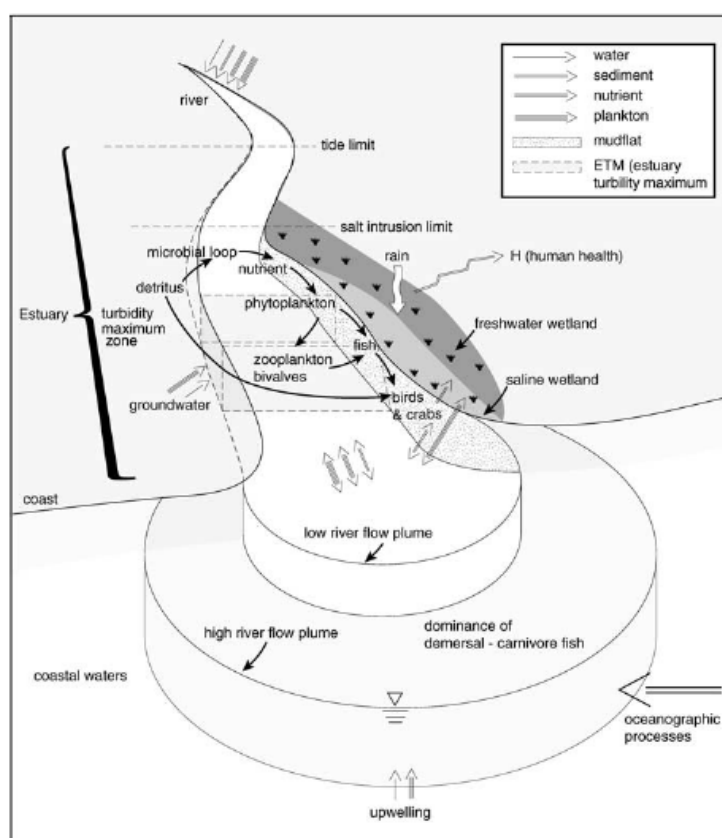


## ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ και ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΠΑΡΑΚΤΙΩΝ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ



ΓΕΩΡΓΙΟΣ ΣΥΛΑΙΟΣ

ΩΚΕΑΝΟΓΡΑΦΟΣ

ΕΠΙΚΟΥΡΟΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Δ.Π.Θ

ΞΑΝΘΗ – ΙΟΥΛΙΟΣ 2010

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

## Ορισμός και Ταξινόμηση Παράκτιων Υδατικών Συστημάτων

Η παράκτια ζώνη είναι η περιοχή μετάβασης μεταξύ του απόλυτα χερσαίου και του απόλυτα θαλάσσιου τμήματος της επιφάνειας της Γης. Θεωρείται ως ένα σημαντικό συστατικό της βιόσφαιρας, λόγω των έντονα ποικίλων φυσικών συστημάτων και πόρων που εμπεριέχει. Η παράκτια ζώνη χαρακτηρίζεται από έντονες αλληλεπιδράσεις. Εδώ, οι χερσαίες και οι θαλάσσιες παγκόσμιες διεργασίες αλληλεπιδρούν, προκαλώντας σημαντικές βιογεωχημικές διαβαθμίσεις. Δημιουργούνται έτσι συστήματα έντονης διαβάθμισης, με χαρακτηριστικές κλιματικές συνθήκες, γεωμορφολογία, ανθρώπινη επίδραση, χαρακτηριζόμενα από δυναμικές φυσικές, χημικές και βιολογικές διεργασίες, που ονομάζονται Παράκτια Υδατικά Συστήματα.

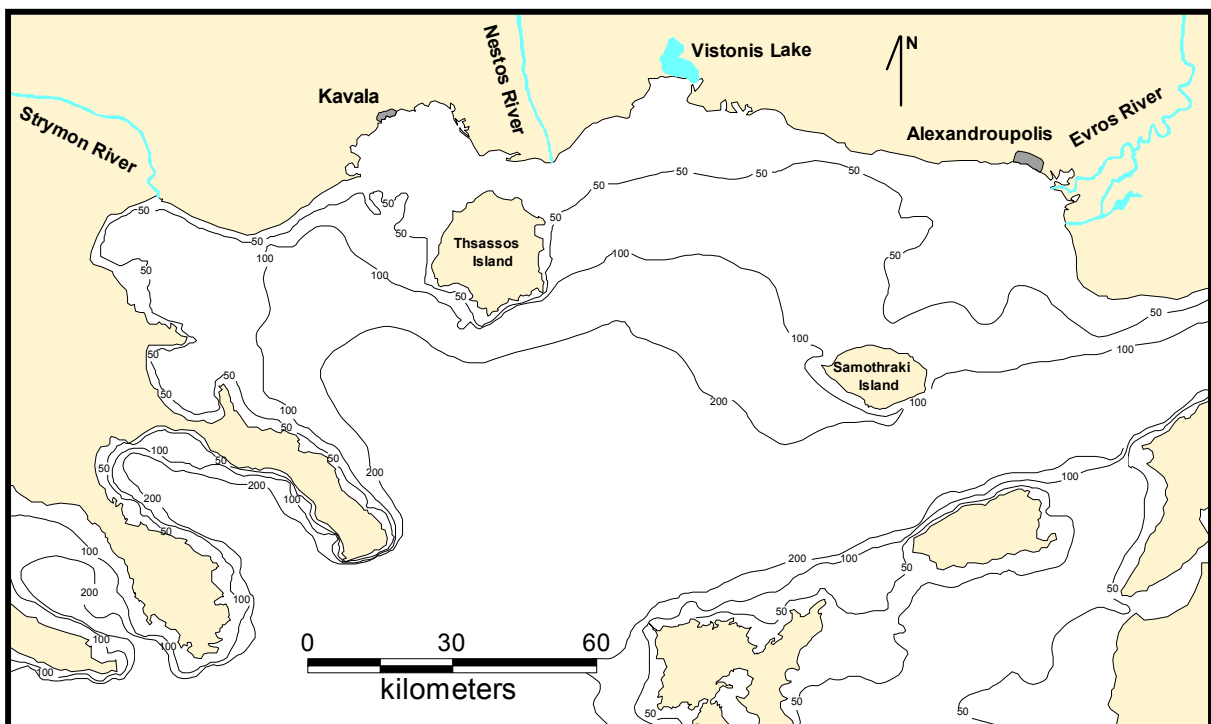
Ως Παράκτια Υδατικά Συστήματα (ΠΥΣ) ορίζουμε γεωμορφολογικά αυτόνομα σώματα νερού της παράκτιας ζώνης, τα οποία βρίσκονται στο κατώτατο τμήμα χερσαίων λεκανών απορροής και εκτείνονται κατά μήκος της ηπειρωτικής υφαλοκρηπίδας. Τα συστήματα αυτά βρίσκονται σε συνεχή ανταλλαγή με την ανοικτή θάλασσα, επηρεάζονται από τις επικρατούσες ατμοσφαιρικές συνθήκες και διαταραχές, ενώ στο εσωτερικό τους λαμβάνουν χώρα έντονες φυσικές και βιογεωχημικές διεργασίες. Γενικά, τα παράκτια υδατικά συστήματα αποτελούν ολοκληρωμένες οικολογικές ενότητες υψηλής βιοποικιλότητας & παραγωγικότητας.

Οι χερσαίες διεργασίες των ΠΥΣ καθορίζονται από τον υδρολογικό κύκλο και τις οριζόντιες ροές που μεταφέρουν υλικά (θρεπτικά άλατα, ρύπους, ιζήματα), κατά μήκος της υδρολογικής λεκάνης, δημιουργώντας συνθήκες μετασχηματισμού των υλικών αυτών και ανάπτυξης βιομάζας. Οι ωκεάνιες διεργασίες των ΠΥΣ καθορίζονται παρόμοια από υδρογραφικούς παράγοντες (ρεύματα, κύματα, παλίρροια) που μεταφέρουν υλικά σε αντίθετες κατευθύνσεις από τις χερσαίες διεργασίες. Το συνολικό αποτέλεσμα είναι η έντονη ετερομορφία και ετερογένεια που προκύπτει από την εξισορρόπηση των χερσαίων και θαλάσσιων μηχανισμών, η οποία ρυθμίζει τη δυναμική του οικοσυστήματος και της βιογεωχημικής ανκύκλωσης των υλικών στο παράκτιο περιβάλλον.

Τα παράκτια υδατικά συστήματα περιλαμβάνουν:

- Ημίκλειστους κόλπους (bays, embayments, fjords, sounds, inlets, gulfs),
- Ποταμοκόλπους (estuaries),
- Ποταμοεκβολές (river mouths),
- Λιμνοθάλασσες (lagoons, rias),
- Παράκτιες λίμνες (coastal lakes),
- Παράκτιοι Υγρότοποι (coastal wetlands, ponds, swamps, salt marshes),
- Λιμενολεκάνες (ports, harbors)

Ειδικότερα, κατά μήκος της ακτογραμμής της Περιφέρειας Ανατολικής Μακεδονίας – Θράκης, αναπτύσσονται πλήθος παράκτιων υδατικών συστημάτων, όπως ημίκλειστοι κόλποι (Στρυμονικός Κόλπος, Κόλπος Ιερισοπού, Κόλπος Καβάλας, Βιστωνικός Κόλπος, Κόλπος Αλεξανδρούπολης), ποταμοεκβολές (εκβολές π. Στρυμόνα, Νέστου και Έβρου), λιμνοθάλασσες (σύμπλεγμα λιμνοθαλασσών π. Νέστου, Βιστωνίδα, Ισμαρίδα, λιμνοθάλασσες δέλτα Έβρου), παράκτιοι υγρότοποι (παραποτάμιο δάσος Νέστου, λίμνες Χρυσούπολης) καθώς και τεχνητές λιμενολεκάνες (Σχήμα 1).

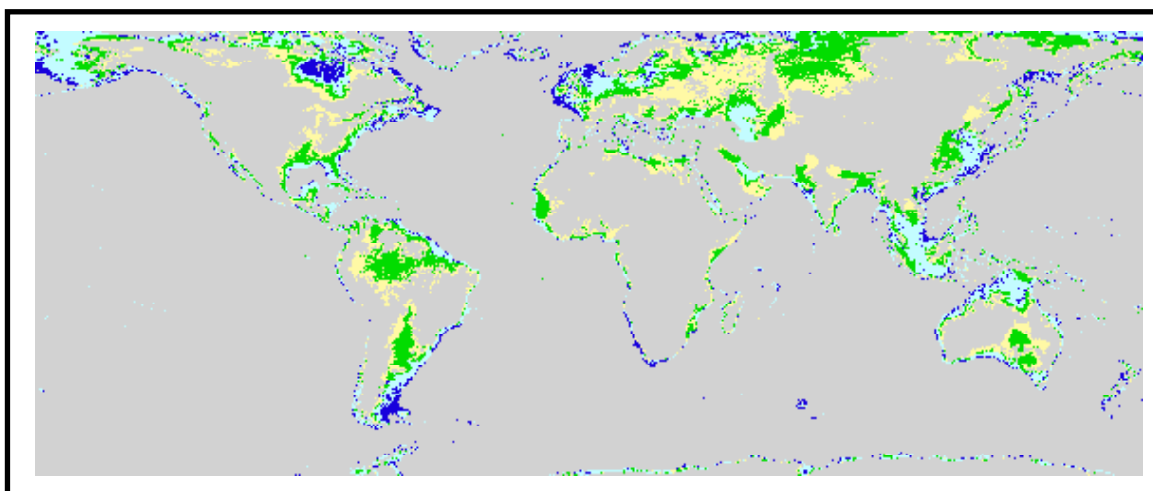


**Σχήμα 1.** Χάρτης ακτογραμμής Β. Αιγαίου όπου παρουσιάζονται τα παράκτια υδατικά συστήματα της περιφέρειας ΑΜΘ.

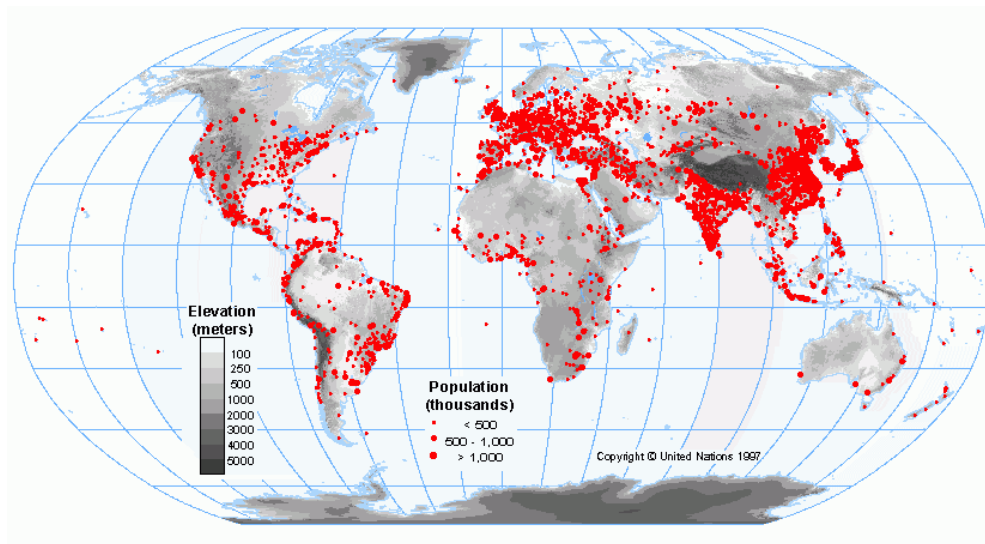
## Χαρακτηριστικά Παράκτιων Υδατικών Συστημάτων

Η παγκόσμια παράκτια ζώνη είναι μήκους ~ 500,000 χλμ και μέσου πλάτους περίπου 50 χλμ, και αντιστοιχεί στο 18% περίπου της επιφάνειας της Γης (Σχήμα 2). Η περιοχή αυτή βρίσκεται υπό σημαντική και συνεχώς αυξανόμενη πίεση εξαιτίας των ανθρώπινων δράσεων, της οικιστικής, βιομηχανικής, τουριστικής και αγροτικής ανάπτυξης και τις επιπτώσεις από την αναμενόμενη άνοδο της στάθμης της θάλασσας (GESAMP, 2001; Σχήμα 3). Η πρόβλεψη για τα επόμενα χρόνια δείχνει περαιτέρω υποβάθμιση της παράκτιας ζώνης και των συστημάτων της (π.χ., υπεραλίευση, άμεσες και έμμεσες επιπτώσεις αλλαγών χρήσεων γης, εκπομπές θερμοκηπιακών αερίων) (Σχήμα 4).

