς κινείται προς το εσωτερικό της λεκάνης, γεγονός που υποδεικνύει την ανάμιξη με τα υπερκείμενα και υποκείμενα νερά. Υπάρχουν σχετικά λίγες παρατηρήσεις για το Νοέμβριο, αλλά φαίνεται ότι μέχρι το τέλος του Οκτωβρίου, η εισροή δεν είναι πια εκεί, ή είναι πολύ πιο ζεστή. Η ταχεία εξαφάνιση υποδεικνύει ότι το κρύο στρώμα νερού στην Ερυθρά Θάλασσα αναμιγνύεται έντονα με το επιφανειακό στρώμα.

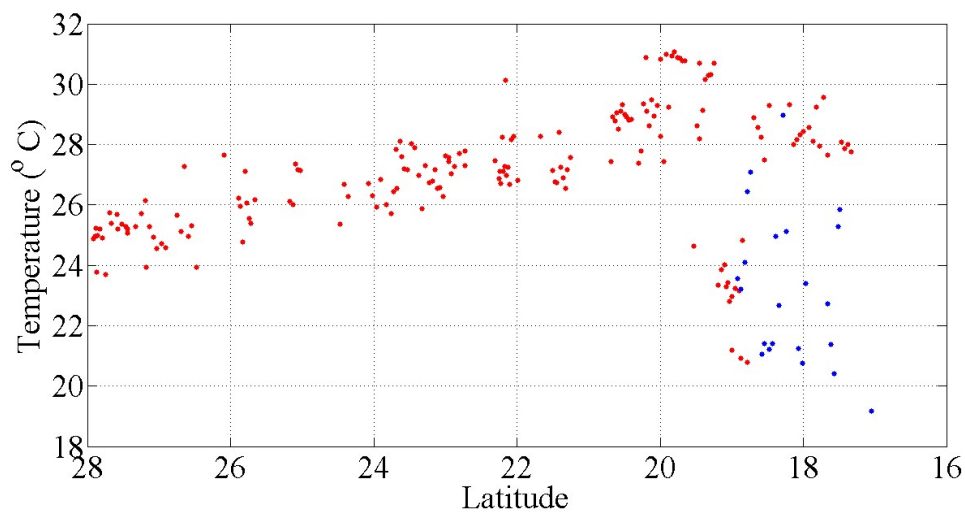
Ενώ, το ρεύμα που εισέρχεται στην Ερυθρά Θάλασσα διαδίδεται με μία ταχύτητα περίπου 0.06 m/s, οι μετρήσεις ρευμάτων των Maillard and Soliman (1986) έδειξαν πως η μέση ταχύτητα εισροής στο στενότερο τμήμα του στενού, κοντά στο νησί Perim, ήταν περίπου 0.25 m/s. Η μείωση της ταχύτητας οφείλεται στην πλευρική διάδοση της εισροής, καθώς αυτή εισέρχεται στην Ερυθρά Θάλασσα.

Η εισροή νερού από τον κόλπο του Aden έχει ως αποτέλεσμα μια καθαρή ροή θερμότητας και αλατιού έξω από την Ερυθρά Θάλασσα κατά τη διάρκεια της θερινής περιόδου. Αυτές οι ροές, καθώς και η καθαρή εξάτμιση από την επιφάνεια της θάλασσας, διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στον προσδιορισμό της ροής ανταλλαγής στο Στενό κατά τη διάρκεια του χειμώνα, καθώς και των ιδιοτήτων του ρεύματος εκροής από την Ερυθρά Θάλασσα.

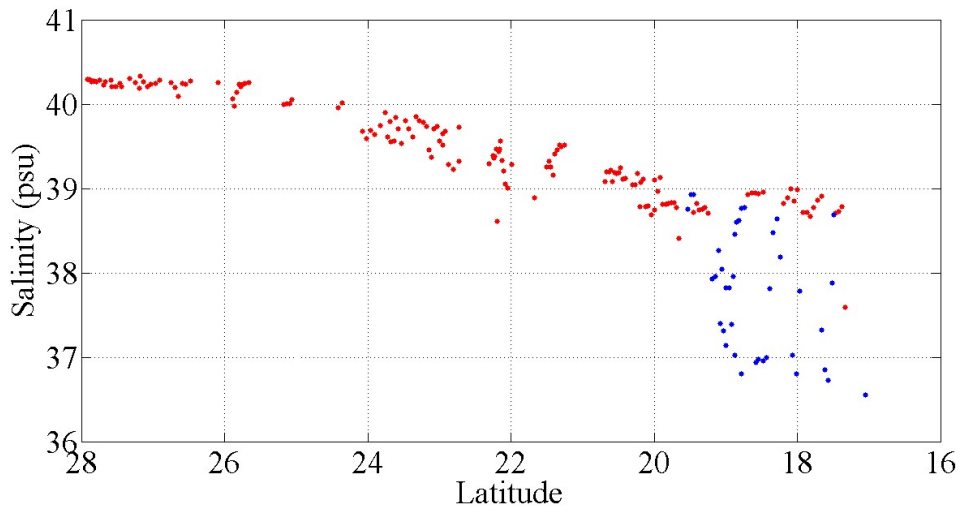
Στην παρούσα εργασία, θα χρησιμοποιήσουμε τα δεδομένα από την ερευνητική αποστολή του 2011, με σκοπό να μελετήσουμε την εισροή του GAIW μέσα στην Ερυθρά Θάλασσα και να πραγματοποιηθεί σύγκριση των αποτελεσμάτων αυτών με τα αποτελέσματα του 2001. Μας ενδιαφέρει να δούμε πόσο εκτείνεται προς τα βόρεια και πόσο παχύ είναι το στρώμα που δημιουργεί. Επίσης, από τα διαθέσιμα δεδομένα θα προσπαθήσουμε να υπολογίσουμε την ταχύτητα εισροής του GAIW.



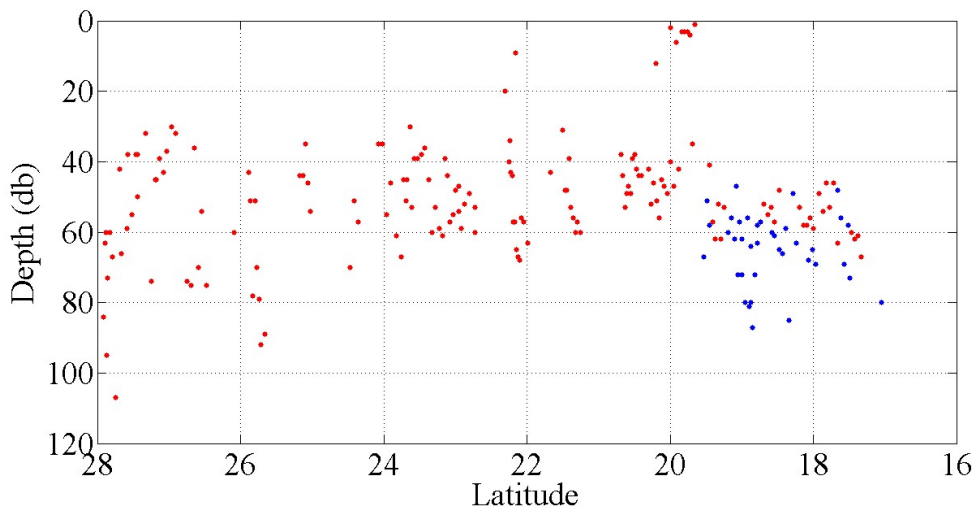
Εικόνα 3.12. Διάγραμμα θ - S όπου S το ελάχιστο της αλατότητας και θ η θερμοκρασία στο ελάχιστο της αλατότητας.



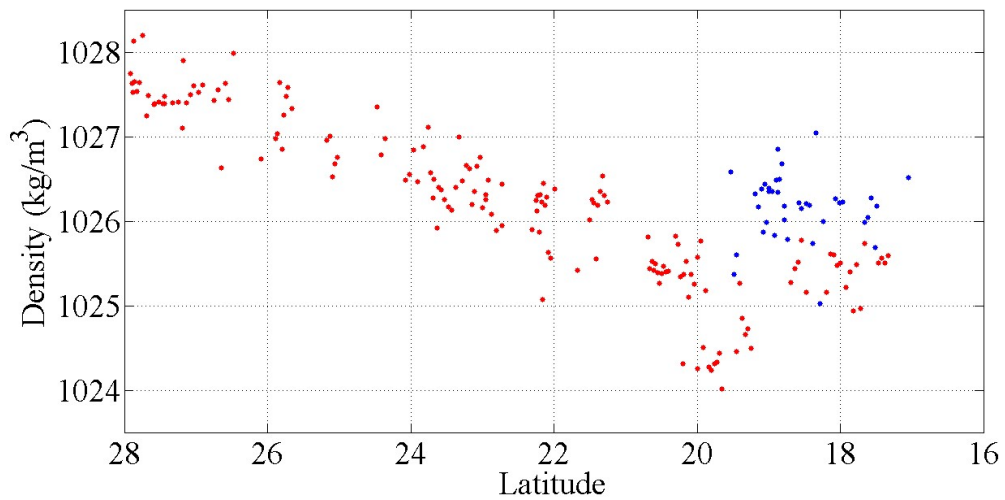
Εικόνα 3.13. Η θερμοκρασία στο ελάχιστο της αλατότητας συναρτήσει του γεωγραφικού πλάτους.



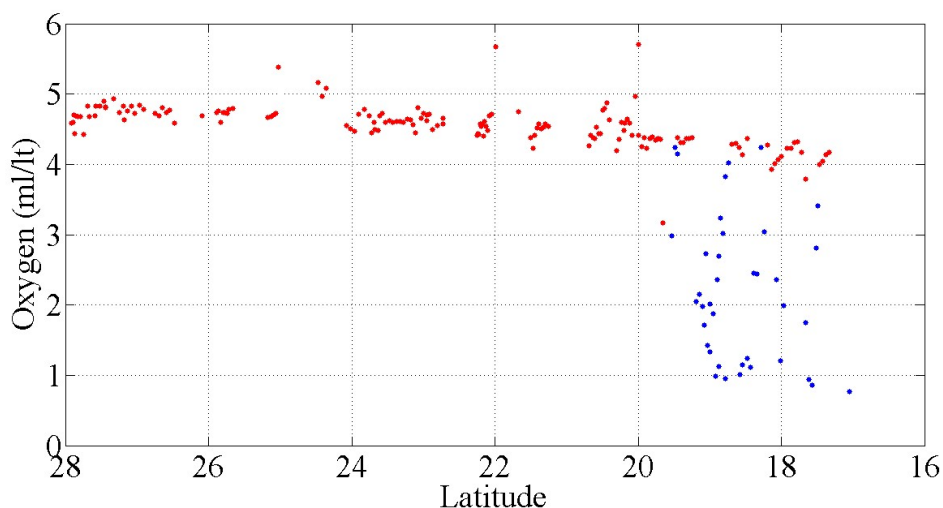
Εικόνα 3.14. Η ελάχιστη αλατότητα συναρτήσει του γεωγραφικού πλάτους.



Εικόνα 3.15. Το βάθος στο οποίο εμφανίζεται το ελάχιστο της αλατότητας σε κάθε γεωγραφικό πλάτος.



Εικόνα 3.16. Η πυκνότητα των νερών με την ελάχιστη αλατότητα.

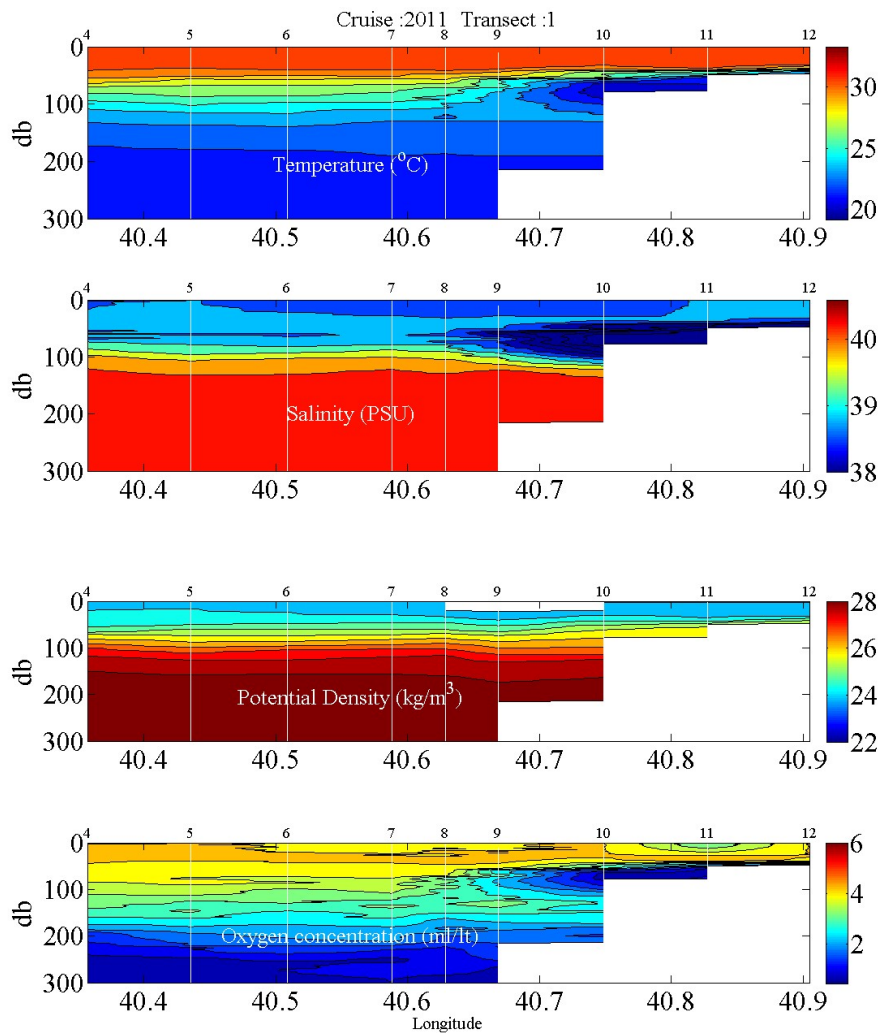


Εικόνα 3.17. Η συγκέντρωση του οξυγόνου των νερών με ελάχιστη αλατότητα.

Στην εικόνα 3.12 δίνεται το διάγραμμα Θ-S της ελάχιστης αλατότητας και της θερμοκρασίας στο ελάχιστο της αλατότητας. Με μπλε χρώμα παρουσιάζονται οι σταθμοί που παρουσιάζουν ένα υποεπιφανειακό ελάχιστο στην αλατότητα, το οποίο αποδίδουμε στην ύπαρξη του GAIW. Στο διάγραμμα αυτό μπορεί εύκολα να εντοπιστεί το GAIW (κάτω αριστερή γωνία), με το εύρος για τις τιμές της πυκνότητας να κυμαίνεται στα 1025-1027 kg/m³. Οι μεταβολές στα χαρακτηριστικά του GAIW, σε συνάρτηση με το γεωγραφικό πλάτος, φαίνονται στις Εικόνες 3.13-3.17, όπου παρουσιάζονται η θερμοκρασία, η αλατότητα, η πυκνότητα και η συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου στο ελάχιστο της αλατότητας, και το βάθος της ελάχιστης αλατότητας ως συνάρτηση του γεωγραφικού πλάτους.

Από το στενό του Bab el Mandeb έως τις 20°N, οι τιμές της ελάχιστης αλατότητας κυμαίνονται από τα 36.5 έως τα 39 psu (Εικόνα 3.16). Στην ίδια περιοχή παρατηρείται ένα θερμοκρασιακό εύρος μεταξύ 19 και 30°C (Εικόνα 3.13) ενώ η συγκέντρωση του οξυγόνου κυμαίνεται μεταξύ 0.77 και 4.36 ml/l (Εικόνα 3.17). Συγχρόνως, το βάθος της ελάχιστης αλατότητας μειώνεται σταδιακά, και ενώ στην είσοδο της λεκάνης ο πυρήνας του GAIW εντοπίζεται σε βάθος 80 m περίπου, σταδιακά γίνεται πολύ ρηχός και φτάνει τα 40 m.

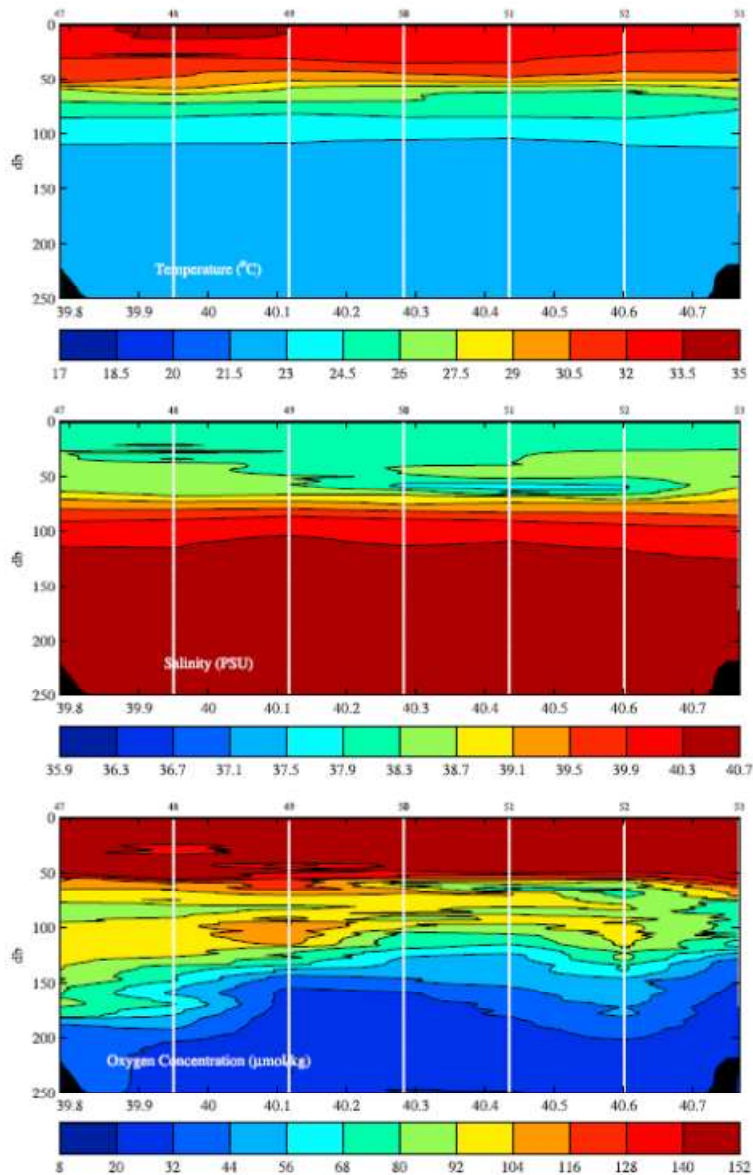
Οι θέσεις των σταθμών, κατά τη διάρκεια της αποστολής του 2011, μας επιτρέπουν να δημιουργήσουμε τομές με την κατανομή των υδρογραφικών χαρακτηριστικών, κάθετα στον άξονα της λεκάνης, οι οποίες θα μας βοηθήσουν στη διερεύνηση της τρισδιάστατης δομής της εισόδου του GAIW στην Ερυθρά Θάλασσα. Θα βασιστούμε στις κατανομές των ιδιοτήτων του νερού για να συνάγουμε τη σχετική κατανομή της δομής του στρώματος αυτού.



Εικόνα 3.18. Κατανομή θερμοκρασίας, αλατότητας, δυνητικής πυκνότητας και συγκέντρωσης οξυγόνου στην πρώτη τομή (transect 1) κάθετα στον άξονα της λεκάνης σε γεωγραφικό πλάτος 17.3-17.6°N.

Στην πρώτη τομή (transect 1) (Εικόνα 3.18), το GAIW εμφανίζεται στο γεωγραφικό πλάτος 17.3-17.6°N, με ένα πάχος 60m (στο βάθος από τα 40 m έως τα 100 m). Οι χαμηλότερες τιμές της θερμοκρασίας και της αλατότητας που καταγράφηκαν στον πυρήνα του GAIW ήταν 20.3°C και 36.7 psu, αντίστοιχα, ενώ η συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου ήταν 0.85 ml/l. Οι μετρήσεις μας παρέχουν την πρώτη ένδειξη πως η εισροή του GAIW μεταφέρεται προς βορρά μέσω ενός καλά καθορισμένου υποεπιφανειακού ρεύματος το οποίο είναι εντοπισμένο στην ανατολική πλευρά της Ερυθράς Θάλασσας.

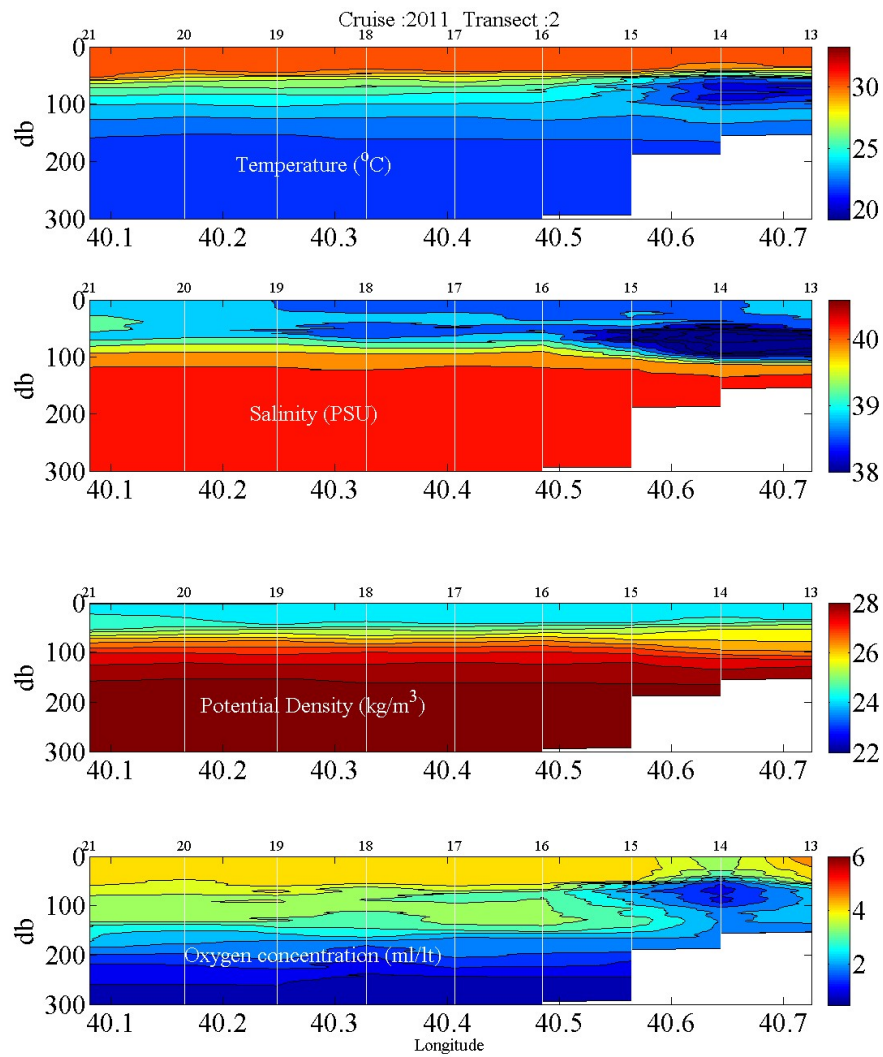
Αντίθετα με τα αποτελέσματα στο transect 1, στο ίδιο γεωγραφικό πλάτος το 2001 οι Sofianos and Johns (2007) (Εικόνα 3.19) βρήκαν πως η εισροή του GAIW μπορούσε να ανιχνευθεί σε βάθος 60 m, κοντά στην ανατολική πλευρά της τομής. Σε αυτό το γεωγραφικό πλάτος το στρώμα του GAIW είχε μειωθεί σε ένα πολύ λεπτό στρώμα και τα χαρακτηριστικά της θερμοκρασίας και της αλατότητας είχαν αλλάξει από την ισχυρή ανάμιξη με τα περιβάλλοντα νερά, με την ελάχιστη αλατότητα στην τομή να φτάνει 37.8 psu.



