



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΙΓΑΙΟΥ

ΠΑΡΑΚΤΙΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑ

Η αλλαγή της θαλάσσιας στάθμης

*Αντώνης Βελεγράκης
Τμήμα Επιστημών της Θάλασσας*



Ευρωπαϊκή Ένωση
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ & ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ, ΠΟΛΙΤΙΣΜΟΥ & ΑΘΛΗΤΙΣΜΟΥ
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΚΟΙΝΩΝΙΚΟ ΤΑΜΕΙΟ

Άδειες Χρήσης

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό υπόκειται σε άδειες χρήσης Creative Commons.
- Για εκπαιδευτικό υλικό, όπως εικόνες, που υπόκειται σε άλλου τύπου άδειας χρήσης, η άδεια χρήσης αναφέρεται ρητώς.



Χρηματοδότηση

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό έχει αναπτυχθεί στα πλαίσια του εκπαιδευτικού έργου του διδάσκοντα.
- Το έργο «**Ανοικτά Ακαδημαϊκά Μαθήματα στο Πανεπιστήμιο Αιγαίου**» έχει χρηματοδοτήσει μόνο τη αναδιαμόρφωση του εκπαιδευτικού υλικού.
- Το έργο υλοποιείται στο πλαίσιο του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση» και συγχρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο) και από εθνικούς πόρους.



Ευρωπαϊκή Ένωση
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ & ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ, ΠΟΛΙΤΙΣΜΟΥ & ΑΘΛΗΤΙΣΜΟΥ
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης





**ΤΜΗΜΑ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ ΘΑΛΑΣΣΑΣ
ΣΧΟΛΗ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ**

**ΠΑΡΑΚΤΙΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑ 3
Η αλλαγή της θαλάσσιας στάθμης**

Α.Φ. Βελεγράκης

3 Η αλλαγή της θαλάσσιας στάθμης

3.1 Υπάρχει αλλαγή και γιατί μάς ενδιαφέρει;

3.2 Παλίρροιες, μία σύντομη επισκόπηση

3.2.1 Η Θεωρία Ισορροπίας (Equilibrium Theory)

3.2.2 Η Δυναμική Θεωρία Παλιρροιών

3.2.3 Μέτρηση των παλιρροιών και μέσης θαλάσσιας στάθμης

3.3 Η μέση θαλάσσια στάθμη

3.4 Μακρόχρονες αλλαγές της θαλάσσιας στάθμης

3.5 Η παράκτια (παράλια) αντίδραση στην αλλαγή

3.1 Υπάρχει αλλαγή και γιατί μας ενδιαφέρει;

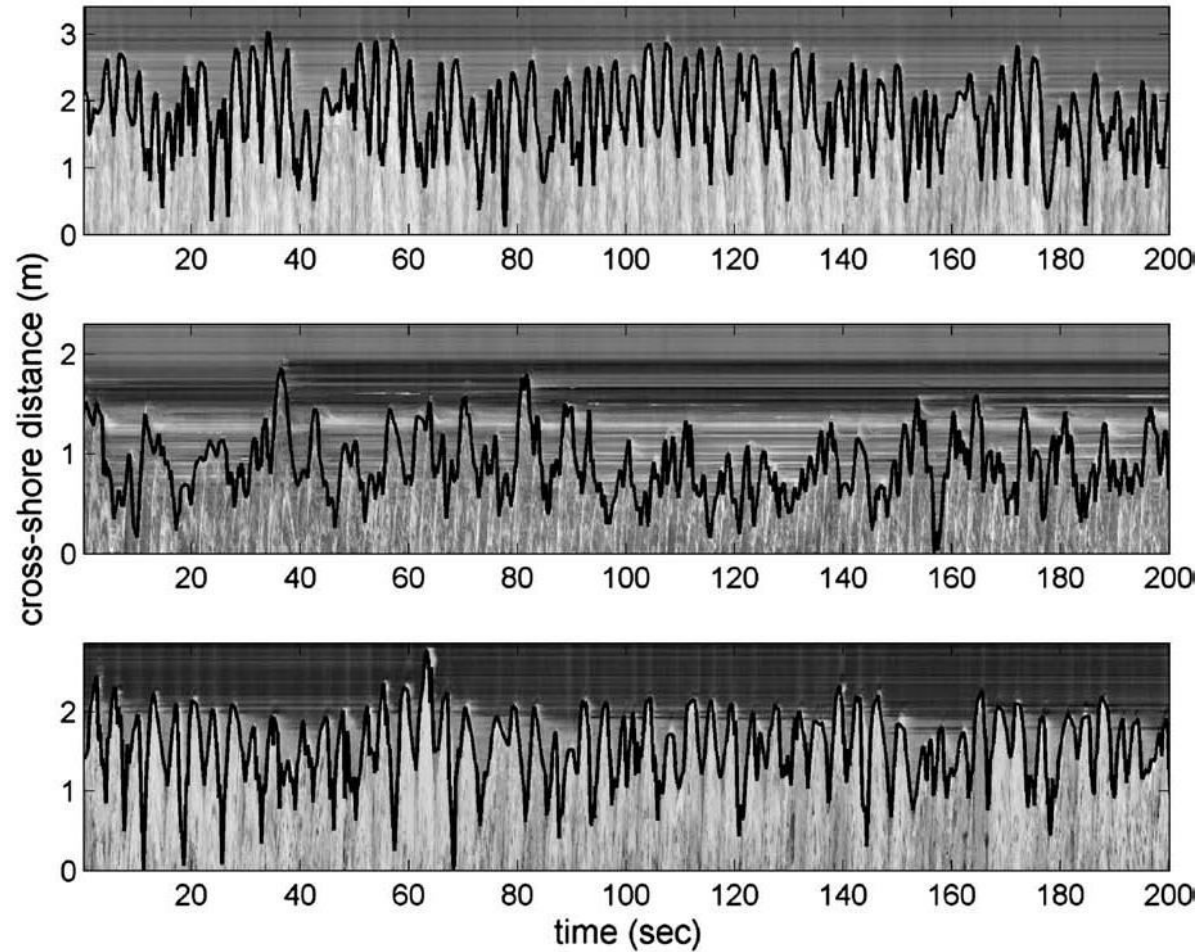
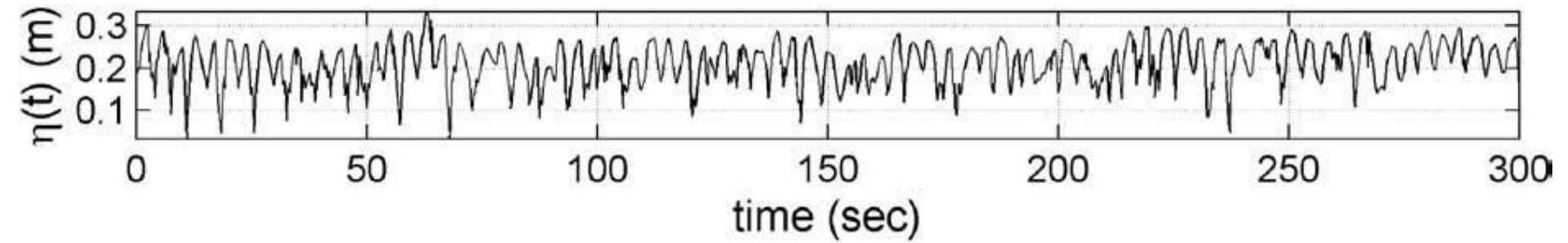
Υπάρχει συνεχής αλλαγή της θαλάσσιας στάθμης που

- έχει σημαντικές επιπτώσεις στην παράκτια (παραλιακή) μορφολογία
- δεν είναι χωρο-χρονικά σταθερή.

Η μεταβλητότητα της αλλαγής οφείλεται στο ότι η θαλάσσια στάθμη ελέγχεται από πολλές διεργασίες/μηχανισμούς που ενεργούν σε διαφορετικές χωρο-χρονικές κλίμακες.

Οι κυριότερες διεργασίες είναι (με φθίνουσα συχνότητα):

- Κυματισμοί
- οι παλίρροιες (tides),
- φουσκοθαλασιές (storm surges),
- μεγάλες περιοδικές κλιματικές αλλαγές (π.χ. El Nino)
- εποχιακές αλλαγές
- μακρόχρονες κλιματικές διαμορφώσεις (π.χ. North Atlantic Oscillation, North American Lake cycles),
- ευστατικές αλλαγές (eustatic changes) και
- ευστατικές / τεκτονικές αλλαγές (eustatic/tectonic changes)



Σχήμα 3.1 Υψίσυχνες αλλαγές στάθμης της θάλασσας. Μεταβλητότητα ύψους νερού στην ζώνη διαβροχής από κυματισμούς (swash zone sea level ($\eta(t)$)).

Αναρρίχηση (εγκάρσια απόσταση) σε 3 παραλίες της Λέσβου (Βαριά, Κανόνι και Χαραμίδα) (Τροποποιημένο από Vousdoukas et al., 2009).



Σχήμα 3.2 Άμπωτις (ebb) και πλημμυρίδα (flood) στο Parrsboro Harbour, Bay of Fundy (η ακτή με την μεγαλύτερη παλίρροια στον κόσμο 14+ m). (Τροποποιημένο από SEPM, 1996).



Σχήμα 3.3 Το αποτέλεσμα της αμψίδος στο λιμάνι του Lynmouth, England, United Kingdom. (Τροποποιημένο από SEPM, 1996).



Σχήμα 3.4 Γεωμορφές (bedforms, megaripples) ποταμόκολπο σε άμπωτη.

3.2 Παλίρροιες: Σύντομη επισκόπηση

Αλλαγές της θαλάσσιας στάθμης που μπορεί να φθάσει τα 15-16 m (Κόλπος του Fundy, Canada) με μικρή περίοδο (ώρες).