Το μεγαλύτερο μέρος των χημικών ενώσεων που εισέρχονται στον ωκεανό, διέρχονται μέσω της παράκτιας ζώνης και των υδατικών συστημάτων της, προκαλώντας αυτό που χαρακτηρίζεται ως σημειακή ή μη-σημειακή ρύπανση (Σχήμα 5). Τα παράκτια υδατικά συστήματα αποτελούν περιοχές μεταφοράς, μετασχηματισμού και αποθήκευσης χημικών ενώσεων, με αποτέλεσμα να λαμβάνουν χώρα έντονες φυσικές και βιογεωχημικές διεργασίες λαμβάνουν χώρα στη περιοχή αυτή.



**Σχήμα 2.** Η Παγκόσμια Παράκτια Ζώνη οριζόμενη ως η περιοχή μεταξύ υψομέτρου +200 μ και βάθους -200 μ.



**Σχήμα 3.** Κατανομή ανθρώπινου πληθυσμού στη Παγκόσμια Παράκτια Ζώνη.

**Ανθρώπινες δραστηριότητες με επιδράσεις στα Παράκτια Υδατικά Συστήματα**



**Σχήμα 4.** Ανθρώπινες δραστηριότητες με επιδράσεις στα Παράκτια Υδατικά Συστήματα.

Τα παράκτια υδατικά συστήματα είναι εξαιρετικά δυναμικά συστήματα, καθώς επηρεάζονται:

A) από το ανοικτό θαλάσσιο όριο από:

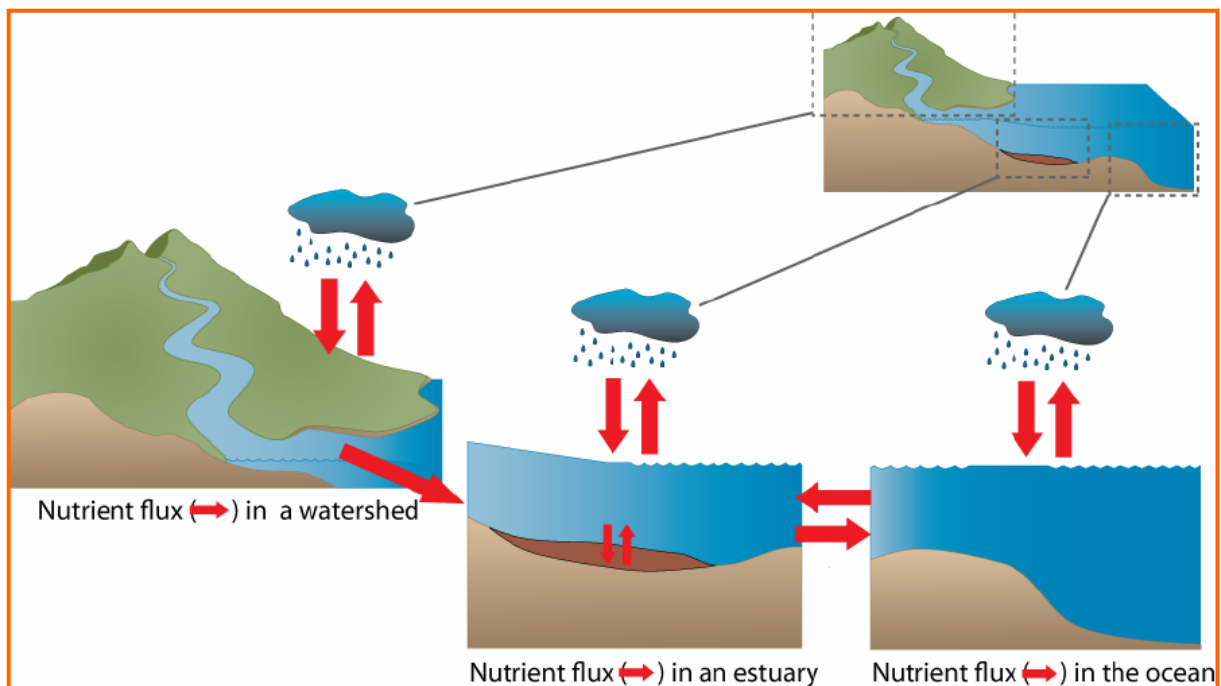
- Παλιρροιακές μεταβολές (tides),
- Γεωστροφική κυκλοφορία (geostrophic circulation),
- Ανεμογενείς επιδράσεις (wind-induced effects),
- Κινήσεις βαρομετρικών συστημάτων (storm surges),
- Ρεύματα πυκνότητας (density currents),
- Κυματισμούς (waves),
- Κλιματική Αλλαγή (climate change)

B) από το χερσαίο θαλάσσιο όριο από:

- Ανθρωπογενείς δραστηριότητες,

➤ Πλημμυρικές ποτάμιες παροχές.

Οι παραπάνω επιδράσεις συμβάλουν στην έντονη χωρική και χρονική μεταβλητότητα που παρατηρείται στις φυσικές, χημικές και βιολογικές παραμέτρους του νερού και του ιζήματος των παράκτιων υδατικών συστημάτων. Έτσι οι περιοχές αυτές χαρακτηρίζονται από σημαντικές οριζόντιες βαθμίδες, ανταλλαγές και ροές μάζας και ενέργειας, κατακόρυφες αλληλοεπιδράσεις με την ατμόσφαιρα, το έδαφος και το υπόγειο νερό. Προκύπτει ότι τα συστήματα αυτά δεν βρίσκονται σε κατάσταση ισορροπίας (steady state), αλλά μεταβάλλονται χρονικά ως αποτέλεσμα των πολλαπλών επιδράσεων σε κλίμακα ημερήσια (π.χ., παλίρροια, βροχόπτωση, ποτάμια παροχή), εποχιακή (π.χ., κλιματικές μεταβολές), ετήσια (π.χ., αλιευτική παραγωγή), δεκαετή (π.χ., ENSO), έως μεταβολές στη κλίμακα του γεωλογικού χρόνου (π.χ., ευστατικές μεταβολές της στάθμης της θάλασσας).



**Σχήμα 5.** Ροές μάζας μεταξύ της λεκάνης απορροής, του παράκτιου υδατικού συστήματος και της παρακείμενης ανοικτής θάλασσας.

Καθώς οι ανθρώπινες δραστηριότητες συμβάλουν στην υποβάθμιση του περιβάλλοντος των παράκτιων υδατικών συστημάτων, πλήθος προβλημάτων αναγνωρίζονται από τους ερευνητές, τα οποία κατηγοριοποιούνται ως εξής:

1. Ρύπανση (αστική, βιομηχανική, γεωργική, τουριστική),

2. Ευτροφισμός, διεργασία κατά την οποία λόγω της υψηλής φόρτισης των παράκτιων συστημάτων σε θρεπτικά άλατα αναπτύσσονται υπέρμετρα φυτικοί υδρόβιοι οργανισμοί (πλαγκτόν και φύκη). Η επίπτωση του φαινομένου είναι η μείωση της διείσδυσης της ηλιακής ακτινοβολίας, η μείωση της συγκέντρωσης του διαλ. οξυγόνου, με αποτέλεσμα την αποσύνθεση του νεκρού οργανικού υλικού και τη περαιτέρω θανάτωση άλλων οργανισμών.
3. Υποβάθμιση βενθικών φυτοκοινωνιών, κοραλλιογενών υφάλων και ζωοβένθους,
4. Μεταβολή του ρυθμού μεταφοράς των ιζημάτων,
5. Αποξήρανση υγροτόπων και η επιφανειακή και υπόγεια διείσδυση θαλασσινού νερού,
6. Υπεραλίευση και χρήση καταστρεπτικών πρακτικών,
7. Κλιματικές μεταβολές και άνοδος της στάθμης της θάλασσας.

Από τα παραπάνω προκύπτει σαφώς η αναγκαιότητα συνεχούς διαχείρισης των παράκτιων υδατικών συστημάτων ώστε να είναι δυνατός ο περιορισμός ή η ελαχιστοποίηση των επιπτώσεων των παραπάνω περιβαλλοντικών βλαβών. Η διαχείριση αυτή θα πρέπει να στηρίζεται στη πλήρη και σε βάθος κατανόηση των φυσικών, χημικών, βιολογικών και γεωλογικών διεργασιών που λαμβάνουν χώρα στο σύστημα. Η σωστή διαχείριση απαιτεί τη χρήση βιβλιογραφικών δεδομένων, δεδομένων πεδίου και μαθηματικών προσομοιώσεων. Η σωστή διαχείριση καταλήγει πάντα στη διατύπωση διαχειριστικών προτάσεων και στην αξιολόγηση των μεθόδων βελτίωσης της σημερινής κατάστασης (Σχήμα 6).



**Σχήμα 6.** Μεθοδολογία διαχείρισης παράκτιων υδατικών συστημάτων.

Ο σύγχρονος Μηχανικός Περιβάλλοντος θα πρέπει:

- να είναι γνώστης των σύνθετων και πολύπλοκων λειτουργιών, διεργασιών και μηχανισμών των Παράκτιων Υδατικών Συστημάτων,
- να αντιλαμβάνεται την ανάγκη ολοκληρωμένης διαχείρισης των ανθρώπινων δραστηριοτήτων σε επίπεδο λεκάνης απορροής,
- να γνωρίζει τη χρήση οργάνων και τη μεθοδολογία συλλογής, ανάλυσης και επεξεργασίας δεδομένων πεδίου από Παράκτια Υδατικά Συστήματα,
- να κατανοεί τη χρησιμότητα των μαθηματικών ομοιωμάτων ως σύγχρονο εργαλείο διαχείρισης περιβαλλοντικών συστημάτων,
- να είναι γνώστης της διαδικασίας σχεδιασμού και κατάστροφης μαθηματικών ομοιωμάτων, της διασύνδεσής τους με δεδομένα πεδίου, της εφαρμογής τους, και
- να έχει τη δυνατότητα εξέτασης εναλλακτικών σεναρίων διαχείρισης για το περιορισμό των επιπτώσεων των ανθρωπογενών παρεμβάσεων και τη διατύπωση προτάσεων περιβαλλοντικής βελτίωσης των παράκτιων συστημάτων.

Η σύγχρονη διαχείριση των παράκτιων υδατικών συστημάτων απαιτείται να λαμβάνει υπόψη της:

- το γεγονός ότι οι άνθρωποι αποτελούν αναπόσπαστο τμήμα του παράκτιου οικο-συστήματος,
- το γεγονός ότι η μελέτη της παράκτιας θάλασσας θα πρέπει να ξεκινά και να διασυνδέεται με τη μελέτη της χερσαίας λεκάνης απορροής (υδρολογική λεκάνη) που μεταφέρει τη ποτάμια απορροή σε αυτήν, και
- το γεγονός ότι η διαχείριση της παράκτιας ζώνης απαιτεί μία ολοκληρωμένη οικο-συστημική προσέγγιση.

Νέα, σύγχρονα εργαλεία και τεχνικές έχουν αναπτυχθεί για τη συστηματική παρακολούθηση, τη προσομοίωση και τη διαχείριση των παράκτιων υδατικών συστημάτων. Το μάθημα παρέχει μία ολοκληρωμένη παρουσίαση των διαφόρων εργαλείων και τεχνικών διαχείρισης με στόχο τη κατανόηση των διεργασιών του συστήματος, την εκτίμηση των ροών μάζας και ενέργειας και τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ των περιβαλλοντικών πιέσεων και της δυναμικής απόκρισης του συστήματος στις πιέσεις.



## Φυσικά Όρια της Παράκτιας Ζώνης

Η παράκτια ζώνη αποτελείται από μία σειρά μοναδικών οικοσυστημάτων, που λειτουργούν προσαρμοσμένα στις υψηλές ροές ενέργειας, θρεπτικών αλάτων και ιζημάτων με αποτέλεσμα την υψηλή βιολογική παραγωγικότητα και την έντονη βιοποικιλότητα ειδών οργανισμών. Έντονες φυσικές δυνάμεις ενεργούν στη παράκτια ζώνη μεταβάλλοντας διαρκώς τη μορφολογία, διαφοροποιώντας τη σύνθεση των οικοσυστημάτων αλλά θέτοντας και σε κίνδυνο τις ανθρώπινες δραστηριότητες.

