

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Η Αλατότητα του Θαλασσινού Νερού

3.1. Η Αλατότητα και η Ηλεκτρική Αγωγιμότητα Νερού

Το θαλασσινό νερό είναι διάλυμα που αποτελείται από 96,5% κατά βάρος νερό και 3,5% διαλυμένες στερεές ουσίες (οργανικά και ανόργανα άλατα και διαλυμένα αέρια). Τα ανόργανα συστατικά αναφέρονται συνολικά με τον όρο «άλατα». Πρόκειται για ιόντα στοιχείων που διαλύθηκαν προερχόμενα από το στερεό φλοιό της Γης μέσω της διαδικασίας της διάβρωσης και της χημικής αποσάθρωσης. Ως αλατότητα (S) αναφέρεται στη συνολική μάζα των διαλυμένων ανόργανων ουσιών ανά μονάδα μάζας θαλασσινού νερού. Εκφράζουμε την αλατότητα σε μέρη ανά εκατομμύριο (ppt), (‰), psu, ή ως αδιάστατη, καθώς διαιρούμε μάζα προς μάζα.

Αλατότητα 35 σημαίνει ότι υπάρχουν 35 g διαλυμένων ανόργανων ουσιών ανά 1 kg νερού. Η μέση αλατότητα του θαλασσινού νερού είναι $S = 35 \text{ ppt}$ (35 μέρη αλάτων σε χίλια μέρη νερό).

Η αλατότητα επηρεάζει τη πυκνότητα του νερού, τη συμπιεστότητα, το σημείο πήξης και το σημείο μέγιστης πυκνότητας, και άρα η αλατότητα θα πρέπει να προσδιορίζεται σε κάθε μέτρηση που γίνεται στη θάλασσα.

Κατά τον Forchhammer (1902), ως αλατότητα ορίζεται η συνολική ποσότητα διαλυμένων αλάτων σε 1 κιλό νερού, όταν όλα τα ανθρακικά ιόντα μετατραπούν σε οξειδία, όλα τα ιόντα βρωμίου και ιωδίου έχουν αντικατασταθεί από ιόντα χλωρίου και το οργανικό υλικό έχει πλήρως οξειδωθεί.

Η συγκέντρωση αλάτων στο νερό μεταβάλλεται χωρικά και χρονικά. Ωστόσο, **η αναλογία των ιόντων στο θαλασσινό νερό παραμένει σταθερή στο χώρο και το χρόνο (Dittmar constancy of composition)**, γεγονός που καταδεικνύει τη συνεχή και πολύ αποτελεσματική μείξη που λαμβάνει χώρα στο εσωτερικό των ωκεανών.

Ο Πίνακας 3.1 παρουσιάζει την ιοντική σύσταση του θαλασσινού νερού.

Πίνακας 3.1. Ιοντική (κατά βάρος) σύσταση θαλασσινού νερού.

Ιόν	Σύμβολο	Ποσοστό συμμετοχής στο θαλασσινό νερό
Χλώριο	Cl ⁻	55,04
Νάτριο	Na ⁺	30,62
Θειική ρίζα	SO ₄ ²⁻	7,68
Μαγνήσιο	Mg ⁺⁺	3,69
Ασβέστιο	Ca ⁺⁺	1,15
Κάλιο	K ⁺	1,10
Ανθρακικά ιόντα	HCO ₃ ⁻	0,41

Η παρατήρηση της σταθερής αναλογίας των παραπάνω στοιχείων, σημαίνει πρακτικά ότι η μέτρηση ενός μόνο συστατικού είναι σε θέση να μας δώσει δεδομένα για τη περιεκτικότητα και των υπόλοιπων των συστατικών του θαλασσινού νερού. Ταυτόχρονα όμως, υπάρχουν σημαντικές μεταβολές στην ολική συγκέντρωση των διαλυμένων στο θαλασσινό νερό αλάτων από περιοχή σε περιοχή και μεταξύ διαφορετικών βαθών στην ίδια θέση. Αυτό σημαίνει ότι υπάρχουν στον ωκεανό διεργασίες που βοηθούν τη συγκέντρωση ή την αραίωση αλάτων σε συγκεκριμένες περιοχές.