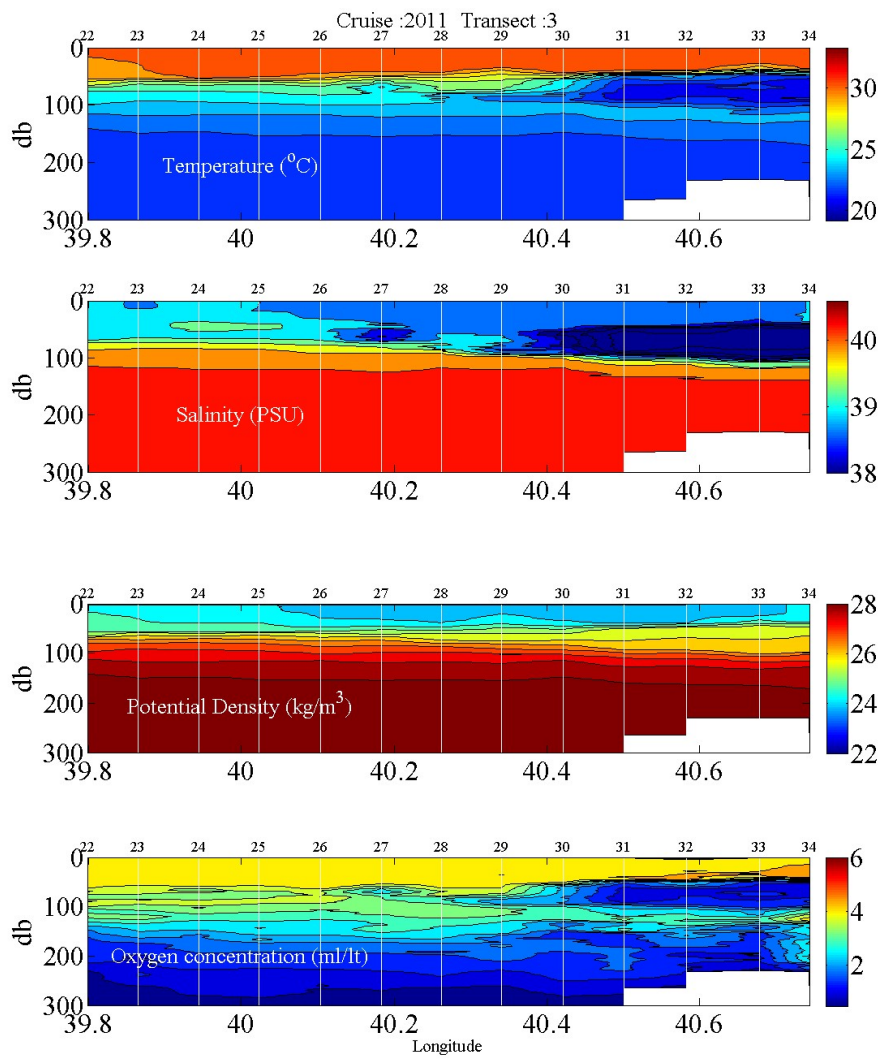
Εικόνα 3.19. Η δυνητική θερμοκρασία, η αλατότητα και η συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου στην τομή C (σε γεωγραφικό πλάτος 17.2-17.5°N) από την αποστολή του 2001 (Sofianos and Johns, 2007).

Μελετώντας τις επόμενες τομές (2-5) παρατηρούμε πως το GAIW εκτείνεται από το νοτιότερο σταθμό της έρευνας (στις 17°N) μέχρι τις 19°N (Εικόνες 3.20-3.23). Το GAIW σε αυτή την περιοχή διακρίνεται από χαμηλές τιμές θερμοκρασίας (20-23°C), χαμηλές τιμές αλατότητας (36.5-38 psu) και μια συγκέντρωση οξυγόνου 1.2-1.7 ml/lit. Εκτείνεται σε βάθη ~35-120m με ένα εύρος δυνητικής πυκνότητας (σ_t) ~25-27 kg/m³.

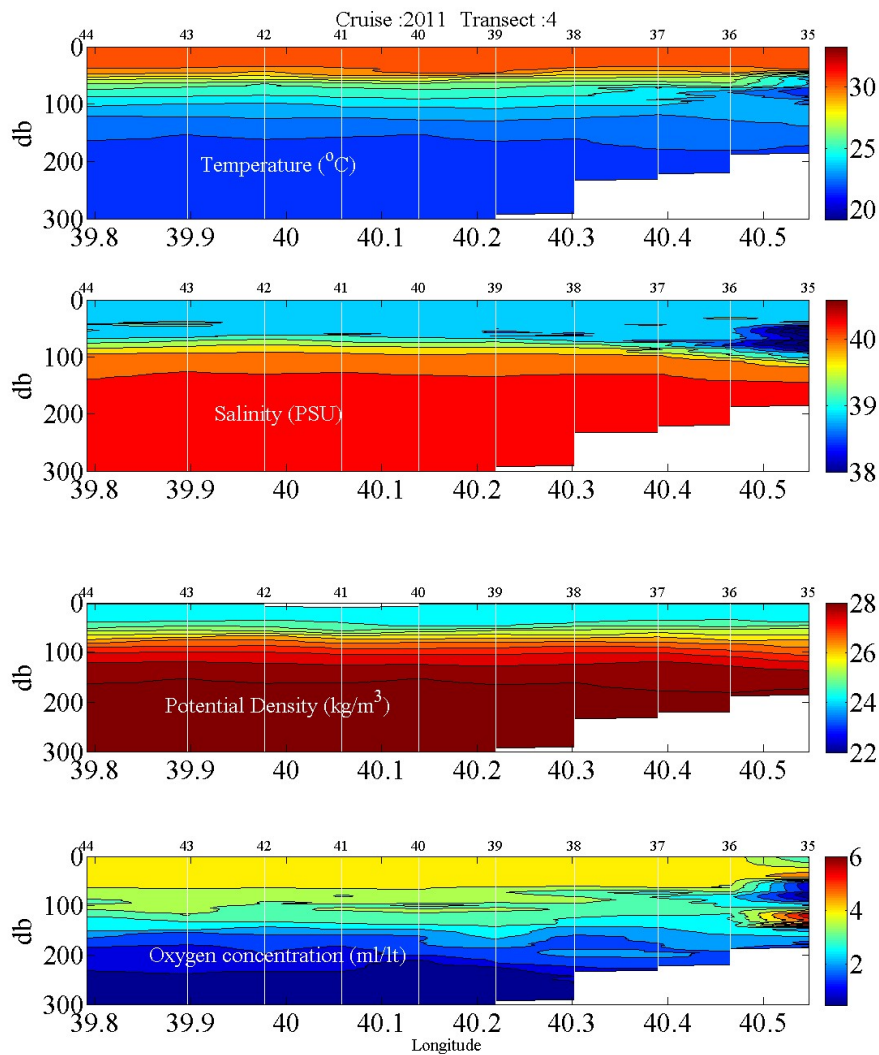
Παρά το γεγονός ότι η εισροή του GAIW στο νότιο τμήμα της Ερυθράς Θάλασσας παρουσιάζει ένα πολύπλοκο μοτίβο κυκλοφορίας, η κατανομή των βασικών μαζών νερού είναι αρκετά οργανωμένη. Το GAIW παρουσιάζει μια κλίση προς την ανατολική ακτή και κατά την πορεία του σε όλη την έκταση της λεκάνης εμφανίζει έντονες αλλαγές στα χαρακτηριστικά του.



Εικόνα 3.20. Κατανομή θερμοκρασίας, αλατότητας, δυνητικής πυκνότητας και συγκέντρωσης οξυγόνου στην δεύτερη τομή (transect 2) κάθετα στον άξονα της λεκάνης σε γεωγραφικό πλάτος $17.6-18^{\circ}\text{N}$.

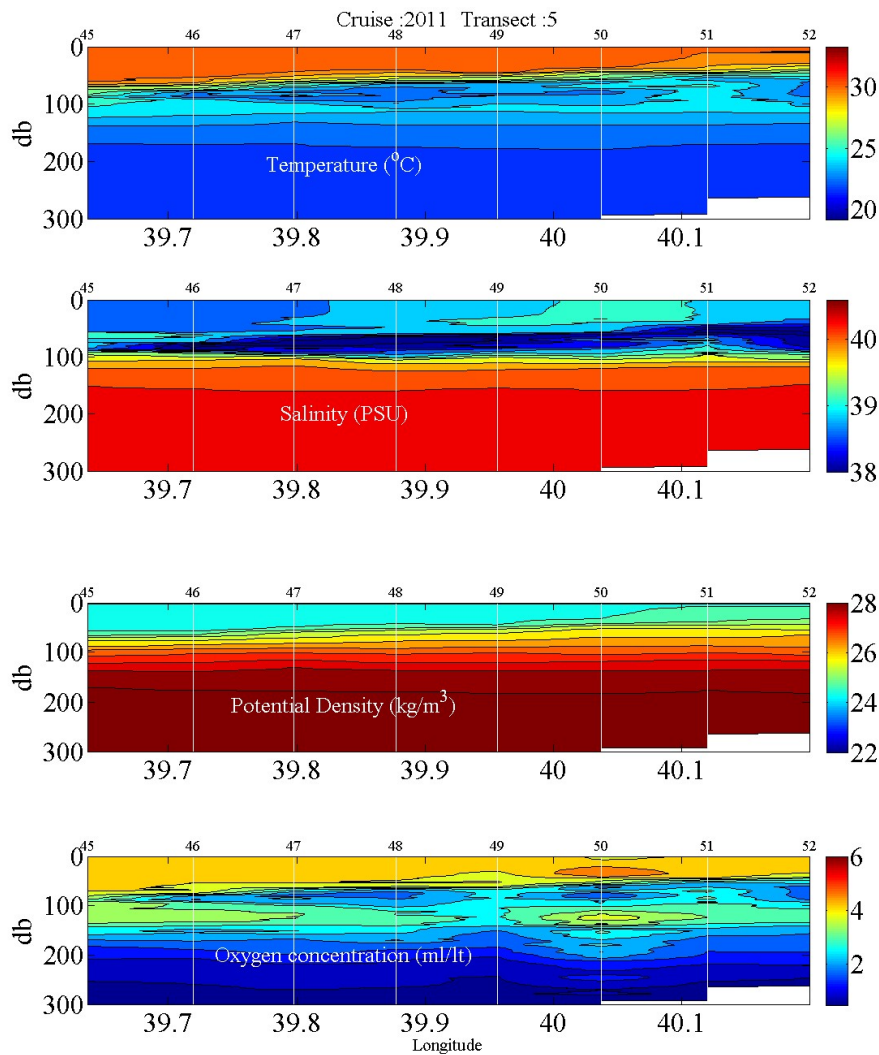


Εικόνα 3.21. Κατανομή θερμοκρασίας, αλατότητας, δυνητικής πυκνότητας και συγκέντρωσης οξυγόνου στην τρίτη τομή (transect 3) κάθετα στον άξονα της λεκάνης σε γεωγραφικό πλάτος 17.9-18.5°N.



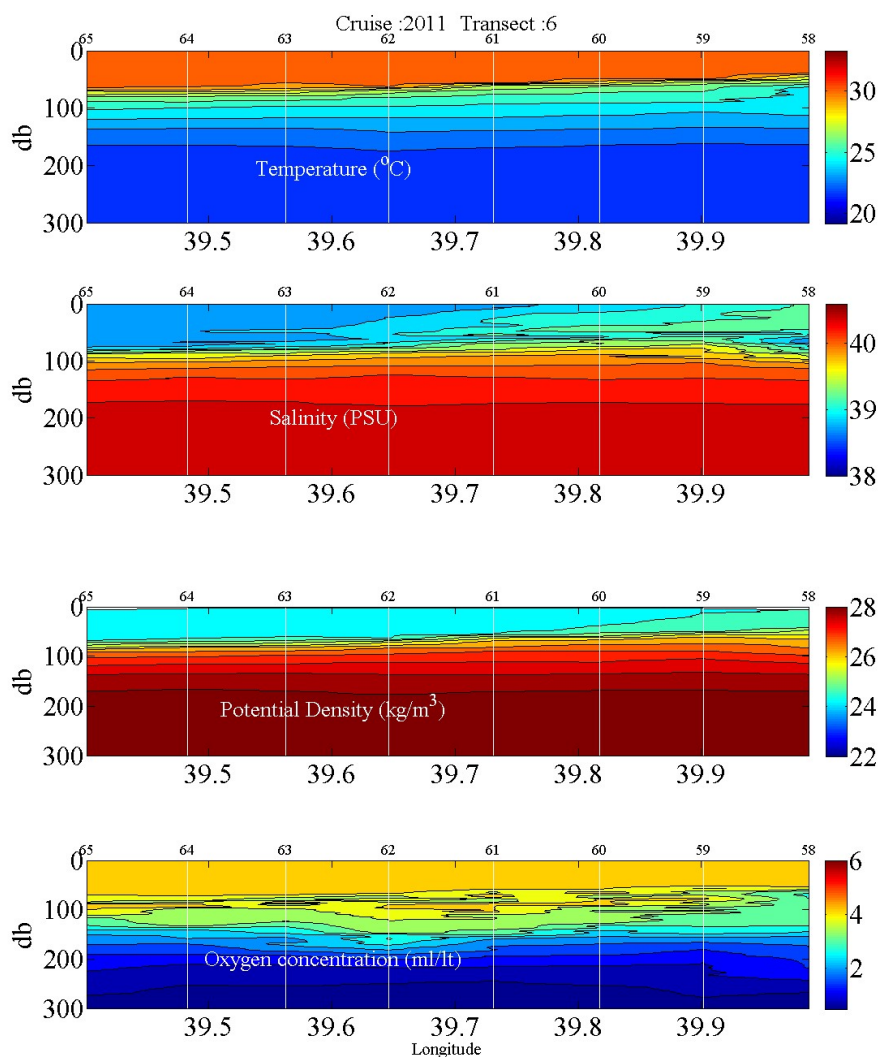
Εικόνα 3.22. Κατανομή θερμοκρασίας, αλατότητας, δυνητικής πυκνότητας και συγκέντρωσης οξυγόνου στην τέταρτη τομή (transect 4) κάθετα στον άξονα της λεκάνης σε γεωγραφικό πλάτος 18.5-18.9°N.

Η προώθηση του GAIW φαίνεται να διακλαδίζεται στην τομή 5, με τον ένα κλάδο να εκτρέπεται νοτιοδυτικά, κατά μήκος της τομής, και ένα δεύτερο να συνεχίζει προς το βορρά, όπως φαίνεται στον ανατολικότερο σταθμό της τομής 6 (Εικόνα 3.24). Η νοτιοδυτική ροή του GAIW, η οποία παρατηρείται κατά μήκος της τομής 5 στις 21 Σεπτεμβρίου, είναι σε συνέπεια με το πεδίο του SLA της αντίστοιχης ημερομηνίας, το οποίο αποκαλύπτει μια αντικυκλωνική δομή που περικλείει την τομή 5 (Churchill et al., 2014). Επίσης, επιβεβαιώνει και την υπόθεση ύπαρξης μιας αντικυκλωνικής δομής στις 19°N που κάναμε μελετώντας τη βύθιση των ισόπυκνων από την κατανομή της πυκνότητας κατά μήκος του άξονα της Ερυθράς Θάλασσας (Εικόνα 3.7). Φαίνεται πως μέρος της ροής του GAIW που κινείται βόρεια προς την τομή 5, παρασύρεται από την αντικυκλωνική δομή και εκτρέπεται προς τα νοτιοδυτικά.



Εικόνα 3.23. Κατανομή θερμοκρασίας, αλατότητας, δυνητικής πυκνότητας και συγκέντρωσης οξυγόνου στην πέμπτη τομή (transect 5) κάθετα στον άξονα της λεκάνης σε γεωγραφικό πλάτος 18.8-19.2°N.

Η επέκταση του GAIW βορειότερα από τις 19°N φαίνεται από τα σαφώς καθορισμένα ελάχιστα της αλατότητας που εμφανίζονται σε όλες τις τομές βορειότερα της τομής 5. Ωστόσο, λόγω της απόστασης που έχει διανύσει μέσα στην Ερυθρά Θάλασσα και της ανάμιξης με τα γειτονικά νερά, το GAIW εμφανίζεται με αρκετά μειωμένο πλάτος και αυξημένη αλατότητα. Η απόδοση των ελαχίστων της αλατότητας, βορειότερα των 19°N, ως απόδειξη του GAIW πρέπει να γίνει με προσοχή. Για να κρίνουμε την πιθανότητα αυτό το ελάχιστο να οφείλεται στο GAIW, θέτουμε ως κριτήριο να είναι σε ένα εύρος δυνητικής πυκνότητας (σ_t) ~25-27 kg/m³, όπως παρατηρείται στο GAIW νότια των 19°N. Εδώ το κριτήριο αυτό ισχύει για το ελάχιστο της αλατότητας που παρατηρείται στις τομές 6-14 (19-24°N). Αυτά τα ελάχιστα εκτείνονται σε όλο το μήκος αυτών των τομών, όμως τα πιο βαθιά ελάχιστα της αλατότητας εμφανίζονται στον ανατολικότερο σταθμό κάθε τομής. Η τομή 14 είναι το βορειότερο σημείο στο οποίο εντοπίζουμε ίχνη του GAIW και βρίσκεται σε γεωγραφικό πλάτος 23.6038 °N - 24.0747 °N.



Εικόνα 3.24. Κατανομή θερμοκρασίας, αλατότητας, δυνητικής πυκνότητας και συγκέντρωσης οξυγόνου στην έκτη τομή (transect 6) κάθετα στον άξονα της λεκάνης σε γεωγραφικό πλάτος 19.2-19.5°N.

Αν και το βόρειο όριο της εισροής δεν μπορεί να προσδιοριστεί με ακρίβεια, οι τιμές της θερμοκρασίας και της αλατότητας, οι οποίες χαρακτηρίζουν τη συγκεκριμένη μάζα νερού δεν μπορούν να εντοπιστούν βορειότερα από τις 24°N, σημείο το οποίο μπορεί να ληφθεί ως το βορειότερο όριο της εισροής. Οι μετρήσεις του 2011 πραγματοποιήθηκαν τέλη Σεπτεμβρίου προς αρχές Οκτώβρη, δηλαδή προς το τέλος της καλοκαιρινής περιόδου. Σε συνδυασμό με τις μετρήσεις του 2001 οι οποίες πραγματοποιήθηκαν Αύγουστο, δηλαδή πιο νωρίς μέσα στη καλοκαιρινή περίοδο, μας δίνεται η δυνατότητα να παρακολουθήσουμε την εξέλιξη της προώθησης του GAIW κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού. Το βορειότερο όριο της εισροής φαίνεται να μετακινείται προς το βορρά και ενώ προς το τέλος του Αυγούστου εντοπίζεται στις 17°N, στις αρχές Οκτώβρη έχει φτάσει στις 24°N. Η απόσταση του σημείου αυτού από το Στενό του Bab el Mandeb είναι περίπου 1200 km. Αν υποθέσουμε ότι η εισροή του GAIW ξεκίνησε τον Ιούνιο, υπολογίζουμε πως η ταχύτητα

εισοχής είναι 0.12 m/s. Η τιμή αυτή είναι διπλάσια από την τιμή που είχε υπολογίσει ο Smeed (1997). Εμφανίζεται μια υπερετήσια μεταβολή στην ταχύτητα εισόδου του GAIW στην Ερυθρά Θάλασσα. Καθώς η εισροή του GAIW, οφείλεται στους μουσώνες, μπορούμε να συμπεράνουμε πως το 2011, η μεγαλύτερη ταχύτητα εισροής οφείλεται σε ισχυρότερους ανέμους.

3.5 Red Sea Deep Water (RSDW)

Κάτω από το σύστημα ρευμάτων που λαμβάνει χώρα στην επιφάνεια και στα ενδιάμεσα βάθη, βρίσκονται τα βαθιά νερά της Ερυθράς Θάλασσας. Αυτά τα νερά αποτελούν μια ξεχωριστή μάζα νερού με αρκετά ομοιογενή θερμοαλατικά χαρακτηριστικά και γεμίζει τη λεκάνη της Ερυθράς Θάλασσας από τα 300 m βάθος έως τον πυθμένα. Τα βαθιά νερά της Ερυθράς Θάλασσας εμφανίζουν τις υψηλότερες τιμές αλατότητας στον παγκόσμιο ωκεανό και παρουσιάζουν εξαιρετική ομοιογένεια. Έχουν παρόμοια χαρακτηριστικά θερμοκρασίας και αλατότητας με το **RSOW** και για πολύ καιρό αντιμετωπίζονταν ως μία μάζα νερού. Μόνο όταν σε παρατηρήσεις σε ολόκληρη τη λεκάνη μετρήθηκαν και άλλοι δείκτες, όπως οι συγκεντρώσεις του οξυγόνου, του ^{14}C , και του ^3He (πχ, Cember 1988; Quadfasel και Baunder 1993; Sofianos και Johns 2007) έγινε δυνατό να διαχωριστούν αυτές οι δύο μάζες νερού. Η **RSDW** χαρακτηρίζεται από πολύ χαμηλή συγκέντρωση οξυγόνου, λόγω της κατανάλωσης καθώς αυτή εξαπλώνεται προς το νότο και αναβλύζει για να επανακυκλοφορήσει προς το βορρά σε μικρότερα βάθη. Η **RSOW** αντίθετα είναι μια σχετικά νεότερη μάζα νερού η οποία συνεισφέρει το μεγαλύτερο μέρος των υψηλής αλατότητας νερών που εξέρχονται μέσω του Bab-el-Mandeb στον Ινδικό Ωκεανό. Επίσης χαρακτηρίζεται από υψηλότερα επίπεδα συγκέντρωσης οξυγόνου κοντά στα 100-150 m στη νότια Ερυθρά Θάλασσα.