Οι παλίρροιες είναι ένα παγκόσμιο φαινόμενο, το οποίο όμως ελέγχεται από τις τοπικές συνθήκες. Έτσι, τα χαρακτηριστικά της (εύρος και περίοδος) είναι πολύ μεταβλητά, με αποτέλεσμα διαφορετικές ακτές να έχουν διαφορετικό παλιρροιακό εύρος και περίοδο.

Οι παλίρροιες οφείλονται στο πεδίο βαρύτητας. Ο πρώτος που συνέλαβε την ιδέα ότι οι παλίρροιες είναι το αποτέλεσμα της βαρύτιμης έλξης από τα ουράνια σώματα (Σελήνη, Ηλιος) ήταν ο Sir Isaac Newton. Το 1686 δημοσίευσε την Θεωρία Ισορροπίας (Equilibrium Theory) για να εξηγήσει τις παλίρροιες στο έργο του Philosophiae Naturalis Principia Mathematica

Θεωρία Ισορροπίας (Equilibrium Theory)

$$F = G \frac{m_{earth} m_{moon}}{R^2}$$

Όπου	F	είναι η δύναμη έλξης
	G	είναι η παγκόσμια σταθερά της βαρύτητας (6.6×10^{-11} Newton m^2/kg^2)
	m_{earth}	είναι η μάζα της Γης
	m_{moon}	είναι η μάζα της Σελήνης
	R	είναι η απόσταση μεταξύ Γης-Σελήνης

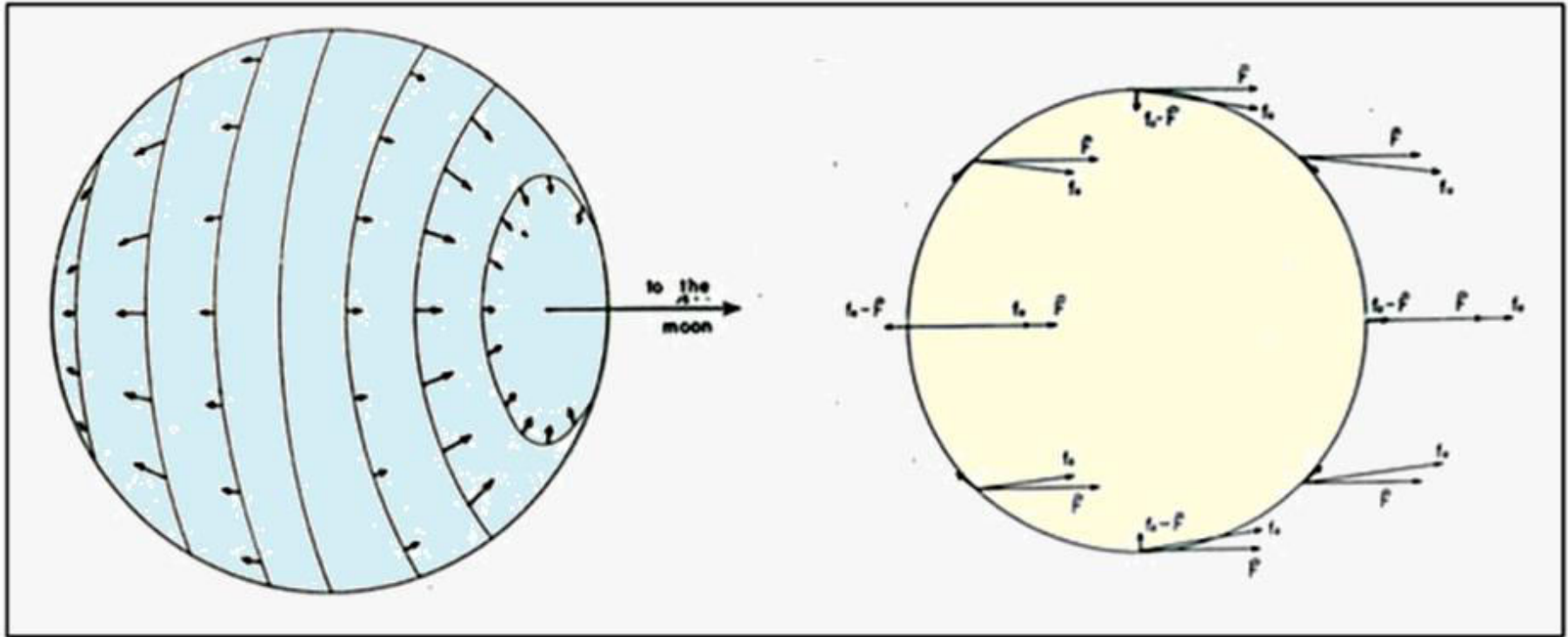
Θεωρία Ισορροπίας (Equilibrium Theory)

Αν και η μέση δύναμη έλξης F δίνεται από την παραπάνω έκφραση, τα διάφορα στοιχεία της γης έλκονται από την Σελήνη με διαφορετικό τρόπο, λόγω της διαφορετικής τους απόστασης.

Π.χ. μια μάζα νερού που βρίσκεται στο μέρος της Γης που βλέπει στην Σελήνη, έλκεται με μεγαλύτερη δύναμη (f_α) από μια ίδια μάζα στον αντίποδα. Αυτές οι διάφορες είναι η αιτία των παλιρροιών.

Η (διανυσματική) διάφορα μεταξύ των δυνάμεων $f_\alpha - F$ δημιουργεί “παλιρροιακά φουσκώματα” (tidal bulges).

Στην πραγματικότητα, η σημαντική δύναμη είναι η εφαπτομενική συνιστώσα της δύναμης $f_\alpha - F$, αφού η συνιστώσα κάθετη στην Γη είναι ασήμαντη συγκρινόμενη με την βαρύτητα.



Σχήμα 3.5.. Σκαριφήματα για την εξήγηση της Θεωρίας Ισορροπίας ((Τροποποιημένο από SEPM, 1996).).

Θεωρία Ισορροπίας (Equilibrium Theory)

Τα “παλιρροιακά φουσκώματα” (tidal bulges) θα αυξάνονται μέχρι ο ρυθμός μεταβολής της πίεσης (pressure gradient) που δημιουργείται από την κεκλιμένη επιφάνεια να ισορροπήσει την εφαπτομενική συνιστώσα της f_α $-F$.

Αν η Γη καλυπτόταν μόνο από νερό, θα μεταμορφωνόταν σε ένα ωοειδές με το μακρύτερο άξονα κατευθυνόμενο προς την Σελήνη.

Λόγω της περιστροφής της Γης, ένας γήινος παρατηρητής θα έβλεπε 2 πλημμυρίδες και δυο αμπώτιδες την ημέρα ενώ το εύρος των παλιρροιών θα εξαρτιόταν από την θέση του παρατηρητή σε σχέση με τον άξονα του ωοειδούς.

Στην πράξη, η περίοδος για κάθε πέρασμα του παλιρροιακού φουσκώματος είναι 12 ώρες και 25 λεπτά.

Θεωρία Ισορροπίας (Equilibrium Theory)

Επίσης λόγω των σχετικών κινήσεων της Σελήνης που αλλάζουν την απόσταση μεταξύ Γης-Σελήνης (Περίγειο, 357000 χλμ και Απόγειο, 407000 χλμ) και κυρίως λόγω της παρουσίας του Ήλιου και της έλξης του, οι παλίρροιες αλλάζουν στον χρόνο.

Ο Ήλιος έχει μάζα 27000000 φορές μεγαλύτερη από την Σελήνη αλλά βρίσκεται και σε πολύ μεγαλύτερη απόσταση. Έτσι, η δύναμη που ασκεί είναι περίπου η μισή από αυτής της Σελήνης.