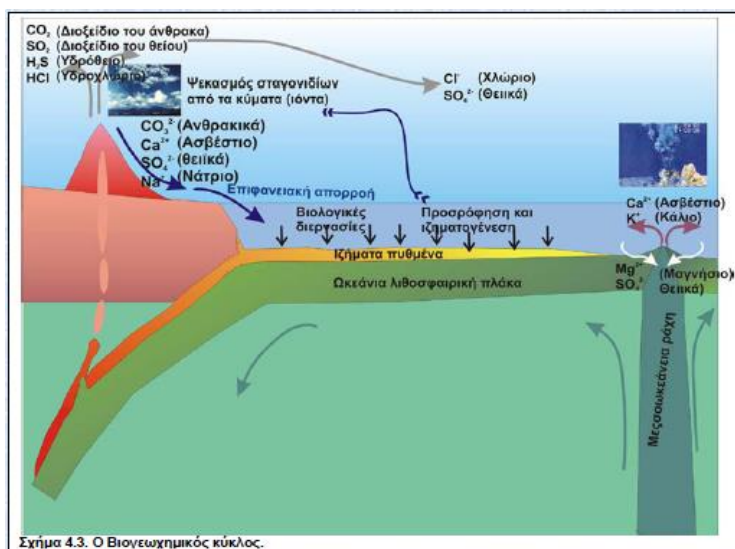
Παράλληλα, η σταθερή αναλογία αλάτων εκφράζει το γεγονός ότι η αλατότητα θεωρείται **συντηρητική παράμετρος (conservative parameter)**. Αυτό σημαίνει ότι η συγκέντρωσή της δεν μεταβάλλεται λόγω βιογεωχημικών διεργασιών, παρά μόνο μέσω φυσικών διεργασιών, όπως:

- Μεταφορά νερού (advection)
- Μείξη νερού (diffusion, dispersion)
- Εξάτμιση (Evaporation)
- Βροχόπτωση (Precipitation)
- Στερεοποίηση νερού (Freezing)

Η εισροή αλάτων στον ωκεανό οφείλεται στην διάβρωση και την αποσάθρωση των ηπείρων, δηλ. σε μια πολύ αργή διεργασία (της τάξης των 100.000 ετών) σε σχέση με το ρυθμό ανάμειξης του ωκεάνιου νερού (της τάξης των 1.000 ετών). Συνεπώς, η ποσότητα του άλατος στους ωκεανούς θεωρείται σταθερή, και είναι της τάξης των 5×10^{19} kg. Οι ποταμοί μεταφέρουν άλατα της τάξης των 3×10^{12} kg/yr. Για να προσδιορίσουμε την ετήσια

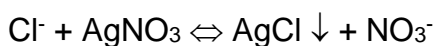
αύξηση αλάτων στον ωκεανό παίρνουμε τους λόγους μέσης αλατότητας προς τα συνολικά άλατα στον ωκεανό ο οποίος είναι ίσος με τον λόγο της προσθήκης της ετήσιας αύξησης ΔS προς την συνολική μάζα αλάτων αυξημένη κατά την ετήσια εισροή αλάτων. Λύνοντας ως προς ΔS βρίσκουμε την ετήσια μεταβολή στην αλατότητα του ωεάνιου νερού, η οποία είναι αμελητέα (μόλις 21×10^{-7}).

$$\frac{35}{5 \times 10^{19}} = \frac{(35 + \Delta S)}{5 \times 10^{19} + 3 \times 10^{12}} \Rightarrow \Delta S = 21 \times 10^{-7} \quad (3.1)$$



Σχήμα 3.1. Φυσικές και βιογεωχημικές διεργασίες που μεταφέρουν και απομακρύνουν άλατα από την υδάτινη στήλη του ωκεανού.