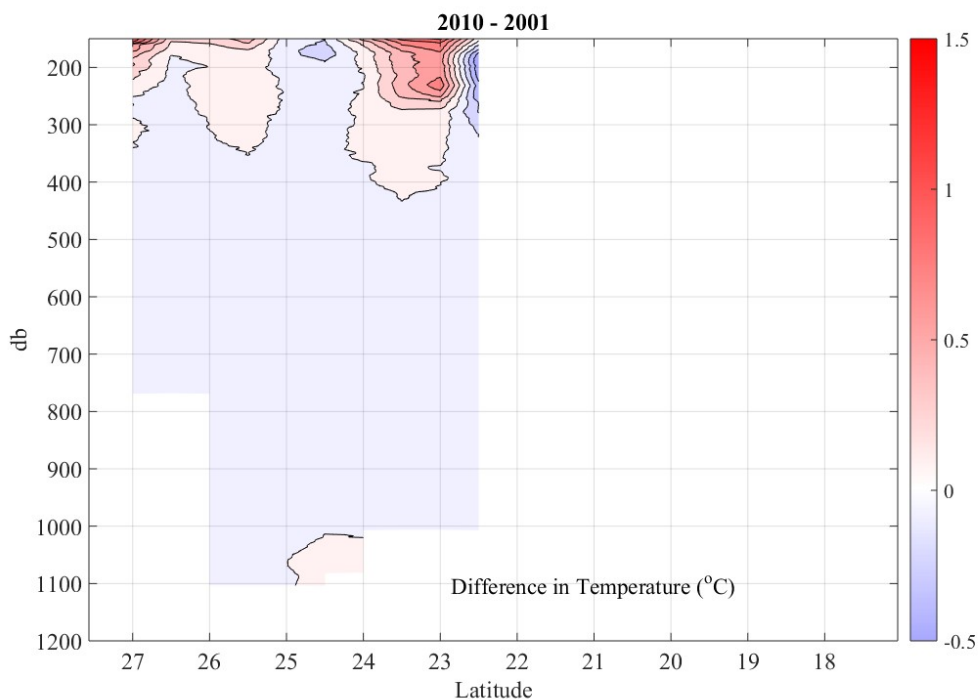
Στην παράγραφο αυτή θέλουμε να ελέγξουμε τις υπερετήσιες μεταβολές στα υδρογραφικά χαρακτηριστικά των βαθιών νερών της Ερυθράς Θάλασσας και αυτό θα γίνει με σύγκριση ανά δύο των δεδομένων από τις αποστολές που έχουμε διαθέσιμα σε αυτή την εργασία. Για τα βαθιά νερά μας ενδιαφέρει να δούμε αν παρατηρούνται μεταβολές στα υδρογραφικά χαρακτηριστικά τους από το 2001 έως το 2011 (μια δεκαετία) και αν υπάρχει κάποια τάση. Τα βαθιά νερά δεν επηρεάζονται από την αλληλεπίδραση της θάλασσας με την ατμόσφαιρα, οπότε δεν μεταβάλλονται τα χαρακτηριστικά τους με τις εποχές. Αρχικά θα ορίσουμε ως RSDW όλα τα νερά της Ερυθράς Θάλασσας που είναι πιο ψυχρά από 22.0 °C και πιο αλμυρά από 40.4 psu.

3.5.1 Μεταβολές κατά μήκος του άξονα

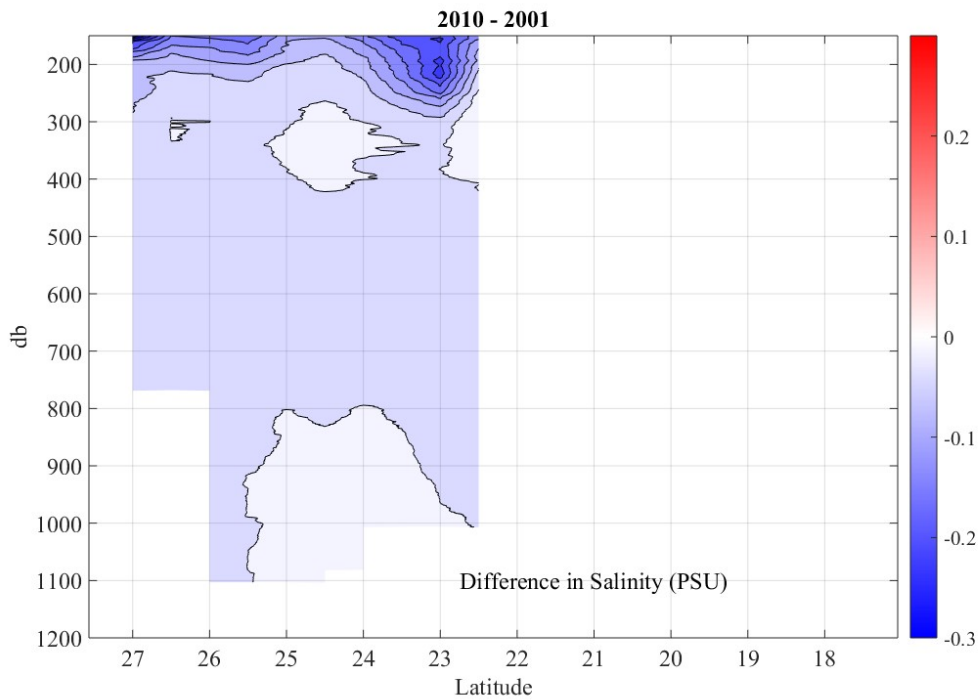
Στο σημείο αυτό χρησιμοποιήθηκαν οι τομές που παρουσιάστηκαν στις Παραγράφους 3.2 και 1.4 (για τα δεδομένα του 2001) της θερμοκρασίας, αλατότητας, πυκνότητας και συγκέντρωσης διαλυμένου οξυγόνου ώστε να εντοπιστούν τυχόν μεταβολές αυτών των χαρακτηριστικών, κατά μήκος του άξονα της λεκάνης σε ολόκληρη τη στήλη νερού. Επειδή θέλουμε να επικεντρωθούμε στις μεταβολές των βαθιών νερών, παρουσιάζονται οι μεταβολές που παρατηρούνται από τα 150 m μέχρι το μέγιστο βάθος, όπου θεωρείται πως δεν υπάρχει επίδραση λόγω εποχικότητας.

Σύγκριση 2001 με 2010

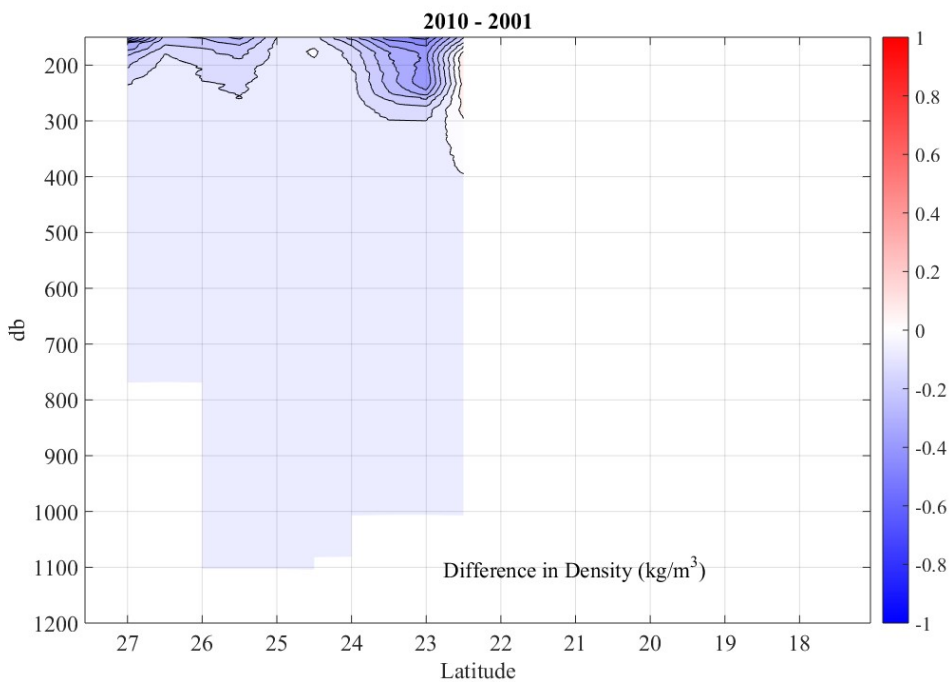
Στις εικόνες 3.25-3.28 απεικονίζονται οι μεταβολές στην θερμοκρασία, την αλατότητα, την πυκνότητα και τη συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου ως προς το βάθος κατά μήκος του άξονα της Ερυθράς Θάλασσας ανάμεσα στα έτη 2001 και 2010. Σε όλα τα διαγράμματα των συγκρίσεων, έχουμε τα ίδια όρια στους άξονες (17-27°N για το γεωγραφικό πλάτος όπως και στις αρχικές τομές και 150-1200m για το βάθος). Γενικά, σε όλη σχεδόν την περιοχή, παρατηρούμε μείωση της θερμοκρασίας, εκτός από δύο πυρήνες με κέντρα στις 25.5°N και στις 23°N, στους οποίους παρατηρείται αύξηση της θερμοκρασίας. Μια πιθανή εξήγηση γι' αυτή την αύξηση στη θερμοκρασία, είναι η εποχική μετακίνηση του αντικυκλώνα, ο οποίος εντοπίζεται κοντά στις 23° N. Η αλατότητα παρουσιάζεται μειωμένη κατά -0.02 rsu σε όλο το βάθος, όπως επίσης και η πυκνότητα με μια μείωση περίπου -0.03 kg/m³. Η μεταβολή στην συγκέντρωση του οξυγόνου παρουσιάζει ένα πιο περίπλοκο μοτίβο, χαρακτηριστικό του οποίου είναι η εναλλαγή αύξησης-μείωσης από ένα βάθος 400m και κάτω.



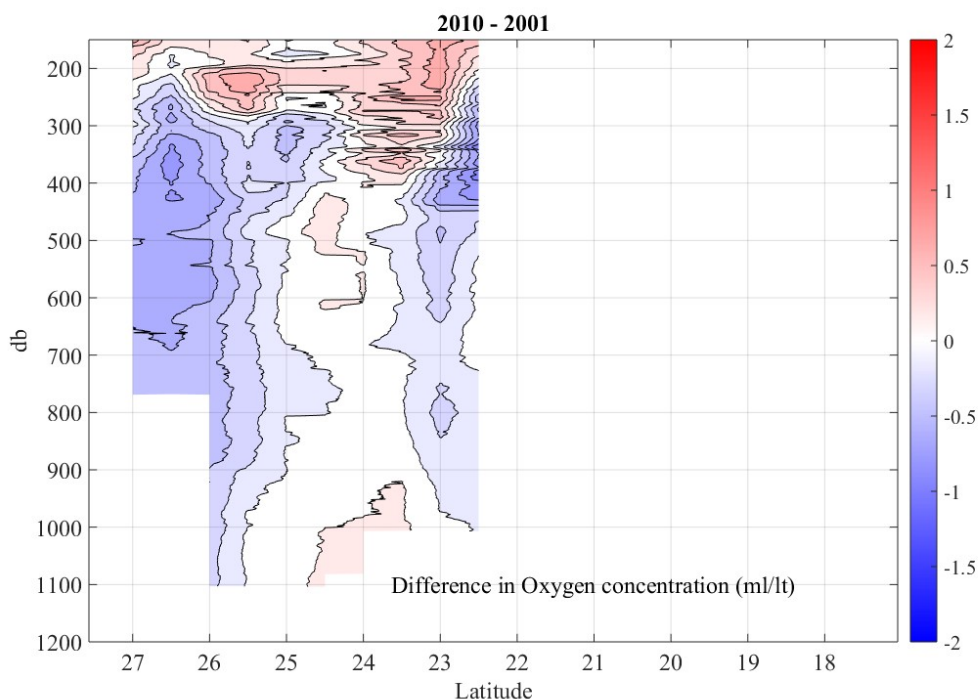
Εικόνα 3.25. Μεταβολές στη θερμοκρασία κατά μήκος του άξονα της Ερυθράς Θάλασσας ανάμεσα στα έτη 2001-2010 σε βάθος 150 m μέχρι το βυθό.



Εικόνα 3.26. Μεταβολές στην αλατότητα κατά μήκος του άξονα της Ερυθράς Θάλασσας ανάμεσα στα έτη 2001-2010 σε βάθος 150 m μέχρι το βυθό.



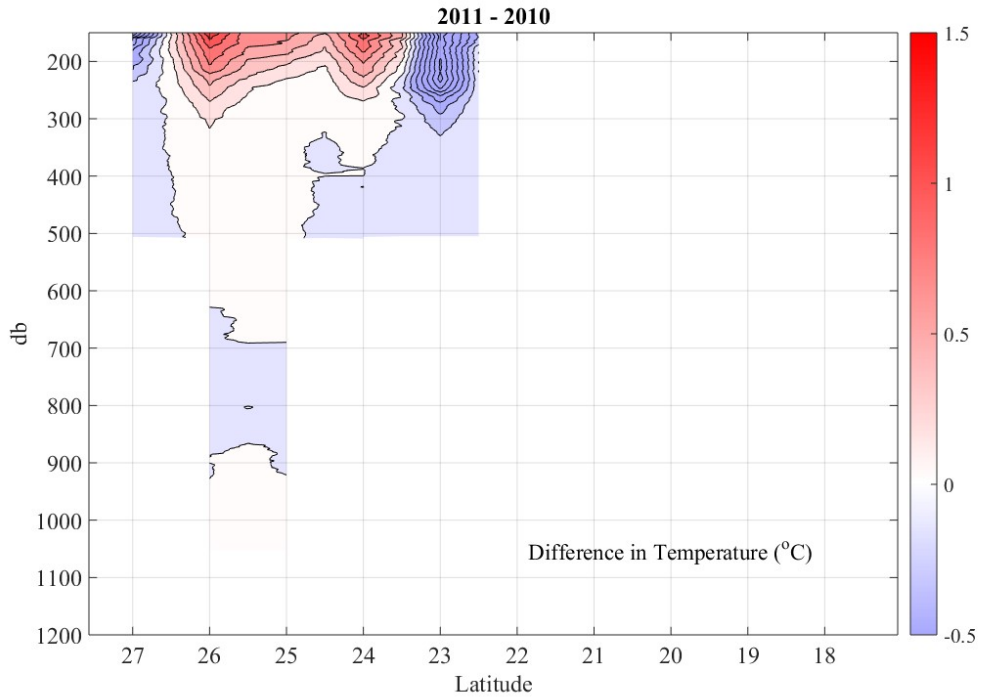
Εικόνα 3.27. Μεταβολές στην πυκνότητα κατά μήκος του άξονα της Ερυθράς Θάλασσας ανάμεσα στα έτη 2001-2010 σε βάθος 150 m μέχρι το βυθό.



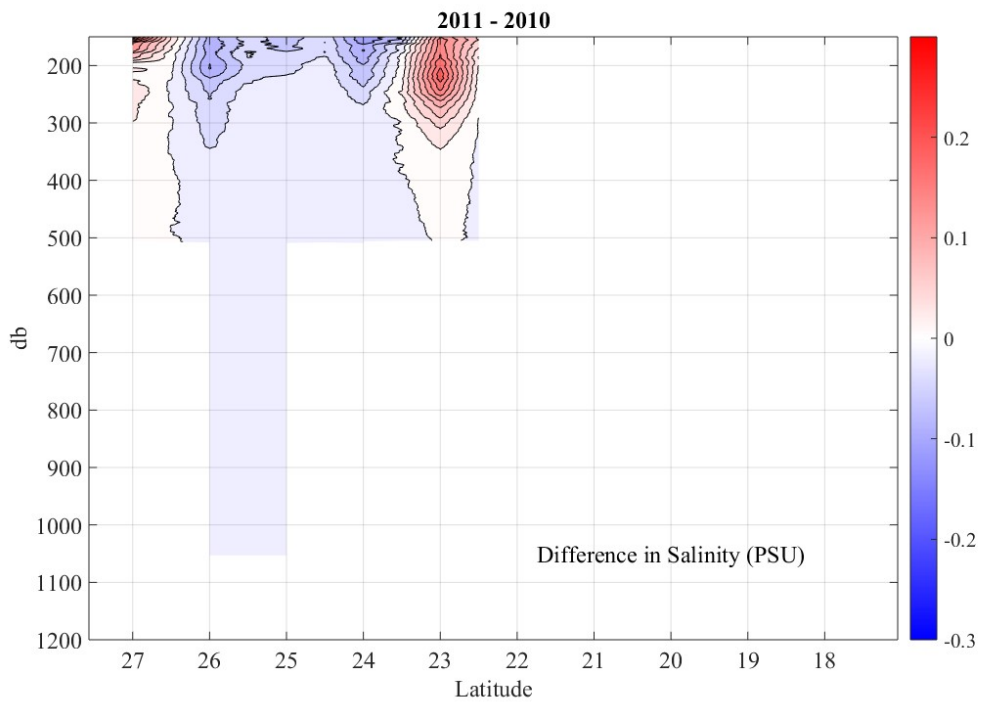
Εικόνα 3.28. Μεταβολές στη συγκέντρωση του οξυγόνου κατά μήκος του άξονα της Ερυθράς Θάλασσας ανάμεσα στα έτη 2001-2010 σε βάθος 150 m μέχρι το βυθό.

Σύγκριση 2010 με 2011

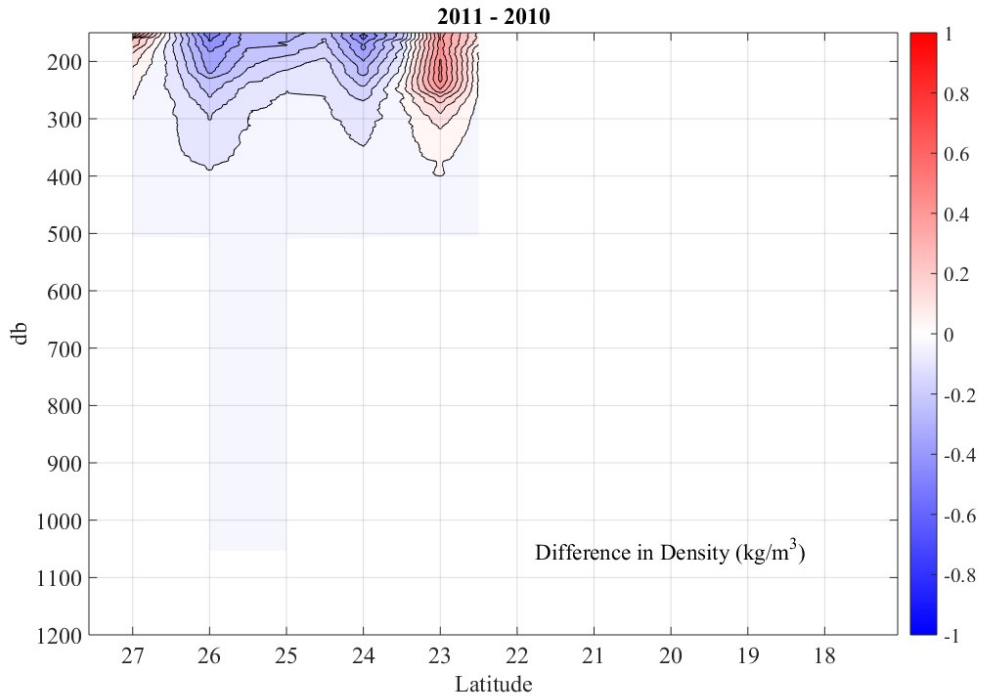
Μεταξύ των ετών 2010 και 2011 η κοινή περιοχή είναι πολύ μικρή, μπορούμε όμως στις Εικόνες 3.29-3.32 να παρατηρήσουμε αύξηση της θερμοκρασίας σε ένα βάθος 150- 300m σε μια περιοχή από τις 23.5-26.5 °N, ενώ στην υπόλοιπη περιοχή η θερμοκρασία μειώνεται. Με κέντρο τις 23°N και τις 27°N αντίστοιχα παρατηρούνται δύο πυρήνες, οι οποίοι εμφανίζουν χαμηλότερη θερμοκρασία έως και 0.5°C, υψηλότερη αλατότητα, υψηλότερη πυκνότητα και χαμηλότερη συγκέντρωση διαλυμένου οξυγόνου. Επίσης, ανάμεσα σε αυτά τα δύο έτη παρουσιάζονται και περιοχές αύξησης της αλατότητας, κάτι που δεν είχε παρατηρηθεί στις προηγούμενες συγκρίσεις. Αυτές οι μεταβολές στη θερμοκρασία και την αλατότητα, παρατηρούμε πως περιορίζονται στα 300-350m, και πιθανώς οφείλονται στις μεταβολές της επιφανειακής κυκλοφορίας, δηλαδή στην εμφάνιση ή μετακίνηση αντικυκλώνων (π.χ. η επίδραση του αντικυκλώνα στις 23°N φτάνει μέχρι και τα 400m βάθος).



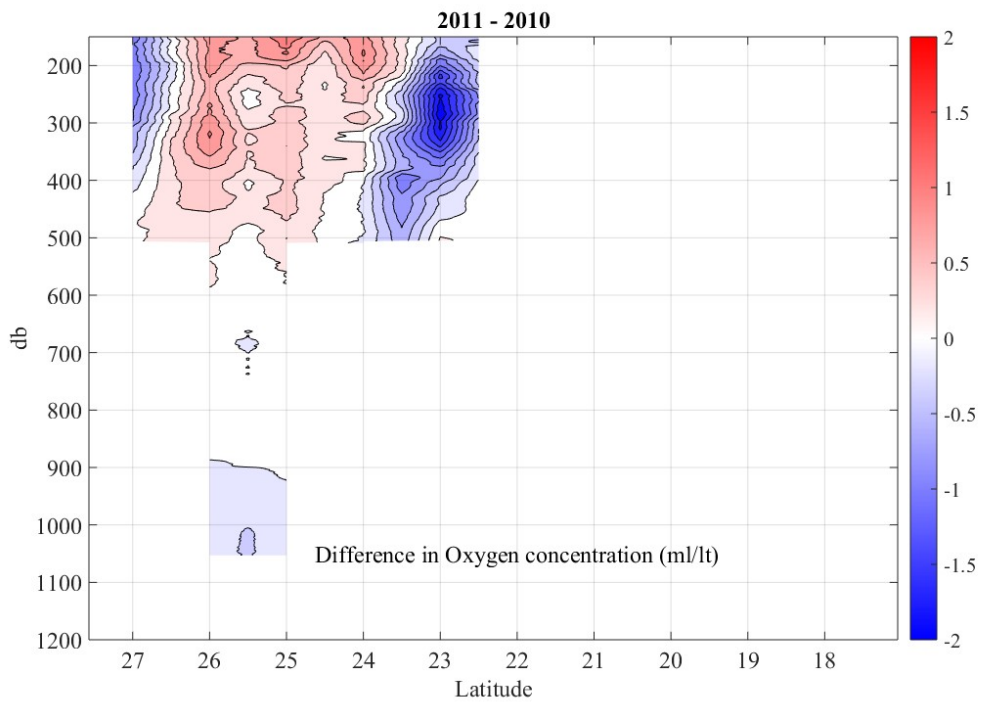
Εικόνα 3.29. Μεταβολές στη θερμοκρασία κατά μήκος του άξονα της Ερυθράς Θάλασσας ανάμεσα στα έτη 2010-2011 σε βάθος 150 m μέχρι το βυθό.