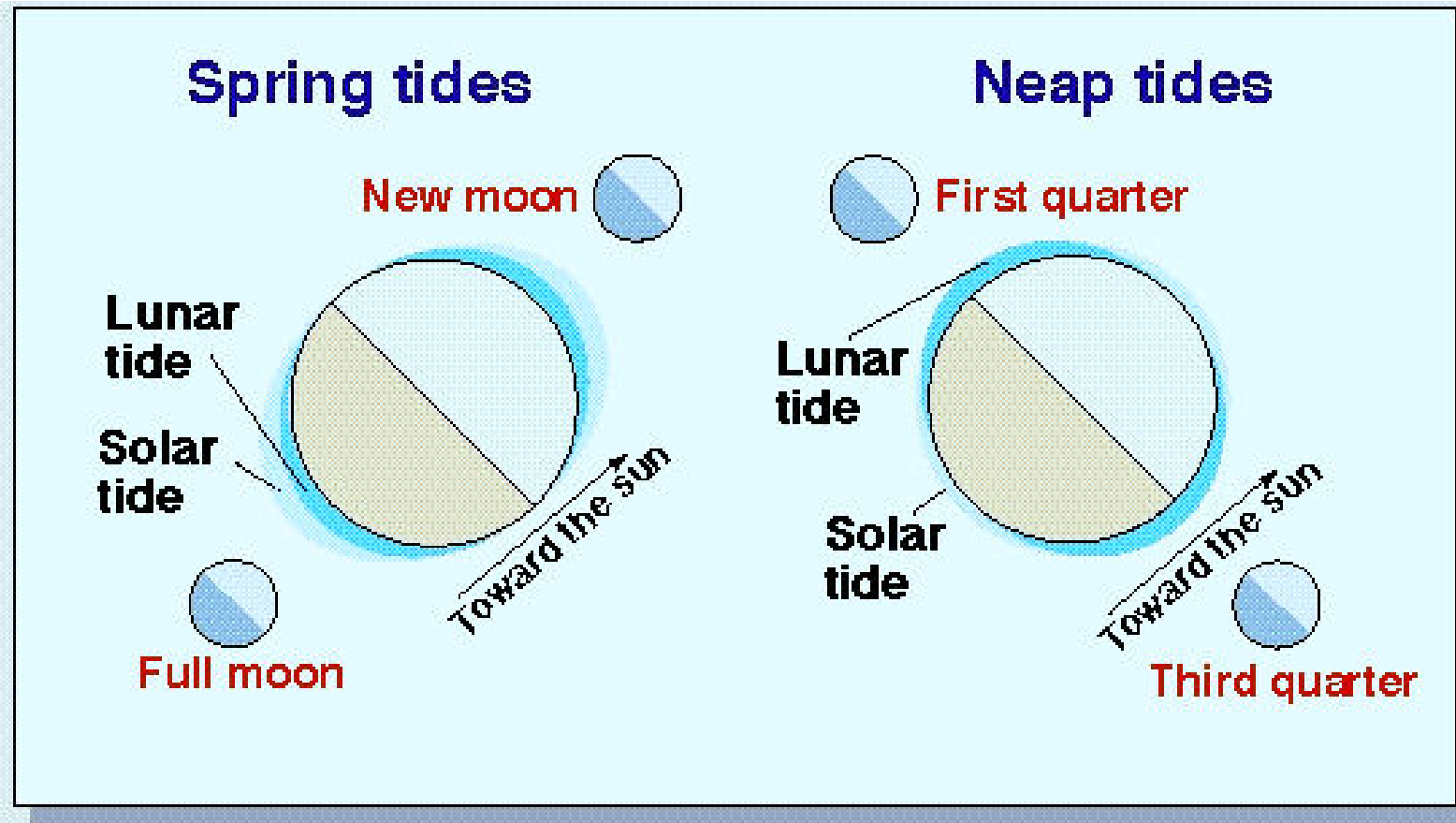
Όταν τα 3 σώματα βρίσκονται σε συζυγία (στην νέα Σελήνη και την Πανσέληνο) τότε οι παλίρροιες είναι μέγιστες (spring tides). Όταν τα 3 σώματα σχηματίζουν ορθή γωνία, τότε οι παλίρροιες είναι ελάχιστες (neap tides).

Επειδή οι τροχιές των σωμάτων δεν είναι κυκλικές και υπάρχουν κλίσεις και περιστροφές γύρω από τους άξονες καθώς και αλληλεπιδράσεις, οι περιοδικότητες των κινήσεων αλλάζουν περαιτέρω.

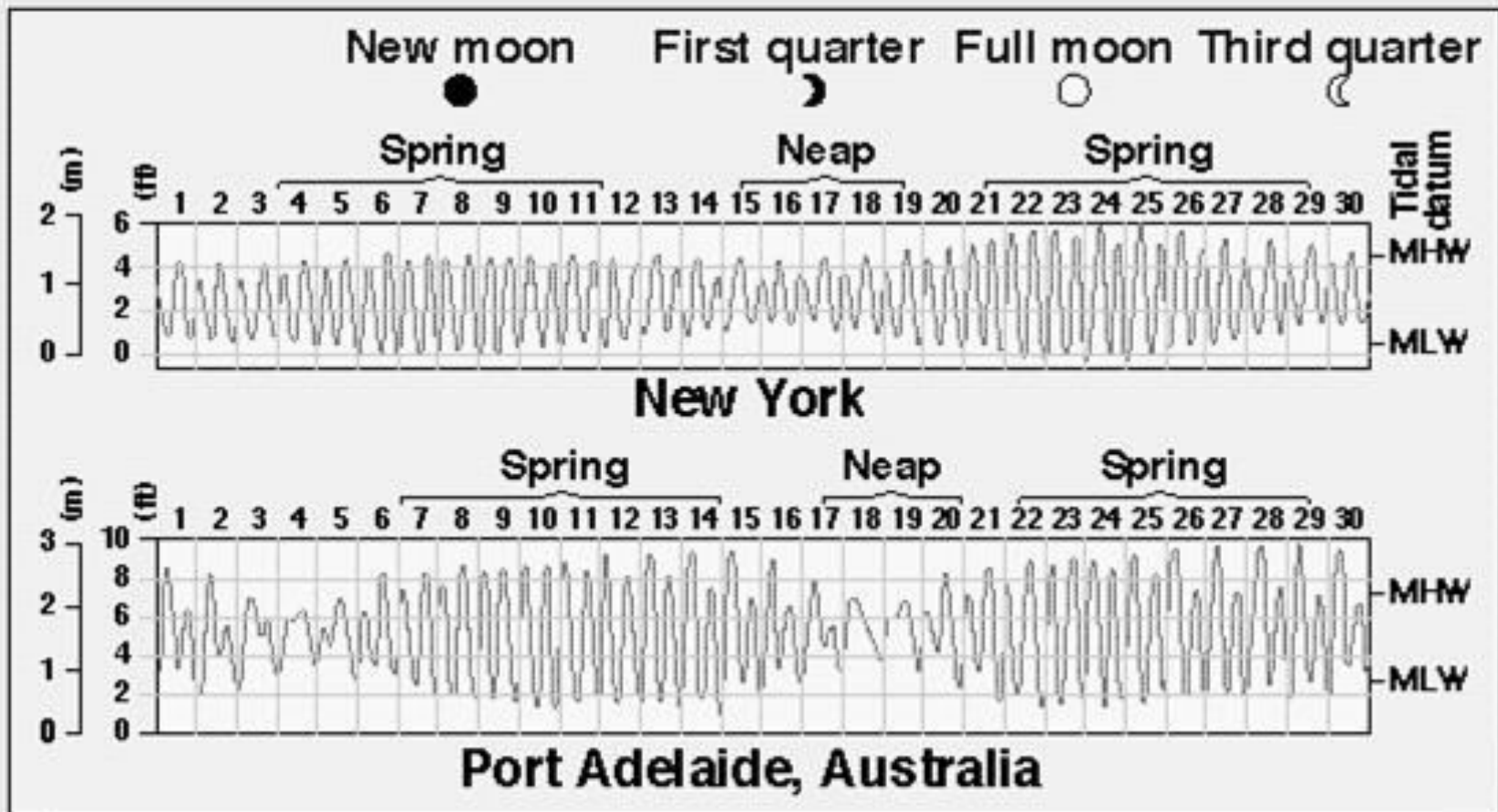
Έτσι οι παλίρροιες είναι το άθροισμα διαφόρων συνιστωσών με διαφορετική περιοδικότητα.

Οι πλέον σημαντικές παλιρροιακές συνιστώσες

Σύμβολο	Περίοδος (ώρες)	Εύρος (M2=100)	Περιγραφή
M2	12.42	100	Η κύρια σεληνιακή συνιστώσα
S2	12	46.6	Η κύρια ηλιακή συνιστώσα
N2	12.66	19.1	Σεληνιακή συνιστώσα λόγω της μηνιαίας μεταβολής της απόστασης της Σελήνης
K2	11.97	12.7	Ηλιακή-Σεληνιακή συνιστώσα λόγω μεταβολών της κλίσης Ήλιου Σελήνης
K1	23.93	58.4	Ηλιακή-Σεληνιακή ημερήσια συνιστώσα
O1	25.82	41.5	Κύρια Σεληνιακή ημερήσια συνιστώσα
P1	24.07	19.3	Κύρια Ηλιακή ημερήσια συνιστώσα



Σχήμα 3.6 Μέγιστες (spring) και ελάχιστες (neap) παλίρροιες. (Τροποποιημένο από SEPM, 1996).



Σχήμα 3.7 Παλιρροιακές χρονοσειρές (Τροποποιημένο από SEPM, 1996).

Δυναμική Θεωρία Παλιρροιών

Αν και η Θεωρία Ισορροπίας εξηγεί καλά τις αιτίες/περιοδικότητα των παλιρροιών αποτυγχάνει στις εφαρμογές π.χ. στην περιγραφή παλιρροιών σε συγκεκριμένα σημεία.

Έτσι ο P-S. Laplace δημιούργησε την Δυναμική Θεωρία, που αν και χρησιμοποιεί τις ίδιες δυνάμεις θεωρεί τις παλίρροιες κύματα και όχι φουσκώματα.

Σύμφωνα με την Δυναμική Θεωρία, ένα παλιρροιακό κύμα που γεννάται σε Ωκεάνια λεκάνη του Β. Ημισφαιρίου ταξιδεύει από Α σε Δ μέχρι που συναντά το δυτικό όριο της λεκάνης και ανακλάται.

Το ανακλώμενο κύμα συνδυάζεται με τα ερχόμενα κύματα και δημιουργεί ένα στάσιμο κύμα. Έτσι το κύμα παλινδρομεί γύρω σε μια γραμμή (nodal line), όπου δεν έχει εύρος αλλά υπάρχουν ισχυρά παλιρροιακά ρεύματα.