Για το προσδιορισμό της αλατότητας χρησιμοποιούμε συνήθως τη χλωριότητα (Chlorinity), δηλ. τη μάζα των ιόντων χλωρίου, βρωμίου και ιωδίου που υπάρχουν σε καθορισμένη μάζα νερού, στο οποίο επενεργεί άργυρος, θεωρώντας ότι οι μικρές ποσότητες των ιόντων βρωμίου και ιωδίου έχουν αντικατασταθεί από ιόντα χλωρίου. Η κύρια αντίδραση που λαμβάνει χώρα για το προσδιορισμό της χλωριότητας είναι :



Ο χλωριούχος άργυρος δημιουργεί ίζημα λευκού χρώματος, όμως για τον ακριβή προσδιορισμό των ιόντων χλωρίου απαιτείται η γνώση της ακριβούς ποσότητας του νιτρικού αργύρου ο οποίος προστίθεται στο διάλυμα. Μετά το προσδιορισμό της χλωριότητας, η αλατότητα προσδιορίζεται από το τύπο :

$$S (\text{‰}) = 1,80655 \times \text{Cl}^- (\text{‰}) \quad (3.2)$$

Η αλατότητα που προσδιορίζεται με τον παραπάνω τρόπο καλείται **απόλυτη αλατότητα (absolute salinity)**. Από το 1979 και μετά ο τρόπος αυτός προσδιορισμού της αλατότητας εγκαταλείφθηκε και αντικαταστάθηκε από το προσδιορισμό της αλατότητας μέσω μίας πιο σύνθετης σχέσης που περιλαμβάνει την χλωριότητα, την πυκνότητα και την ηλεκτρική αγωγιμότητα του θαλασσινού νερού.

$$S = f(T, C, \rho)$$

Η αλατότητα που προκύπτει με το νέο τρόπο προσδιορισμού καλείται **πρακτική αλατότητα (practical salinity)**. Η πρακτική αλατότητα μπορεί να προβληθεί στη κλίμακα πρακτικής αλατότητας η οποία βασίζεται σε **καθορισμένο δείγμα νερού (standard seawater)** που σε κανονική πίεση και θερμοκρασία 15°C έχει ηλεκτρική αγωγιμότητα ίση με αυτή διαλύματος χλωριούχου καλίου με 31,4357 γρ. KCl ανά χιλιόγραμμο διαλύματος. Το προκαθορισμένο αυτό δείγμα προέρχεται από το Β. Ατλαντικό και καλείται '**νερό Κοπενγχάγης**'.

Η ηλεκτρική αγωγιμότητα είναι το μέτρο της ευκολίας με την οποία το ηλεκτρικό ρεύμα διέρχεται μέσα από ένα υλικό (στη προκειμένη περίπτωση το θαλασσινό νερό). Το καθαρό νερό διαθέτει τιμή αγωγιμότητας μόλις 0,055 μSiemens/cm, ενώ όταν η συγκέντρωση των αλάτων (με την μορφή ιόντων) αυξάνει, αυξάνει και η ηλεκτρική αγωγιμότητα C. Η ηλεκτρική αγωγιμότητα εξαρτάται κυρίως από την αλατότητα. Ωστόσο μεταβάλλεται και με την θερμοκρασία και την πίεση. Άρα η ηλεκτρική αγωγιμότητα είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας, αλατότητας και πίεσης.

$$C = f(T, S, p) \quad (3.3)$$

Έτσι, όταν η θερμοκρασία του νερού αυξάνεται, αυξάνει και η ηλεκτρική αγωγιμότητα. Για κάθε 1 °C που αυξάνεται η θερμοκρασία, η αγωγιμότητα αυξάνεται κατά 2 – 4%. Η ηλεκτρική αγωγιμότητα αυξάνεται, επίσης, με την αύξηση της υδροστατικής πίεσης (δηλ. του βάθους). Συνεπώς, όταν γίνονται μετρήσεις αγωγιμότητας σε μεγάλα βάθη, είναι αναγκαίο να ληφθεί υπόψη η υδροστατική πίεση, ώστε να προβούμε σε σχετικές διορθώσεις.