Η παράκτια ζώνη περιλαμβάνει υδρολογικές λεκάνες, ποταμοεκβολές, παράκτιες θάλασσες εκτεινόμενη έως και την ηπειρωτική υφαλοκρηπίδα. Αυτή η σχετικά στενή λωρίδα μεταξύ ξηράς και θάλασσας δέχεται διεργασίες και φαινόμενα που μπορεί να ξεκινούν από τα πλέον μακρινά και μεγάλου υψόμετρου τμήματα της παρακείμενης υδρολογικής λεκάνης, έως και από τα νερά της ανοικτής θάλασσας και του ωκεανού. Οι παράκτιες διεργασίες που αναπτύσσονται βιογεωχημικές αλλά και κοινωνικο-οικονομικές συσχετίσεις.

Στη βιβλιογραφία δεν υπάρχει ένας απλός και ρητός ορισμός των φυσικών ορίων της παράκτιας ζώνης. Ένας κοινός εμπειρικός κανόνας αναφέρει ότι θα πρέπει να περιλάβουμε στην ανάλυσή μας χερσαίες περιοχές έως και 100 χλμ μακριά από τη παράκτια ζώνη. Τελευταίες εκτιμήσεις του παράκτιου πληθυσμού και των ανθρώπινων δραστηριοτήτων θεωρούν ότι η παράκτια ζώνη θα πρέπει να περιλαμβάνει το χερσαίο τμήμα με ανύψωση έως τα +200 μ και σε απόσταση έως 100 χλμ από την ακτογραμμή. Το θαλάσσιο όριο προσδιορίζεται με βάση διάφορους παράγοντες, ο κυριότερος από τους οποίους είναι η βαθυμετρία. Το όριο συνήθως τοποθετείται στην ισοβαθή των 200 μ βάθους.

Θεωρώντας τα παραπάνω φυσικά όρια για τη παράκτια ζώνη, εκτιμούμε ότι είναι η περιοχή:

- που καταλαμβάνει <20% της επιφάνειας της Γης,
- που περιλαμβάνει >45% του ανθρώπινου πληθυσμού της Γης,
- που περιλαμβάνει το 75% των μεγα-πόλεων με πληθυσμό >10 εκ. κατοίκων,
- που παράγει το 90% της παγκόσμιας αλιευτικής παραγωγής,
- που αποτελεί τη κύρια ζώνη απόθεσης των ιζημάτων,
- που αποτελεί τη κύρια περιοχή έντονων βιογεωχημικών διεργασιών,

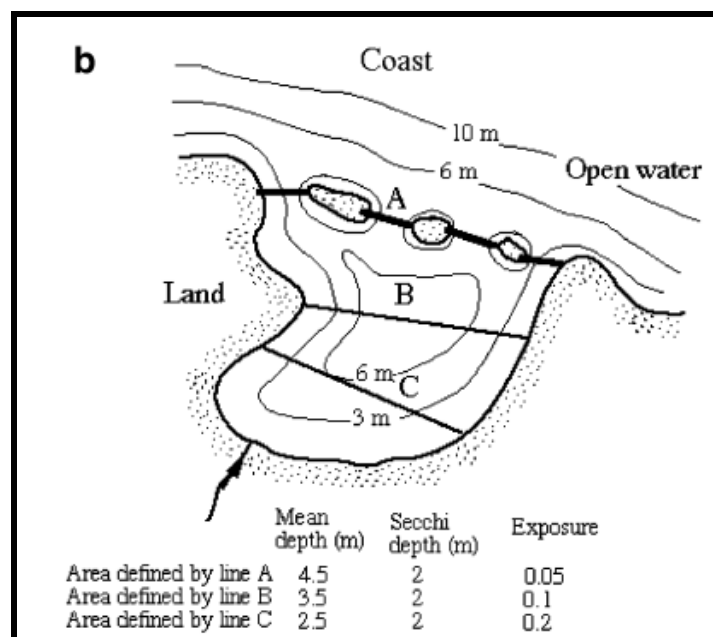
- που χαρακτηρίζεται από έντονη χωρική ετερογένεια, και δυναμική μεταβλητότητα στο χρόνο,
- που διαθέτει στο εσωτερικό της έντονες βαθμίδες μεταβλητότητας και έντονη ποικιλότητα.

## Φυσικά Όρια των Παράκτιων Συστημάτων

Η μορφομετρία της παράκτιας περιοχής, δηλ. το μέγεθος της και τα μορφολογικά της χαρακτηριστικά επηρεάζουν το ρυθμό ανανέωσης της εισερχόμενης σε αυτή μάζας. Έτσι, η μορφολογία της περιοχής επηρεάζει τη δυναμική των ιζημάτων και τη παρουσία των ρύπων σε αυτή. Μία σημαντική ερώτηση αφορά το καθορισμό των φυσικών ορίων του παράκτιου συστήματος, δηλ. το καθορισμό των ορίων μεταξύ αυτού και της παρακείμενης ανοικτής θάλασσας. Ο καθορισμός αυτός είναι ιδιαίτερα σημαντικός για το προσδιορισμό παραμέτρων όπως το μέσο βάθος ή όγκος της περιοχής μελέτης. Η μεθοδολογία που έχει αναπτυχθεί για το βέλτιστο καθορισμό των φυσικών ορίων του παράκτιου συστήματος χρησιμοποιεί το συντελεστή έκθεσης (exposure ratio, Ex) ο οποίος εκφράζει το λόγο μεταξύ του εμβαδού της οριακής διατομής και του εμβαδού της παράκτιας περιοχής.

Συνεπώς,  $Ex = (A_i / Area) \times 100$

Χρησιμοποιώντας το λόγο Ex για διάφορες οριακές γραμμές της παράκτιας περιοχής, ορίζουμε ως το όριο της τη γραμμή με την οποία το Ex αποκτά την ελάχιστη τιμή του (Σχήμα 7).



Σχήμα 7. Καθορισμός ορίου παράκτιας περιοχής – ανοικτής θάλασσας με βάση τη παράμετρο Ex.

Μόλις καθορίσουμε τη παράκτια περιοχή, μπορούμε να προσδιορίσουμε σημαντικές παραμέτρους για το ισοζύγιο μάζας, όπως ο όγκος νερού της περιοχής, το μέσο βάθος και το εμβαδόν της περιοχής.

## **Συστήματα Ταξινόμησης Παράκτιων Υδατικών Συστημάτων**

Για τη κατανόηση των παράκτιων υδατικών συστημάτων προσπαθούμε να αναπτύξουμε θεωρητικές προσεγγίσεις με εφαρμογή σε όσο γίνεται μεγαλύτερο εύρος παράκτιων λεκανών. Καθώς η επιστήμη προσπαθεί να γενικεύσει τη δυναμική συμπεριφορά των διαφόρων συστημάτων, η ταξινόμηση των παράκτιων συστημάτων προσφέρει παρόμοιες προσεγγίσεις σε συστήματα που ανήκουν στην ίδια ταξινομική ομάδα. Για τη ταξινόμηση των παράκτιων συστημάτων υπάρχουν διεθνώς τρία γενικά συστήματα: α) το μορφολογικό σύστημα, β) το γεωμορφολογικό σύστημα, και γ) το σύστημα στρωματοποίησης. Το μορφολογικό σύστημα βασίζεται στα μορφολογικά χαρακτηριστικά της παράκτιας περιοχής, όπως η παράμετρος έκθεσης, το εμβαδόν και το σχήμα της. Η γεωμορφολογική κατάταξη βασίζεται στα τοπογραφικά και γεωλογικά χαρακτηριστικά του κάθε συστήματος, καθώς και στη δυναμική ιζημάτων που εισέρχονται σε αυτό. Το σύστημα στρωματοποίησης αναφέρεται στην ύπαρξη στρωμάτων (layers) νερού με διαφορετική πυκνότητα (συνήθως προερχόμενο από διαφορετικές πηγές, όπως το ποτάμιο νερό χαμηλής πυκνότητας και το ωκεάνιο νερό υψηλής πυκνότητας).

Σε σχέση με το μορφολογικό σύστημα ταξινόμησης, χρησιμοποιείται η παράμετρος έκθεσης  $E_x$ . Παράκτιες περιοχές με τιμές  $E_x$  μικρότερες του 0.002 θεωρούνται 'πολύ κλειστά παράκτια συστήματα'. Παράκτιες περιοχές με τιμές μεγαλύτερες του 1.3 θεωρούνται 'ανοικτά παράκτια συστήματα'. Τέλος, παράκτιες περιοχές με τιμές  $E_x$  μεταξύ του 0.002 και 1.3 θεωρούνται 'ημίκλειστα παράκτια συστήματα'. Αναλυτικά, το μορφολογικό σύστημα ταξινόμησης δίνεται στο Πίνακα 1.

Πίνακας 1. Μορφολογική ταξινόμηση παράκτιων συστημάτων με βάση τη παράμετρο έκθεσης του συστήματος (Lindgren and Hakanson, 2007).

Τιμή $E_x$	Χαρακτηρισμός Συστήματος	Τυπικά Συστήματα
0-0.002	Κλειστά έως πολύ κλειστά συστήματα	Οι περισσότερες λιμνοθάλασσες
0.002-1.3	Ημίκλειστα συστήματα	Κόλποι, φιόρδς
>1.3	Ανοικτά συστήματα	Ανοικτές ακτές

Άλλη μορφολογική παράμετρος είναι το εμβαδόν της παράκτιας περιοχής. Το εμβαδόν μαζί με το μέσο βάθος ορίζουν τον όγκο νερού της παράκτιας περιοχής. Με βάση το εμβαδόν, οι περιοχές κατατάσσονται σε:

Πίνακας 2. Ταξινόμηση παράκτιων περιοχών με βάση το εμβαδόν τους.

Εμβαδόν παράκτιας περιοχής ( $\text{km}^2$ )	Χαρακτηρισμός περιοχής
> 10.000	Πολύ μεγάλη
1.000-10.000	Μεγάλη
100-1.000	Ενδιάμεση
10-100	Μικρή
< 10	Πολύ μικρή

Άλλη σημαντική μορφολογική παράμετρος είναι το σχήμα της παράκτιας περιοχής. Το σχήμα της επηρεάζει άμεσα τη ποσότητα των ιζημάτων που θα υποστούν την επίδραση του ανέμου και των κυμάτων καθώς και το εμβαδόν της περιοχής όπου συμβαίνει επαναιώρηση των ιζημάτων πυθμένα. Αυτό στη συνέχεια επηρεάζει την εσωτερική φόρτιση του συστήματος σε αιωρούμενα συστατικά. Επιπλέον, το σχήμα της ακτής επηρεάζει την ανάπτυξη μακροφυκών και βενθικής άλγης και συνεπώς επηρεάζει τη παραγωγικότητα του συστήματος. Γενικά, οι μεγάλοι βάθους ακτές σχήματος U έχουν μικρότερο εμβαδόν ευφωτικής ζώνης. Όσο μεγαλύτερο το εμβαδόν της ευφωτικής ζώνης, τόσο υψηλότερη είναι η πρωτογενής παραγωγικότητα της περιοχής σε φυτοπλαγκτόν, βενθική άλγη και μακροφύκη, άρα και υψηλότερη η βιολογική αξία και τα απαιτούμενα μέτρα προστασίας της περιοχής. Συνεπώς αυτές είναι περιοχές όπου θα πρέπει να είμαστε ιδιαίτερα προσεκτικοί στην ανάπτυξη παράκτιων τουριστικών υποδομών (μαρίνες, λιμάνια) ή στην εκπομπή ρύπων.

Ο παράγοντας σχήματος της περιοχής  $V_d$  εκφράζεται ως:

$$V_d = \frac{3D_m}{D_{\max}}$$

Όπου  $D_{\max}$  (σε  $\mu$ ) είναι το μέγιστο βάθος της παράκτιας περιοχής. Με βάση το παράγοντα σχήματος, οι παράκτιες περιοχές κατατάσσονται σε:

Πίνακας 3. Μορφολογική ταξινόμηση παράκτιων συστημάτων με βάση τη παράμετρο έκθεσης του συστήματος (Håkanson, 2004).

Σχήμα Περιοχής	Συμβολισμός Συστήματος	Τιμή $V_d$
Εξαιρετικά κυρτή	VCx	0.05 – 0.33
Κυρτή	Cx	0.33 – 0.67
Ελαφρά κυρτή	SCx	0.67 – 1.00
Γραμμική	L	1.00 – 1.33
Κοίλη	C	1.33 – 2.00

Τέλος, ο δυναμικός λόγος DR είναι μία παράμετρος που περιγράφει τη κατανομή του βάθους στη παράκτια περιοχή. Ορίζεται ως:

$$DR = \sqrt{\frac{Area}{D_m}}$$

Όπου area είναι το εμβαδόν της παράκτιας περιοχής (σε  $\text{km}^2$ ) και  $D_m$  το μέσο βάθος (σε  $\mu$ ). Ο λόγος αυτός συνδέεται με την επαναιώρηση και την απόθεση ιζημάτων και μέσω αυτών τη φόρτιση ή τη βύθιση των θρεπτικών αλάτων σε μία παράκτια περιοχή. Σε κάθε παράκτια περιοχή υπάρχει μία ρηχή ζώνη όπου η δυναμική πυθμένα επηρεάζεται από τα ρεύματα και τα κύματα, με αποτέλεσμα τη μεταφορά και διάβρωση των ιζημάτων. Συνήθως η ζώνη αυτή έχει εμβαδόν μεγαλύτερο του 15% της περιοχής, αντιστοιχώντας σε τιμή  $DR = 0.25$ . Αυτό σημαίνει ότι οι περιοχές απόθεσης ιζήματος καταλαμβάνουν περίπου το 85% της συνολικής παράκτιας περιοχής. Σε σχετικά ρηχές περιοχές, με τιμές  $DR > 0.25$ , η επίδραση του ανέμου και των κυμάτων είναι αυξημένη, με αποτέλεσμα τη καλύτερη οξυγόνωση του πυθμένα, τη μεγαλύτερη επαναιώρηση ιζημάτων και τη φόρτιση της υδάτινης στήλης σε θρεπτικά άλατα. Αντίθετα, σε περιοχές σχετικά μεγαλύτερου βάθους, με τιμές  $DR < 0.25$ , η πιθανότητα εμφάνισης ανοξικών συνθηκών πυθμένα αυξάνεται, λόγω των αυξημένων χρόνων ανανέωσης του νερού πυθμένα. Οι συνθήκες αυτές επηρεάζουν την επιβίωση και ανάπτυξη της βενθικής χλωρίδας και πανίδας, και είναι δυνατόν να προκαλέσουν τη διαλυτοποίηση του φωσφόρου των ιζημάτων.