Δυναμική Θεωρία Παλιρροιών

Η περίοδος της ταλάντωσης δίνεται από

$$T_n = 2L_b/\sqrt{gh}$$

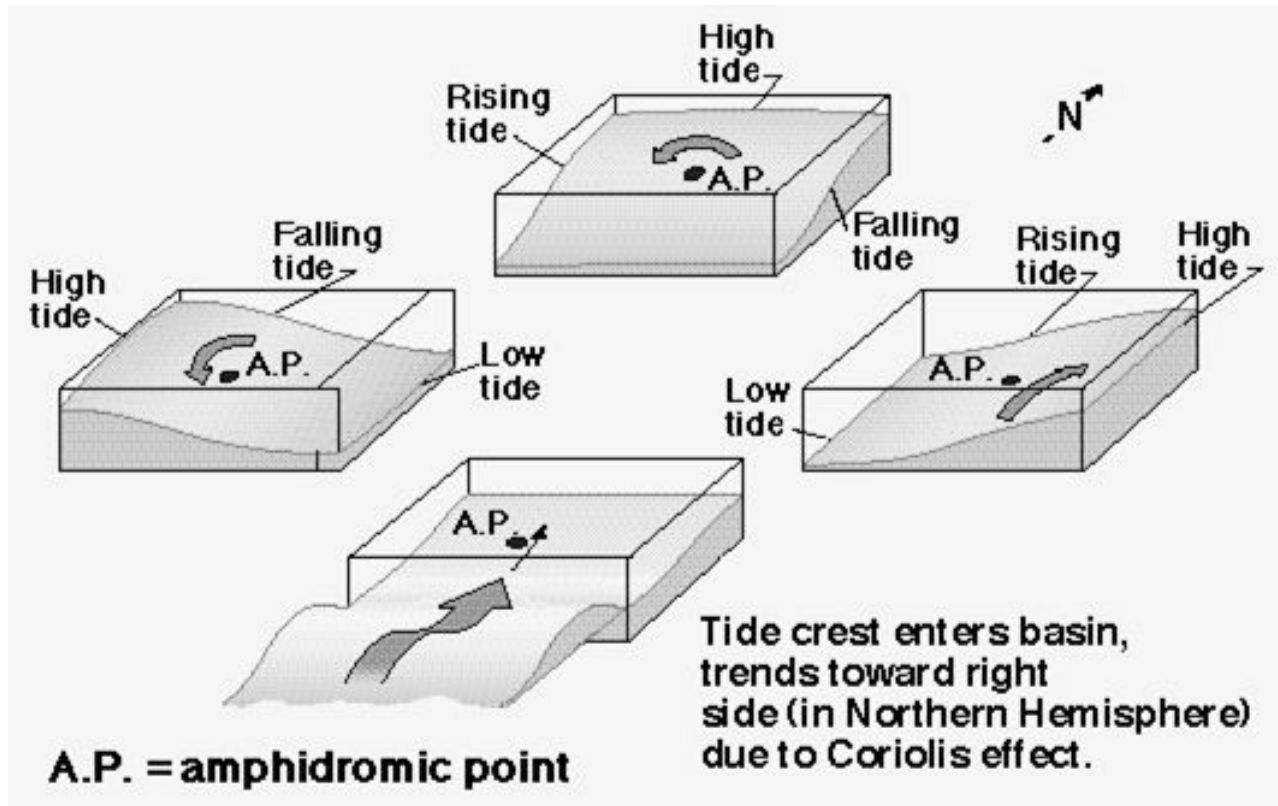
L_b είναι το μήκος (Α-Δ) της λεκάνης, και h το βάθος.

Λόγω της συνεχούς οδήγησης, η ταλάντωση των παλιρροιακών κυμάτων είναι εξαναγκασμένη και έτσι αποκτά σημασία η σχέση μεταξύ της ιδιοσυχνότητας της λεκάνης και της περιοδικότητας της οδήγησης.

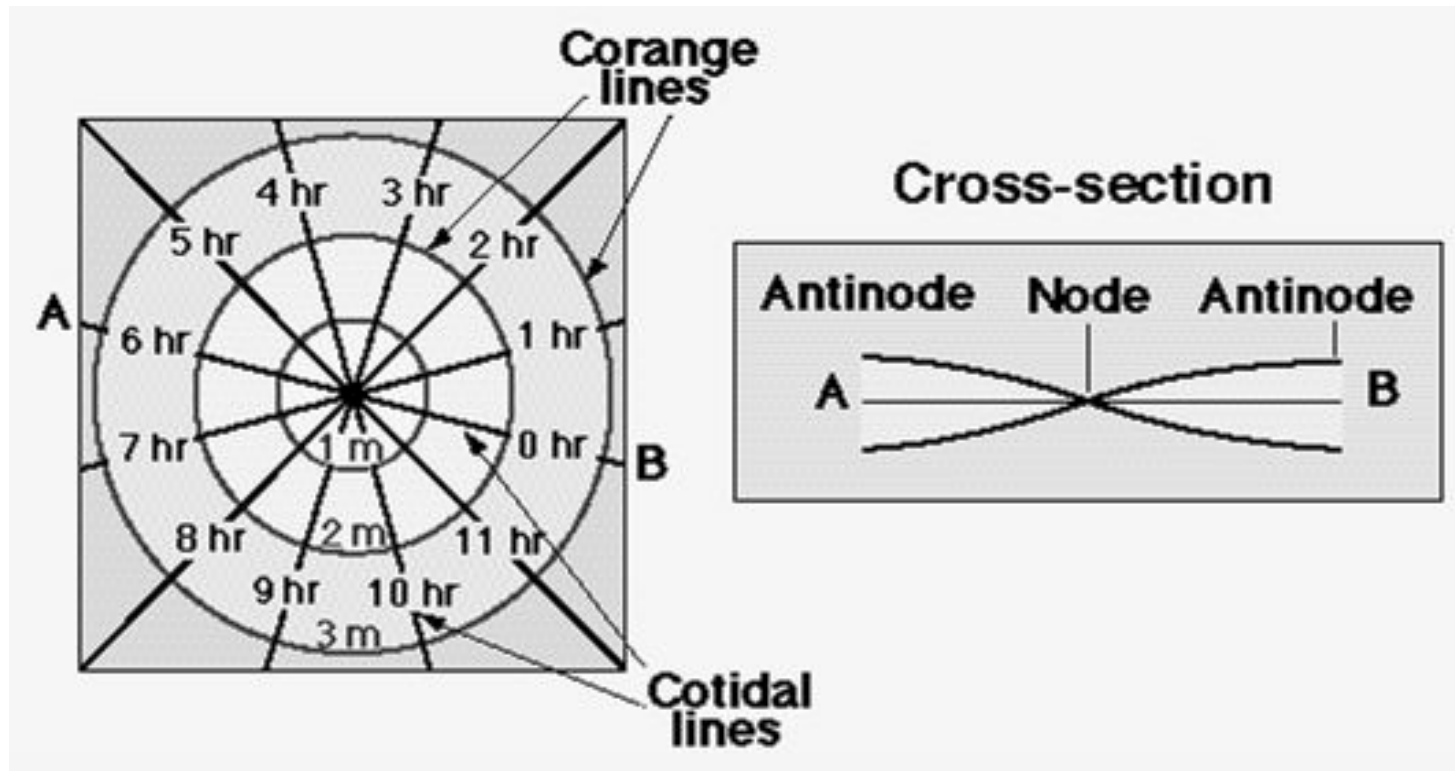
Έτσι κάτω από ορισμένες συνθήκες θα υπάρχει ενίσχυση του κύματος ενώ κάτω από άλλες απόσβεση (π.χ. στη Μεσόγειο)

Λόγω της δύναμης Coriolis, το παλιρροιακό κύμα ταλαντώνεται γύρω από ένα σημείο (αμφίδρομο σημείο) και όχι γραμμή (counterclockwise Kelvin wave).

Και τελικά, η τριβή από τον πυθμένα μπορεί να αλλάξει περαιτέρω τις παλίρροιες και να δημιουργήσει διαφορετικά εύρη ταλαντώσεων στην ίδια λεκάνη



Σχήμα 3.8 Η εξέλιξη της αμφιδρομικής κυκλοφορίας λόγω της δύναμης Coriolis



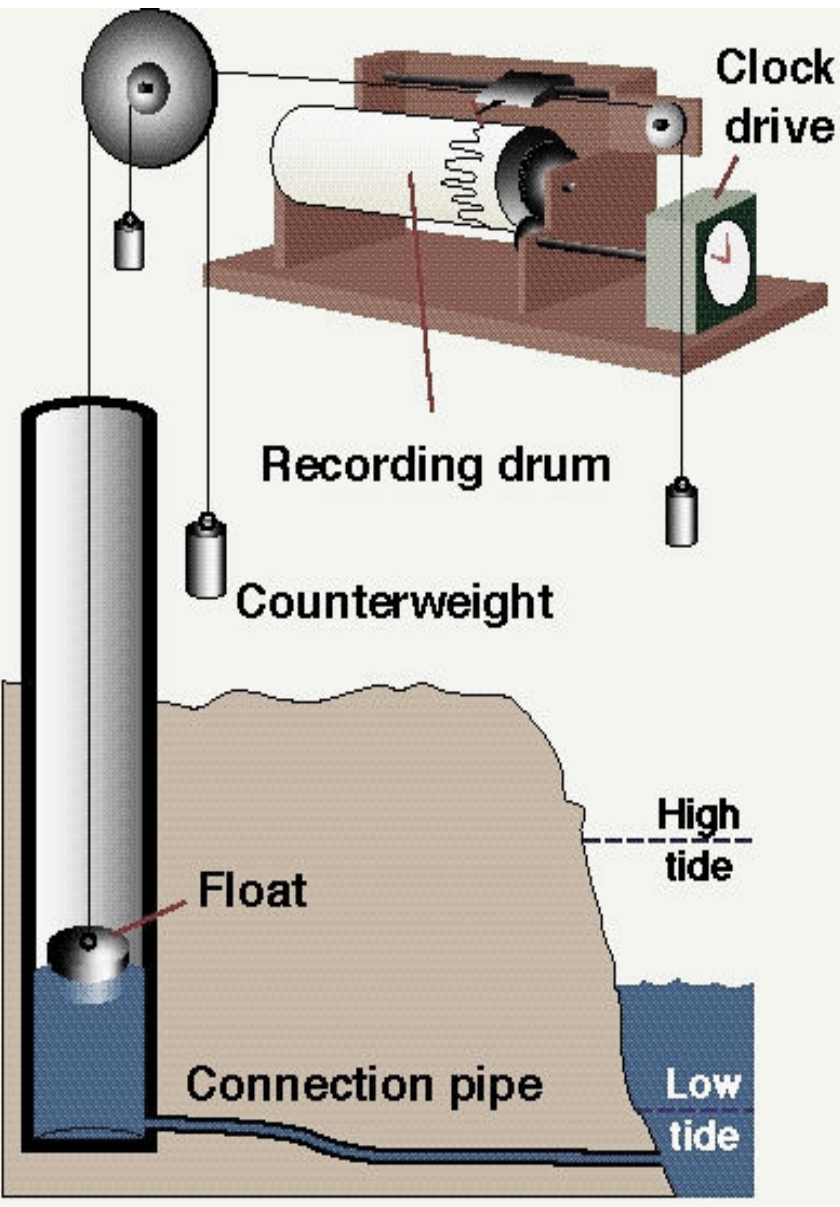
Σχήμα 3.9 Αμφιδρομικό σύστημα παλίρροιας. (Τροποποιημένο από SEPM, 1996).