Εικόνα 3.30. Μεταβολές στην αλατότητα κατά μήκος του άξονα της Ερυθράς Θάλασσας ανάμεσα στα έτη 2010-2011 σε βάθος 150 m μέχρι το βυθό.



Εικόνα 3.31. Μεταβολές στην πυκνότητα κατά μήκος του άξονα της Ερυθράς Θάλασσας ανάμεσα στα έτη 2010-2011 σε βάθος 150 m μέχρι το βυθό.



Εικόνα 3.32. Μεταβολές στη συγκέντρωση του οξυγόνου κατά μήκος του άξονα της Ερυθράς Θάλασσας ανάμεσα στα έτη 2010-2011 σε βάθος 150 m μέχρι το βυθό.

Στις τομές των μεταβολών του οξυγόνου, αντίθετα, παρατηρείται εναλλαγή αύξησης-μείωσης (θετικές-αρνητικές τιμές) και κάτω από τα 400m. Το μοτίβο που παρουσιάζεται στις μεταβολές του οξυγόνου μεταξύ των διαφορετικών αποστολών, μας οδηγεί στην υπόθεση πως η ροή του RSDW δεν είναι συνεχείς αλλά γίνεται με pulses. Αυτό σημαίνει πως η δημιουργία βαθιών νερών δεν συμβαίνει κάθε χειμώνα, αλλά μόνο τους χειμώνας εκείνους που επικρατούν οι κατάλληλες καιρικές συνθήκες.

Από τις τομές του οξυγόνου του 2010 και 2011, βλέπουμε πως στα βαθιά νερά η “γλώσσα” χαμηλού οξυγόνου, η οποία αποτελεί τον κλάδο του RSDW που αναβλύζει και επιστρέφει προς το βορρά, σε βάθος 400 m περίπου, έχει προχωρήσει από το Μάρτιο του 2010 έως το Σεπτέμβρη του 2011 από τις 23°N στις 24.3°N, δηλαδή κατά περίπου 150 km. Μπορούμε να υπολογίσουμε την ταχύτητα με την οποία γίνεται αυτή η κίνηση του RSDW να είναι ίση με $3 \cdot 10^{-3}$ m/s. Σύμφωνα με αυτή την ταχύτητα και δεδομένου πως το μήκος της Ερυθράς Θάλασσας είναι περίπου 2000 km, υπολογίζουμε πως ο χρόνος που χρειάζονται τα βαθιά νερά να κινηθούν από το σημείο δημιουργίας τους στο βορρά σε όλο το μήκος της λεκάνης και να επιστρέψουν είναι 40 χρόνια. Το αποτέλεσμα αυτό είναι σε συμφωνία με παλαιότερες μελέτες που είχαν υπολογίσει το χρόνο παραμονής των βαθιών νερών κοντά στα 40 γρ (π.χ. Kuntz, 1985; Cember, 1988).

3.5.2. Χρονοσειρές των μέσων τιμών των υδρογραφικών χαρακτηριστικών

Ο κύριος στόχος αυτής της παραγράφου είναι να διερευνήσει τις μεταβολές στα υδρογραφικά χαρακτηριστικά της Ερυθράς Θάλασσας από το 2001 έως το 2011 και να προσδιορίσει αν υπάρχει σημαντική τάση προς υψηλότερη αλατότητα και υψηλότερη θερμοκρασία υπό το πρίσμα των υπερετήσιων μεταβολών. Προκειμένου να προσδιορίσουμε τις μεταβολές στις θερμοαλατικές ιδιότητες του RSDW για την περίοδο 2001 έως 2011, χρησιμοποιήσαμε μια μέθοδο ανάλυσης παρόμοια με αυτή που χρησιμοποίησε ο Alraddadi (2013) για την Ερυθρά Θάλασσα. Στη μελέτη του ο Alraddadi, μελέτησε τις θερμοαλατικές ιδιότητες κάτω από τα 300m βάθος ακολουθώντας την παρακάτω μέθοδο. Για κάθε υδρογραφικό προφίλ, υπολόγισε τις μέσες τιμές της δυνητικής θερμοκρασίας και της αλατότητας, κάτω από τα 300m έως το μέγιστο βάθος του κάθε προφίλ. Στη συνέχεια, υπολόγισε τη μέση τιμή αυτών των υδρογραφικών χαρακτηριστικών ανά cruise και ανά χρόνο, ώστε να αποκτηθεί μια μοναδική τιμή. Για την RSDW επιλέχθηκε το βάθος των 300m, επειδή η κατανομή των θερμοαλατικών ιδιοτήτων (δυνητική θερμοκρασία και αλατότητα) στο βαθύ αυτό στρώμα είναι σχεδόν ομοιογενής, όπως φαίνεται και στις Εικόνες 3.1-3.8.

Τα αποτελέσματα του Alraddadi έδειξαν πως υπάρχει μείωση της θερμοκρασίας κατά μέσο όρο, με ένα ρυθμό $-2.5 \cdot 10^{-4}$ °C/yr, καθώς και μείωση της αλατότητας με ένα μέσο όρο $-0.09 \cdot 10^{-4}$ psu/yr, σε ολόκληρο το σύνολο των δεδομένων του, από το 1889 έως το 2011. Επιπλέον, η ανάλυση δείχνει μια πτωτική τάση στη δυνητική πυκνότητα $-0.0002 \cdot 10^{-4}$ kg·m³/yr κατά μέσο όρο. Ωστόσο, οι μεταβολές αυτές στις θερμοαλατικές ιδιότητες του RSDW δεν ήταν στατιστικά σημαντικές.

Μετά το διαχωρισμό των δεδομένων σε δύο ομάδες, προκειμένου να διευκολυνθεί η σύγκριση μεταξύ τους, ανάλογα με την πυκνότητα των παρατηρήσεων, η ανάλυση δείχνει ότι υπάρχει αύξηση της θερμοκρασίας ($27 \cdot 10^{-4} \pm 11 \cdot 10^{-4}$ °C/yr) και μείωση της αλατότητας

($5.7 \cdot 10^{-4} \pm 3.4 \cdot 10^{-4}$ psu/yr) στο RSDW για το χρονικό διάστημα μεταξύ 1889 και 1950 (pre-1950). Αντίθετα, για το χρονικό διάστημα μεταξύ 1950 και 2011 (post-1950), παρατηρείται ψύξη και μείωση της αλατότητας στο RSDW, $35.5 \cdot 10^{-4} \pm 5.6 \cdot 10^{-4}$ °C/ yr και $13.8 \cdot 10^{-4} \pm 2.8 \cdot 10^{-4}$ psu/yr, αντίστοιχα.

Αυτό το σήμα της μείωσης της θερμοκρασίας και της αλατότητας (post-1950) είναι στατιστικά σημαντικό, με επίπεδο εμπιστοσύνης πάνω από 95%. Το σήμα αύξησης της θερμοκρασίας και μείωσης της αλατότητας για τη χρονική περίοδο πριν από το 1950 είναι σημαντικό σε επίπεδο εμπιστοσύνης άνω του 95% μόνο για την τάση θέρμανσης.

Σύμφωνα με το σύνολο των δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν σε αυτή τη μελέτη, οι διαφορές στη δυνητική θερμοκρασία του RSDW, μεταξύ 1950 και 2011, κυμαίνονται στην τιμή των 0.12 °C περίπου. Επιπλέον, οι διαφορές στην αλατότητα για την ίδια περίοδο βρέθηκαν να είναι 0.13 psu. Αξιοσημείωτα, οι μεταβολές στη δυνητική θερμοκρασία και την αλατότητα στο RSDW συσχετίζονται με έναν συντελεστή συσχέτισης $r=0.4$, γεγονός που υποδηλώνει ότι μακροπρόθεσμα οι μεταβολές στη δυνητική θερμοκρασία και την αλατότητα του RSDW αντισταθμίζονται στη πυκνότητα. Αυτό υποστηρίζεται από το γεγονός πως δεν υπάρχει σημαντική τάση μακροχρόνια στη δυνητική πυκνότητα του RSDW.

Η ανάλυση των θερμοαλατικών ιδιοτήτων του RSDW από τις υδρογραφικές τομές, κατά μήκος του άξονα της Ερυθράς Θάλασσας, μεταξύ του 1962 και του 2001, αποκαλύπτει μια μέση μείωση της θερμοκρασίας κατά 0.25 ± 0.028 °C και μείωση της αλατότητας κατά 0.018 ± 0.008 psu, μειώσεις που εμφανίζονται στις ιδιότητες του RSDW για πάνω από τέσσερις δεκαετίες.

Στη παρούσα εργασία, προκειμένου να μελετηθούν οι μεταβολές στις θερμοαλατικές ιδιότητες του RSDW, κατασκευάστηκαν χρονοσειρές με τρία διακριτά σημεία, όπου κάθε σημείο αντιστοιχεί στη μέση τιμή μιας παραμέτρου (θερμοκρασία, αλατότητα, δυνητική πυκνότητα ή οξυγόνο) από ένα συγκεκριμένο βάθος ως τον πυθμένα. Υπολογίστηκαν διάφορες μέσες τιμές, ξεκινώντας από την επιφάνεια και κατεβαίνοντας ανά 100 m ως τα 1000 m και μόνο για τους σταθμούς κατά μήκος του άξονα της λεκάνης.

Στον Πίνακα 3.1 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των χρονοσειρών για τις μέσες τιμές από τα 300 m έως το μέγιστο βάθος, ενώ στις Εικόνες 3.33-3.36 απεικονίζονται τα αποτελέσματα για όλα τα βάθη.

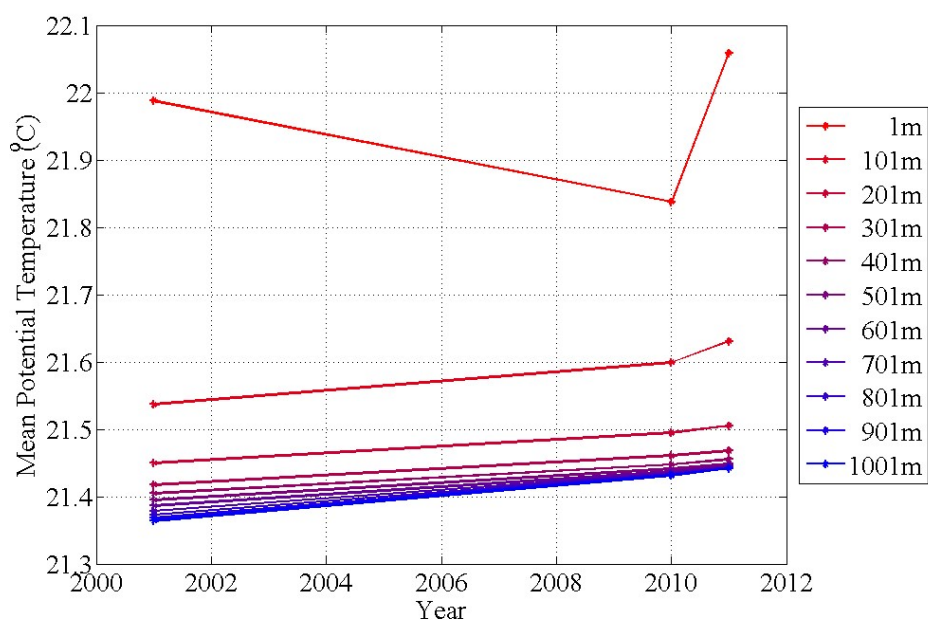
	2001	2010	2011
Θερμοκρασία (°C)	21.45	21.49	21.51
Αλατότητα (psu)	40.56	40.54	40.54
Δυνητική Πυκνότητα (kg/m³)	28.60	28.58	28.57
Συγκέντρωση Οξυγόνου (ml/l)	1.852	1.857	1.811

Πίνακας 3.1. Μέσες τιμές των υδρογραφικών χαρακτηριστικών από τους σταθμούς κατά μήκος του άξονα της Ερυθράς Θάλασσας από τα 300m έως το μέγιστο βάθος για τα τρία έτη της μελέτης.

Για την χρονική περίοδο από το 2001 έως το 2011, και για τις μέσες τιμές από τα 300m έως το μέγιστο βάθος, προκύπτει πως η θερμοκρασία αυξάνει με ένα ρυθμό $53.85 \cdot 10^{-4} \text{ }^\circ\text{C}/\text{yr}$, η αλατότητα μειώνεται με ένα ρυθμό $-20.88 \cdot 10^{-4} \text{ psu}/\text{yr}$ και η πυκνότητα μειώνεται με ρυθμό $-26.92 \cdot 10^{-4} \text{ kg}/\text{m}^3 \cdot \text{yr}$.

Τα αποτελέσματα μας, συμφωνούν με αυτά του Alraddadi, ως προς την μείωση της αλατότητας (για την περίοδο μετά το 1950) όμως, δίνουν αντίθετα αποτελέσματα σχετικά με την θερμοκρασία. Ο Alraddadi υπολόγισε ψύξη για την χρονική περίοδο από το 1950 έως το 2011, ενώ από την παρούσα ανάλυση προκύπτει πως την δεκαετία από το 2001 έως το 2011, η θερμοκρασία των βαθιών νερών αυξάνεται.

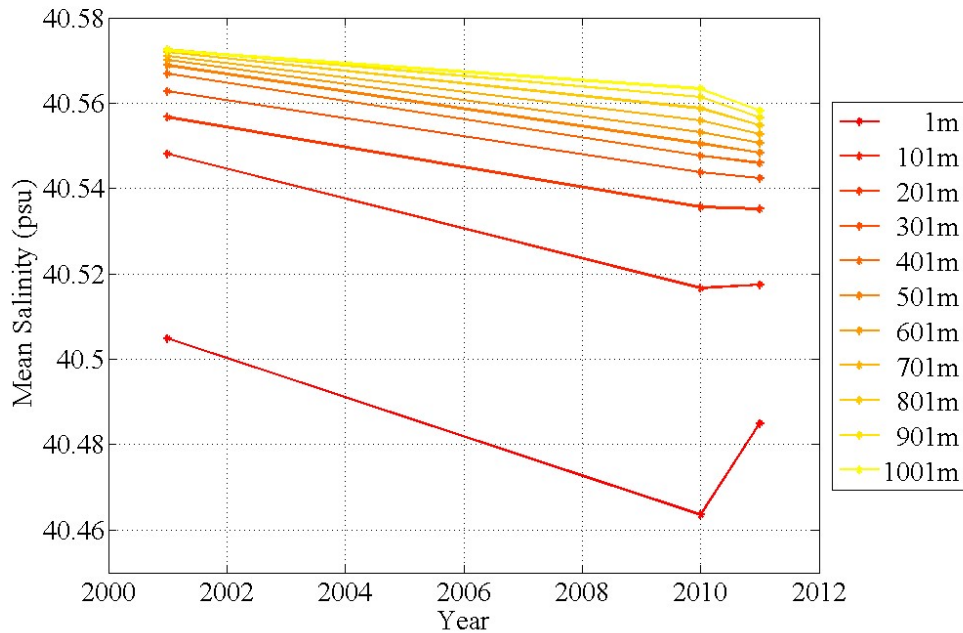
Σχετικά με τις χρονοσειρές της θερμοκρασίας (Εικόνα 3.33), παρατηρούμε πως όταν υπολογίζουμε τη μέση τιμή της θερμοκρασίας σε ολόκληρη τη στήλη νερού, αυτή μειώνεται από το 2001 μέχρι το 2010 και αυξάνεται από το 2010 μέχρι το 2011. Αυτό είναι αναμενόμενο αφού το 2001 και το 2011 οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν καλοκαίρι ενώ το 2010 χειμώνα, οπότε και έχουμε έντονη εποχική μεταβολή. Η εποχική επίδραση, όμως βλέπουμε πως είναι εμφανής μόνο στα πρώτα 100m, καθώς η χρονοσειρά της μέσης τιμής της θερμοκρασίας από τα 100m έως το βυθό δεν παρουσιάζει μείωση της θερμοκρασίας μεταξύ των ετών 2001 και 2010. Η χρονοσειρά αυτή, όμως παρουσιάζει μεγαλύτερες μέσες τιμές σε σχέση με τις επόμενες, που υπολογίζουν τις μέσες τιμές από τα 200 και τα 300 m, καθώς τα νερά στα 100 και στα 200 m έχουν υψηλότερη θερμοκρασία από τα πιο βαθιά. Παρατηρούμε επίσης πως από ένα βάθος 400m και κάτω, δεν παίζει σημαντικό ρόλο από πιο βάθος έχουμε υπολογίσει τη μέση τιμή, πράγμα που υποδεικνύει μια ομοιομορφία στην θερμοκρασία από ένα βάθος 400m και κάτω.



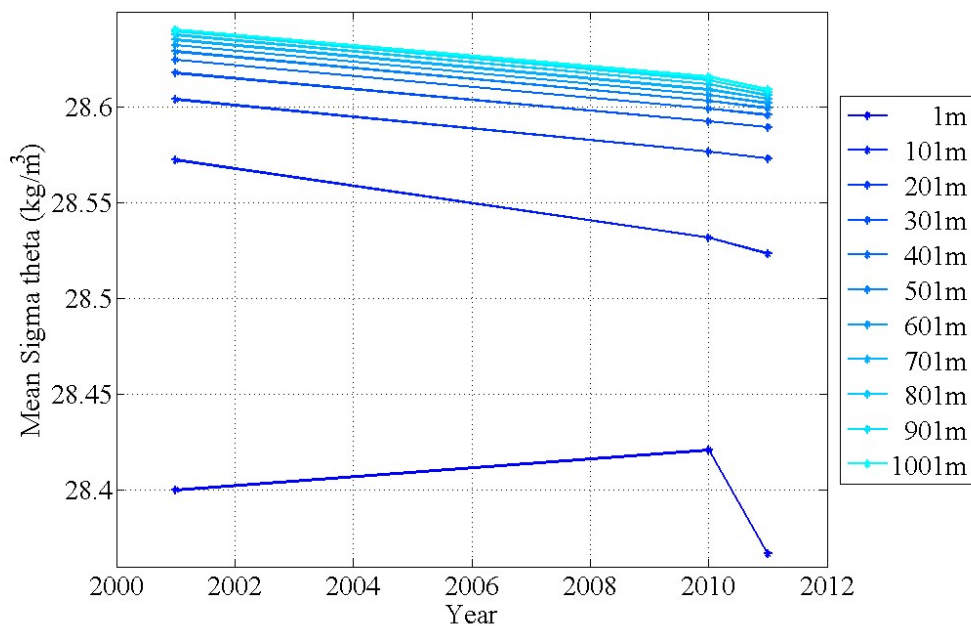
Εικόνα 3.33. Χρονοσειρές της μέσης τιμής της θερμοκρασίας.

Αντίστοιχες μεταβολές παρατηρούμε και στις χρονοσειρές της αλατότητας (Εικόνα 3.34), με την μέση τιμή της αλατότητας σε όλη τη στήλη του νερού να μειώνεται μεταξύ των ετών

2001 και 2010 και στη συνέχεια να αυξάνεται. Η μικρότερη αλατότητα των επιφανειακών νερών το 2010, όπου οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν χειμώνα, οφείλεται στην εισροή του GASW το οποίο εισέρχεται στην Ερυθρά Θάλασσα από τον Κόλπο του Αδεν κατά τη διάρκεια του χειμώνα. Από ένα βάθος 400m και κάτω παρατηρούμε και εδώ μικρές μεταβολές στις μέσες τιμές της αλατότητας. Συνολικά, παρατηρείται μια συνεχής μείωση της αλατότητας των βαθιών νερών από το 2001 έως το 2011.

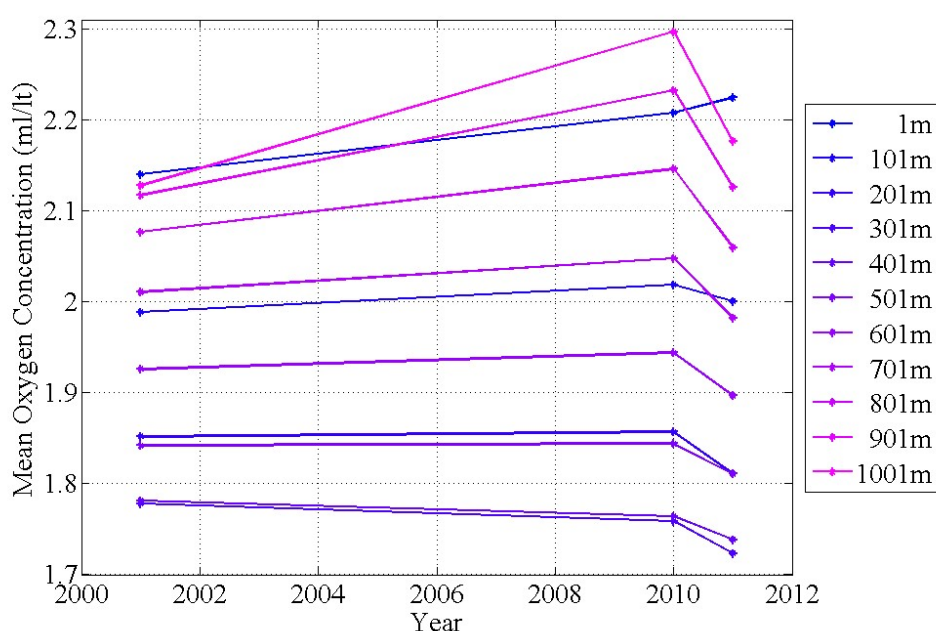


Εικόνα 3.34. Χρονοσειρές της μέσης τιμής της αλατότητας.



Εικόνα 3.35. Χρονοσειρές της μέσης τιμής της δυνητικής πυκνότητας.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι χρονοσειρές των μέσων τιμών της συγκέντρωσης του διαλυμένου οξυγόνου (Εικόνα 3.36). Παρατηρούμε πως αν υπολογίσουμε τη μέση τιμή από την επιφάνεια έως το μέγιστο βάθος, οι μέσες τιμές της συγκέντρωσης του διαλυμένου οξυγόνου είναι της τάξης των 2.2 ml/lt και παρουσιάζεται αύξηση από το 2001 μέχρι το 2011. Οι μέσες τιμές που υπολογίζουμε από τα 100 m είναι μικρότερες και μειώνονται συνεχώς αν τις υπολογίσουμε από τα 200m, 300 m και 400 m. Στη συνέχεια, καθώς υπολογίζουμε τις μέσες τιμές από μεγαλύτερα βάθη, αυτές αυξάνονται και η μέση τιμή της συγκέντρωσης του οξυγόνου από τα 1000 m είναι μεγαλύτερη από τη μέση τιμή από μικρότερα βάθη. Τα βαθιά νερά, από 500 m και πιο βαθιά, είναι πιο οξυγονωμένα από τα από πάνω τους. Μελετώντας τώρα τις χρονικές μεταβολές, παρατηρούμε πως σε όλες τις χρονοσειρές εκτός της πρώτης αυξάνεται η συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου μεταξύ των ετών 2001 και 2010, ενώ μειώνεται μεταξύ του 2010 και 2011.