Ο προσδιορισμός της αλατότητας γίνεται με τους παρακάτω τρόπους :

(1) Εξάτμιση δείγματος νερού και τη ζύγιση βάρους των εναπομεινάντων στερεών συστατικών.

(2) Προσδιορισμός ιόντων χλωρίου, βρωμίου, ιωδίου που συνθέτουν τη παράμετρο της **χλωριότητας** και συσχέτιση της χλωριότητας με την αλατότητα μέσω του τύπου : $S = 1,80655 Cl^-$ (ακρίβεια 0,025). Η χλωριότητα μετρείται με ένα αλατόμετρο το οποίο χρησιμοποιεί την ηλεκτρική αγωγιμότητα του νερού (την ικανότητα του νερού να επιτρέπει ηλεκτρικό ρεύμα να διέρχεται από το εσωτερικό του) για να μετρήσει τη ποσότητα των ελεύθερων ιόντων στο νερό.

(3) Προσδιορισμός αλατότητας μέσω αγωγιμότητας, C , η οποία είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας, της αλατότητας και της πίεσης.

$$S = f(T, C, p) \quad (3.4)$$

Καλύτερα αποτελέσματα επιτυγχάνονται με τη μέθοδο (3) παρά με τη μέθοδο (2). Η μέτρηση της αγωγιμότητας είναι σχετικά εύκολη μέθοδος. Απαιτεί μόλις δύο ηλεκτρόδια διαφορετικής πολικότητας βυθισμένα στο νερό και την εφαρμογή μίας ηλεκτρικής τάσης. Η μέτρηση της έντασης ηλεκτρικού ρεύματος μεταξύ τους προσδιορίζει την ηλεκτρική αγωγιμότητα. Η μέτρηση της αγωγιμότητας γίνεται ταυτόχρονα με τη μέτρηση της θερμοκρασίας, ώστε να είναι δυνατή η απομόνωση της επίδρασης της θερμοκρασίας και να προσδιοριστεί η αλατότητα. Η ακρίβεια της μεθόδου είναι 0,001 – 0,004 ppt και η επαναληψιμότητά της είναι 0,001 ppt.

Ο προσδιορισμός της αγωγιμότητας γίνεται με τους παρακάτω τρόπους :

- α) Με το σαλινόμετρο (salinometer) το οποίο μετρά το λόγο της αγωγιμότητας του δείγματος προς την αγωγιμότητα του Standard Sea Water.
- β) Με το CTD (Conductivity – Temperature – Depth meter), ένα αυτογραφικό όργανο που μετρά θερμοκρασία – αγωγιμότητα και πίεση σε διάφορα βάθη της υδάτινης στήλης και υπολογίζει την αλατότητα του νερού.
- γ) Με το SeaCat, ένα τύπο CTD το οποίο σύρεται από το ερευνητικό σκάφος με σταθερή ταχύτητα και προγραμματίζεται για να κινείται μόνο του σε διάφορα βάθη της υδάτινης στήλης.

Προσδιορισμός πρακτικής αλατότητας μέσω αγωγιμότητας

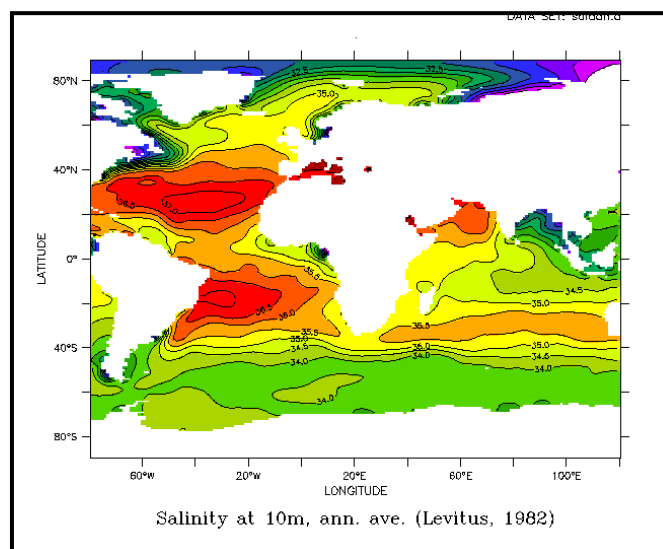
Η αλατότητα μπορεί να προσδιοριστεί μέσω της μέτρησης της αγωγιμότητας με τον προσδιορισμό του λόγου K_{15} .