Μέτρηση των παλιρροιών και μέσης θαλάσσιας στάθμης

Γίνεται με ειδικά όργανα (παλιρροιογράφους) που τοποθετούνται σε κατάλληλα επιλεγμένα σημεία

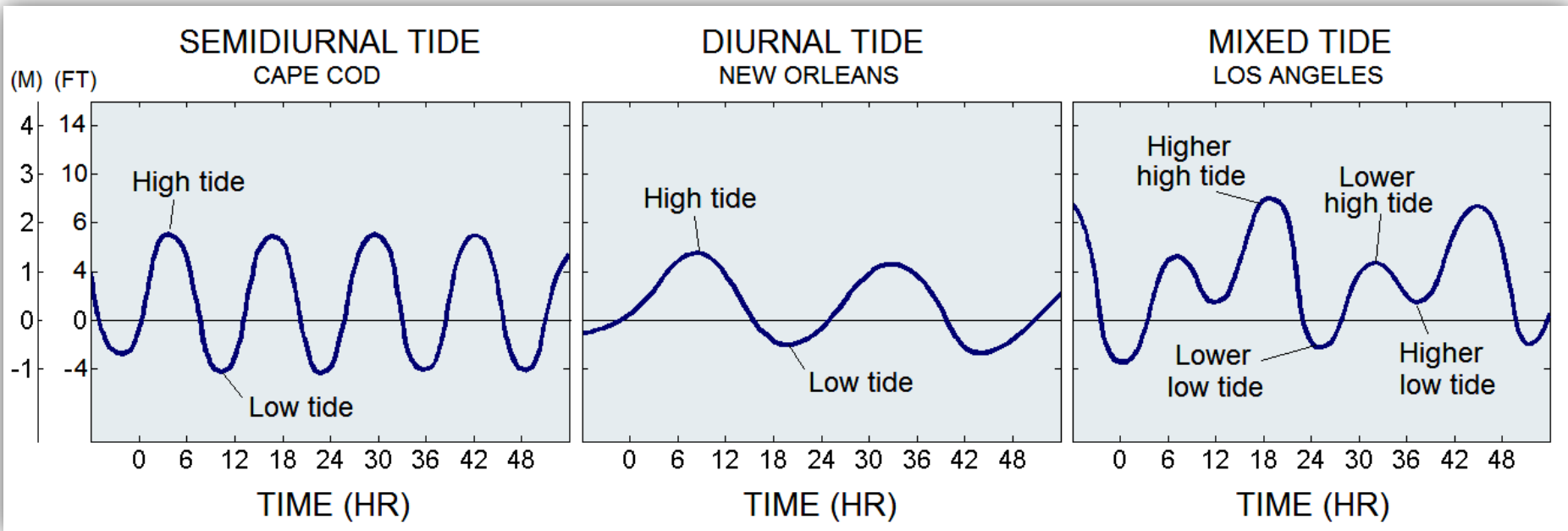
Υπάρχει εκτεταμένο δίκτυο στον κόσμο, το οποίο δυστυχώς δεν είναι πάντα πλήρες η/και συνεπές/ακριβές λόγω κακής συντήρησης, κακής επιλογής θέσεως κλπ. Χαρακτηριστικό παράδειγμα η Ανατ. Μεσόγειος και η Ελλάδα

Η διάρκεια των χρονοσειρών δεν είναι στις περισσότερες περιπτώσεις αρκετή για την σωστή στατιστική μελέτη των δεδομένων

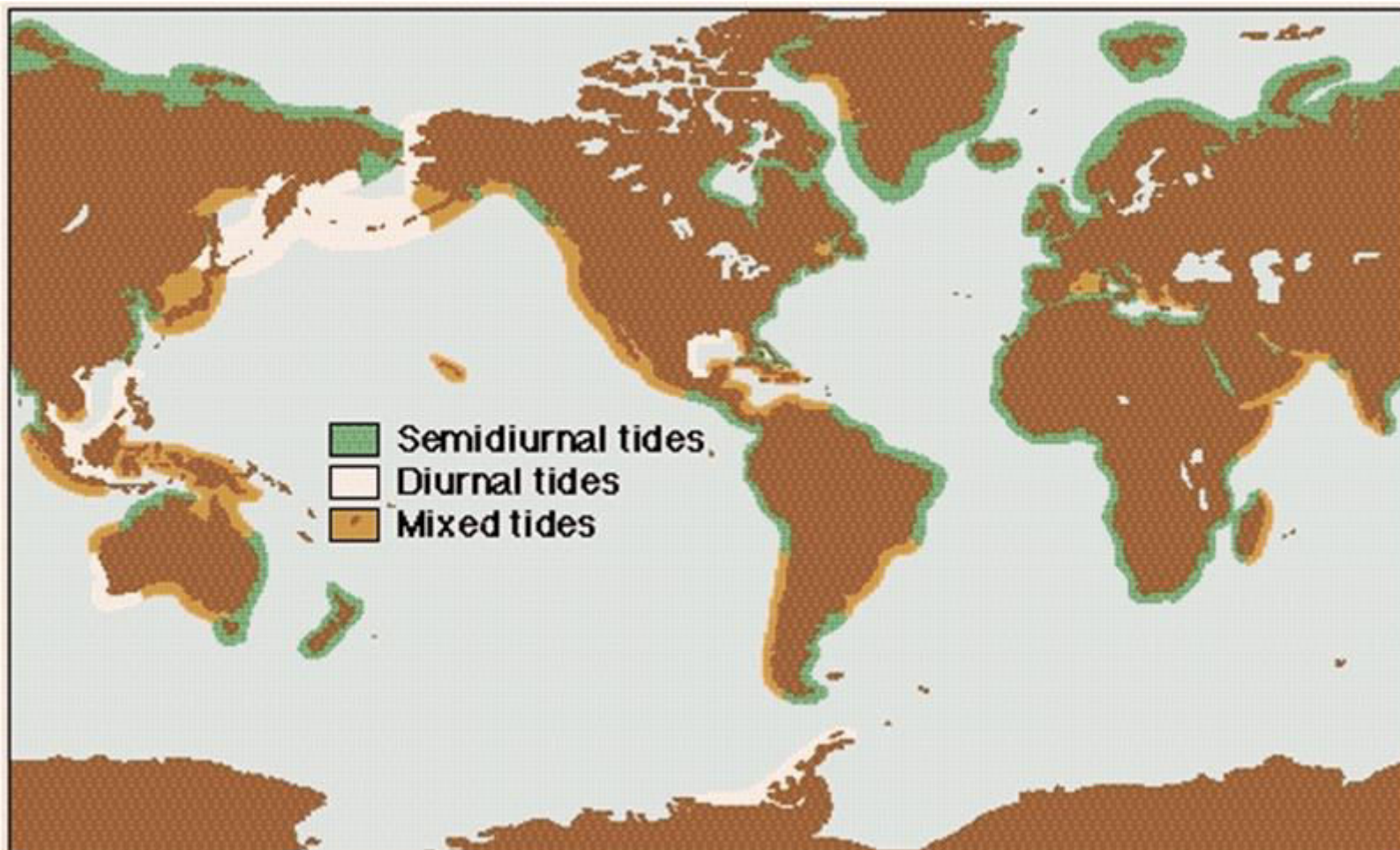


Σχήμα 3.10 Μηχανικός παλιρροιογράφος. Ο μακρύς σωλήνας (connection pipe) στο float well βοήθα να αποσβέσει τη κυματική κίνηση στις καταγραφές.

Η θέση των οργάνων είναι σημαντική αφού πρέπει να βρίσκονται σε σημεία χωρίς τεκτονικές κινήσεις (για μελέτες σχετικές με την αλλαγή της μέσης στάθμης). (Τροποποιημένο από SEPM, 1996).



Σχήμα 3.11 Παλιρροιακές καμπύλες από (α) ημιημερήσια παλίρροια του Cape Cod, Massachusetts (β) ημερήσια παλίρροια της New Orleans, Louisiana (γ) μικτή παλίρροια του Los Angeles, California. Βασισμένο στο Garrison (1996)



Σχήμα 3.12 Η γεωγραφική κατανομή των τύπων παλιρροιών.
(Τροποποιημένο από SEPM, 1996).