Σε σχέση με τη δυναμική των ιζημάτων πυθμένα, διακρίνουμε τις παρακάτω διεργασίες:

- Περιοχές διάβρωσης (Erosion Areas), όπου δεν συμβαίνει απόθεση αλλά κυριαρχεί η μεταφορά λεπτόκοκκων ιζημάτων. Περιοχές διάβρωσης έχουν συνήθως σκληρό υπόστρωμα, αποτελούμενο από αδρομερή άμμο, χαλίκια και συμπαγείς βράχους με χαμηλό οργανικό υλικό και χαμηλές συγκεντρώσεις θρεπτικών αλάτων και ρύπων.
- Περιοχές μεταφοράς (Transportation Areas), όπου επικρατούν τα λεπτομερή ιζήματα τα οποία αποτίθενται περιοδικά. Χαρακτηρίζονται από μεικτά λεπτόκοκκα και αδρομερή ιζήματα εμφανίζονται σε περιοχές όπου η ανεμογενής – κυματική δράση αντισταθμίζεται από τις συνθήκες δυναμικής πυθμένα. Στις περιοχές αυτές είναι δύσκολο να διακρίνουμε περιοχές διάβρωσης από αυτές της απόθεσης.
- Περιοχές απόθεσης (Accumulation Areas), όπου επικρατεί η συνεχής απόθεση των λεπτόκοκκων ιζημάτων. Χαρακτηρίζονται από λεπτόκοκκα ιζήματα, όπου όμως εμφανίζονται υψηλές συγκεντρώσεις ρύπων.

Με βάση τα παραπάνω, η κατάταξη των παράκτιων περιοχών ως προς το δυναμικό λόγο DR δίνεται στο Πίνακα 4.

Πίνακας 4. Μορφολογική ταξινόμηση παράκτιων συστημάτων με βάση το δυναμικό λόγο του συστήματος.

Χαρακτηρισμός Περιοχής	Τιμή DR	Περιγραφή
Πολύ μεγάλου βάθους	<0.064	Περιοχές με έντονες κλίσεις πυθμένα, και έντονες διεργασίες μεταφοράς και διάβρωσης ιζημάτων
Μεγάλου βάθους	0.064 – 0.25	Περιοχές με σχετικά υψηλές κλίσεις πυθμένα, όπου συμβαίνουν διεργασίες διάβρωσης, μεταφοράς και απόθεσης λεπτόκοκκων ιζημάτων
Ενδιάμεσου βάθους	0.25 – 4.1	Περιοχές επηρεαζόμενες από τις ανεμογενείς και κυματικές διεργασίες όπου συμβαίνουν διεργασίες διάβρωσης, μεταφοράς και απόθεσης λεπτόκοκκων ιζημάτων
Μικρού βάθους	> 4.1	Περιοχές επηρεαζόμενες από τις ανεμογενείς και κυματικές διεργασίες όπου συμβαίνουν διεργασίες διάβρωσης και μεταφοράς λεπτόκοκκων ιζημάτων

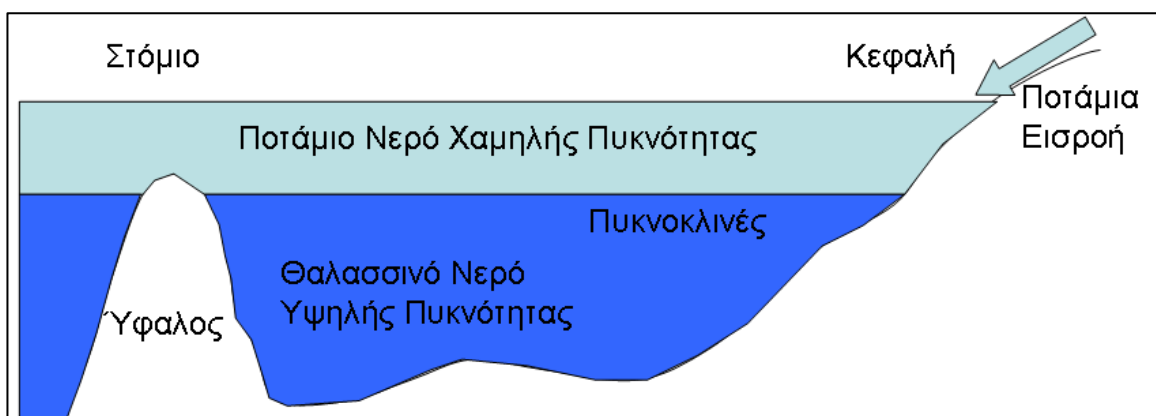
Σε σχέση με τη γεωμορφολογική ταξινόμηση, σημειώνουμε ότι όλα τα παράκτια συστήματα χρονολογούν την ύπαρξή τους από τη τελευταία μεσοπαγετώδη περίοδο (περίπου 20.000 χρόνια πριν), όταν η στάθμη της θάλασσας ανήλθε κατά περίπου 120 μέτρα. Καθώς τα παράκτια συστήματα βρίσκονται σε συνεχή γεωμορφική μεταβολή, η θέση τους στο γεωμορφολογικό σύστημα κατάταξης είναι δυνατόν να αλλάξει. Οι κύριες γεωμορφολογικές ομάδες παράκτιων υδατικών συστημάτων είναι:

α) Οι πλημμυρισμένες ποταμοεκβολές (drowned river valleys).

Πρόκειται για λεκάνες που προέκυψαν από τη επέκταση της θάλασσας σε μία υπάρχουσα ποτάμια κοιλάδα, οπότε τα χερσαία όρια του συστήματος είναι μία ισοϋψής καμπύλη της παλαιάς υδρολεκάνης. Τα συστήματα αυτά έχουν συνήθως ένα σχήμα V από το ποτάμιο κανάλι, και είναι μικρού βάθους (>20 μ.) και διαθέτουν ομαλές πλευρικές κλίσεις.

β) τα φιόρδ (fjords)

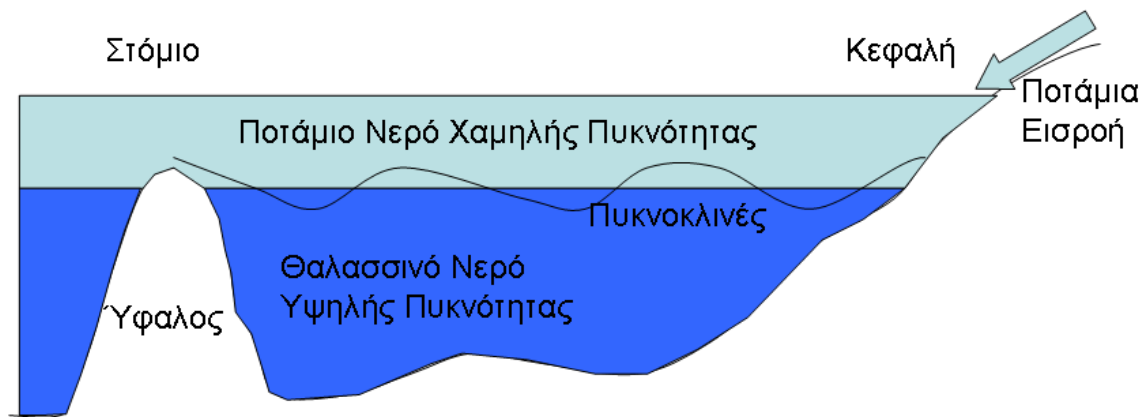
Είναι πλημμυρισμένες παγετώδεις κοιλάδες που πλημμύρισαν με θαλασσινό νερό. Χαρακτηρίζονται από την ύπαρξη ενός υφάλου, προερχόμενου από το υλικό διάβρωσης του παγετώνα το οποίο αποτίθεται κοντά στο στόμιό τους, και από την εισροή ποταμού στη κεφαλή τους. Τα φιόρδ είναι γενικά βαθύτερα από τα συστήματα της προηγούμενης κατηγορίας, και διαθέτουν απότομες πλαγιές. Λόγω της παρουσίας νερού διαφορετικών πυκνοτήτων τα φιόρδ είναι συνήθως στρωματοποιημένα, με το βαρύτερο θαλασσινό νερό να εγκλωβίζεται στο πυθμένα πίσω από τον ύφαλο που ενεργεί ως φυσικό φράγμα (Σχήμα 8).



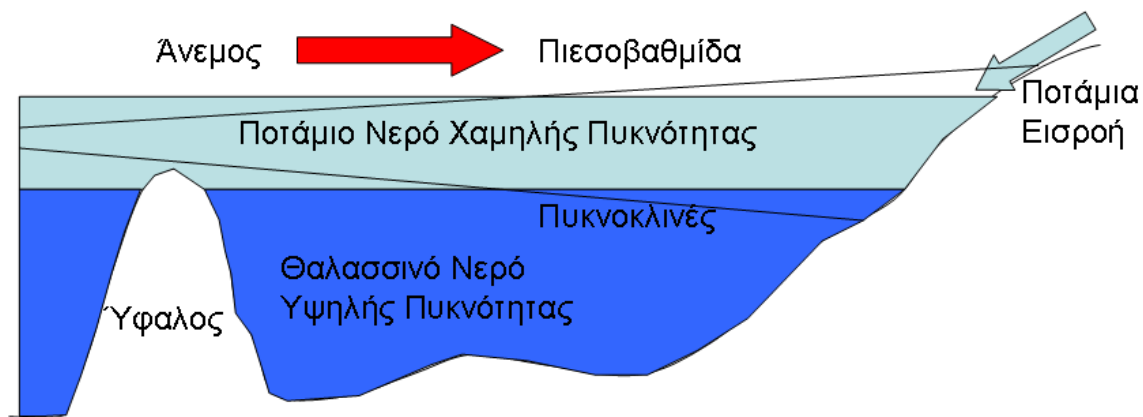
**Σχήμα 8.** Τυπική διατομή ενός φιόρδ.

Η λεκάνη του φιόρδ θα αποκτήσει έτσι έναν υψηλό βαθμό στρωματοποίησης ο οποίος εμποδίζει τη κατακόρυφη ανάμειξη. Το πλέον σύνηθες για το εγκλωβισμένο νερό του

πυθμένα είναι να εμφανίζει σημάδια υποξίας, δηλ. χαμηλή περιεκτικότητα σε διαλυμένο οξυγόνο, πολύ κάτω από τα επίπεδα κορεσμού. Αυτό αποτελεί το κύριο αποτέλεσμα της έντονης κατακόρυφης στρωματοποίησης, καθώς δεν είναι δυνατή η κατακόρυφη μεταφορά οξυγόνου από την ατμόσφαιρα. Παράλληλα το πυθμιαίο νερό μειώνει τη συγκέντρωση οξυγόνου του λόγω της αναπνοής από τους ζωικούς οργανισμούς του πυθμένα και την αποσύνθεση του οργανικού υλικού που ζει στην επιφάνεια αλλά μόλις πεθάνει βυθίζεται προς το πυθμένα.



(α)



(β)

**Σχήμα 9.** Ανανέωση νερού πυθμένα σε φιόρδ, λόγω α) της εμφάνισης εσωτερικών κυμάτων στο πυκνοκλινές, και β) της επίδρασης του ανέμου που προκαλεί πιεσοβαθμίδα μέσω ανόδου της στάθμης της θάλασσας που εξισορροπείται από αντίθετη κίνηση του πυκνοκλινούς.

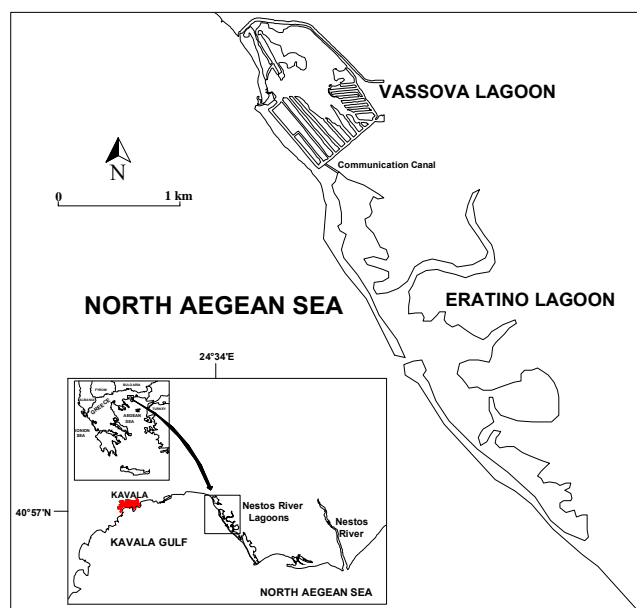
Η ανανέωση του νερού στο πυθμένα του φιόρδ μπορεί να προέλθει από δύο μηχανισμούς: α) εάν το όριο διαχωρισμού του νερού χαμηλής και υψηλής πυκνότητας (το οποίο ονομάζεται πυκνοκλινές) βρίσκεται κοντά στη κορυφή του υφάλου, τότε παράγονται εσωτερικά κύματα (internal waves) τα οποία συμβάλουν στη μεταφορά νερού πυθμένα πάνω από τον ύφαλο και έξω από τη λεκάνη του φιόρδ (Σχήμα 9α). β)



Η επίδραση του ανέμου είναι δυνατόν αν μεταφέρει νερό πάνω από τον ύφαλο, καθώς ο άνεμος που κινείται από το στόμιο προς τη κεφαλή του φιόρδ, αυξάνει τη στάθμη της θάλασσας στη κεφαλή. Η πιεσοβαθμίδα που προκαλείται με φορά από τη κεφαλή προς το στόμιο, εξισορροπείται από την άνοδο του πυκνοκλινούς στη περιοχή του στομίου, ένα φαινόμενο που ονομάζεται upwelling (Σχήμα 9β).