$K_{15} = C_{15,5}/C_{15,35}$, όπου $C_{15,35} = 42.896$ mhom/cm ή mS/cm.

$$S = \alpha_0 + \alpha_1 K_{15}^{1/2} + \alpha_2 K_{15} + \alpha_3 K_{15}^{3/2} + \alpha_4 K_{15}^2 + \alpha_5 K_{15}^{5/2}$$
$$\alpha_0 = 0.0080, \alpha_1 = -0.1692, \alpha_2 = 25.3851,$$
$$\alpha_3 = 14.0941, \alpha_4 = -7.0261, \alpha_5 = 2.7081$$
$$\sum \alpha_i = 35$$

3.2. Επιφανειακή Κατανομή της Αλατότητας

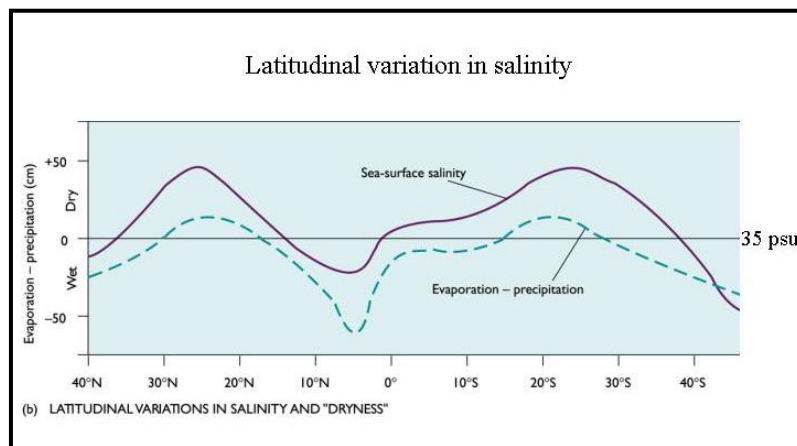
Η αλατότητα του θαλασσινού νερού κυμαίνεται από 33-37‰, με μέσο όρο το 34‰. Η κατανομή της αλατότητας των επιφανειακών υδάτων δείχνει ότι υπάρχει άμεση σχέση μεταξύ της αλατότητας και του γεωγραφικού πλάτους. Χαμηλές τιμές αλατότητας βρίσκονται στις πολικές περιοχές και στον Ισημερινό, ενώ υψηλές τιμές βρίσκονται στις υποτροπικές ζώνες (Σχήμα 3.2).



Σχήμα 3.2. Επιφανειακή κατανομή αλατότητας στον Ατλαντικό Ωκεανό.

Η ζωνώδης γεωγραφική κατανομή της αλατότητας συνδέεται κατά κύριο λόγο με τη βροχόπτωση (precipitation) και την εξάτμιση (evaporation). Το Σχήμα 3.3 δείχνει την

επιφανειακή κατανομή της αλατότητας κατά μήκος ενός μεσημβρινού, σε σχέση με την τιμή διαφοράς της βροχόπτωσης από την εξάτμιση. Οι μέγιστες τιμές αλατότητας βρίσκονται στα γεωγραφικά πλάτη όπου η ετήσια εξάτμιση είναι μεγαλύτερη από την ετήσια βροχόπτωση.