3.3 Μέση θαλάσσια στάθμη

Αυτού του είδους οι μελέτες απαιτούν την ανάλυση χρονοσειρών καλής ποιότητας

Δυστυχώς, λόγω προβλημάτων σχετικών με διάρκεια/αξιοπιστία των χρονοσειρών δεν είναι δυνατή η παρακολούθηση με καλή χωρο-χρονική διακριτικότητα των αλλαγών της μέσης τιμής της θάλασσας

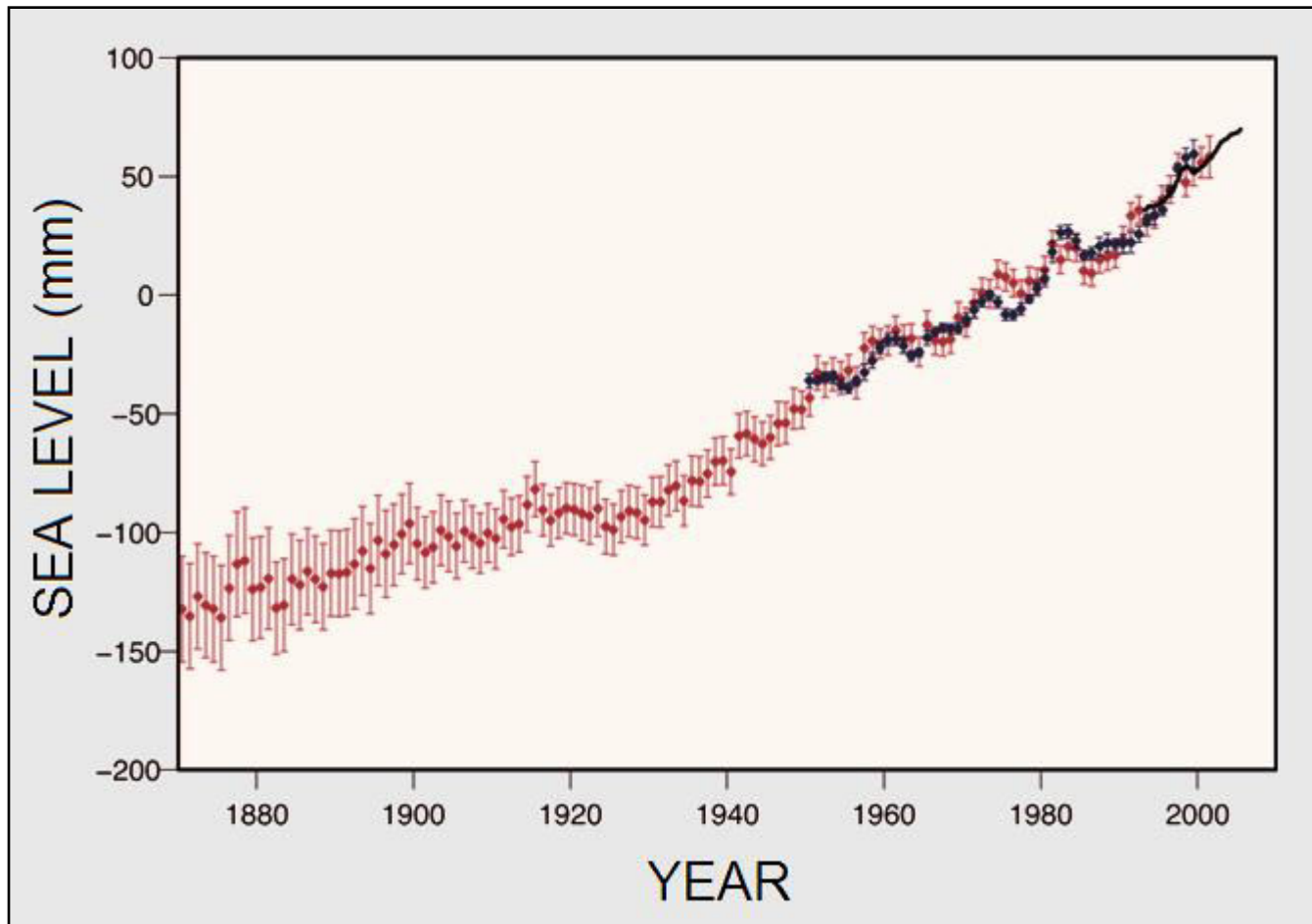
Η ημερήσια θαλάσσια στάθμη εξαρτάται όχι μόνο από την παλίρροια (και τις χαμηλόσυχνες συνιστώσες της) αλλά και από τις τοπικές (μετεωρολογικές) συνθήκες. Οι μηνιαίες μεταβολές από την θερμοκρασία, την εποχικότητα των ρευμάτων η και άλλα φαινόμενα όπως το El Nino Τέλος οι ετήσιες και δεκαετήσιες μεταβολές από την ύπαρξη μακροχρόνιων κλιματικών μεταβολών

Μέση θαλάσσια στάθμη

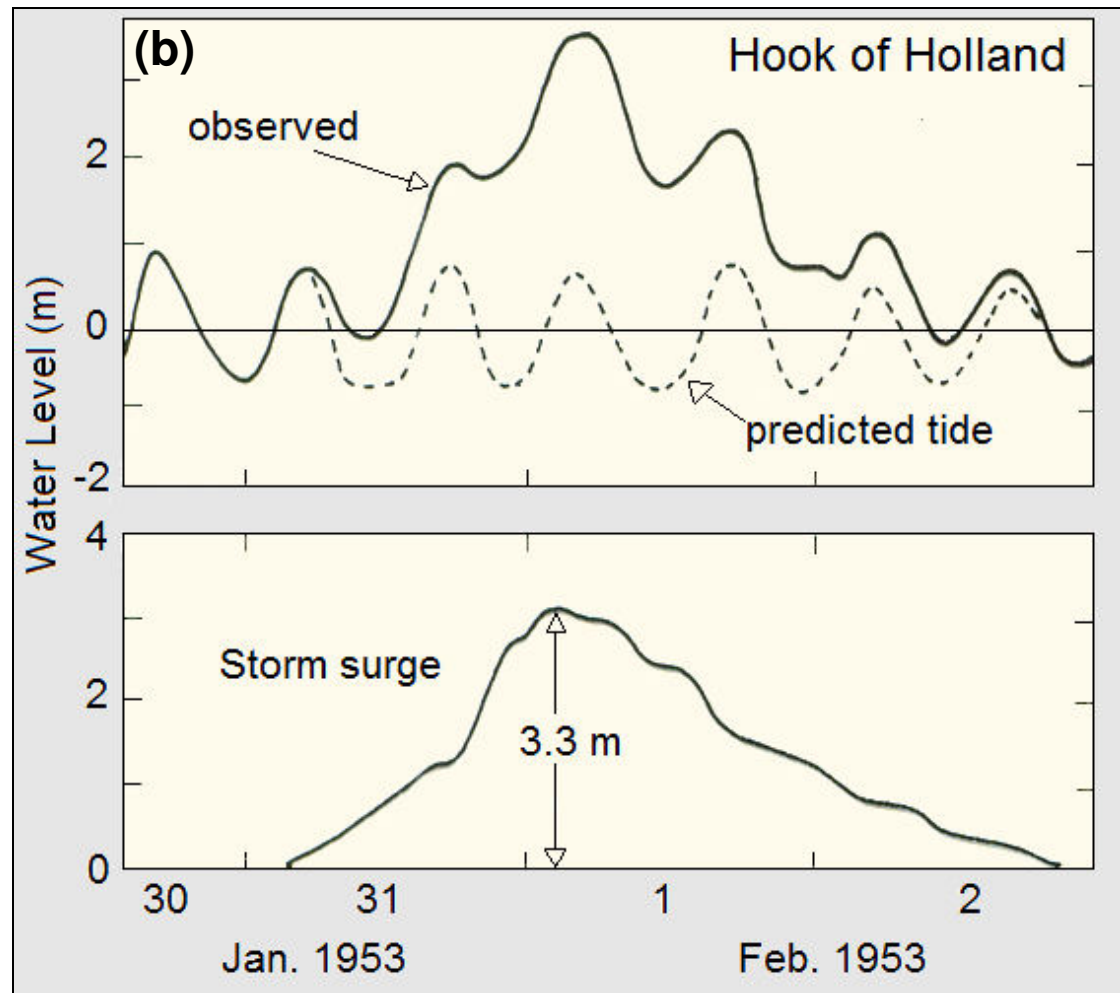
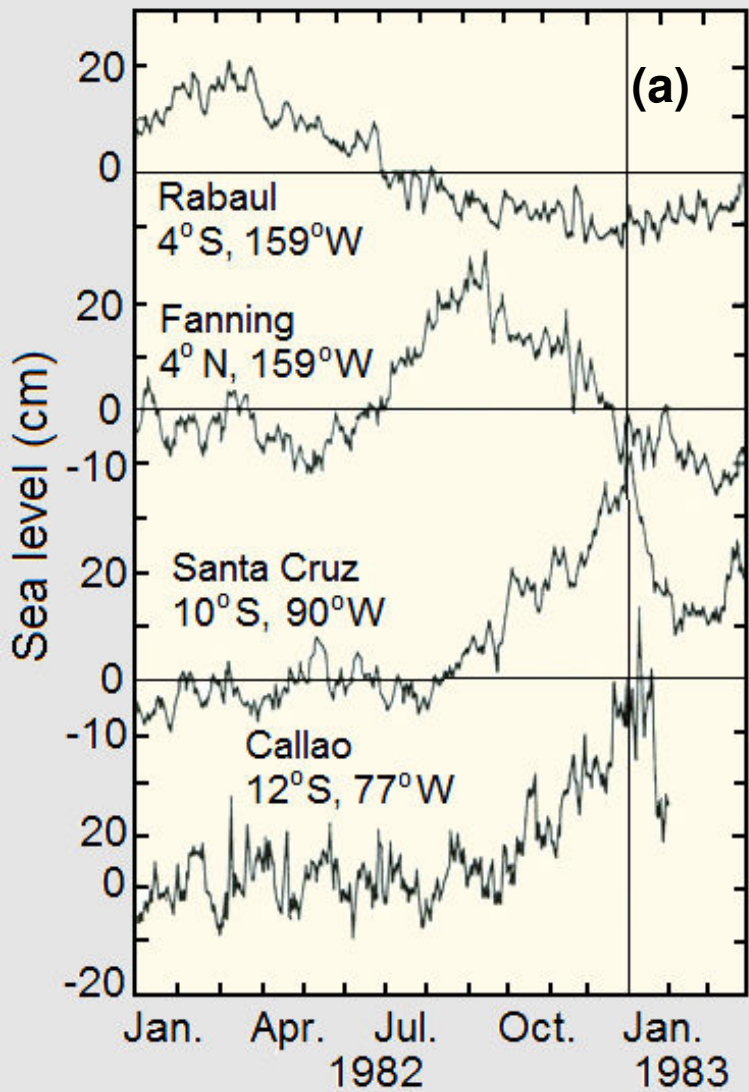
Οι παλιρροιακές χρονοσειρές μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για την μελέτη των μακροχρόνιων (π.χ. ετήσιων, δεκαετιακών) αλλαγών της μέσης θαλάσσιας στάθμης