#### γ) οι παράκτιες λιμνοθάλασσες (bar-built estuaries & coastal lagoons)

Πρόκειται για ρηχές λεκάνες που οφείλουν τον ημίκλειστο χαρακτήρα τους στην προέκταση ενός αμμώδους συνήθως βραχίονα (spit, sand bar) που τροφοδοτείται με ίζημα από τα διαμήκη παράκτια ρεύματα. Η λεκάνη δημιουργείται κατά την έξοδο στη θάλασσα ενός ή περισσοτέρων ποταμών. Το μέγεθος του ανοίγματος που επιτρέπει ο βραχίονας εξαρτάται από τη ποτάμια ροή ή τη παλιρροιακή κυκλοφορία, και σε πολλές περιπτώσεις η λεκάνη αποκλείεται κατά περιόδους (Σχήμα 10). Τα συστήματα αυτά είναι κοινά σε περιοχές με εποχιακά έντονες βροχοπτώσεις, όταν τα ποτάμια μεταφέρουν υψηλές ποσότητες φερτών υλών, οι οποίες αναδιατάσσονται και μεταφέρονται παράλληλα με την ακτογραμμή, λόγω του διαμήκους παράκτιου ρεύματος, κατά τους μήνες χαμηλής βροχόπτωσης. Με το μηχανισμό αυτό σχηματίζεται και προωθείται ο βραχίονας των παράκτιων λιμνοθαλασσών. Οι λεκάνες των συστημάτων αυτών είναι συνήθως ρηχές (μερικά μέτρα βάθος). Το στόμιο του συστήματος έχει τη μορφή στενού καναλιού που παράγει έντονα παλιρροιακά ρεύματα (0.15 m/s ή μεγαλύτερα), με μεγέθη ικανά να μεταφέρουν ιζήματα ακόμη και μεγάλης κοκκομετρικής διαμέτρου. Το παλιρροιακό στόμιο συνήθως περιορίζει την επίδραση των παλιρροιών στο εσωτερικό της λεκάνης, προκαλώντας μία διαφορά φάσης μεταξύ της ημίκλειστης λεκάνης και της παρακείμενης ανοικτής θάλασσας που μπορεί να φθάσει τις 90° σε πολύ στενά κανάλια. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι η άνοδος της στάθμης στη λεκάνη είναι σχεδόν μηδενική όταν η ωκεάνια στάθμη βρίσκεται στο μέγιστο ή στο ελάχιστό της.

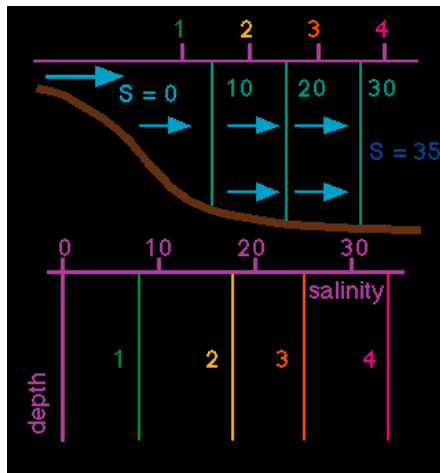


**Σχήμα 10.** Οι λιμνοθάλασσες Βάσσοβας και Ερατεινού αποτελούν χαρακτηριστικά δείγματα αυτής της κατηγορίας παράκτιων υδατικών συστημάτων.

Σε σχέση με τη ταξινόμηση με βάση τη στρωματοποίηση, προκύπτει ότι γενικά το γλυκό νερό που εισέρχεται στα παράκτια αυτά συστήματα δημιουργεί ένα ανώτερο στρώμα νερού χαμηλής πυκνότητας που καλύπτει την επιφάνεια του συστήματος και εξέρχεται προς την ανοικτή θάλασσα. Ταυτόχρονα, συμβαίνει η εισροή ωκεάνιου νερού με μεγαλύτερη πυκνότητα που καταλαμβάνει το κατώτερο στρώμα του συστήματος. Η παρουσία των δύο διαφορετικών στρωμάτων συνοδεύεται από την εμφάνιση της μεταξύ τους διεπιφάνειας, μέσω της οποίας γίνεται η μείξη των δύο υδάτινων μαζών. Η ταξινόμηση αυτή σχετίζεται με το βαθμό στρωματοποίησης – μείξης των δύο αυτών στρωμάτων, η οποία προσδιορίζει και τη κατανομή των λοιπών παραμέτρων νερού και ρύπων στο σύστημα. Οι κύριες κατηγορίες των παράκτιων υδατικών συστημάτων είναι:

α) συστήματα πλήρους ανάμειξης

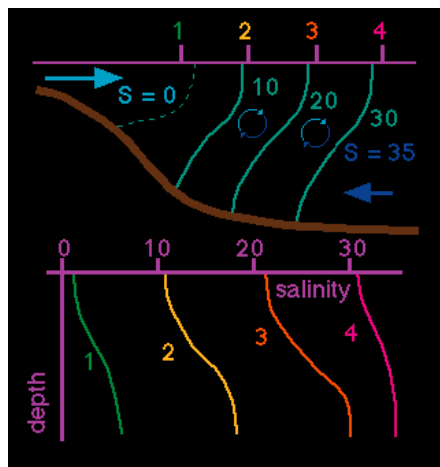
Είναι ρηχά συστήματα μικρού όγκου στα οποία η αλατότητα σε κάθε σημείο είναι σχετικά ομοιόμορφη από την επιφάνεια ως το πυθμένα, λόγω της πλήρους ανάμειξης του ποτάμιου και του θαλασσινού νερού. Η ανάμειξη που συμβαίνει είναι τυρβώδης οπότε το σύστημα χαρακτηρίζεται από υψηλή παρουσία τύρβης σε όλα τα βάθη. Ταυτόχρονα, η αλατότητα εμφανίζει διαμήκη αύξηση από τη κεφαλή του συστήματος προς το στόμιό του (Σχήμα 11).



**Σχήμα 11.** Σκαρίφημα κατανομής αλατότητας κατά μήκος ενός πλήρους αναμειγμένου παράκτιου υδατικού συστήματος.

### β) συστήματα μερικής ανάμειξης

Πρόκειται για συνήθως ρηχά συστήματα στα οποία η αλατότητα αυξάνει σταδιακά από τη κεφαλή προς το στόμιο σε κάθε βάθος. Αναγνωρίζονται δύο βασικά στρώματα νερού: το νερό χαμηλής αλατότητας που έχει ποτάμια προέλευση, και το θαλασσινό νερό που καταλαμβάνει το πυθμένα. Τα δύο στρώματα διαχωρίζονται από μία ζώνη μείξης. Στα συστήματα αυτά αναπτύσσεται η τυπική κυκλοφορία ποταμοεκβολών (estuarine circulation), καθώς υπάρχει μία καθαρή επιφανειακή ροή προς τον ωκεανό και μία ροή αντίθετης φοράς του υπο-επιφανειακού θαλάσσιου νερού (Σχήμα 12).

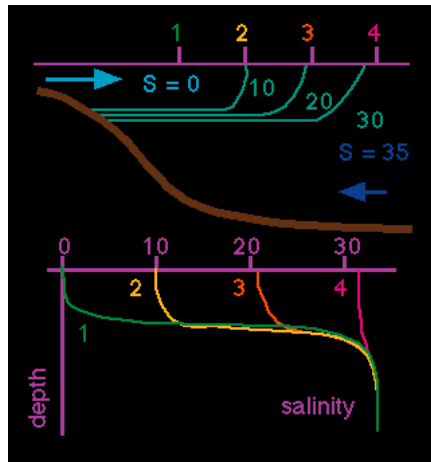


**Σχήμα 12.** Σκαρίφημα κατανομής αλατότητας κατά μήκος ενός μερικά αναμειγμένου παράκτιου υδατικού συστήματος.

### γ) συστήματα υψηλής στρωμάτωσης

Τυπικά βαθιά συστήματα στα οποία η αλατότητα του ανώτερου στρώματος αυξάνει από τη κεφαλή προς το στόμιο, όπου αποκτά τιμή σχεδόν ίση με αυτή του ανοικτού ωκεανού. Ωστόσο, το βαθύτερο στρώμα χαρακτηρίζεται από μία σχετικά ομοιόμορφη

ωκεάνια αλατότητα, σε κάθε βάθος σε όλο το μήκος του συστήματος. Η καθαρή ροή των δύο στρωμάτων είναι όμοια με αυτή των μερικά αναμεμιγμένων συστημάτων, εκτός από το ότι η μείξη που συμβαίνει στην διεπιφάνεια προκαλεί την εισροή νερού από το στρώμα πυθμένα προς το επιφανειακό στρώμα. Αντίθετα, το νερό χαμηλής αλατότητας δεν φαίνεται να διαλυτοποιείται στο βαθύτερο στρώμα και απλά κινείται από τη κεφαλή προς το στόμιο του συστήματος. Στο εσωτερικό του συστήματος αναπτύσσεται ένα ισχυρό αλοκλινές στη διεπιφάνεια, με αλοβαθμίδα (διαφορά αλατότητας με το βάθος στη διεπιφάνεια) της τάξης των 20‰ (Σχήμα 13).

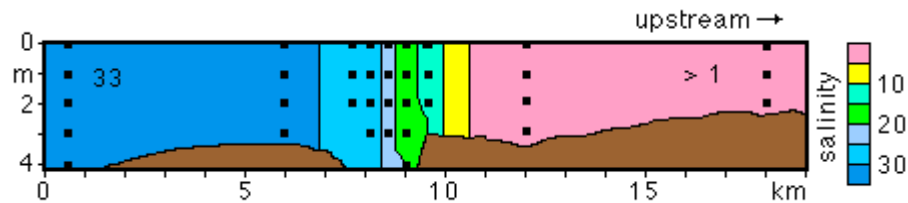


**Σχήμα 13.** Σκαρίφημα κατανομής αλατότητας κατά μήκος ενός ισχυρά στρωματοποιημένου παράκτιου υδατικού συστήματος.

## Παραδείγματα Ταξινόμησης Παράκτιων Υδατικών Συστημάτων

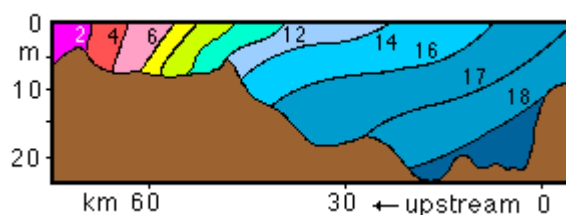
Τα πλήρως αναμιγμένα συστήματα είναι εξαιρετικά σπάνια στη πραγματικότητα, ωστόσο αρκετά συστήματα προσεγγίζουν αυτές τις συνθήκες. Για τη κατάταξή τους σε αυτή τη κατηγορία συγκρίνουμε το λόγο  $R/V$ , όπου  $R$  είναι ο όγκος γλυκού νερού που εισέρχεται στο σύστημα κατά τη διάρκεια ενός παλιρροιακού κύκλου (12.5 ώρες) και  $V$  ο παλιρροιακός όγκος δηλ. ο όγκος νερού που εισέρχεται από την ανοικτή θάλασσα στο σύστημα κατά τη φάση πλήμμης της παλίρροιας. Τα συστήματα πλήρους ανάμειξης χαρακτηρίζονται από πολύ χαμηλούς λόγους  $R/V$ , μικρότερους του 0.005. Αυτό σημαίνει ότι το γλυκό ποτάμιο νερό έχει όγκο πολλές τάξεις μικρότερο αυτού της θαλάσσιας εισροής. Συμβαίνει σε περιοχές με πολύ μεγάλο παλιρροιακό εύρος, όπου δημιουργούνται έντονα παλιρροιακά ρεύματα, τα οποία εισάγουν τύρβη στο σύστημα προκαλώντας τη πλήρη κατακόρυφη ανάμειξη. Τέτοιο σύστημα είναι ο Κόλπος Fundy στο Καναδά με παλιρροιακό εύρος 14 μ. Άλλο παράδειγμα είναι το Myall River στην

Αυστραλία, όπου η ποτάμια παροχή είναι πολύ μικρότερη της παλιρροιακής εισροής (Σχήμα 14).