Εικόνα 3.36. Χρονοσειρές της μέσης τιμής της συγκέντρωσης του διαλυμένου οξυγόνου.

3.6 Η στρωμάτωση της Ερυθράς Θάλασσας

Με τον όρο στρωμάτωση εννοούμε την κατά βάθος ή κατά ύψος κατανομή της πυκνότητας. Η στρωμάτωση αποτελεί μια βασική ιδιότητα του Ωκεανού και της Ατμόσφαιρας. Το θεμελιώδες μέγεθος, που χρησιμοποιούμε όταν αναφερόμαστε στη στρωμάτωση, είναι η λεγόμενη “συχνότητα πλευστότητας” ή συχνότητα Brunt-Väisälä, η οποία καθορίζεται από την κατανομή της πυκνότητας κατά βάθος $\rho(z)$ και ορίζεται ως:

$$N^2 = -\frac{g}{\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial z} \quad (4.1)$$

όπου ρ είναι η δυναμική πυκνότητα, ρ_0 είναι μια σταθερά πυκνότητα αναφοράς και g η επιτάχυνση της βαρύτητας της Γης.

Στην δυναμική της ατμόσφαιρας και την ωκεανογραφία, η συχνότητα Brunt–Väisälä, ή συχνότητα πλευστότητας, είναι η συχνότητα με την οποία ταλαντώνεται μια ποσότητα νερού, όταν μετατοπιστεί από τη θέση ισορροπίας σε ένα στατικά σταθερό περιβάλλον. Η συχνότητα Brunt–Väisälä σχετίζεται με τα εσωτερικά κύματα βαρύτητας και παρέχει μια χρήσιμη περιγραφή της ατμοσφαιρικής και θαλάσσιας σταθερότητας.

Σε ένα στρωματωμένο ωκεανό, μια (μικρή) διαταραχή σε οποιαδήποτε διεπιφάνεια θα προκαλούσε μια απόκριση, η οποία μας οδηγεί σε μια σημαντική έννοια της Δυναμικής του ωκεανού, η οποία ονομάζεται ‘Κανονικοί Τρόποι Ταλάντωσης’ (‘Normal Modes’). Η μεγάλη χρησιμότητα της κατασκευής αυτών των Κανονικών Τρόπων στον ωκεανό είναι ότι, με μία επαρκή προσέγγιση (τα κύματα διάδοσης είναι πολύ μεγάλα στην οριζόντια κλίμακα σε σύγκριση με την κατακόρυφη ή αλλιώς βρίσκονται σε υδροστατική προσέγγιση) το σύστημα διαθέτει διαχωρισίμες λύσεις στην οριζόντια και κατακόρυφη διάσταση. Σε αυτή την περίπτωση, κάθε τρόπος ταλάντωσης συμπεριφέρεται ανεξάρτητα και αυτό έχει μεγάλη χρησιμότητα. Ανά πάσα στιγμή, η κατάσταση του ωκεανού, δηλαδή η $u=u(x, y, z, t)$ μπορεί να βρεθεί από τη δομή των κανονικών τρόπων ταλάντωσης. Εκτός από αυτό, αν εφαρμόσουμε τις παραπάνω προσεγγίσεις, η κατάσταση του συστήματος μπορεί να απλοποιηθεί περαιτέρω σε $u=u(x, y, t) \cdot u(z)$, δηλαδή να διαχωριστούν οι κατακόρυφοι τρόποι ταλάντωσης από τις οριζόντιες κινήσεις.

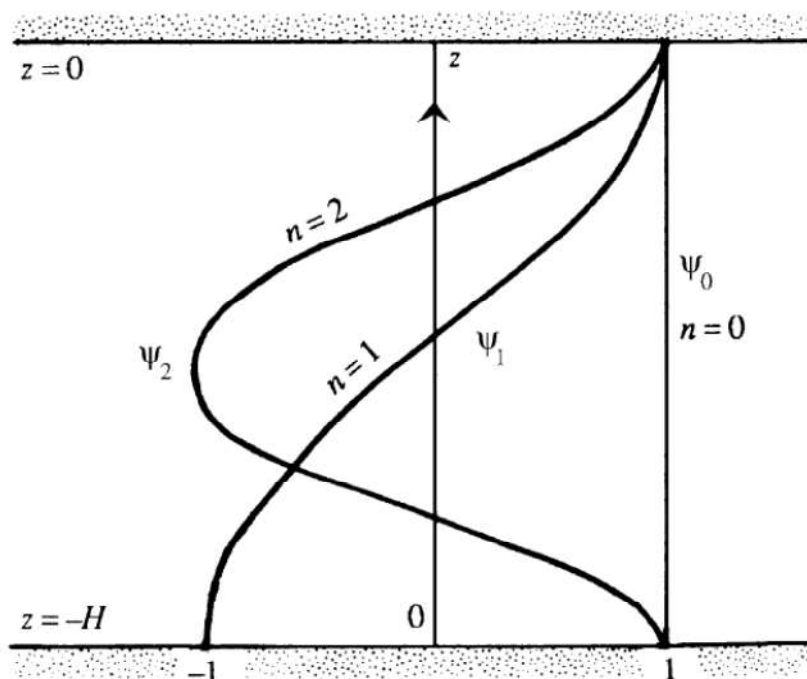
Στην περίπτωση των ωκεανών, υπάρχουν οριακές συνθήκες στο βυθό και στην επιφάνεια, οι οποίες περιορίζουν την ενέργεια σε μία περιοχή πεπερασμένης κατακόρυφης έκτασης, αν και η οριζόντια διάδοση επιτρέπεται. Έτσι ο ωκεανός μπορεί να θεωρηθεί ως ένας κυματοδηγός που αναγκάζει την ενέργεια να μεταδίδεται οριζόντια (Gill, 1982). Αυτή η ιδιότητα του ωκεανού ως κυματοδηγός παρέχει μόνο ένα δυνατό αριθμό ιδιοτιμών και στο όριο των μακρών κυμάτων (δηλαδή πολύ μικρές τιμές των ‘ k ’ και ‘ l ’), οι αντίστοιχες ιδιοσυναρτήσεις είναι ανεξάρτητες από τους οριζόντιους κυματαριθμούς.

Στην περίπτωση του ωκεανού με πεπερασμένη κατακόρυφη στρωμάτωση, οι λύσεις μπορούν να εκφραστούν ως το άθροισμα των κανονικών τρόπων ταλάντωσης, καθένας από τους οποίους έχει μια σταθερή κάθετη δομή και συμπεριφέρεται στην οριζόντια διάσταση και στο χρόνο (x, y, t) με τον ίδιο τρόπο, όπως ένα ομοιογενές υγρό με ελεύθερη επιφάνεια (Gill, 1982). Αυτό σημαίνει ότι η κατακόρυφη ταλάντωση συνοδεύεται με σταθερή οριζόντια κίνηση.

Για έναν ωκεανό με ‘ n ’ στρώματα, μπορεί να υπάρχουν ‘ n ’ κατακόρυφοι (κανονικοί) τρόποι ταλάντωσης. Γενικά, αν ο ωκεανός αποτελείται από ‘ n ’ στρώματα, οι τρόποι ταλάντωσης αποτελούνται από 1 βαροτροπικό και ‘ $n-1$ ’ βαροκλινικούς (συνολικά ‘ n ’ τρόποι ταλάντωσης). Κάθε χρονική στιγμή, η κατάσταση του συστήματος είναι ένας γραμμικός συνδυασμός των ‘ n ’ τρόπων ταλάντωσης. Έτσι, η κατάσταση του συστήματος μπορεί να παρασταθεί ως το άθροισμα αυτών των κανονικών τρόπων και αποτελεί ένα σημαντικό εργαλείο για να βρούμε την εξέλιξη του συστήματος.

Για οποιοδήποτε προφίλ πυκνότητας, είναι δυνατή η εξαγωγή της δομής των κανονικών τρόπων ταλάντωσης του ωκεανού. Ο πρώτος τρόπος (Εικόνα 3.37), για $n=0$, είναι ο βαροτροπικός και η ιδιοσυνάρτηση του είναι μια ευθεία γραμμή, όλος ο ωκεανός κινείται με μια ενιαία ταχύτητα. Ο επόμενος τρόπος, για $n=1$, ο πρώτος βαροκλινικός, έχει μια ιδιοσυνάρτηση που τέμνει τη γραμμή του μηδενός σε ένα σημείο. Το στρώμα πάνω από το σημείο αυτό φέρεται ως ένα ενιαίο στρώμα για τον συγκεκριμένο τρόπο και το στρώμα από κάτω φέρεται ως ένα διαφορετικό στρώμα (προσέγγιση δύο στρωμάτων). Ο δεύτερος

βαροκλιτικός τρόπος τέμνει τη γραμμή του μηδενός σε δύο σημεία, και ούτω καθεξής για τους ανώτερους τρόπους.

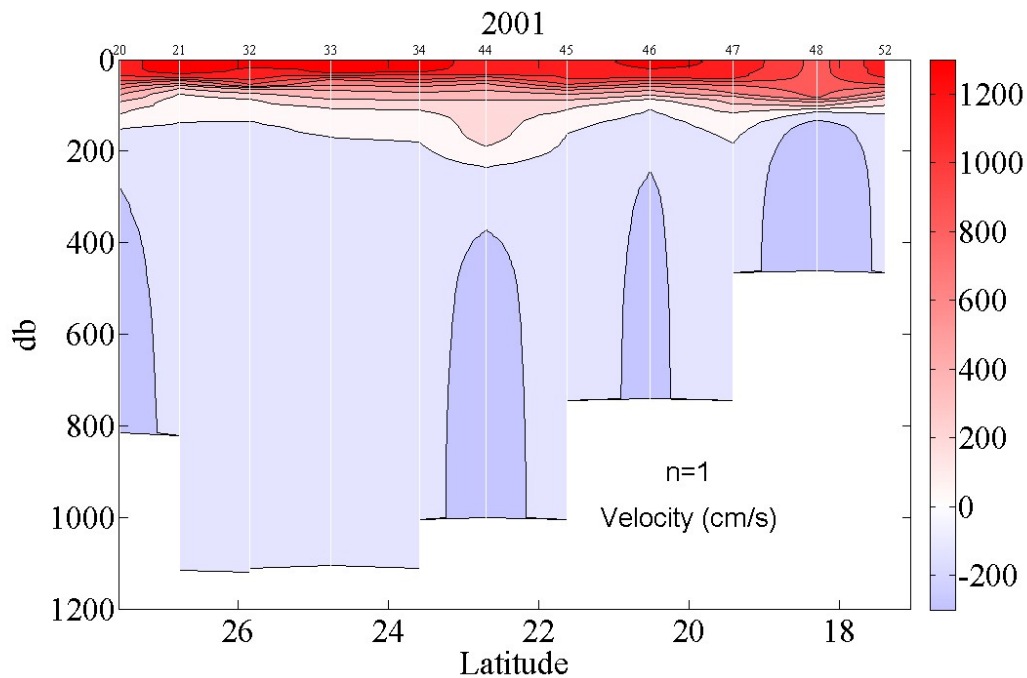


Εικόνα 3.37. Κατακόρυφη κατανομή των τριών πρώτων κανονικών τρόπων ταλάντωσης σε ένα στρωματωμένο μέσο ομοιόμορφης συχνότητας πλευστότητας για ένα στρώμα υγρού βάθους H . Ο πρώτος κανονικός τρόπος ταλάντωσης ($n=0$) είναι σχεδόν ομοιογενής με το βάθος. Ο δεύτερος κανονικός τρόπος ταλάντωσης ($n=1$) έχει τη μορφή μισού μήκους κύματος για $-H < z < 0$. Ο τρίτος κανονικός τρόπος ταλάντωσης ($n=2$) έχει τη μορφή ενός ολόκληρου μήκους κύματος για $-H < z < 0$ (Kundu et al., 2012).

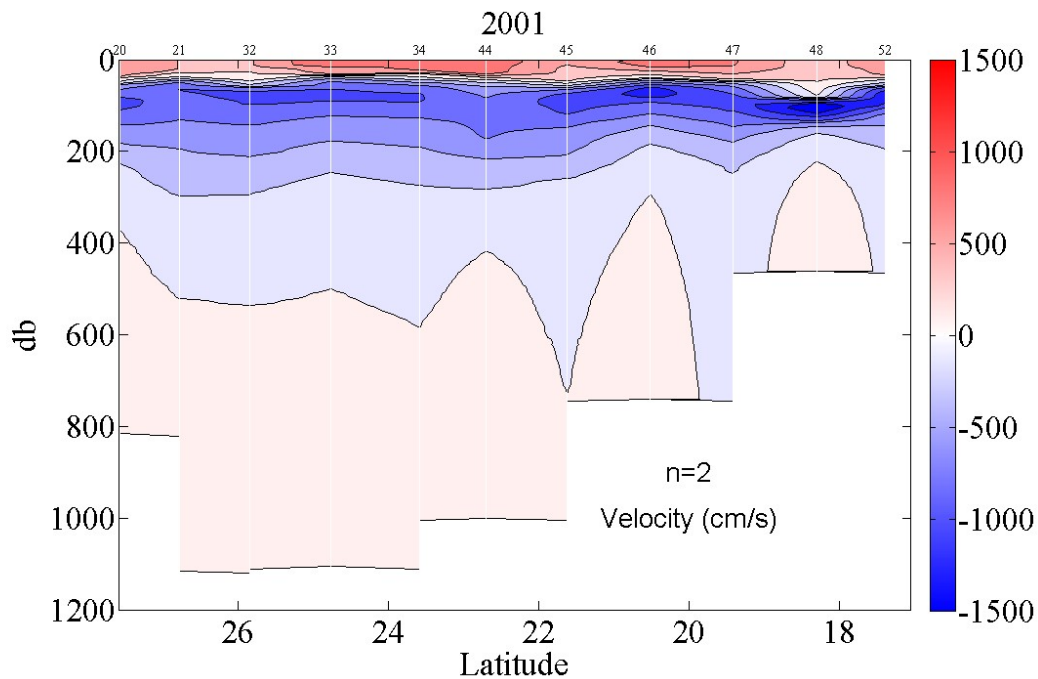
3.6.1 Κανονικοί τρόποι ταλάντωσης κατά μήκος της λεκάνης

Παρακάτω δίνεται η δομή των κανονικών τρόπων ταλάντωσης, όπως αυτοί υπολογίστηκαν από τους σταθμούς κατά μήκος του άξονα της λεκάνης της Ερυθράς Θάλασσας από τα δεδομένα των τριών αποστολών. Στις Εικόνες 3.38 – 3.39 παρουσιάζονται ο πρώτος και ο δεύτερος βαροκλιτικός τρόπος ταλάντωσης κατά μήκος του άξονα της λεκάνης της Ερυθράς Θάλασσας από τα δεδομένα του 2001. Από την Εικόνα 3.38, στην οποία παρουσιάζεται η δομή του πρώτου βαροκλιτικού τρόπου ταλάντωσης της, παρατηρούμε πως το πρώτο, το επιφανειακό στρώμα, φτάνει στα 110-130 m. Μόνο στη περιοχή του αντικυκλώνα, στις 23°N, το επιφανειακό στρώμα είναι πιο βαθύ και φτάνει στα 230m. Οι ταχύτητες του επιφανειακού στρώματος φτάνουν τα 120cm/s, ενώ βαθύτερο στρώμα, το οποίο καταλαμβάνει τα βάθη από τα 130m έως τον πυθμένα, παρουσιάζει ταχύτητες ως και τα 200cm/s. Ο πρώτος βαροκλιτικός τρόπος εξηγεί το 72.89% της διακύμανσης της λεκάνης (explained variance 72.89%).

Στην Εικόνα 3.39 παρουσιάζεται ο δεύτερος βαροκλιτικός τρόπος ταλάντωσης κατά μήκος της λεκάνης για το 2001. Το πρώτο στρώμα είναι περιορισμένο στα πρώτα 30-50 m και έχει ταχύτητες μέχρι τα 1000 cm/s. Στις 18°N εμφανίζεται ένας ενδιαφέρων σχηματισμός, ο οποίος προκαλεί βάθυνση του πρώτου στρώματος ως τα 80 m και ταυτόχρονα το δεύτερο στρώμα γίνεται πιο “ενεργό” με ταχύτητες μέχρι 1500 cm/s. Το δεύτερο στρώμα καταλαμβάνει τα βάθη από τα 50 m μέχρι τα 400 m με το πιο ενεργό τμήμα του να φτάνει στα 200 m. Στον δεύτερο βαροκλιτικό τρόπο δεν εντοπίζεται η επίδραση του αντικυκλώνα των 23°N, ενώ αντίθετα αυτή εμφανίζεται στον πρώτο βαροκλιτικό τρόπο. Ο δεύτερος βαροκλιτικός τρόπος εξηγεί το 13.12% της διακύμανσης της λεκάνης (explained variance 13.12%).



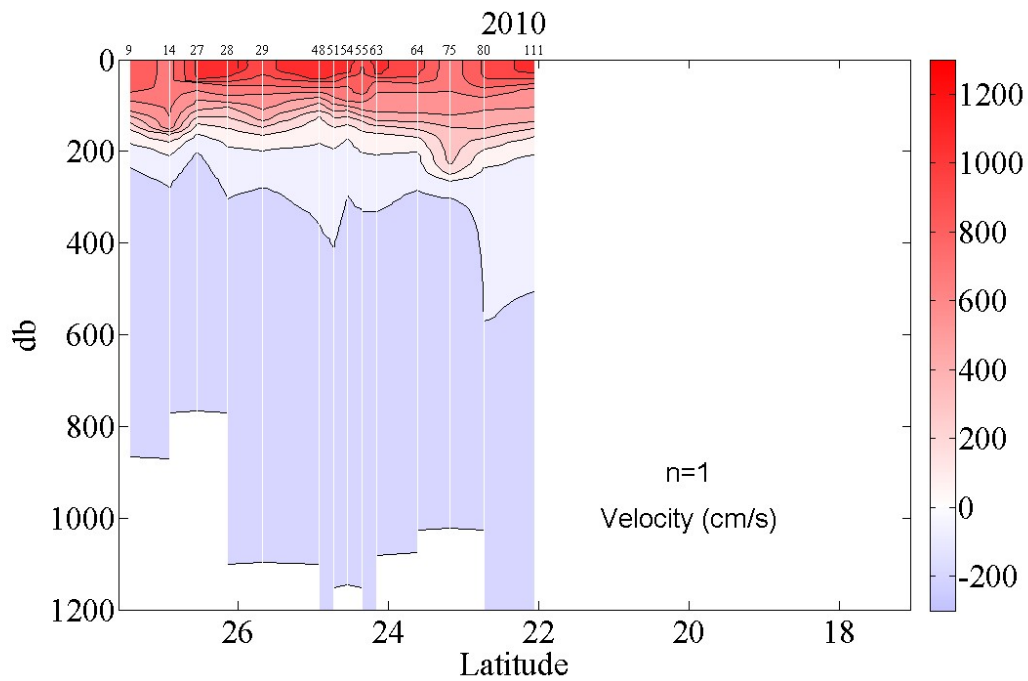
Εικόνα 3.38. Κατανομή του πρώτου βαροκλιτικού τρόπου κατά μήκος της λεκάνης της Ερυθράς Θάλασσας από τα δεδομένα του 2001.



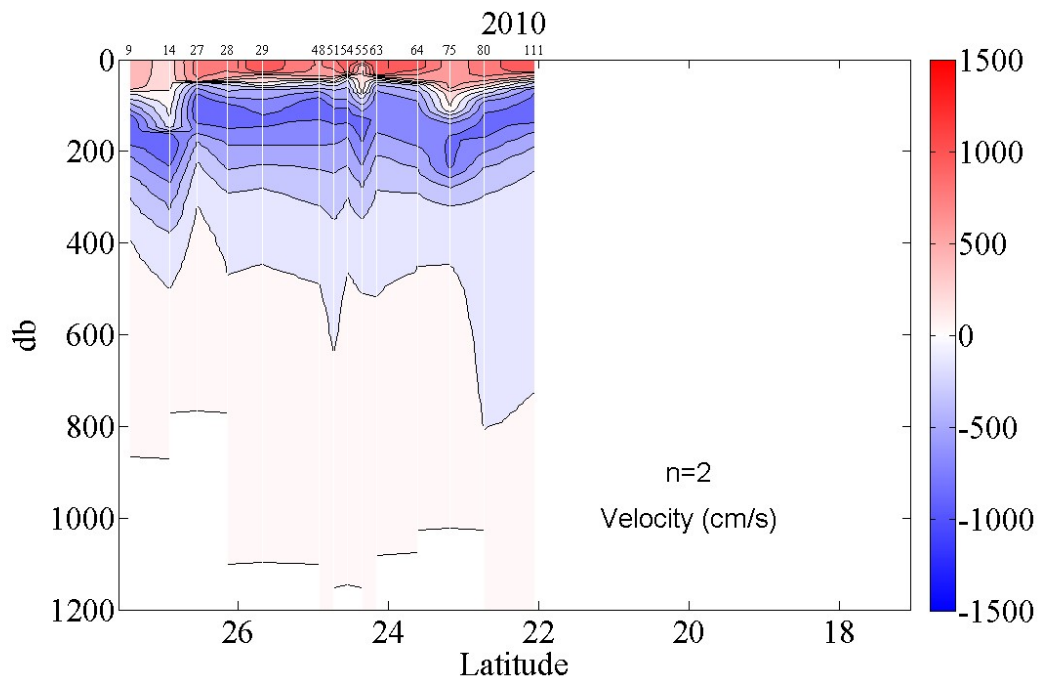
Εικόνα 3.39. Κατανομή του δεύτερου βαροκλιτικού τρόπου κατά μήκος της λεκάνης της Ερυθράς Θάλασσας από τα δεδομένα του 2001.

Η κατανομή του πρώτου βαροκλιτικού τρόπου για το χειμώνα του 2010 δίνεται στην Εικόνα 3.40. Το επιφανειακό στρώμα φτάνει μέχρι τα 200 m με μέγιστη ταχύτητα τα 1200 cm/s. Στις 23°N, και σε αυτά τα αποτελέσματα, το επιφανειακό στρώμα είναι πιο βαθύ και φτάνει ως τα 260 m. Από αυτό το βάθος και κάτω το δεύτερο στρώμα εμφανίζεται με ταχύτητες μέχρι -200 cm/s. Ο πρώτος βαροκλιτικός τρόπος εξηγεί το 71.79% της διακύμανσης/μεταβλητότητας της λεκάνης (explained variance 71.79%).