Οι πλέον δραματικές αλλαγές είναι οι ημερήσιες λόγω μετεωρολογικών φαινομένων όπως οι φουσκοθαλασσιές (storm surges) και οι τυφώνες (Netherlands, BaglaDesh , USA etc)

Θυμηθείτε ότι μετρήσεις της θαλάσσιας στάθμης δεν δείχνουν αλλαγές μόνον στην θάλασσα αλλά και στην ξηρά (ανύψωση / καταβύθιση) η οποία μπορεί να οφείλεται είτε σε τεκτονικά είτε σε αλλά φυσικά / ανθρωπογενή φαινόμενα (π.χ. Υπεράντληση υδροφόρων, κοιτασμάτων αερίου κλπ)

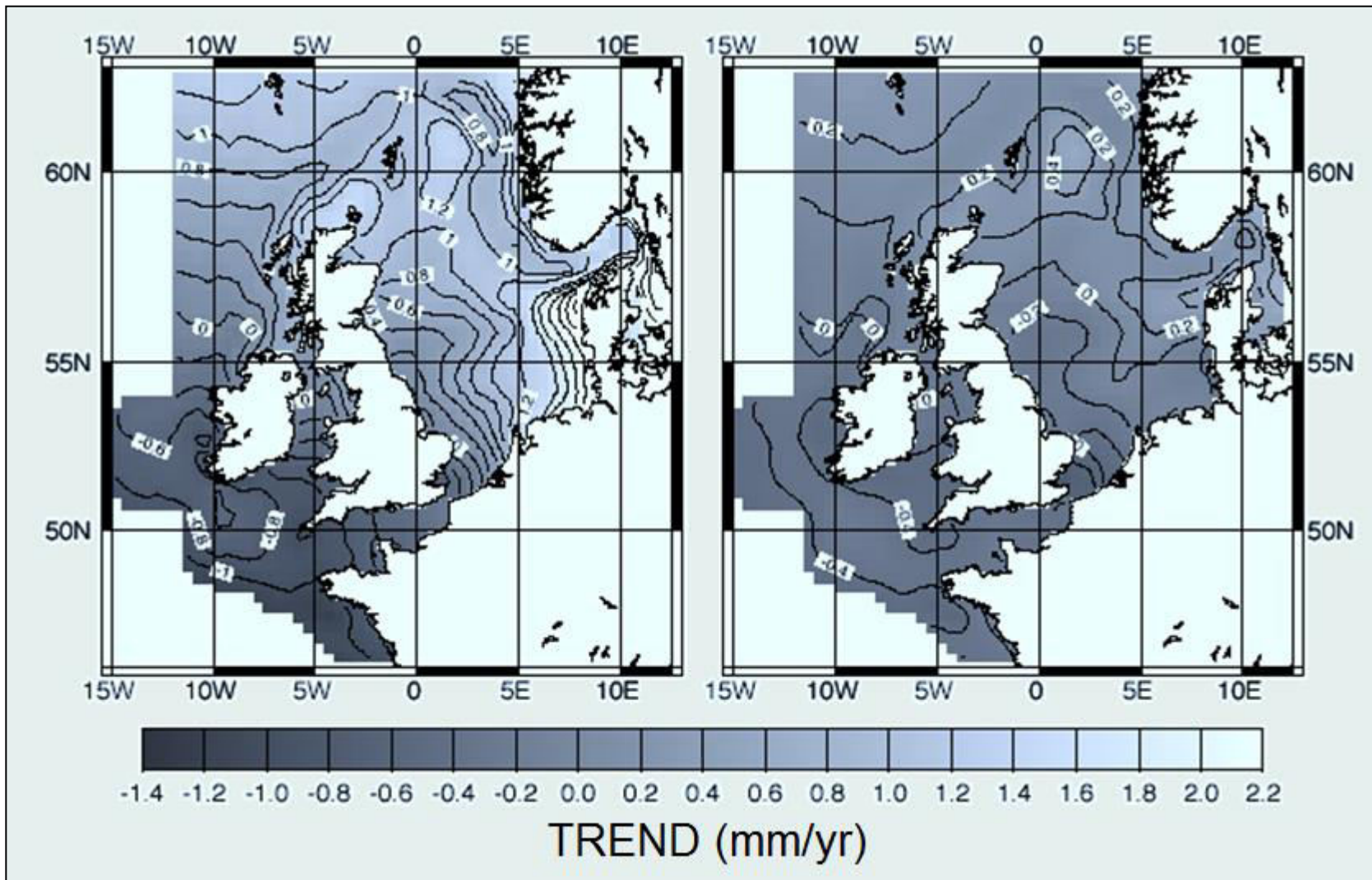


Σχήμα 3.13 Παγκόσμια θαλάσσια στάθμη: Κόκκινη καμπύλη από Church and White (2006), μπλε καμπύλη από παλιρροιογράφους (Holgate and Woodworth, 2004) και μαύρη καμπύλη από δορυφορικά δεδομένα (Leuliette et al., 2004). Κόκκινες και μπλε καμπύλες ανωμαλίες σε σχέση με την μέση στάθμη 1961-1990· μαύρη καμπύλη ανωμαλία σε σχέση με το 1993-2001 (επίπεδο σημαντικότητας 90%) After IPCC (2007).



Σχήμα 3.14 (a) Αύξηση της θαλάσσιας στάθμης σε διαφορετικές ακτές του Ειρηνικού κατά την εξέλιξη του φαινομένου El Niño το 1982-1983. Καθώς το φαινόμενο εξελισσόταν, η στάθμη αυξανόταν προοδευτικά προς την ακτή της Ν. Αμερικής (b) Η μεγάλη φουσκοθαλασσιά στην Ολλανδία το 1953. Η συνολική θαλάσσια στάθμη ήταν η συνισταμένη της παλιρροιακής στάθμης και της αύξησης της φουσκοθαλασσιάς (storm surge) που είχε ύψος 3.3 m. (βασισμένο στο Komar, 1998).

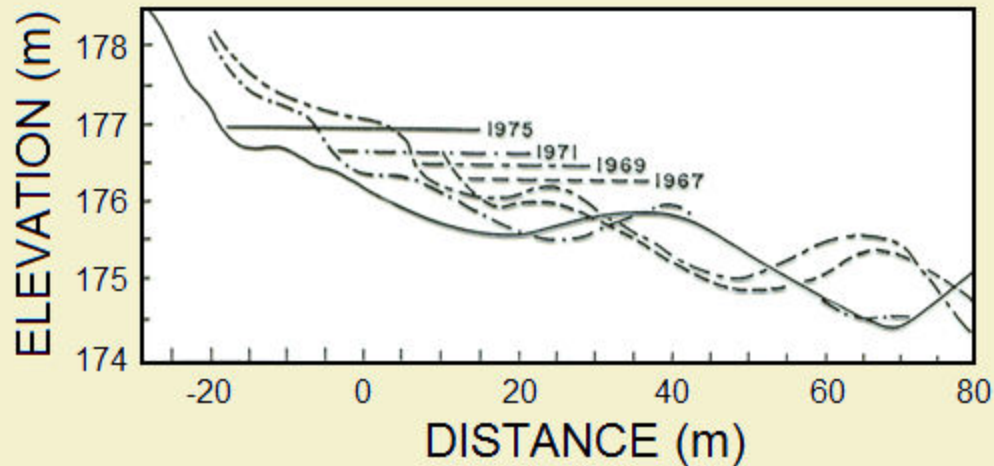
Trend of tide +surge model sea level (a); trend of tide +surge model sea level with NAO regression removed (b). The model covers the period 1955-2000.



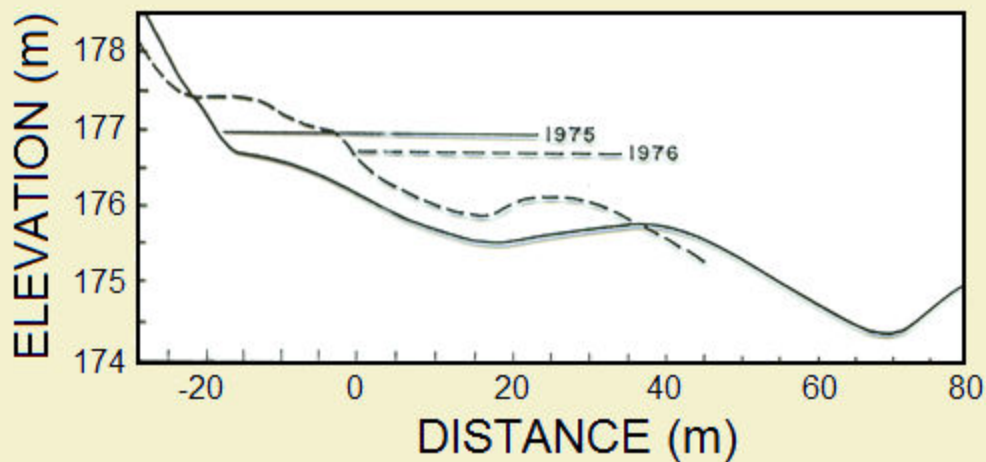
Σχήμα 3.15 Άνοδος στάθμης της θάλασσας στην Β. Ευρώπη. (After Tsimplis et al. 2003).