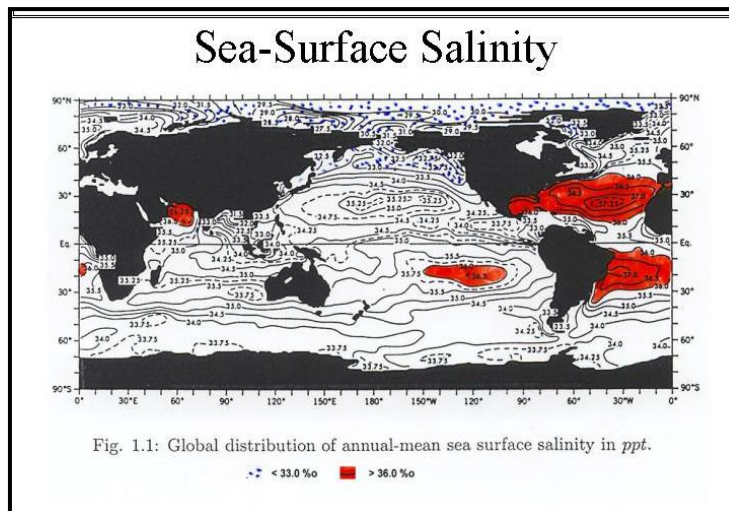
Σχήμα 3.3. Κατανομή μέσης ετήσιας επιφανειακής αλατότητας κατά μήκος ενός μεσημβρινού, σε σύγκριση με τη διαφορά εξάτμισης και βροχόπτωσης (E-P).

Άλλοι παράγοντες που επηρεάζουν την αλατότητα δίνονται στο παρακάτω Πίνακα 3.2.

Πίνακας 3.2. Παράγοντες που αυξάνουν ή ελαττώνουν την αλατότητα των ωκεανών.

Αύξηση αλατότητας	Μείωση αλατότητας
Εξάτμιση	Βροχόπτωση
Σχηματισμός πάγου	Λιώσιμο πάγου
Επιφανειακή κυκλοφορία (advection of more saline water)	Επιφανειακή κυκλοφορία (advection of less saline water)
Μείξη με πιο αλμυρά νερά	Μείξη με λιγότερο αλμυρά νερά
Διάλυση αλατούχων αποθέσεων	Έκχυση γλυκών υδάτων από ποταμούς και παγετώνες.

Το Σχήμα 3.4 δίνει τη μέση ετήσια κατανομή της διαφοράς E-P στην επιφάνεια της Γης, καθώς και τις κυριότερες διευθύνσεις μεταφοράς των υδρατμών στην ατμόσφαιρα, και εξηγεί έτσι τη κατανομή των μεγίστων και ελαχίστων της αλατότητας στην επιφάνεια των ωκεανών. Προκύπτει ότι το μέγιστο της αλατότητας βρίσκεται στις υποτροπικές περιοχές, όπου η εξάτμιση υπερिशχύει της βροχόπτωσης λόγω των αλληγών ανέμων (trading winds). Η ατμοσφαιρική κυκλοφορία μεταφέρει τους υδρατμούς αυτούς προς τον Ισημερινό και τα μεγαλύτερα γεωγραφικά πλάτη, όπου με την συμπύκνωσή τους μετατρέπονται σε βροχή, οδηγώντας σε ελάχιστα αλατότητας στις περιοχές αυτές.



Σχήμα 3.4. Επιφανειακή κατανομή αλατότητας και περιοχές μέγιστης αλατότητας στον Ωκεανό.