**Σχήμα 14.** Κατανομή αλατότητας κατά μήκος του Myall River.

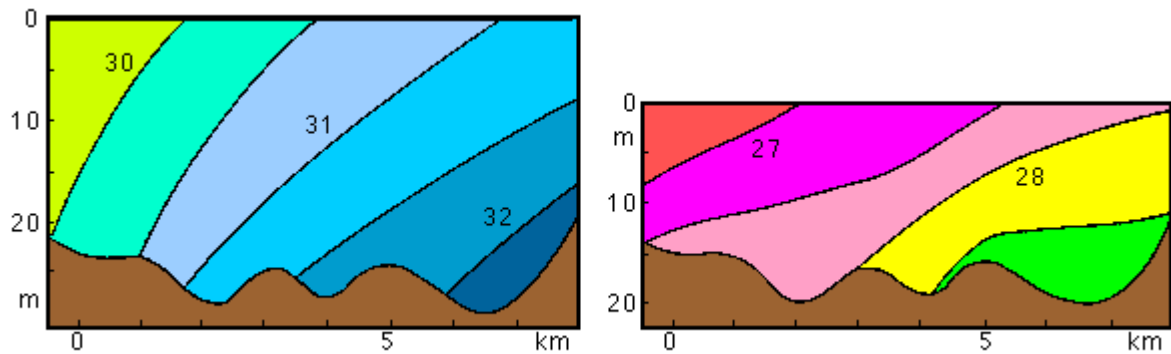
Στα συστήματα μερικής ανάμειξης, ο λόγος R/V είναι αυξημένος μεταξύ 0.005 – 0.1. Τα παλιρροιακά ρεύματα είναι ιδιαίτερα έντονα ώστε το σύστημα γίνεται παντού τυρβώδες. Στα ρηχά συστήματα η τύρβη είναι το αποτέλεσμα της τριβής πυθμένα, δημιουργώντας διατμητικές τάσεις μέσα στην υδάτινη στήλη. Η τυρβώδης μείξη που αναπτύσσεται προκαλεί ανταλλαγή μάζας, ορμής και άλατος μεταξύ των δύο στρωμάτων και προς τις δύο κατευθύνσεις. Παράδειγμα τέτοιων συστημάτων είναι το Chesapeake Bay στην ακτή του Ατλαντικού Ωκεανού στις ΗΠΑ, που τροφοδοτείται από το ποταμό Susquehanna μήκους 300 χλμ. με πλήθος παραποτάμους και υψηλή ποτάμια παροχή. Το Σχήμα 15 παρουσιάζει τη κατανομή αλατότητας κατά μήκος του κόλπου. Η αλατότητα μεταβάλλεται σε όλο το μήκος του σε οποιοδήποτε βάθος, προκαλώντας ένα επιφανειακό στρώμα με αλατότητα 12-17 ‰ και ένα στρώμα πυθμένα με αλατότητα 15-18 ‰.



**Σχήμα 15.** Κατανομή αλατότητας κατά μήκος του Chesapeake Bay.

Άλλο παράδειγμα είναι η ποταμοεκβολή του Mersey River στο Liverpool. Το ποτάμι εκβάλλει στην Ιρλανδική Θάλασσα αφού περάσει ένα στενό διάυλο μήκους 8 χλμ. και πλάτους 1-2 χλμ. Το παλιρροιακό εύρος στα στενά υπερβαίνει τα 5 μ και φθάνει τα 9.4 μ σε συνθήκες παλίρροιας μεγάλου εύρους. Η μέση ποτάμια παροχή είναι 25 m<sup>3</sup>/s, η οποία θεωρείται μικρή σε σχέση με το παλιρροιακό όγκο των περίπου 200 m<sup>3</sup>/s. Ως αποτέλεσμα το νερό πυθμένα κινείται παλινδρομικά μέσα και έξω από το σύστημα

καλύπτοντας αποστάσεις αρκετών χιλιομέτρων, κάμπτοντας τις ισόαλες καμπύλες από την επιφάνεια προς το πυθμένα (Σχήμα 16).

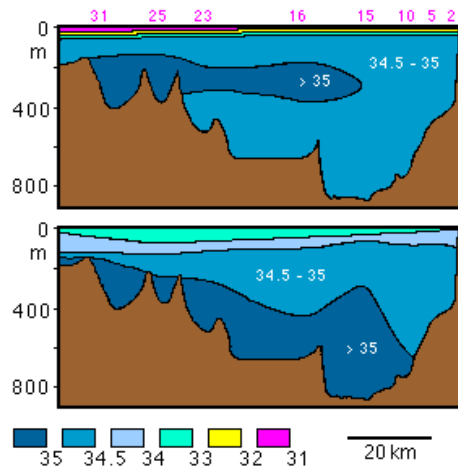


**Σχήμα 16.** Κατανομή αλατότητας κατά μήκος του Mersey River υπό συνθήκες πλήμμης (εισόδου θαλασσινού νερού) και άμπωτης (εξόδου θαλασσινού νερού).

Η αύξηση του λόγου  $R/V$  στα επίπεδα των 0.1 – 1.0 μετατρέπει το σύστημα σε ισχυρά στρωματωποιημένο. Το επιφανειακό στρώμα γλυκού νερού κινείται αντίθετα σε σχέση με το παλιρροιακό ρεύμα δημιουργώντας έντονη διατμητική τάση στη διεπιφάνεια. Η τάση αυτή δημιουργεί αστάθειες με τη μορφή εσωτερικών κυμάτων που συχνά θραύονται τοπικά εκτοξεύοντας αλμυρό νερό στο ανώτερο στρώμα. Η διεργασία αυτή ονομάζεται εισδοχή (entrainment) και ορίζεται ως η μεταφορά μάζας και άλατος από το λιγότερο τυρβώδες στρώμα προς το στρώμα υψηλής τύρβης, επομένως η εισδοχή είναι διεργασία μονής κατεύθυνσης. Τυπικό παράδειγμα τέτοιου συστήματος είναι το Silver Bay στο Καναδά με μήκος 8 χλμ, πλάτος 1 χλμ και μέσο βάθος 80 μ. Το παλιρροιακό εύρος είναι 2 μ παράγοντας παλιρροιακό ρεύμα περίπου 0.02 m/s. Η εισροή γλυκού νερού είναι κοντά στα 100 m<sup>3</sup>/s το καλοκαίρι, αλλά μόνο 5 m<sup>3</sup>/s το χειμώνα. Έτσι δημιουργείται ένα στρώμα πάχους περίπου 5 μ το καλοκαίρι που εξέρχεται με ταχύτητα 0.15 – 0.20 m/s. Η αλατότητα στο ανώτερο στρώμα κυμαίνεται από μηδενικές τιμές στη κεφαλή έως τα 28 ‰ στο στόμιο. Το χειμώνα το επιφανειακό νερό εξέρχεται με ταχύτητα 0.10 m/s καθώς το γλυκό νερό έχει μειωθεί σημαντικά.

Παρόμοιες συνθήκες έχουν παρατηρηθεί στο Hardanger Fjord, μήκους 100 χλμ. και βάθους 850 μ στη Νορβηγία. Η παροχή γλυκού νερού είναι της τάξης των 350-400 m<sup>3</sup>/s το καλοκαίρι και λιγότερο από 20 m<sup>3</sup>/s το χειμώνα. Το Σχήμα 16 παρουσιάζει τη κατανομή αλατότητας και στις δύο εποχές. Βλέπουμε ότι το καλοκαίρι το επιφανειακό στρώμα έχει πάχος 50 μ, ενώ το πυθμιαίο στρώμα καλύπτει πάχος 150 – 300 μ, κινούμενο ελαφρά πάνω από τον ύφαλο που βρίσκεται σε βάθος 150 μ. Οι

επιφανειακές αλατότητες κυμαίνονται από σχεδόν μηδενικές τιμές στη κεφαλή έως τα 31 ‰ πάνω από τον ύφαλο. Η έντονη διεπιφάνεια διαχωρίζει τα δύο στρώματα. Το χειμώνα, λόγω της περιορισμένης ποτάμιας παροχής, η διεπιφάνεια αυξάνει το πάχος της προς το ανώτερο στρώμα, οπότε η τυρβώδης διάχυση μειώνει της αλοβαθμίδα μεταξύ των στρωμάτων.



**Σχήμα 17.** Κατανομή αλατότητας κατά μήκος του Hardanger Fjord το καλοκαίρι (πάνω διάγραμμα) και το χειμώνα (κάτω διάγραμμα).

## Κύριες Διεργασίες Παράκτιων Υδατικών Συστημάτων

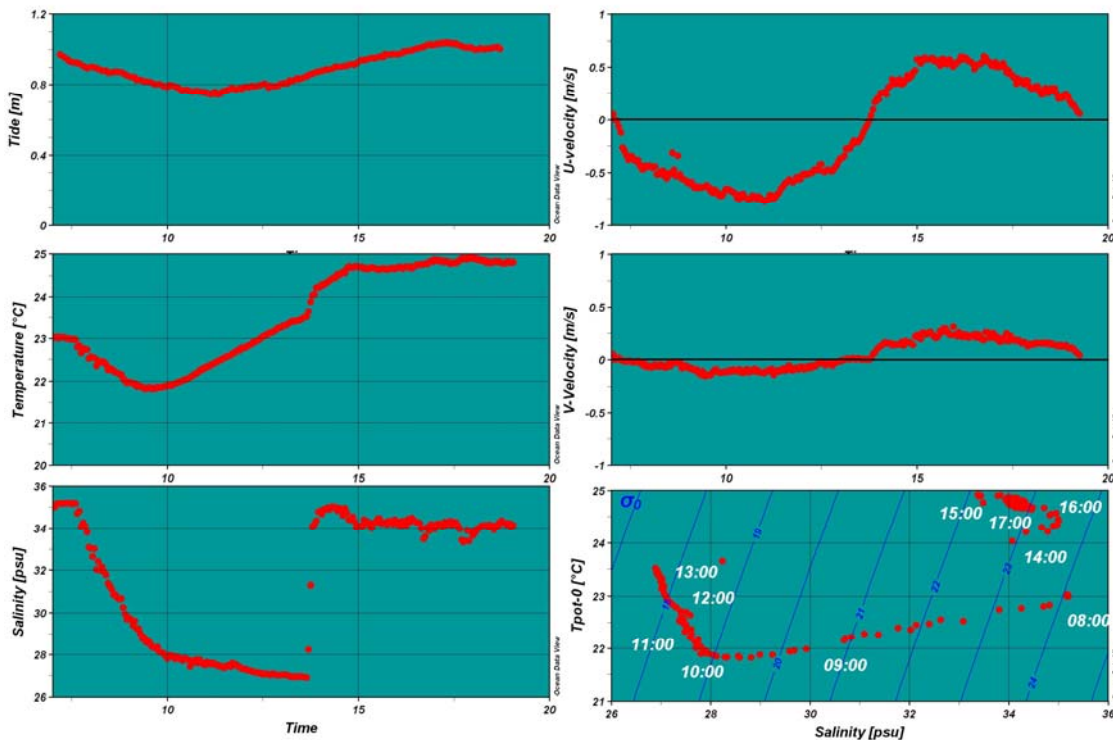
### Ανανεωσιμότητα Συστήματος

Η ανταλλαγή νερού με την ανοικτή θάλασσα αποτελεί βασική παράμετρο που ρυθμίζει την ανανεωσιμότητα του παράκτιου συστήματος και χαρακτηρίζει τη ευαισθησία του στον ευτροφισμό. Ο ρυθμός ανανέωσης  $R_{wat}$  (μονάδες 1/time) ορίζεται ως ο λόγος της συνολικής επιφανειακής παροχής σε μία παράκτια περιοχή ( $Q$ ) και του συνολικού της όγκου νερού ( $V$ ). Το  $Q$  είναι το άθροισμα όλων των επιφανειακών απορροών ( $Q_{trib}$ ), της επιφανειακής και υπο-επιφανειακής ανταλλαγής με τη παρακείμενη θάλασσα ( $Q_{sw}$  και  $Q_{dw}$ , αντίστοιχα). Ο όγκος  $V$  προκύπτει από το γινόμενο της έκτασης της παράκτιας περιοχής ( $A_{rea}$ ) και του μέσου βάρους ( $D_m$ ).

Οι επιφανειακές και υπο-επιφανειακές ανταλλαγές νερού λαμβάνουν χώρα εξαιτίας των παρακάτω φαινομένων και διεργασιών:

## A) Παλιρροιακά Ρεύματα (Tidal Currents)

Η ένταση των παλιρροιακών ρευμάτων εξαρτάται από το λόγο του παλιρροιακού εύρους της στάθμης της θάλασσας προς το μέσο βάθος της παράκτιας λεκάνης. Συνήθως ο λόγος αυτός κυμαίνεται μεταξύ 10 και 100%. Αυτό σημαίνει ότι τα παλιρροιακά ρεύματα στις παράκτιες λεκάνες είναι γενικά μεγάλης έντασης. Τα ρεύματα αυτά έχουν σημαντική επίδραση στη μετακίνηση αιωρούμενου υλικού (σωματιδίων, όπως ρύποι, ιζήματα, πλαγκτόν, κλπ.), προκαλώντας την οριζόντια διασπορά τους ή/και τη κατακόρυφη μείξη τους. Τα έντονα παλιρροιακά ρεύματα μπορούν να διαβρώσουν το θαλάσσιο πυθμένα προκαλώντας την επανα-αιώρηση των ιζημάτων. Το μέσο παλιρροιακό εύρος στο Παγκόσμιο Ωκεανό είναι της τάξης του 1 μ, ωστόσο σε κάποιους ωκεανούς φθάνει τα 2-3 μ. Το εύρος αυτό ενισχύεται στις παράκτιες λεκάνες, όπου λόγω του φαινομένου του συντονισμού (resonance) παράγονται μακροπαλίρροιες (macrotides), δηλ. παλίρροιες με πολύ υψηλό εύρος.



**Σχήμα 18.** Μεταβολή της στάθμης της θάλασσας (αριστερά πάνω), της θερμοκρασίας (αριστερά μέση), της αλατότητας (αριστερά κάτω), παλιρροιακού ρεύματος (δεξιά πάνω), στη λιμνοθάλασσα Βάσσοβα κατά τη διάρκεια ενός πλήρους παλιρροιακού κύκλου.