Στο δεύτερο βαροκλιτικό τρόπο, για το 2010 (Εικόνα 3.41), το επιφανειακό στρώμα καταλαμβάνει τα πρώτα 50 m, παρουσιάζει όμως σημεία όπου βαθαινει και πάνω από τα 100 m στις 27, 24.3 και 23°N. Οι ταχύτητες του φτάνουν μέχρι τα 1100 cm/s. Το δεύτερο στρώμα εμφανίζεται από ένα ελάχιστο βάθος 300 m έως ένα μέγιστο βάθος στα 800 m, με μια μέγιστη ταχύτητα -800 cm/s. Κάτω από το δεύτερο στρώμα, το τρίτο στρώμα φτάνει μέχρι τον πυθμένα με μια μέγιστη ταχύτητα 150 cm/s. Ο δεύτερος βαροκλιτικός τρόπος εξηγεί το 13.16% της διακύμανσης/μεταβλητότητας της λεκάνης (explained variance 13.16%).



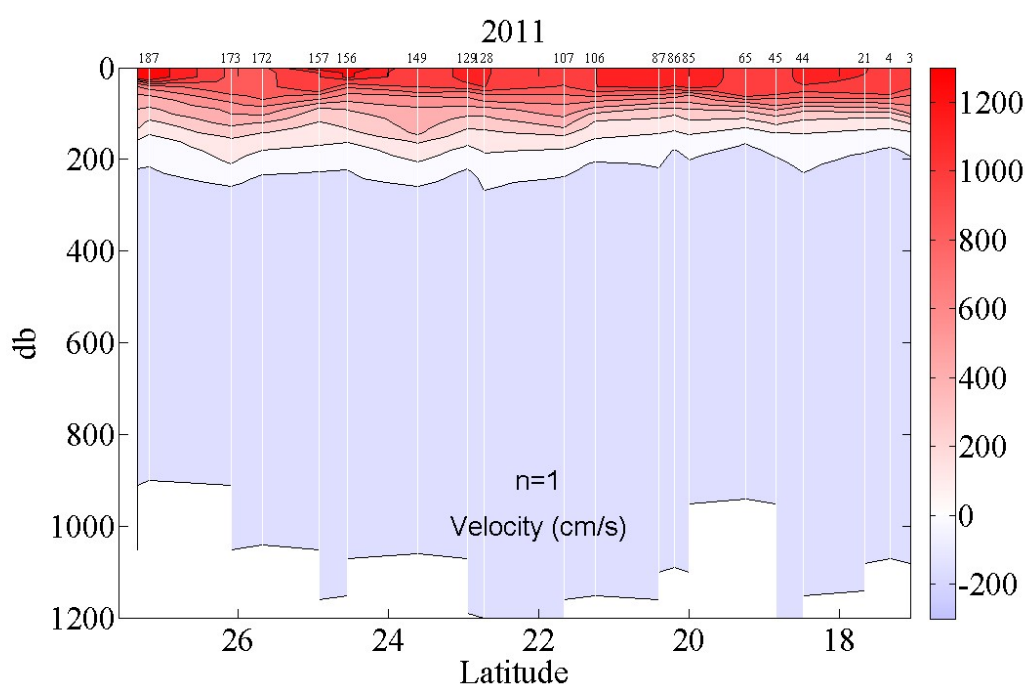
Εικόνα 3.40. Κατανομή του πρώτου βαροκλιτικού τρόπου κατά μήκος της λεκάνης της Ερυθράς Θάλασσας από τα δεδομένα του 2010.



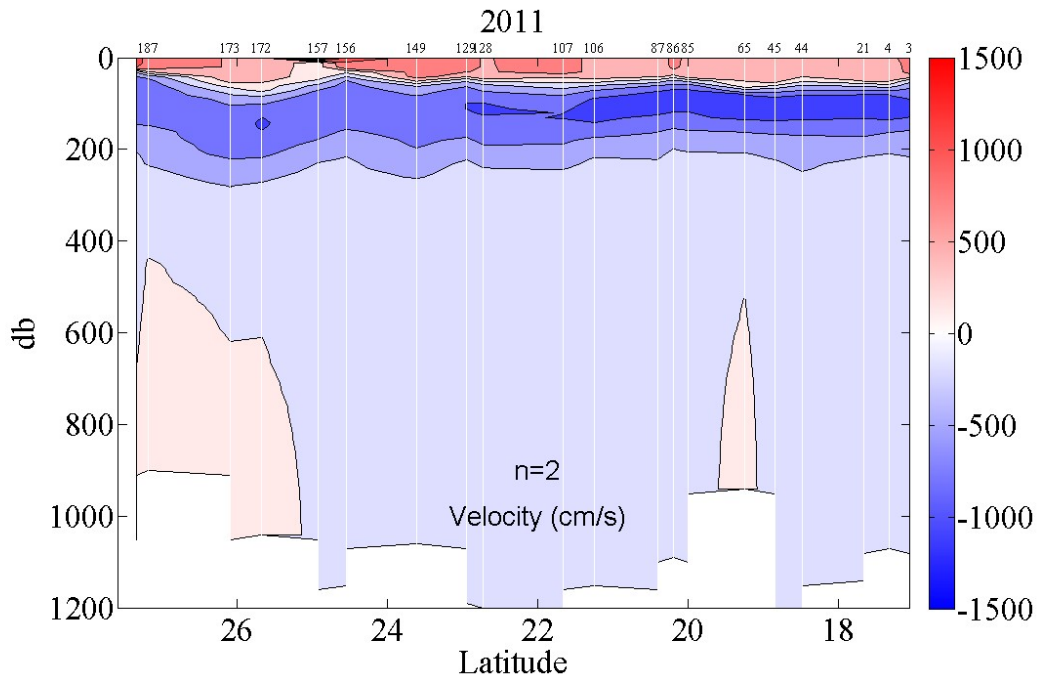
Εικόνα 3.41. Κατανομή του δεύτερου βαροκλιτικού τρόπου κατά μήκος της λεκάνης της Ερυθράς Θάλασσας από τα δεδομένα του 2010.

Στην Εικόνα 3.42 παρουσιάζεται η κατανομή του πρώτου βαροκλιτικού τρόπου ταλάντωσης από την επεξεργασία των δεδομένων του 2011. Στον πρώτο βαροκλιτικό τρόπο το επιφανειακό στρώμα φτάνει μέχρι τα 200-240 m βάθος και έχει μέγιστη ταχύτητα 1300 cm/s. Το δεύτερο στρώμα, από τα 200 m έως τον πυθμένα παρουσιάζει ταχύτητες μέχρι -160 cm/s. Ο πρώτος βαροκλιτικός τρόπος εξηγεί το 72.20% της διακύμανσης της λεκάνης.

Για το δεύτερο βαροκλιτικό τρόπο (Εικόνα 3.43), το ρηχότερο σημείο του επιφανειακού στρώματος φτάνει στα 20 m σε βάθος, ενώ το βαθύτερο τα 70 m. Οι ταχύτητες σε αυτό το επιφανειακό στρώμα φτάνουν μέχρι τα 1400 cm/s. Το υποκείμενο δεύτερο στρώμα φτάνει μέχρι τα 300 m, ακόμα και τα 440 m. Οι ταχύτητες σε αυτό το στρώμα φτάνουν τα -1100 cm/s. Το τρίτο στρώμα που καταλαμβάνει το υπόλοιπο τμήμα της λεκάνης παρουσιάζει ταχύτητες μέχρι 160 cm/s. Ο δεύτερος βαροκλιτικός τρόπος εξηγεί το 13.87% της διακύμανσης της λεκάνης .



Εικόνα 3.42. Κατανομή του πρώτου βαροκλιτικού τρόπου κατά μήκος της λεκάνης της Ερυθράς Θάλασσας από τα δεδομένα του 2011.



Εικόνα 3.43. Κατανομή του δεύτερου βαροκλιτικού τρόπου κατά μήκος της λεκάνης της Ερυθράς Θάλασσας από τα δεδομένα του 2011.

Συνολικά, μπορούμε να πούμε πως από τη σύγκριση των παραπάνω δεν προκύπτουν σημαντικές μεταβολές στη στρωμάτωση της Ερυθράς Θάλασσας στη διάρκεια των δέκα ετών από το 2001 έως το 2011. Μικρή μεταβολή παρατηρείται στον πρώτο βαροκλιτικό τρόπο, στον οποίο το βάθος που καταλαμβάνει το επιφανειακό στρώμα έχει βαθύνει από τα 110 m στα 240 m, χωρίς όμως ιδιαίτερη μεταβολή στις ταχύτητες.

3.6.2 Κανονικοί τρόποι ταλάντωσης σε Βορρά-Μέση-Νότο

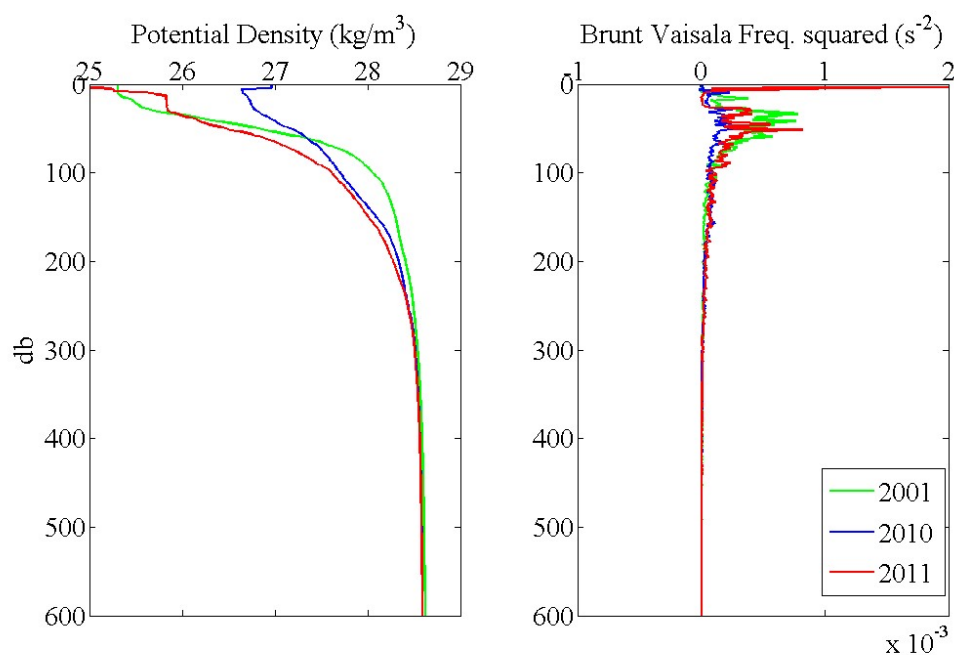
Για να μελετήσουμε καλύτερα τις μεταβολές στη στρωμάτωση της Ερυθράς Θάλασσας, στη διάρκεια των δέκα ετών της μελέτης μας, χωρίζουμε τη λεκάνη σε τρεις περιοχές Βόρεια – Κεντρική – Νότια, περιοχές οι οποίες ορίζονται από τα γεωγραφικά πλάτη: 28 - 22°N για τη Βόρεια, 22-17°N για την Κεντρική και 17-14°N για τη Νότια. Σε κάθε περιοχή και για κάθε χρονιά μετρήσεων, υπολογίστηκε ένα μέσο κατακόρυφο προφίλ πυκνότητας, από τους κατά μήκος του άξονα της λεκάνης σταθμούς. Το προφίλ αυτό στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό της συχνότητας Brunt–Väisälä και των κανονικών τρόπων ταλάντωσης.

Στις Εικόνες 3.44-3.49 παρουσιάζονται η πυκνότητα του μέσου προφίλ, η συχνότητα Brunt–Väisälä καθώς και οι δύο πρώτοι βαροκλιτικοί τρόποι ταλάντωσης για τις τρεις περιοχές για τα έτη 2001, 2010 και 2011.

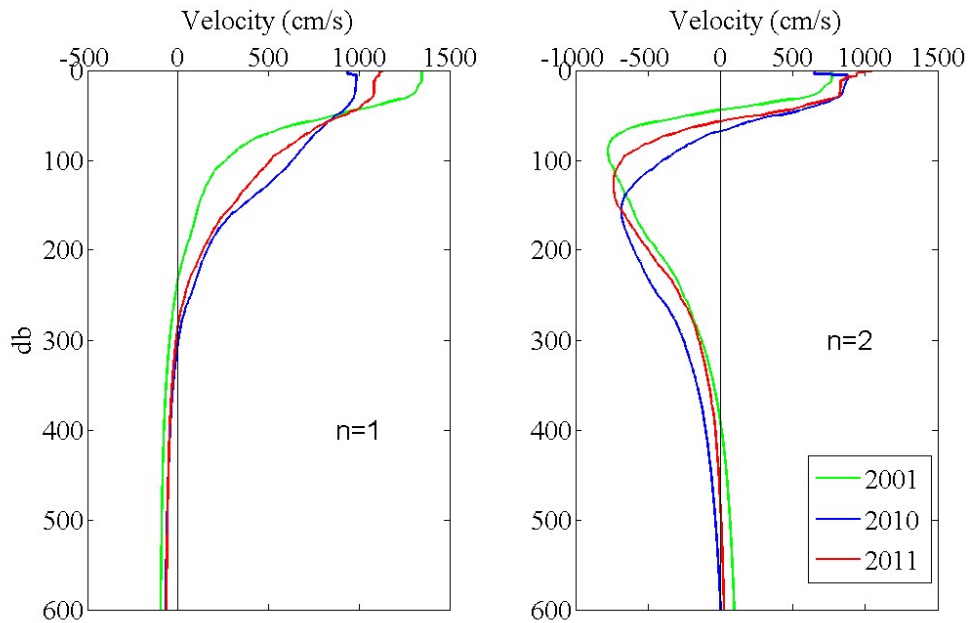
Στη Βόρεια περιοχή της Ερυθράς Θάλασσας (Εικόνες 3.44 και 3.45) και για τον πρώτο βαροκλιτικό τρόπο ταλάντωσης μπορούμε να παρατηρήσουμε πως το 2001 το επιφανειακό στρώμα είναι πιο ρηχό (230 m σε σχέση με τα 300m το 2010 και τα 280m το 2011), ενώ παρουσιάζει μεγαλύτερη μέγιστη ταχύτητα (1346 cm/s σε σχέση με τα 984 cm/s του 2010

και τα 1133 cm/s του 2011). Η ακτίνα αποδιαμόρφωσης Rossby στη βόρεια περιοχή της Ερυθράς Θάλασσας για τον πρώτο βαροκλινικό τρόπο ταλάντωσης είναι 18.7 km για το 2001, 18.5 km για το 2010, ενώ υπολογίζεται στα 21.1 km για το 2011.

Για το δεύτερο βαροκλινικό τρόπο ταλάντωσης στη Βόρεια περιοχή της Ερυθράς Θάλασσας το 2001, το επιφανειακό στρώμα φτάνει σε βάθος μέχρι τα 44 m και η μέγιστη ταχύτητα του είναι τα 767.7 cm/s. Το δεύτερο στρώμα καταλαμβάνει τα βάθη από τα 44 m έως τα 394 m και έχει μέγιστη ταχύτητα -779.4 cm/s. Από τα 394 m έως τον πυθμένα, το τρίτο στρώμα έχει μέγιστη ταχύτητα 143 cm/s. Η ακτίνα αποδιαμόρφωσης Rossby για το δεύτερο βαροκλινικό τρόπο ταλάντωσης είναι 9.2 km. Το 2010, το επιφανειακό στρώμα φτάνει σε βάθος τα 67 m, με τη μέγιστη ταχύτητα του στρώματος να φτάνει τα 875.9 cm/s. Το δεύτερο στρώμα καταλαμβάνει βάθη από τα 67 m έως τα 600 m και έχει μέγιστη ταχύτητα -687 cm/s. Από τα 600 m έως τον πυθμένα, το τρίτο στρώμα εμφανίζει μέγιστη ταχύτητα στα 87 cm/s. Η ακτίνα αποδιαμόρφωσης Rossby για το δεύτερο βαροκλινικό τρόπο ταλάντωσης είναι 8.0 km. Το 2011, το επιφανειακό στρώμα φτάνει μέχρι τα 57 m βάθος και έχει μέγιστη ταχύτητα 1042 cm/s. Το δεύτερο στρώμα βρίσκεται από τα 57 m έως τα 490 m με μέγιστη ταχύτητα -742 cm/s, ενώ το τρίτο στρώμα έχει μέγιστη ταχύτητα 66 cm/s. Η ακτίνα αποδιαμόρφωσης Rossby του δεύτερου βαροκλινικού τρόπου υπολογίστηκε στα 9.8 km για το 2011.



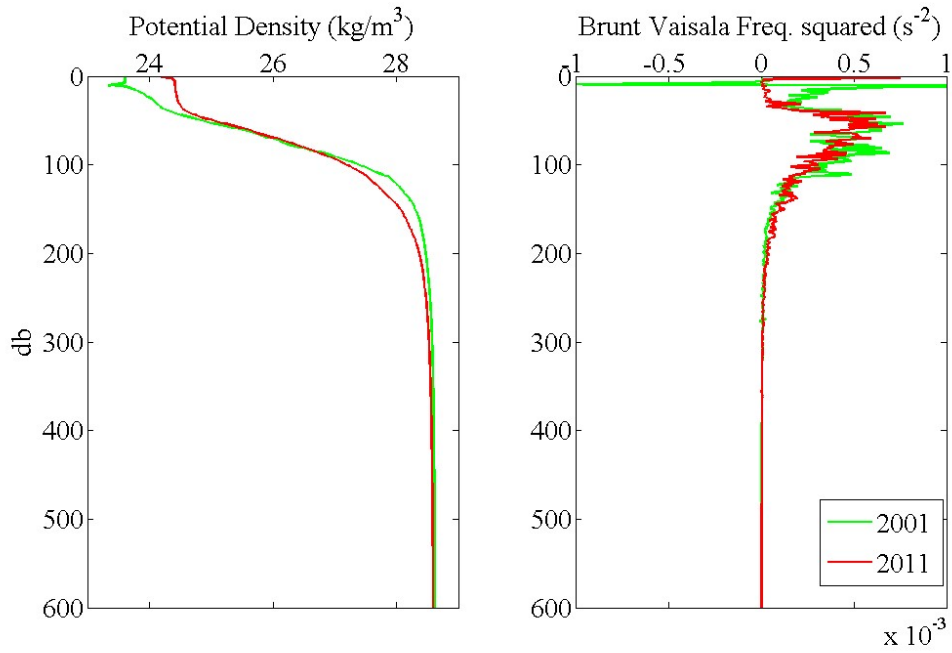
Εικόνα 3.44. Η μέση πυκνότητα των σταθμών (αριστερά) και η συχνότητα Brunt-Väisälä (δεξιά) τα έτη 2001, 2010 και 2011 στη Βόρεια περιοχή (Latitude : 25°N) της Ερυθράς Θάλασσας.



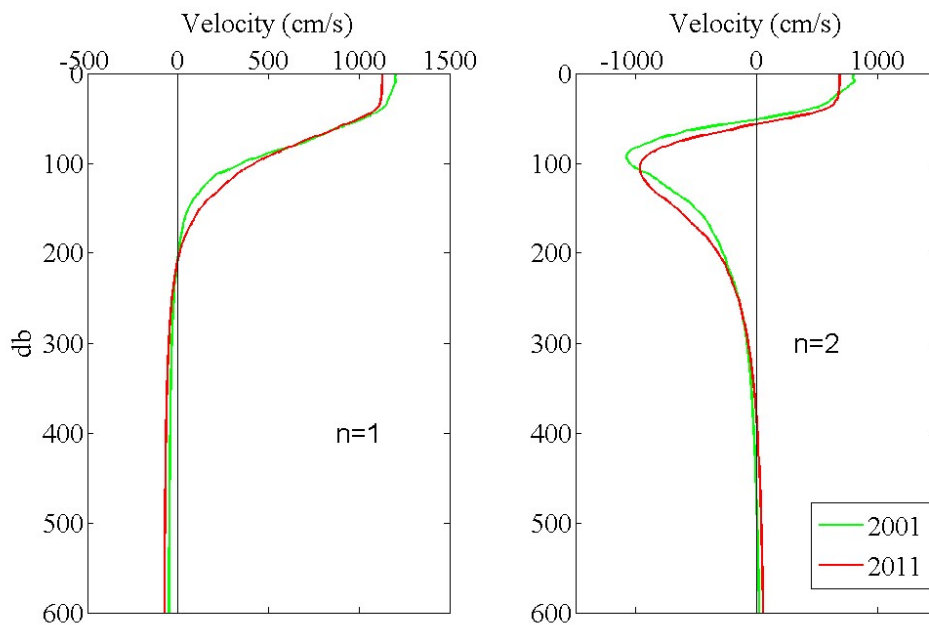
Εικόνα 3.45. Ο πρώτος και ο δεύτερος βαροκλιτικός τρόπος για τη Βόρεια περιοχή (Latitude : 25°N) της Ερυθράς Θάλασσας τα έτη 2001, 2010 και 2011.

Στις Εικόνες 3.46 και 3.47 παρουσιάζεται η πυκνότητα, η συχνότητα Brunt-Väisälä καθώς και οι δύο πρώτοι βαροκλιτικοί τρόποι ταλάντωσης για την Κεντρική περιοχή της Ερυθράς Θάλασσας (μέσο γεωγραφικό πλάτος 19.5°N). Για τον πρώτο βαροκλιτικό τρόπο ταλάντωσης, το 2001, το επιφανειακό στρώμα φτάνει στα 200 m σε βάθος και παρουσιάζει μέγιστη ταχύτητα 1200 cm/s. Το επόμενο/υποκείμενο στρώμα έχει μέγιστη ταχύτητα -56 cm/s. Η ακτίνα αποδιαμόρφωσης Rossby υπολογίστηκε στα 33.7 km. Αντίστοιχα, το 2011, το επιφανειακό στρώμα φτάνει σε βάθος 205 m, με μια μέγιστη ταχύτητα 1125 cm/s. Το δεύτερο στρώμα έχει μέγιστη ταχύτητα -80.8 cm/s. Η ακτίνα αποδιαμόρφωσης Rossby είναι 32.5 km.

Για το δεύτερο βαροκλιτικό τρόπο, το 2001, το επιφανειακό στρώμα φτάνει ως τα 51 m με μια μέγιστη ταχύτητα 808 cm/s. Το δεύτερο στρώμα εντοπίζεται ανάμεσα στα 51 m έως 488 m με μια μέγιστη ταχύτητα -1080 cm/s. Το τρίτο σε βάθος στρώμα εμφανίζει μέγιστη ταχύτητα 58 cm/s. Η ακτίνα αποδιαμόρφωσης Rossby υπολογίζεται στα 12.3 km. Το 2011, το επιφανειακό στρώμα φτάνει σε 55 m βάθος με μια μέγιστη ταχύτητα 685 cm/s. Το δεύτερο στρώμα εντοπίζεται ανάμεσα στα 55 m έως 388 m με μια μέγιστη ταχύτητα -970 cm/s. Το τρίτο στρώμα εμφανίζει μέγιστη ταχύτητα 77 cm/s. Η ακτίνα αποδιαμόρφωσης Rossby υπολογίζεται στα 13.0 km.