Κοντά στη ξηρά, οι τιμές της αλατότητας παρεκκλίνουν σημαντικά από τις προαναφερθείσες τιμές. Οι παρεκκλίσεις αυτές βρίσκονται κυρίως σε περιοχές όπου:

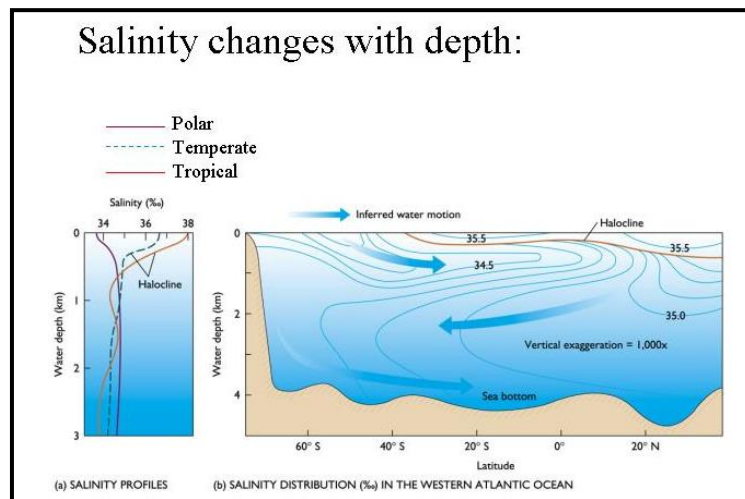
- α) υπάρχει μεγάλη έκχυση γλυκών υδάτων, όπως το Δέλτα του Αμαζονίου,
- β) μεγάλη εξάτμιση, όπως σε λιμνοθάλασσες,
- γ) η επικοινωνία με τη θάλασσα είναι περιορισμένη, όπως Μεσόγειος Θάλασσα, Ερυθρά Θάλασσα και Μαύρη Θάλασσα.

3.3. Κατανομή της αλατότητας με το βάθος

Η κατανομή της αλατότητας με το βάθος δεν είναι εύκολο να συνοψισθεί όσο αυτή της θερμοκρασίας. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η ευσταθής ισορροπία της υδάτινης στήλης εξαρτάται κυρίως από τη θερμοκρασία (εκτός των πολικών περιοχών). Έτσι, τα νερά υψηλής θερμοκρασίας (μικρής πυκνότητας) βρίσκονται στην επιφάνεια και τα νερά χαμηλής θερμοκρασίας (μεγάλης πυκνότητας) σε μεγαλύτερα βάθη. Οι αλατότητες των ωκεανών δεν είναι ικανές να επηρεάσουν τόσο σημαντικά τη πυκνότητα, ώστε να μεταβάλουν τη δομή της υδάτινης στήλης. Έτσι, στα ανώτερα στρώματα των ωκεανών, μπορεί να υπάρχουν νερά χαμηλής ή υψηλής αλατότητας.

Το Σχήμα 3.5 παρουσιάζει τυπικά προφίλ αλατότητας για μικρά, μέσα και μεγάλα γεωγραφικά πλάτη, για τον Ατλαντικό και τον Ειρηνικό Ωκεανό. Στα προφίλ αυτά φαίνεται ότι στα μικρά γεωγραφικά πλάτη η αλατότητα είναι μέγιστη στα επιφανειακά στρώματα,

αποκτά ένα ελάχιστο μεταξύ 600 – 1000 μ. και αυξάνεται συνεχώς από τα 1000 – 2000 μ. Στα υψηλά γεωγραφικά πλάτη, όπου η αλατότητα είναι χαμηλή, η τιμή της αυξάνεται συνέχεια μέχρι τα 2000 μ. Στις τροπικές περιοχές η αλατότητα αποκτά μέγιστο μεταξύ 100 – 200 μ. λόγω της βύθισης νερού μεγάλης αλατότητας στις τροπικές ζώνες.



Σχήμα 3.5. Κατακόρυφα προφίλ αλατότητας στον Ατλαντικό Ωκεανό.

Στις παράκτιες περιοχές, όπου χύνονται μεγάλοι ποταμοί, δημιουργείται μία ζώνη **απότομης αύξησης της αλατότητας η οποία καλείται αλοκλινές (halocline)** που αποτελεί τη διαχωριστική επιφάνεια μεταξύ του επιφανειακού στρώματος γλυκού νερού και του βαθύτερου στρώματος υψηλής αλατότητας.