Μόνο σε πολύ περιορισμένες λεκάνες συναντούμε χαμηλά παλιρροιακά εύρη, της τάξης των περίπου 20 εκ., που καλούνται μικροπαλίρροιες (micro-tides). Τέτοια περιορισμένη περιοχή είναι η λεκάνη της Μεσογείου όπου επικρατεί μικρο-



παλιρροιακό περιβάλλον με παλιρροιακά εύρη 20-40 εκ. Επομένως, οι παλίρροιες έχουν πολύ σημαντική επίδραση στη δυναμική των παράκτιων υδατικών συστημάτων, ενώ στην ανοικτή θάλασσα (και στο μεγαλύτερο τμήμα της ηπειρωτικής υφαλοκρηπίδας) δεν έχουν ιδιαίτερη σημασία. Το Σχήμα 18 παρουσιάζει τη μεταβολή των κύριων φυσικών παραμέτρων (θερμοκρασίας, αλατότητας), λόγω μεταβολής της στάθμης της θάλασσας, και της εναλλαγής των παλιρροιακών ρευμάτων, κατά τη διάρκεια ενός πλήρους παλιρροιακού κύκλου (Λιμνοθάλασσα Βάσσοβα, παλίρροια μεγάλου εύρους).

### B) Εισροή Γλυκού Νερού (Freshwater Inflow)

Το γλυκό νερό εισέρχεται στις παράκτιες λεκάνες μέσω των ποταμών, των χειμάρρων, καθώς και πιθανών υπόγειων εκροών (π.χ., υποθαλάσσιων πηγών). Η εισροή του προκαλεί την ανάπτυξη ενός επιφανειακού στρώματος χαμηλής πυκνότητας που κινείται από τη κεφαλή προς το στόμιο του συστήματος. Εισέρχεται επίσης στα παράκτια συστήματα μέσω της βροχόπτωσης. Το σχετικό μέγεθος της εισροής γλυκού νερού στα παράκτια συστήματα εξαρτάται από παράγοντες όπως το κλίμα, το χερσαίο ανάγλυφο, η αστικοποίηση, η απόληψη νερού για άρδευση, η βιομηχανική και ανθρώπινη χρήση νερού, κλπ. Η εισροή γλυκού νερού επηρεάζει τη δυναμική της παράκτιας λεκάνης καθώς μεταβάλλει τη κατανομή της αλατότητας, άρα και της πυκνότητας, ενώ προκαλεί την έξοδο μεγάλων όγκων θαλασσινού νερού από το σύστημα προς την ανοικτή θάλασσα. Η εξάτμιση επηρεάζει επίσης τα παράκτια συστήματα, καθώς κυρίως σε ξηρές περιοχές μπορεί να αποκτήσει πιο σημαντικό ρόλο από τη βροχόπτωση. Μία αύξηση ή μείωση της προσφερόμενης ποσότητας γλυκού νερού μεταβάλλει τη κατανομή αλατότητας και πυκνότητας προκαλώντας θετική ή αρνητική επίδραση στην άνωση (buoyancy) της υδάτινης στήλης.

### Γ) Επίδραση Ανέμου (Wind Forcing)

Η σημασία της επίδρασης του ανέμου αυξάνει στις παράκτιες λεκάνες λόγω του περιορισμένου βάθους της υδάτινης στήλης των λεκανών αυτών. Έτσι, η επίδραση του ανέμου επηρεάζει σχεδόν ολόκληρη την υδάτινη στήλη και όχι μόνο το επιφανειακό στρώμα (στρώμα Ekman) που επηρεάζεται στη περίπτωση του ανοικτού ωκεανού. Ωστόσο, το παραγόμενο ανεμογενές ρεύμα (wind-induced current) έχει ένταση υψηλότερη στην επιφάνεια της θάλασσας η οποία βαίνει σταδιακά μειούμενη με το βάθος. Σύμφωνα με παρατηρήσεις πεδίου, η ένταση του ανεμογενούς ρεύματος είναι

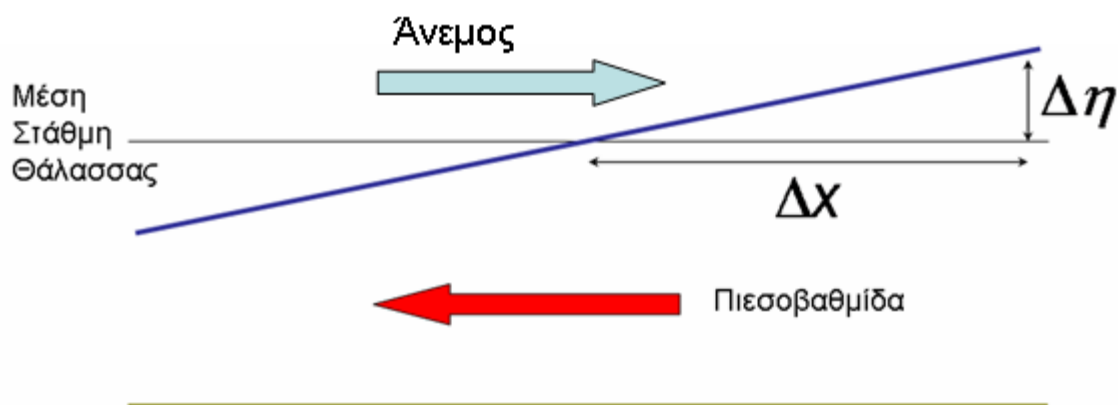
περίπου το 3% της έντασης του ανέμου που το δημιουργεί, η δε διεύθυνσή του εκτρέπεται κατά 45° δεξιόστροφα από τη διεύθυνση του ανέμου.

#### Δ) Επίδραση Τριβής Πυθμένα (Bottom Friction)

Η τριβή πυθμένα θεωρείται σημαντική δύναμη στη δυναμική ισορροπία των παράκτιων λεκανών, λόγω και πάλι του περιορισμένου βάθους τους. Αυτό οφείλεται σε δύο λόγους: α) στο γεγονός ότι η πυθμιαία τριβή είναι μία επιφανειακή δύναμη, επομένως αυξάνει τη σχετική σημασία της όταν το βάθος μειώνεται, προκαλώντας σημαντική επίδραση στη φυσική και οικολογική δυναμικών των παράκτιων συστημάτων, σε αντίθεση με την ανοικτή θάλασσα όπου η τριβή πυθμένα θεωρείται ότι επιδρά σε σχεδόν αμελητέο τμήμα της υδάτινης στήλης. β) ο δεύτερος λόγος είναι ότι η τριβή πυθμένα είναι σημαντική ώστε να αυξάνεται με το τετράγωνο της ταχύτητας του ρεύματος. Έτσι, καθώς οι παράκτιες λεκάνες εμφανίζουν πολύ υψηλότερα ρεύματα από την ανοικτή θάλασσα, η σημασία της τριβής πυθμένα στη παράκτια δυναμική αυξάνει.

#### Ε) Πιεσοβαθμίδα (Pressure Gradient)

Η κυρίαρχη δύναμη σε όλα τα ωκεάνια συστήματα είναι οριζόντια πιεσοβαθμίδα, η οποία προκαλείται από δύο διεργασίες: α) τη μεταβολή στη κλίση της στάθμης της θάλασσας, όταν το νερό είναι σταθερής πυκνότητας (βαροτροπική πιεσοβαθμίδα), και β) από τις οριζόντιες μεταβολές της πυκνότητας σε ένα δεδομένο επίπεδο βάθους της υδάτινης στήλης (βαροκλιτική πιεσοβαθμίδα). Η πιεσοβαθμίδα παράγεται άμεσα μέσω της μεταβολής της στάθμης της θάλασσας που προκαλούν οι παλίρροιες, η επίδραση της περιστροφής της Γης (δύναμη Coriolis), ο άνεμος και τα θραυόμενα κύματα. Τέλος, παράγεται από διαφορές πυκνότητας της υδάτινης στήλης, λόγω διαφορών θερμοκρασίας και αλατότητας, ειδικά στις περιοχές εισροής γλυκού νερού στα παράκτια συστήματα. Η πιεσοβαθμίδα είναι η δύναμη που αναπτύσσεται για να εξισορροπήσει οποιαδήποτε κίνηση του νερού από τις παραπάνω δυνάμεις. Στις παράκτιες λεκάνες η κίνηση του νερού προς μία κατεύθυνση (π.χ., λόγω επίδρασης ανέμου) προκαλεί μεταβολή της στάθμης της θάλασσας, η οποία γίνεται αντιληπτή μέσω της κλίσης της. Η κλίση της στάθμης της θάλασσας παράγει πιεσοβαθμίδα, η οποία έχει φορά αντίθετη προς την αρχική κίνηση του νερού (Σχήμα 20).

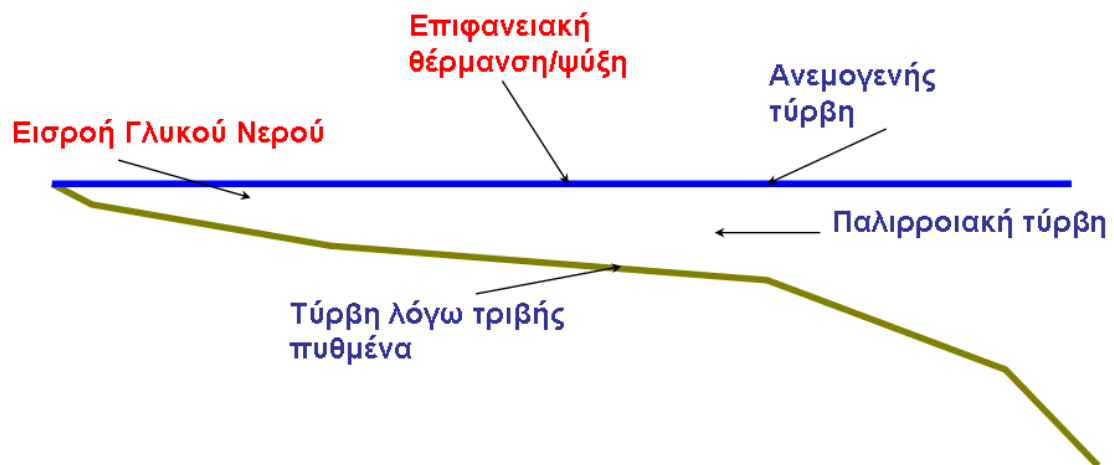


**Σχήμα 20.** Παραγωγή πιεσοβαθμίδας λόγω μεταβολής στάθμης θάλασσας ( $\Delta\eta$ ).

Η ολική πιεσοβαθμίδα (ολοκληρωμένη σε ολόκληρη την υδάτινη στήλη) που προκλήθηκε από τη κλίση της στάθμης είναι ανάλογη με το βάθος της στήλης νερού, ενώ η ανεμογενής τάση είναι ανεξάρτητη του βάθους του νερού. Έτσι, όταν ο άνεμος κινείται πάνω από μία παράκτια λεκάνη, παράγεται άνοδος στάθμης (wind set up) η οποία είναι αντιστρόφως ανάλογη του βάθους. Επομένως, οι παράκτιες περιοχές τείνουν να δημιουργούν σημαντικές ανόδους στάθμης λόγω ανέμων. Για παράδειγμα ένας τυπικός άνεμος που κινείται πάνω από μία παράκτια λεκάνη βάθους 2 μ και μήκους 20 χλμ θα προκαλέσει άνοδο της στάθμης της τάξης μεριών δεκάδων εκατοστών (Σχήμα 20). Ο ίδιος άνεμος πάνω από την ανοικτή θάλασσα προκαλεί άνοδο στάθμης μικρότερη του 1 χιλιοστού.

### ΣΤ) Στρωματοποίηση (Stratification)

Η στρωματοποίηση συμβαίνει στις παράκτιες λεκάνες λόγω της επιφανειακής θέρμανσης (κυρίως κατά την άνοιξη και το καλοκαίρι), και της εισροής γλυκού νερού. Ταυτόχρονα, όπως είδαμε προηγουμένως, οι παράκτιες περιοχές έχουν αυξημένες ροές γλυκού νερού, περιορισμένο βάθος, εντονότερα παλιρροιακά και ανεμογενή ρεύματα. Τα έντονα παλιρροιακά και ανεμογενή ρεύματα προκαλούν μείωση της στρωματοποίησης και κατακόρυφη ανάμειξη (Σχήμα 21). Προκύπτει λοιπόν ότι οι παράκτιες λεκάνες χαρακτηρίζονται από έντονες μεταβολές στο χώρο και το χρόνο στις συνθήκες στρωματοποίησης τους.