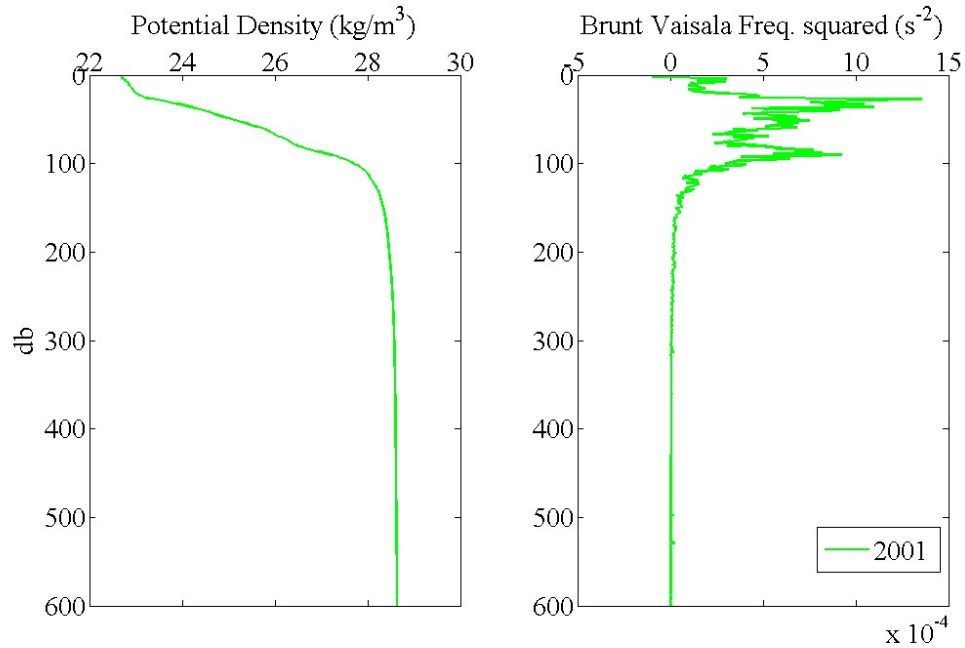


Εικόνα 3.46. Η μέση πυκνότητα των σταθμών (αριστερά) στην Κεντρική περιοχή (Latitude : 19.5°N) της Ερυθράς Θάλασσας και η συχνότητα Brunt–Väisälä (δεξιά) τα έτη 2001 και 2011.

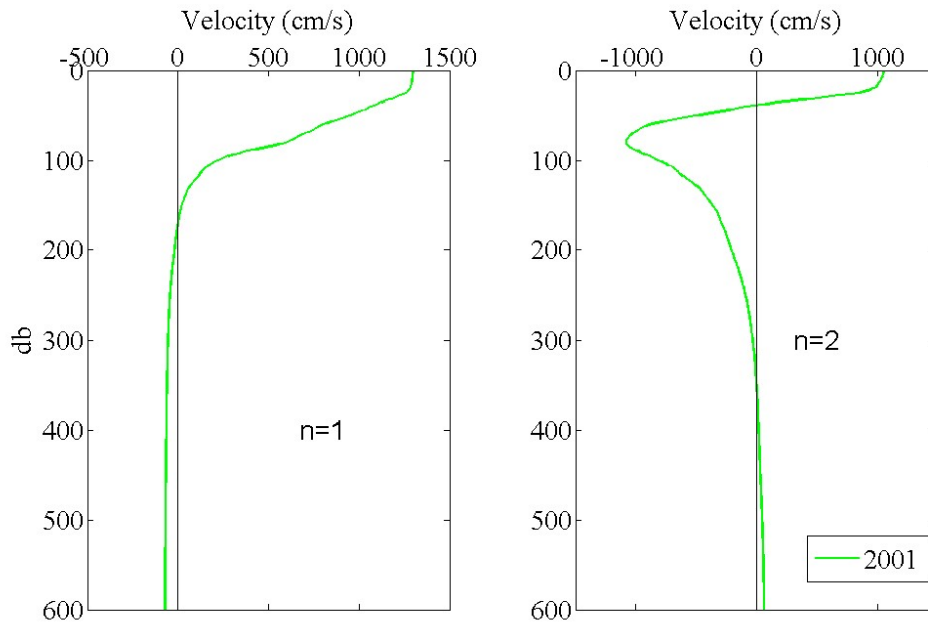


Εικόνα 3.47. Ο πρώτος, δεύτερος και τρίτος βαροκλιτικός τρόπος για την Κεντρική περιοχή (Latitude : 19.5°N) της Ερυθράς Θάλασσας τα έτη 2001 και 2011.

Για τη Νότια περιοχή της Ερυθράς Θάλασσας (μέσο γεωγραφικό πλάτος 15.5°N) έχουμε δεδομένα μόνο από το 2001, οπότε δεν μπορούμε να μελετήσουμε τις μεταβολές στη στρωμάτωση της περιοχής αυτής. Το επιφανειακό στρώμα του πρώτου βαροκλιτικού τρόπου φτάνει σε βάθος 170 m με μέγιστη ταχύτητα 1296 cm/s. Το δεύτερο στρώμα παρουσιάζει μια μέγιστη ταχύτητα -74.8 cm/s. Η ακτίνα αποδιαμόρφωσης Rossby υπολογίζεται στα 41.3 km. Για το δεύτερο βαροκλιτικό τρόπο ταλάντωσης, το επιφανειακό στρώμα φτάνει σε βάθος 38 m με μέγιστη ταχύτητα 1049 cm/s. Το δεύτερο στρώμα εντοπίζεται μεταξύ 38 m και 358 m, με μια μέγιστη ταχύτητα -1083 cm/s. Το τρίτο στρώμα έχει μέγιστη ταχύτητα 69.5 cm/s. Η ακτίνα αποδιαμόρφωσης Rossby υπολογίζεται στα 15.8 km.



Εικόνα 3.48. Η μέση πυκνότητα των σταθμών (αριστερά) στη Νότια περιοχή της Ερυθράς Θάλασσας και η συχνότητα Brunt-Väisälä (δεξιά) το έτος 2001.



Εικόνα 3.49. Ο πρώτος, δεύτερος και τρίτος βαροκλιτικός τρόπος για τη Νότια περιοχή της Ερυθράς Θάλασσας το 2001.

3.7 Ακτίνα αποδιαμόρφωσης Rossby και κυκλοφορία

Τα κύματα Rossby είναι βαρύνουσας σημασίας για όλες τις σύγχρονες θεωρίες μεγάλης κλίμακας. Είναι υπεύθυνα για τον καθορισμό του πιο θεμελιώδους χαρακτηριστικού της κυκλοφορίας μεγάλης κλίμακας: την προς τα δυτικά εντατικοποίηση της κυκλοφορίας. Στον Βόρειο Ατλαντικό, το φαινόμενο αυτό εμφανίζεται έντονα ως το Gulf Stream. Αντίστοιχα το φαινόμενο αυτό εμφανίζεται και σε άλλες μεγάλες λεκάνες του ωκεανού. Τα κύματα Rossby αποτελούν επίσης το δυναμικό μηχανισμό για την μεταβατική προσαρμογή (transient adjustment) του ωκεανού σε μεγάλης κλίμακας ατμοσφαιρικές επιδράσεις. Σε συνδυασμό με τα παράκτια παγιδευμένα κύματα κατά μήκος των ανατολικών ορίων των ωκεανών, τα κύματα Rossby αποτελούν ένα μηχανισμό για τη μετάδοση πληροφοριών από τους τροπικούς σε ενδιάμεσα και μεγαλύτερα γεωγραφικά πλάτη (Global Observations of Oceanic Rossby Waves).

Τα κύματα Rossby είναι η μεγάλης κλίμακας δυναμική απόκριση του ωκεανού στην επίδραση του ανέμου και της ροής πλευστότητας (θέρμανση και ψύξη). Μπορούν επίσης να παραχθούν από διαταραχές κατά μήκος των ανατολικών ορίων που συνδέονται με παράκτια παγιδευμένα κύματα, τα οποία προέρχονται από χαμηλότερα γεωγραφικά πλάτη. Η πρότυπη θεωρία για την ελεύθερη διάδοση των γραμμικών κυμάτων Rossby μπορεί να προκύψει από τη γραμμικοποίηση των unforced εξισώσεων μεγάλης κλίμακας για μια κατάσταση ισορροπίας. Αυτό δίνει μια κυματική εξίσωση για τους κάθετους κανονικούς τρόπους ταλάντωσης. Η δύναμη επαναφοράς είναι το λεγόμενο "β-effect", δηλαδή η

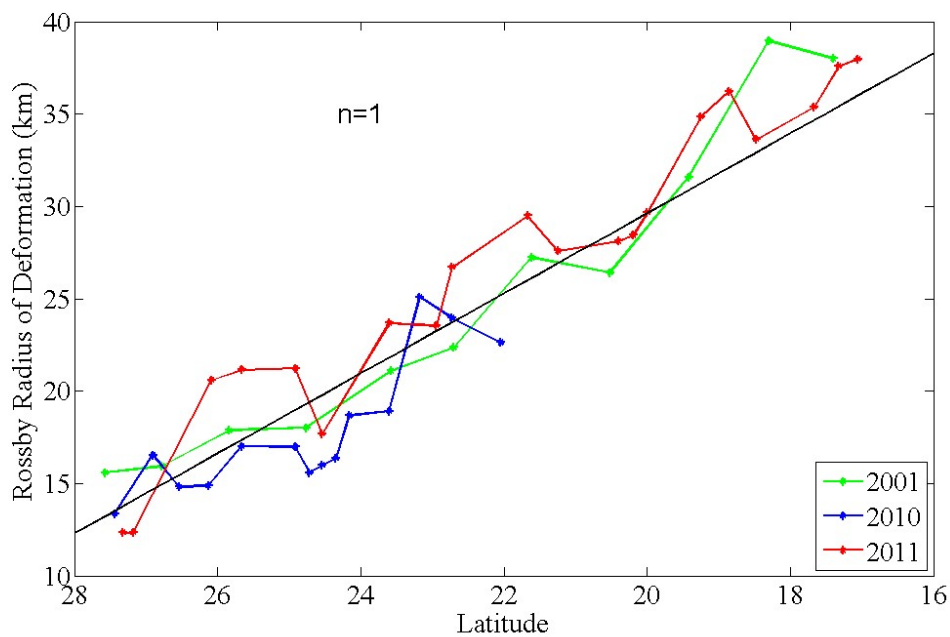
μεταβολή της Coriolis συναρτήσεως του γεωγραφικού πλάτους. Η καμπυλότητα της επιφάνειας της Γης είναι έτσι απαραίτητη για την ύπαρξη των κυμάτων Rossby.

Όπως περιγράφεται και στο Κεφάλαιο 2, η ακτίνα αποδιαμόρφωσης Rossby για τον 'n' βαροκλιτικό τρόπο ταλάντωσης υπολογίζεται από τη σχέση:

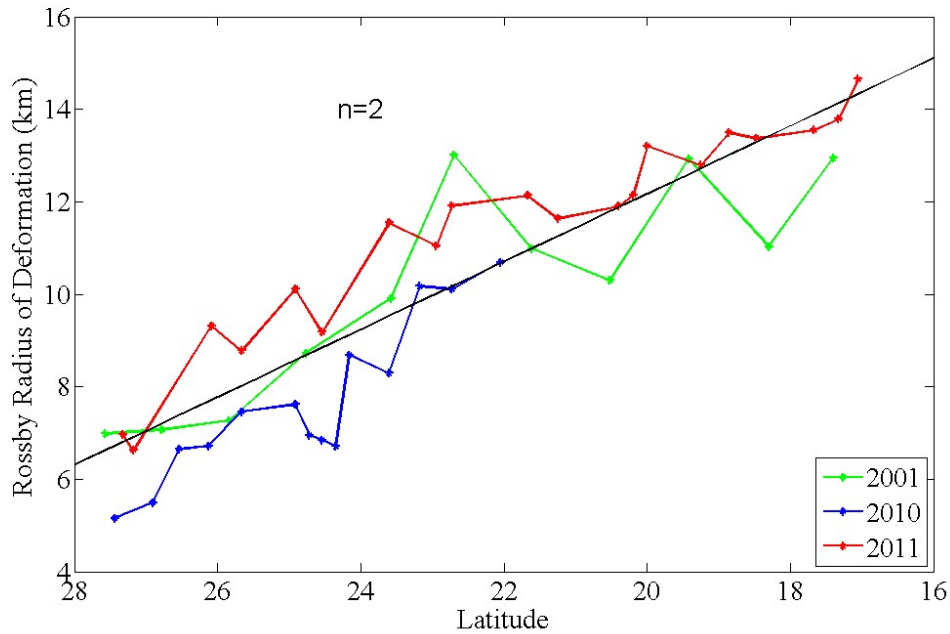
$$R_n = \frac{c_n}{|f(\phi)|}, \text{ όπου } c_n = \sqrt{gH_e} \quad (4.3)$$

όπου H_e το ισοδύναμο βάθος.

Στη συνέχεια υπολογίστηκε η ακτίνα αποδιαμόρφωσης Rossby για τους σταθμούς κατά μήκος του άξονα της λεκάνης και τα αποτελέσματα για κάθε αποστολή για το πρώτο, και δεύτερο βαροκλιτικό τρόπο ταλάντωσης παρουσιάζονται στα σχήματα 3.50 και 3.51. Εντυπωσιακό είναι πως οι τιμές της ακτίνας αποδιαμόρφωσης Rossby δεν μεταβάλλονται σημαντικά με τις εποχές, αλλά ακολουθούν την ίδια τάση κατά μήκος της λεκάνης. Ακολουθώντας τη διεύθυνση βορρά-νότου, η ακτίνα αποδιαμόρφωσης Rossby του πρώτου βαροκλιτικού τρόπου αυξάνει από την τιμή 12,3 km στις 27°N μέχρι την τιμή 37.9 km στην έξοδο της λεκάνης.



Εικόνα 3.50. Η ακτίνα αποδιαμόρφωσης Rossby για τον πρώτο βαροκλιτικό τρόπο κατά μήκος του άξονα της λεκάνης.



Εικόνα 3.51. Η ακτίνα αποδιαμόρφωσης Rossby για τον δεύτερο βαροκλιτικό τρόπο κατά μήκος του άξονα της λεκάνης.

Στη συνέχεια, με γραμμική παρεμβολή υπολογίστηκε η βέλτιστη ευθεία παρεμβολής στα σημεία από την κάθε αποστολή και υπολογίστηκε η κλίση της κάθε ευθείας. Για κάθε έναν βαροκλιτικό τρόπο ταλάντωσης υπολογίστηκε η μέση τιμή των κλίσεων και τα αποτελέσματα είναι:

Για τον πρώτο βαροκλιτικό τρόπο: $y = -2.1653x + 72.9433$ και

για τον δεύτερο βαροκλιτικό τρόπο: $y = -0.7327x + 26.8333$.

Για κάθε βαροκλιτικό τρόπο μπορούμε να υπολογίσουμε την ταχύτητα των κυμάτων Rossby, στο όριο των μακρών κυμάτων, από τη σχέση:

$$c_R = -\beta_0 R^2 \quad (4.7)$$

όπου $\beta_0 = 2 \left(\frac{\Omega}{R_E} \right) \cos \varphi$.

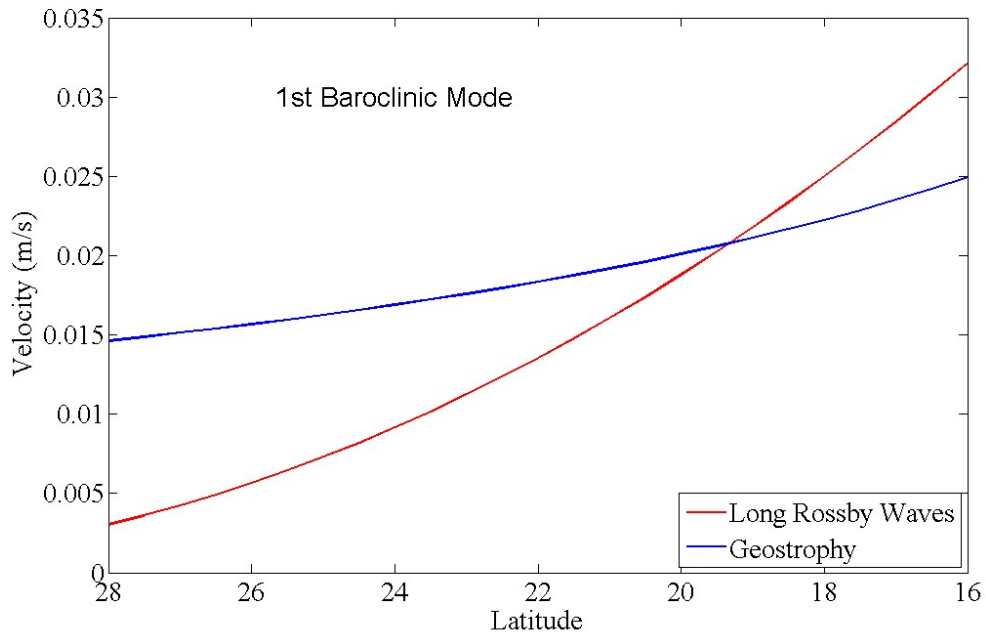
Μπορούμε επίσης, από τη σχέση:

$$u_g = -\frac{g}{f} \frac{\partial \eta}{\partial y} \quad (4.8)$$

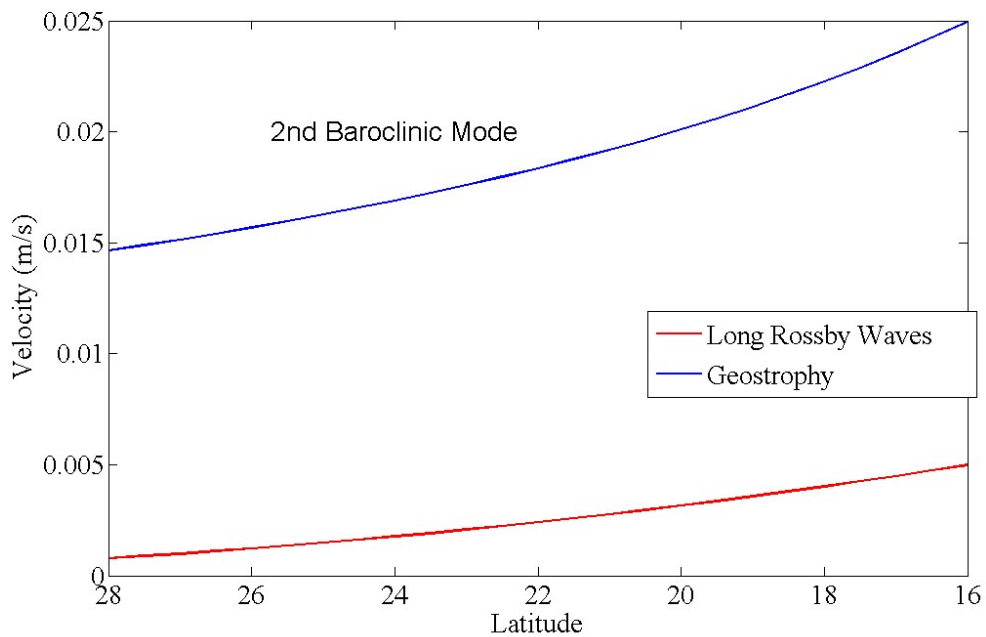
να υπολογίσουμε τη γεωστροφική ταχύτητα λόγω της κλίσης της επιφάνειας της θάλασσας, για την οποία χρησιμοποιήθηκε η τιμή:

$$\frac{\partial \eta}{\partial y} = 10^{-6} \text{ (Sofianos και Johns, 2001).}$$

Οι συγκρίσεις των αποτελεσμάτων για τις δύο ταχύτητες (διάδοση κυμάτων Rossby/γεωστροφική ταχύτητα) παρουσιάζονται στις Εικόνες 3.52 και 3.53:



Εικόνα 3.52. Σύγκριση της ταχύτητας των μακρών κυμάτων Rossby του πρώτου βαροκλινικού τρόπου με την ταχύτητα λόγω γεωστροφίας.



Εικόνα 3.53. Σύγκριση της ταχύτητας των μακρών κυμάτων Rossby του δεύτερου βαροκλινικού τρόπου με την ταχύτητα λόγω γεωστροφίας.

Στην Εικόνα 3.52 μπορούμε να παρατηρήσουμε πως από τη είσοδο της Ερυθράς Θάλασσας έως τις 19°N περίπου, η ταχύτητα των μακρών κυμάτων Rossby του πρώτου βαροκλινικού τρόπου, είναι μεγαλύτερη από τη γεωστροφική ταχύτητα. Το σημείο τομής των δύο καμπύλων αποτελεί ένα κρίσιμο γεωγραφικό πλάτος (θ_{cr}), βόρεια του οποίου, τα κύματα Rossby δεν μπορούν να μεταφέρουν τη διαταραχή στο δυτικό όριο, με συνέπεια η ενέργεια να συσσωρεύεται στην ανατολική πλευρά της Ερυθράς Θάλασσας. Νότια του κρίσιμου γεωγραφικού πλάτους, τα κύματα Rossby είναι ικανά να δώσουν ενίσχυση δυτικού ορίου. Έτσι, περιμένουμε μια προς τη δύση εντατικοποίηση της μεσημβρινής ροής νότια της θ_{cr} και ανατολική εντατικοποίηση βόρεια της θ_{cr} .

Οι Sofianos και Johns (2003) μέσω προσομοίωσης με τη χρήση αριθμητικού μοντέλου, υπολόγισαν το κρίσιμο αυτό γεωγραφικό πλάτος κοντά στις 16°N, σε ένα πείραμα το οποίο λάμβανε υπ' όψιν μόνο τη θερμοαλατική επίδραση, ενώ με την προσθήκη της επίδρασης του ανέμου το γεωγραφικό αυτό πλάτος παρουσίαζε μια μετακίνηση προς τα νότια (κοντά στις 14.5°N. Το αποτέλεσμα της παρούσας μελέτης δίνει μια θ_{cr} πολύ πιο βόρεια από τα αποτελέσματα των Sofianos και Johns (2003), οπότε μπορούμε να συμπεράνουμε πως η επίδραση της πλευστότητας είναι κυρίαρχη και όχι η επίδραση του ανέμου.

Κεφάλαιο 4. Συμπεράσματα

Σκοπός της παρούσας εργασίας ήταν η μελέτη της μεταβλητότητας των θερμοαλατικών χαρακτηριστικών και της στρωμάτωσης της Ερυθράς Θάλασσας. Η μελέτη αυτή πραγματοποιήθηκε με δεδομένα από ωκεανογραφικούς πλόες που πραγματοποιήθηκαν στην Ερυθρά Θάλασσα το 2001, το 2010 και το 2011 και επικεντρώθηκε σε μεγάλης κλίμακας φαινόμενα και τις υπερετήσιες μεταβολές τους.

Αρχικά, μελετήθηκε η κατανομή των μαζών νερού στη λεκάνη της Ερυθράς Θάλασσας κατά τη χειμερινή και κατά την θερινή περίοδο από τις τομές της θερμοκρασίας, της αλατότητας, της πυκνότητας και της συγκέντρωσης διαλυμένου οξυγόνου κατά μήκος του άξονα της λεκάνης. Κατά τη χειμερινή περίοδο, στην επιφάνεια της Ερυθράς Θάλασσας εμφανίζεται το GASW, το οποίο είναι μια μάζα νερού που εισέρχεται στην Ερυθρά Θάλασσα από τον Κόλπο του Aden. Κάτω από το GASW, εμφανίζεται το RSOW, το οποίο αποτελεί την εξερχόμενη μάζα νερού από την Ερυθρά Θάλασσα προς τον Ινδικό Ωκεανό. Κατά την καλοκαιρινή περίοδο, είναι εμφανής η εισροή του GAIW, ως μια πιο ψυχρή και μικρότερης αλατότητας μάζα νερού, η οποία εισέρχεται στην Ερυθρά Θάλασσα ανάμεσα στις εξερχόμενες RSSW και RSOW. Επίσης, και τις δύο εποχές, από ένα βάθος περίπου 300 m έως το πυθμένα, η Ερυθρά Θάλασσα γεμίζει με το RSDW, το οποίο είναι μία πολύ ομοιογενής μάζα νερού ως προς τη θερμοκρασία και την αλατότητα. Η συγκέντρωση του οξυγόνου παρουσιάζει ένα ελάχιστο στα 500 m, ενώ στα πιο βαθιά στρώματα παίρνει υψηλότερες τιμές. Η σχετικά υψηλή τιμή στη συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου που παρατηρείται στα βαθιά νερά του βορειότερου άκρου της Ερυθράς Θάλασσας είναι χαρακτηριστικό των “νέων” βαθιών νερών που δημιουργούνται στους κόλπους του Suez και της Aqaba. Τέλος, από την κατανομή της πυκνότητας έγινε η ταυτοποίηση κυκλώνων και αντικυκλώνων στην επιφανειακή κυκλοφορία, με σημαντικότερο τον αντικυκλώνα στις 23 °N, ο οποίος αποτελεί μόνιμο χαρακτηριστικό της κυκλοφορίας και η επίδρασή του φτάνει σε βάθος τα 300 m.

Στη συνέχεια η μελέτη οργανώθηκε σύμφωνα με τις μάζες νερού που εμφανίζονται στην Ερυθρά Θάλασσα. Μελετήθηκαν τα επιφανειακά νερά, τα οποία παρουσιάζουν αναμενόμενες μεταβολές κατά μήκος της Ερυθράς Θάλασσας, οι οποίες εξηγούνται από το πεδίο του ανέμου και την αλληλεπίδραση ατμόσφαιρας ωκεανού. Καθώς επίσης και από την επίδραση του εισερχόμενου GAIW. Η θερμοκρασία των επιφανειακών νερών, κατά τη θερινή περίοδο, αρχικά αυξάνει προς το νότο, από τους 28°C σε ένα μέγιστο στους 34°C, κοντά στις 17°N, ενώ στη συνέχεια, από αυτό το γεωγραφικό πλάτος και προς το νότο, παρατηρείται μια μείωση της θερμοκρασίας, με την επιφανειακή θερμοκρασία στην έξοδο της λεκάνης να φτάνει περίπου τους 31°C. Η επιφανειακή η αλατότητα μειώνεται από τα 40.5 psu στο βορρά, στα 37.5 psu στην έξοδο της λεκάνης. Το χειμώνα, ακολουθώντας τη διεύθυνση βορρά-νότου η θερμοκρασία αυξάνει από 24°C σε 26.5°C κοντά στις 22°N. Τα διαθέσιμα δεδομένα από την αποστολή του 2010 δεν αρκούν για να έχουμε εικόνα νοτιότερα από τις 22°N. Η επιφανειακή αλατότητα παρουσιάζει πτώση προς τα νότια, από τα 40 psu στο βόρειο άκρο της λεκάνης στα 38.5 psu στις 22°N.

Στη συνέχεια μελετήθηκε η εισροή του GAIW, το οποίο GAIW εκτείνεται από το νοτιότερο σταθμό της έρευνας (στις 17°N) μέχρι τις 19°N, μέσω ενός καλά καθορισμένου υποεπιφανειακού ρεύματος που είναι εντοπισμένο στην ανατολική πλευρά της Ερυθράς Θάλασσας. Χαρακτηρίζεται από χαμηλές τιμές θερμοκρασίας (20-23°C), χαμηλές τιμές

αλατότητας (36.5-38 psu) και μια συγκέντρωση οξυγόνου 1.2-1.7 ml/lit. Εκτείνεται σε βάθη ~35-120m με ένα εύρος δυνητικής πυκνότητας (σ_t) ~25-27 kg/m³. Η προώθηση του GAIW φαίνεται να διακλαδίζεται κοντά στις 19°N, με τον ένα κλάδο να εκτρέπεται νοτιοδυτικά, καθώς παρασύρεται από την αντικυκλωνική δομή που εμφανίζεται στο συγκεκριμένο γεωγραφικό πλάτος. Η επέκταση του GAIW βορειότερα από τις 19°N φαίνεται από τα σαφώς καθορισμένα ελάχιστα της αλατότητας. Ωστόσο, έχει μειωθεί σε ένα πολύ λεπτό στρώμα και τα χαρακτηριστικά της θερμοκρασίας και της αλατότητας έχουν αλλάξει από την ισχυρή ανάμιξη με τα περιβάλλοντα νερά. Το βορειότερο σημείο στο οποίο εντοπίζονται ίχνη του GAIW βρίσκεται σε γεωγραφικό πλάτος 24°N. Η ταχύτητα με την οποία εισέρχεται και κινείται το GAIW στην Ερυθρά Θάλασσα, υπολογίστηκε ίση με 0.12 m/s.

Από τη μελέτη των βαθιών νερών προκύπτει πως για την χρονική περίοδο από το 2001 έως το 2011, και για τις μέσες τιμές από τα 300m έως το μέγιστο βάθος, η θερμοκρασία αυξάνει με ένα ρυθμό $5.4 \cdot 10^{-3}$ °C/yr, η αλατότητα μειώνεται με ένα ρυθμό $-2.1 \cdot 10^{-3}$ psu/yr και η πυκνότητα μειώνεται με ρυθμό $-2.7 \cdot 10^{-3}$ kg/m³·yr. Οι μέσες τιμές στη συγκέντρωση του οξυγόνου παρουσιάζουν μια χωρική μεταβολή που δείχνει πως η δημιουργία των βαθιών νερών δεν είναι συνεχής, αλλά συμβαίνει μόνο κατά τη διάρκεια χειμώνων που παρουσιάζουν εντονότερη ψύξη. Η ταχύτητα με την οποία κινούνται τα βαθιά νερά στο βαθύ κύτταρο κυκλοφορίας είναι ίση με $3 \cdot 10^{-3}$ m/s, τιμή που μας οδηγεί στον υπολογισμό του χρόνου παραμονής των βαθιών νερών στα 40 χρόνια.

Στο δεύτερο μέρος της εργασίας, μελετήθηκε η στρωμάτωση της λεκάνης της Ερυθράς Θάλασσας, μέσω της ανάλυσης σε κανονικούς τρόπους ταλάντωσης και τη μελέτη των μεταβολών αυτών με τα χρόνια. Δεν παρατηρήθηκε κάποια ιδιαίτερη μεταβολή στη δομή του πρώτου και του δεύτερου βαροκλινικού τρόπου ταλάντωσης μεταξύ των ετών της μελέτης μας. Στη συνέχεια, έγινε υπολογισμός της ακτίνας αποδιαμόρφωσης Rossby του πρώτου βαροκλινικού τρόπου, για την οποία προέκυψε πως ανεξάρτητα της εποχής, ακολουθώντας τη διεύθυνση βορρά-νότου αυξάνει από 12 km στις 27°N μέχρι 38 km στην έξοδο της λεκάνης. Τέλος, υπολογίστηκε η γεωστροφική ταχύτητα, και ύστερα από σύγκριση με την ταχύτητα των μακρών κυμάτων Rossby, βρέθηκε το κρίσιμο γεωγραφικό πλάτος (θ_{cr}), βόρεια του οποίου τα κύματα Rossby δεν μπορούν να μεταφέρουν τη διαταραχή στο δυτικό όριο, με συνέπεια η ενέργεια να συσσωρεύεται στην ανατολική πλευρά της Ερυθράς Θάλασσας. Το κρίσιμο αυτό γεωγραφικό πλάτος υπολογίστηκε ίσο με 19°N. Νότια των 19°N τα κύματα Rossby είναι ικανά να δώσουν ενίσχυση δυτικού ορίου. Έτσι, περιμένουμε μια προς τη δύση εντατικοποίηση της μεσημβρινής ροής νότια της θ_{cr} και ανατολική εντατικοποίηση βόρεια της θ_{cr} .

Βιβλιογραφία

Ahmad F, Sultan SAR (1987), On the heat terms in the central region of the Red Sea. *Deep Sea Res* 34:1757-1760.

Alraddadi TM (2013), Temporal changes in the Red Sea circulation and associated water masses. Ph.D. thesis, University of Southampton, United Kingdom.

Anati DA (1976), Balance and transports in the Red Sea and the Gulf of Elat (Aqaba). *Israel J Earth Sci* 25:104-110.

Armi L, Farmer DM (1988), The flow of Atlantic water through the Strait of Gibraltar. *Prog Oceanogr* 21:1-105.

Beal LM, Ffiofield A, Gordon AL (2000), Spreading of Red Sea overflow waters in the Indian Ocean. *Geophysical Research*, 105, 8549-8564.

Bethoux JP (1988), Red Sea geochemical budgets and exchanges with the Indian Ocean. *Marine Chemistry* 24:83-92.

Biton E, Gildor H (2011), The general circulation of the Gulf of Aqaba (Gulf of Eliat) revisited: the interplay between the exchange flow through the Straits of Tiran and surface fluxes. *J Geophys Res* 116:C08020. doi: 10.1029/2010JC006860.

Bower AS, Hunt HD, Price JF (2000), Character and dynamics of the Red Sea and Persian Gulf outflows. *Geophysical Research*, 105C, 6387-6414.

Bower AS, Farrar JT (2015), Chapter 19: Air-Sea Interaction and Horizontal Circulation in the Red Sea. In: *The Red Sea. The Formation, Morphology, and Environment of a Young Ocean Basin*. Rasul N, Stuart I (eds). Springer Publishing, Germany.

Buchan A (1895), Report on oceanic circulation based on the observation made on board H.M.S. "Challenger" and other observations report on scientific results of the voyage of H.M.S. "Challenger".

Candela J (2001), Mediterranean Water and Global Circulation. In: *SIEDLER G, CHURCH J, GOULD J (eds) Ocean Circulation and Climate-Observing and Modelling the Global Ocean*. San Diego: Academic Press.

Cember RP (1988), On the sources, formation, and circulation of Red Sea Deep Water. *J Geophys Res* 93:8175-8191.

Chelton DB, de Szoeke RA., Schlax MG, El Naggar K, Siwertz N (1998), Geographical variability of the first baroclinic Rossby radius of deformation, *J. Phys. Oceanogr.*, 28, 433-459.

Churchill JH, Bower AS, McCorkle DC, Abualnaja Y (2014), The transport of nutrient-rich Indian Ocean water through the Red Sea and into coastal reef systems, *Journal of Marine Research*, 72, 165-181.

Clifford M, Horton C, Schmitz J, Kantha LH (1997), An oceanographic nowcast/forecast system for the Red Sea. *J Geophys Res* 102:25101-25122.

Edwards AJ, Head SM (1987), *Key Environments: Red Sea*, Oxford, Pergamon Press.

Eshel G, Cane MA, Blumethal MB (1994), Modes of subsurface, intermediate, and deep water renewal in the Red Sea. *J Geophys Res* 99:15941-15952.

Farmer DM, Armi L (1988), The flow of Mediterranean water through the Strait of Gibraltar. *Prog Oceanogr* 21:1-105.

Gill AE, (1982), *Atmospheric-Ocean Dynamics*, International Geophysics Series, Vol.30.

Hecht A, Anati D (1983), A description of the Straits of Tiran in winter 1978. *Israel J Earth Sci* 32:149-164.

Jean-Baptiste P, Fourre E, Metzl N, TERNON JF, Poisson A (2004), Red Sea Deep Waters circulation and ventilation rate deduced from ^3He and ^{14}C tracer fields. *Journal of Marine Systems*, 48, 37-50.

Johns WE, Sofianos SS (2012), Atmospherically forced exchange through the Bab el Mandeb Strait. *J Phys Oceanogr* 42:1143-1157.

Klinker J, Reiss Z, Kropach C, Levanon I, Harpaz H, Halicz E, Assaf G (1976), Observations on the circulation pattern in the Gulf of Elat (Aqaba), Red Sea. *Israel J Earth Sci* 25:85-103.

Kundu PK, Cohen IM, Dowling DR (2012), *Fluid Mechanics Fifth Edition*, Elsevier Inc.

Kuntz R (1985), Bestimmung der Tiefenwasserzirkulation des Roten Meeres anhand einer Boxmodellauswertung von Tritium-, ^3He - und Dalinitatsdaten. Ph.D. thesis, Ruprecht Karls University, Heidelberg, 76pp.

Maillard C (1974), Eaux intermediaires et formation d'eau profonde en Mer Rouge. *L'oceanographie physique de la Mer Rouge. Cent. Natl. pour l'Exploitation des Oceans, Paris*, pp 105-133.

Maillard C, Soliman G (1986), Hydrography of the Red Sea and exchanges with the Indian Ocean in summer. *Oceanol Acta* 9:249-269.

Manasrah RS, Badran M, Lass HU, Fennel W (2004), Circulation and the winter deep-water formation in the northern Red Sea. *Oceanologia* 46:5-23.

Manins PC (1973), A filling box model of the deep circulation of the Red Sea. *Memoires Societe Royale des Sciences de Liege*, 6, 153-166.

Morcós SA (1970), Physical and chemical oceanography of the Red Sea. *Oceanogr Mar Biol Ann Rev* 8:73-202.

Morcós SA, Soliman GF (1974), Circulation and deep water formation in the northern Red Sea in winter (based on R/V Mabahiss sections, January-February, 1935). *L'oceanographie physique de la Mer Rouge. Cent. Natl. pour l'Exploitation des Oceans, Paris*, pp 91-103.

Murray S, Hecht A, Babcock A (1984), On the mean flow in the Tiran Strait in winter. *J Mar Res* 42:265-284.

Murray SP, Johns W (1997), Direct observations of seasonal exchange through the Bab el Mandeb Strait. *Geophys Res Lett* 24:2557-2560.

Neumann J (1952), Evaporation from the Red Sea. *Israel Explor J* 2:153-162.

Neumann AC, McGill DA (1962), Circulation of the Red Sea in early summer. *Deep Sea Res* 8:223-235.

Papadopoulos VP, Zhan P, Sofianos SS, Raitzos DE, Qurban M, Abualnaja Y, Bower A, Kontoyiannis H, Pavlidou A, Mohamed Asharaf TT, Zarokanellos N, Hoteit I (2015), Factors governing the deep ventilation of the Red Sea. *J. Geophys. Res. Oceans*, 120, 7493-7505, doi: 10.1002/2015JC010996.

Patzert WC (1972), Seasonal reversal in Red Sea circulation. *L'oceanographie physique de la Mer Rouge, Symposium de l'Association Internationale des Sciences Physiques de l'ocean*. Paris: CNEXO, 55-85.

Patzert WC (1974a), Wind-induced reversal in Red Sea circulation. *Deep Sea Res* 21:109-121.

Patzert WC (1974b), Volume and heat transports between the Red Sea and Gulf of Aden, notes on the Red Sea heat budget. *L'oceanographie physique de la Mer Rouge*. CNEXO, Paris, pp 191-201.

Pedgley DE (1974), An outline of the weather and climate of the Red Sea. In: *L' Oceanographie Physique de la Mer Rouge*, Cent. Natl. pour l' Exploitation des Oceans, Paris: 9-27.

Phillips OM (1966), On turbulent convection currents and the circulation of the Red Sea. *Deep Sea Res* 13:1149-1160.

Plaehn O, Baschek B, Badewien T, Walter M, Rhein M (2002), Important of the Gulf of Aqaba for the formation of bottom water in the Red Sea. *Journal of Geophysical Research*, 107(C8), doi: 10.1029/2000JC000342.

Poisson A, Morcos S, Souvermezoglou E, Papaud A, Ivanoff A (1984), Some aspects of biogeochemical cycles in the Red Sea with special references to new observations made in summer 1982. *Deep-Sea Res.*, 31, 707-718.

Pratt LJ, Johns W, Murray SM, Katsumata K (1999), Hydraulic interpretation of direct velocity measurements in the Bab al Mandab. *J Phys Oceanogr* 29:2769-2784.

Pratt LJ, Deese HE, Murray SP, Johns W (2000), Continuous dynamical modes in straits having arbitrary cross sections, with applications to the Bab al Mandab. *J Phys Oceanogr* 30(10):2515-2534.

Privett DW (1959), Monthly charts of evaporation from the Indian Ocean (including the Red Sea and the Persian Gulf). *Q J Royal Meteorol Soc* 85:424-428.

Quadfasel D, Baunder H (1993), Gyre-scale circulation cells in the Red Sea. *Oceanol Acta* 16:221-229.

Quadfasel D (2001), Red Sea Circulation. In: STEELE JA, THORPE SA, TUREKIAN KK (eds). *Encyclopedia of Ocean Sciences*.

Robinson MK (1974), Atlas of monthly mean sea surface and subsurface temperature and subsurface temperature and the depth of the top of the Thermocline. *L'oceanographie physique de la Mer Rouge, Symposium de l'Association Internationale des Sciences Physiques de l'ocean*. Paris: CNEXO, 29-54.

- Saenko** OA (2006), Influence of global warming on baroclinic Rossby radius in the ocean: a model intercomparison, *J. Climate*, 19, 1354–1360.
- Sewell** RBS (1934), The John Murray expedition to the Arabian Sea. *Nature* 133:86-89.
- Shapiro** GI, Meschanov SL (1991), Distribution and spreading of Red Sea water and salt lens formation in the northwest Indian Ocean. *Deep-Sea Research* 38:23-34.
- Siedler** G (1969), General circulation of water masses in the Red Sea. In: DEGENS E, ROSS DA (eds), *Hot Brines and Recent Heavy Metal Deposits in the Red Sea*. New York: Springer-Verlag.
- Sloyan** BM, Rintoul SR (2000), Estimates of area-averaged diapycnal fluxes from basin-scale budgets. *J Phys Oceanogr* 30:2320-2341.
- Smeed** D (1997), Seasonal variation of the flow in the strait of Bab el Mandeb. *Oceanol Acta* 20:773-781.
- Smeed** DA (2000), Hydraulic control of three-layer exchange flows: application to the Bab el Mandeb. *J Phys Oceanogr* 93(C12):15467-15472.
- Smeed** DA (2004), Exchange through the Bab el Mandeb. *Deep Sea Res Part II* 51: 455-474.
- Smith** WHF, Sandwell DT (1997), Global sea floor topography from satellite altimetry and ship depth soundings. *Science* 277:1956-1962.
- Sofianos** SS (2000), Circulation and water mass formation in the Red Sea, and the exchange with the Indian Ocean. Ph.D. thesis, University of Miami, Miami, Florida.
- Sofianos** SS, Johns WE (2001), Wind induced sea level variability in the Red Sea. *Geophys. Res. Lett.*, vol. 28, no. 16, p. 3175-3178.
- Sofianos** SS, Johns WE, Murray SP (2002), Heat and freshwater budgets in the Red Sea from direct observations at Bab el Mandeb. *Deep Sea Res Part II* 49:1323-1340.
- Sofianos** SS, Johns WE (2002), An Oceanic General Circulation Model (OGCM) investigation of the Red Sea circulation: 1. Exchange between the Red Sea and the Indian Ocean. *J Geophys Res* 107(C11): 3196. doi:10.1029/2001JC001184.
- Sofianos** SS, Johns WE (2003), An Oceanic General Circulation Model (OGCM) investigation of the Red Sea circulation: 2. Three dimensional circulation in the Red Sea. *J Geophys Res* 108(C3): 3066. doi: 10.1029/2001JC001185.
- Sofianos** SS, Johns WE (2007), Observations of the summer Red Sea circulation. *J Geophys Res* 112:C06025. doi: 10.1029/2006JC003886.
- Sofianos** SS, Johns WE (2015), Water Mass Formation, Overturning Circulation, and the Exchange of the Red Sea with the Adjacent Basins. N.M.A. Rasul and I.C.F. Stewart (eds.), *The Red Sea*, Springer Earth System Sciences, doi: 10.1007/978-3-662-45201-1_20, © Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Souvermezoglou** E, Metzl N, Poisson A (1989), Red Sea budgets of salinity, nutrients, and carbon calculated in the strait of Bab el Mandeb during the summer and winter season. *J. Mar. Res.*, 47, 441-456.

Thompson EF (1939), Chemical and physical investigations. The exchange of water between the Red Sea and the Gulf of Aden over the "Sill". John Murray expedition 1933-34, vol 2, Scientific Reports, pp 105.

Tragou E, Garrett C, Outerbridge R, Gilman G (1999), The heat and freshwater budgets of the Red Sea. *J Phys Oceanogr* 29:2504-2522.

Valentine HR, Lutjeharms JRE, Brundrit GB (1993), The water masses and volumetry of southern Agulhas current region. *Deep-Sea Research*, 40, 1285-1305.

Vercelli E (1927), Recherche di oceanografia fisica eseguite della R. N. AMMIRAGLIO MAGNAGHI (1923-24), IV, La temperature e la salinita. *Ann Idrograf* 11:1-66.

Vercelli E (1931a), Nuove ricerche sulli correnti marine nel Mar Rosso. *Annali Idrografici* 12:1-74.

Vercelli E (1931b), Le esplorazioni talassografiche nel Mar Rosso. *Atti del Primo Congresso di Studi Coloniali*, Firenze, pp 23.

Woelk S, Quadfasel D (1996), Renewal of deep water in the Red Sea during 1982-1987. *J Geophys Res* 101:18155-18165.

Wyrtki K (1971), *Oceanographic Atlas of the International Indian Ocean Expedition*, Washington, DC, National Science Foundation.

Wyrtki K (1974), On the deep circulation of the Red Sea. *L'oceanographie physique de la Mer Rouge. Cent Natl pour l'Exploitation des Oceans*, Paris, pp 135-163.

Yao F, Hoteit I, Pratt LJ, Bower AS, Zhai P, Kohl A, Gopalakrishnan G (2014a), Seasonal overturning circulation in the Red Sea: Model validation and summer circulation, *J. Geophys. Res. Oceans*, 119, 2238-2262, doi: 10.1002/2013JC009004.

Yao F, Hoteit I, Pratt LJ, Bower AS, Kohl A, Gopalakrishnan G, Rivas D (2014b), Seasonal overturning circulation in the Red Sea: Winter circulation, *J. Geophys. Res. Oceans*, 119, 2263-2289, doi: 10.1002/2013JC009331.

Yegorov NI (1950), Calculation of the heat balance of the Red Sea. *Meteorologiya i Hidrologiya* 3:49-56.