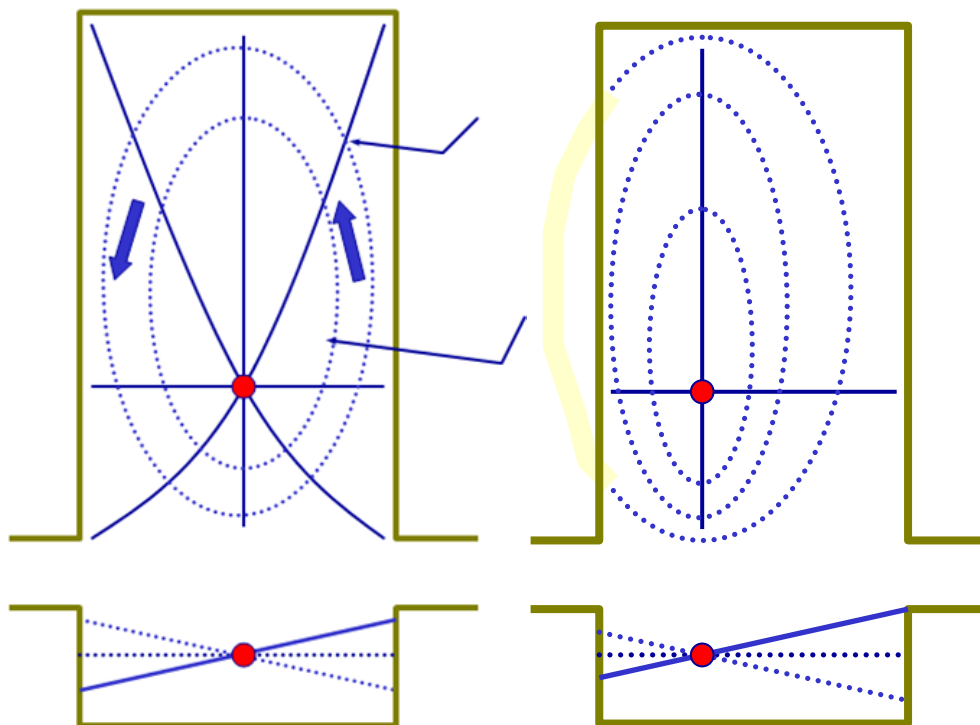


**Σχήμα 21.** Παράγοντες που συμβάλλουν στη στρωματοποίηση (με κόκκινο χρώμα) και στη μείξη (με μπλε χρώμα) της υδάτινης στήλης.

### Ζ) Τοπογραφικές Επιδράσεις

Η τοπογραφία της κάθε παράκτιας λεκάνης είναι μοναδική, αλλά και ιδιαίτερα σημαντική για τη δυναμική της, λόγω του περιορισμένου βάθους της και τις ιδιαιτερότητες της ακτογραμμής (βραχίονες, κανάλια, ύφαλοι, κλπ.). Οι τοπογραφικές επιδράσεις κατηγοριοποιούνται σε:

α) επίδραση στη κλασσική κυκλοφορία παράκτιας λεκάνης, η οποία είναι αντιωρολογιακή γύρω από τη λεκάνη στο Β. Ημισφαίριο και ωρολογιακή στο Ν. Ημισφαίριο. Πράγματι, στο Β. Ημισφαίριο το νερό κινείται δεξιόστροφα προς τη κοντινότερη ακτογραμμή (αντίστροφα στο Ν. Ημισφαίριο), δημιουργώντας μία περιδίνηση (gyre). Έτσι, το γλυκό νερό που εκρέει από ένα ποταμό σε μία παράκτια λεκάνη εκτρέπεται και κινείται δεξιόστροφα σχηματίζοντας προς αυτή τη διεύθυνση στρώμα μεγαλύτερου πάχους. Ταυτόχρονα, το νερό που εισέρχεται στη λεκάνη κατά τη διάρκεια μίας παλίρροιας κινείται και αυτό δεξιόστροφα (αντίθετα από το γλυκό νερό), καταλαμβάνοντας μεγαλύτερο πάχος στρώματος κατά τη διεύθυνση αυτή (Σχήμα 22). Σε άμεση σχέση με αυτές τις περιδινήσεις βρίσκεται η πιεσοβαθμίδα η οποία προκύπτει από την άνοδο ή τη πτώση τη στάθμης της θάλασσας. Καθώς η στήλη νερού είναι στρωματοποιημένη, το πυκνοκλινές εκτρέπεται αντίστοιχα από το οριζόντιο επίπεδο με σκοπό να εξισορροπήσει τη πιεσοβαθμίδα στο στρώμα πυθμένα.



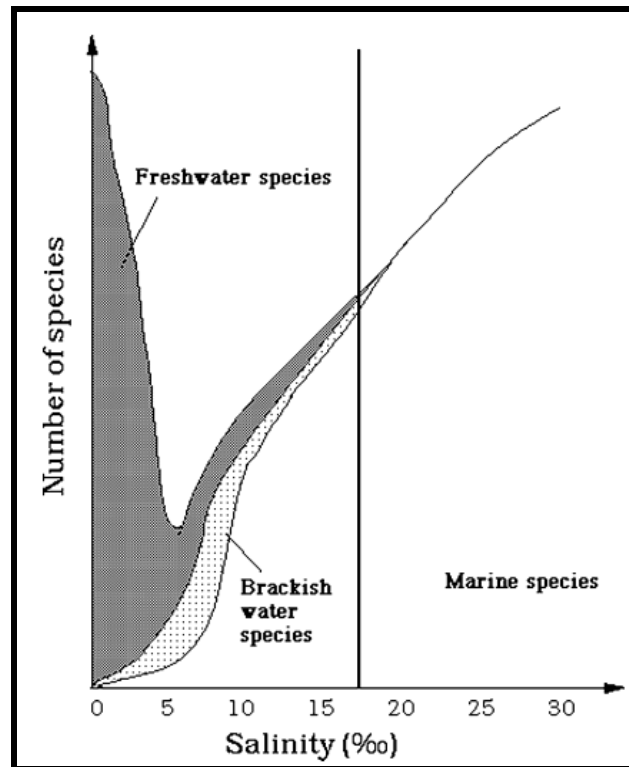
**Σχήμα 22.** Περιδίνηση παλιρροιακού κύματος εισερχόμενου σε παράκτια λεκάνη, χωρίς επίδραση τοπογραφίας πυθμένα (αριστερά) και με επίδραση τοπογραφίας πυθμένα (δεξιά).

β) επίδραση στις ανεμογενείς περιδινήσεις. Σε μία λεκάνη σταθερού βάθους, η δράση του ανέμου προκαλεί κίνηση προς τη κατεύθυνση του ανέμου στην επιφάνεια και αντίθετη με τη κατεύθυνση του ανέμου στο στρώμα πυθμένα. Η κίνηση αυτή θα εκτρέπεται από τη δύναμη Coriolis οπότε θα προέκυπτε η κλασική κυκλοφορία παράκτιας λεκάνης με το κάθε στρώμα να εκτρέπεται δεξιόστροφα της κίνησής του. Η περιδίνηση αυτή θα παραμορφωνόταν λόγω της επίδρασης της τοπογραφίας πυθμένα, καθώς η καθαρή ροή στα ρηχά νερά τείνει να είναι αντίθετη προς τη φορά του ανέμου, ενώ η καθαρή ροή στα βαθύτερα σημεία τείνει να κινείται με τη φορά του ανέμου.

Οι πλέον σημαντικές παράμετροι που απαιτούνται για τη διαχείριση ενός παράκτιου συστήματος είναι η αλατότητα και η θερμοκρασία του νερού.

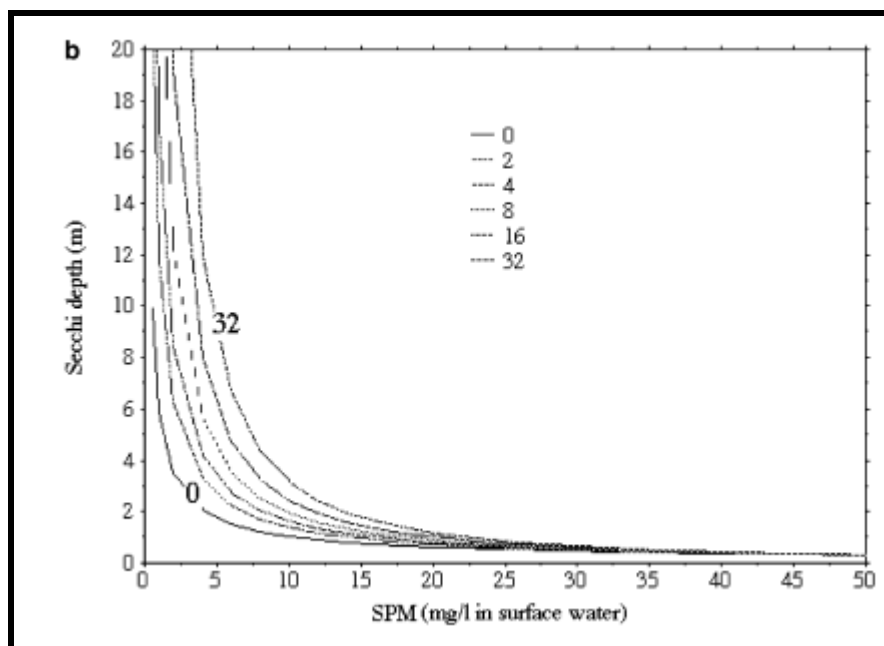
#### A. Αλατότητα Νερού

Η αλατότητα είναι ιδιαίτερης σημασίας γιατί καθορίζει τα βιολογικά χαρακτηριστικά της παράκτιας περιοχής όπως ο αριθμός των ειδών (Σχήμα 23), η αναπαραγωγική τους ικανότητα, η πρόσληψη τροφής και η ανάπτυξή τους, κλπ.

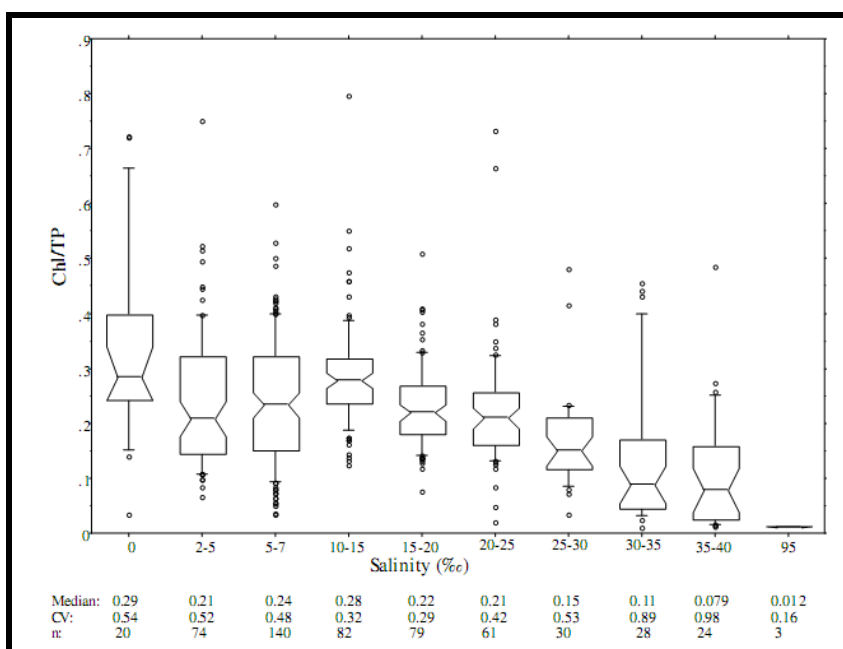


Σχήμα 23. Συσχέτιση μεταξύ αλατότητας και αριθμού ειδών.

Επιπλέον, η υψηλότερη αλατότητα σχετίζεται με αυξημένη παρουσία συσσωματωμένων ιζημάτων επηρεάζοντας τη θολερότητα της υδάτινης στήλης (Σχήμα 24). Όσο υψηλότερη είναι η αλατότητα τόσο υψηλότερη και η τάση συσσωμάτωσης των κόκκων των ιζημάτων, επηρεάζοντας το ρυθμό ιζηματο-απόθεσης στη περιοχή. Αυτό με τη σειρά του σχετίζεται με την υψηλή συγκέντρωση θρεπτικών αλάτων, όπως ο φώσφορος και άλλοι ρύποι, σε σωματιδιακή φάση. Έτσι η αλατότητα επηρεάζει τη σχέση μεταξύ του ολικού φωσφόρου και της πρωτογενούς παραγωγής και βιομάζας, όπως εκφράζεται μέσα από το λόγο  $Chl/TP$ . Ο λόγος αυτός μεταβάλλεται κυματοειδώς ως προς την αλατότητα: αποκτά ελάχιστη τιμή (μεταξύ 0.15 – 0.30) για τιμές αλατότητας 2-5, αυξάνεται σταδιακά ως 0.25 – 0.35 για τιμές αλατότητας 10-15, και κατόπιν μειώνεται διαρκώς ως το ελάχιστο γύρω στο 0.012 για τιμές αλατότητας 35-40 (Σχήμα 25).



Σχήμα 24. Συσχέτιση μεταξύ της θολερότητας (βάθος Secchi), της συγκέντρωσης αιωρούμενων συστατικών SPM και της αλατότητας στα επιφανειακά νερά παράκτιων περιοχών.



Σχήμα 25. Διάγραμμα Box-and-Whisker (παρουσιάζει γεωμετρικούς μέσους, τεταρτημόρια, εκατοστημόρια και τιμές εκτός ορίων), του λόγου Chi/TP για 10 κλάσεις αλατότητας.

## B. Θερμοκρασία Νερού

Η θερμοκρασία ρυθμίζει πολλές σημαντικές διεργασίες και λειτουργίες στα παράκτια συστήματα, όπως τη βακτηριδιακή αποσύνθεση του οργανικού υλικού, και επομένως

τη κατανάλωση οξυγόνου, τη θερμική στρωμάτωση, και επομένως τη κατακόρυφη μείξη εντός του θερμοκλινούς, κλπ. Δεδομένα θερμοκρασίας και ποιότητας νερού έδειξαν ότι όταν η επιφανειακή θερμοκρασία κυμαίνεται από 0 έως 25°C, ο λόγος  $ChI/TP$  εξαπλασιάζεται αυξανόμενος από 0.09 σε 0.53. Αντίστοιχα, κατά τη παραγωγική περίοδο της άνοιξης, όταν η θερμοκρασία αυξάνεται από 15 σε 25°C, ο λόγος  $ChI/TP$  αυξάνεται κατά 1.5 φορές.