Lake Michigan (after Hands 1983)

A. Shore retreat, 1967-1975



B. Shore recovery, 1975-1976



Σχήμα 3.16 Μακροχρόνιες αλλαγές στις Λίμνες της Β. Αμερικής . (Τροποποιημένο από Komar (1998))

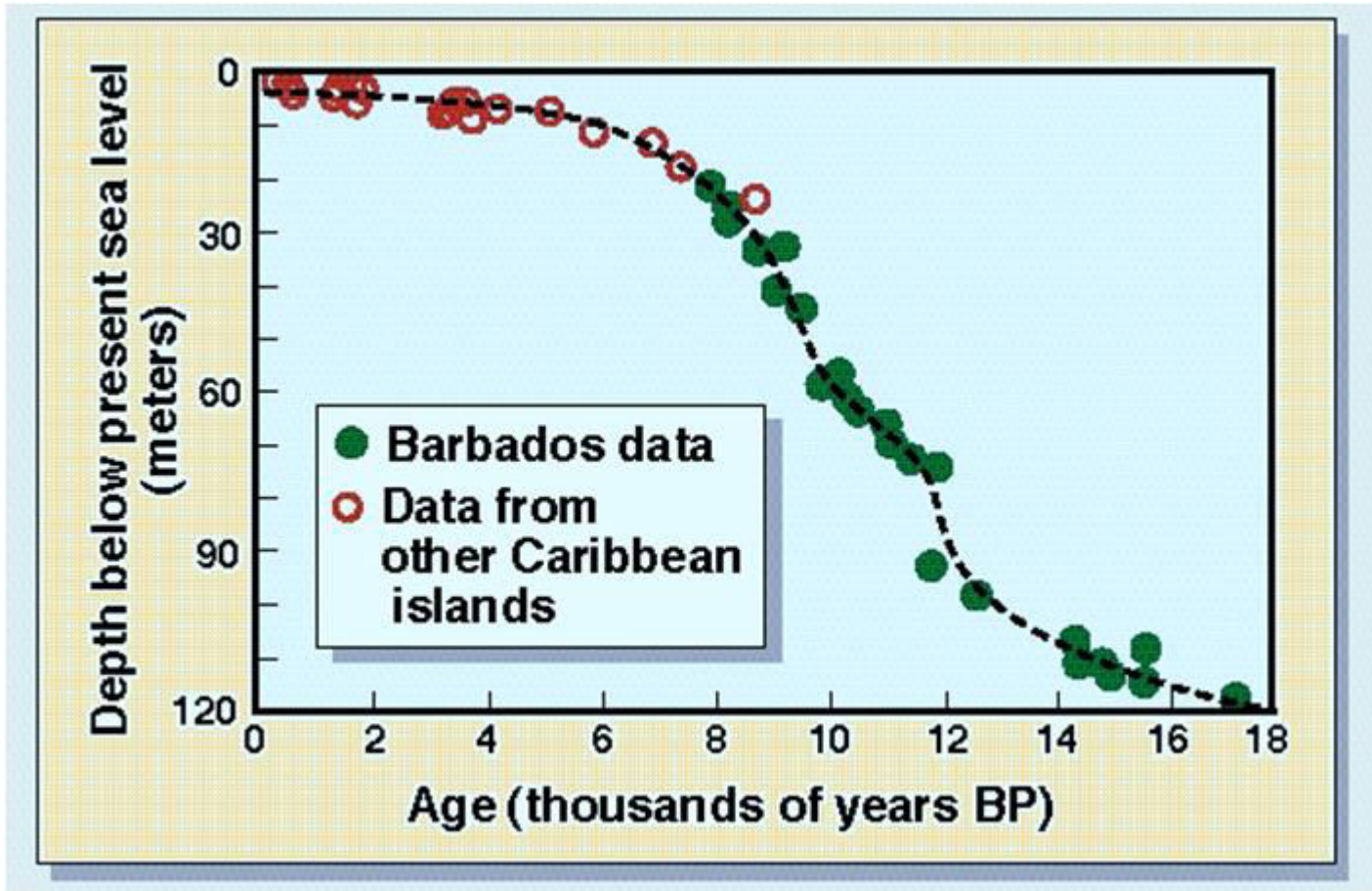
3.4 Μακρόχρονες αλλαγές της θαλάσσιας στάθμης

Όπως προαναφέρθηκε, υπάρχουν μεγάλης κλίμακας κλιματικές διαμορφώσεις (π.χ. North Atlantic Oscillation, North American Lake cycles) που μπορούν να επιδράσουν την θαλάσσια στάση (είτε θετικά είτε αρνητικά)

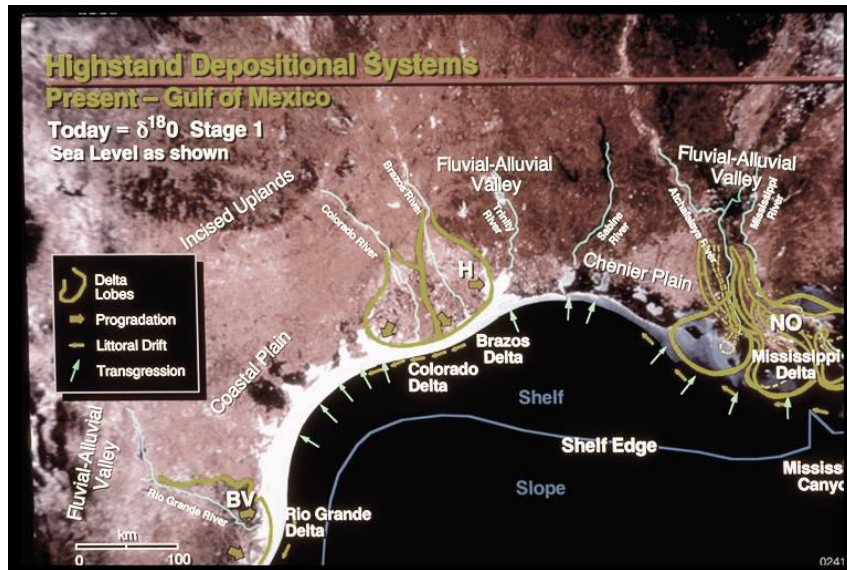
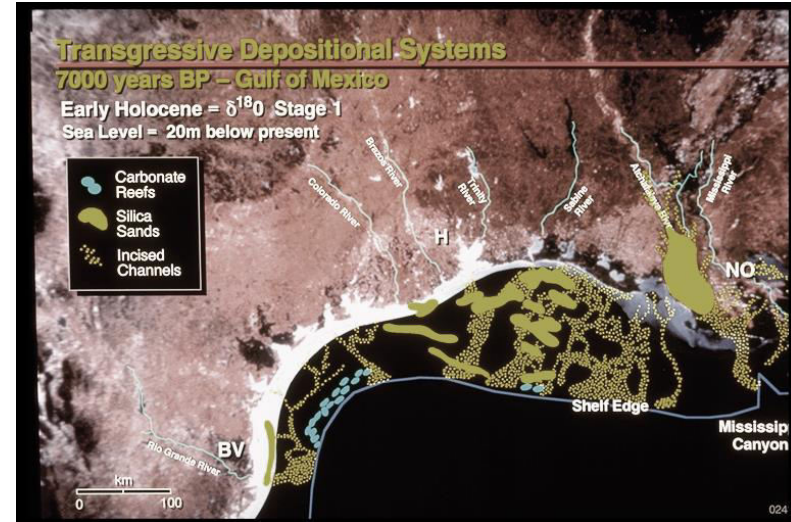
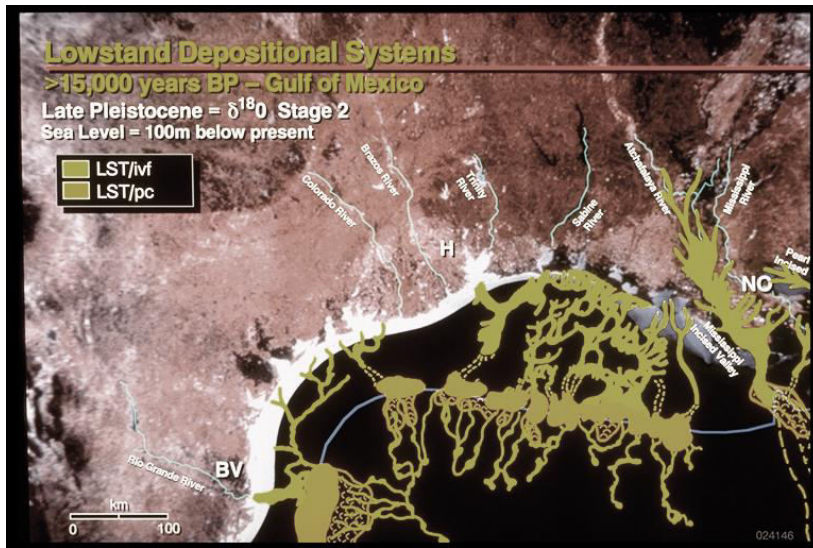
Οι πλέον ανησυχητικές όμως αλλαγές είναι οι ευστατικές αλλαγές (eustatic changes) που σχετίζονται (κυρίως) με το άνοδο της θερμοκρασίας και την ηπειρωτική παγοκάλυψη. ποσοστό κάλυψης του πλανήτη με πάγο.

Αυτές οι αλλαγές μπορούν να δημιουργήσουν (όπως έχουν δημιουργήσει στο παρελθόν) μακρόχρονες και σημαντικές ανυψώσεις της θαλάσσιας στάθμης

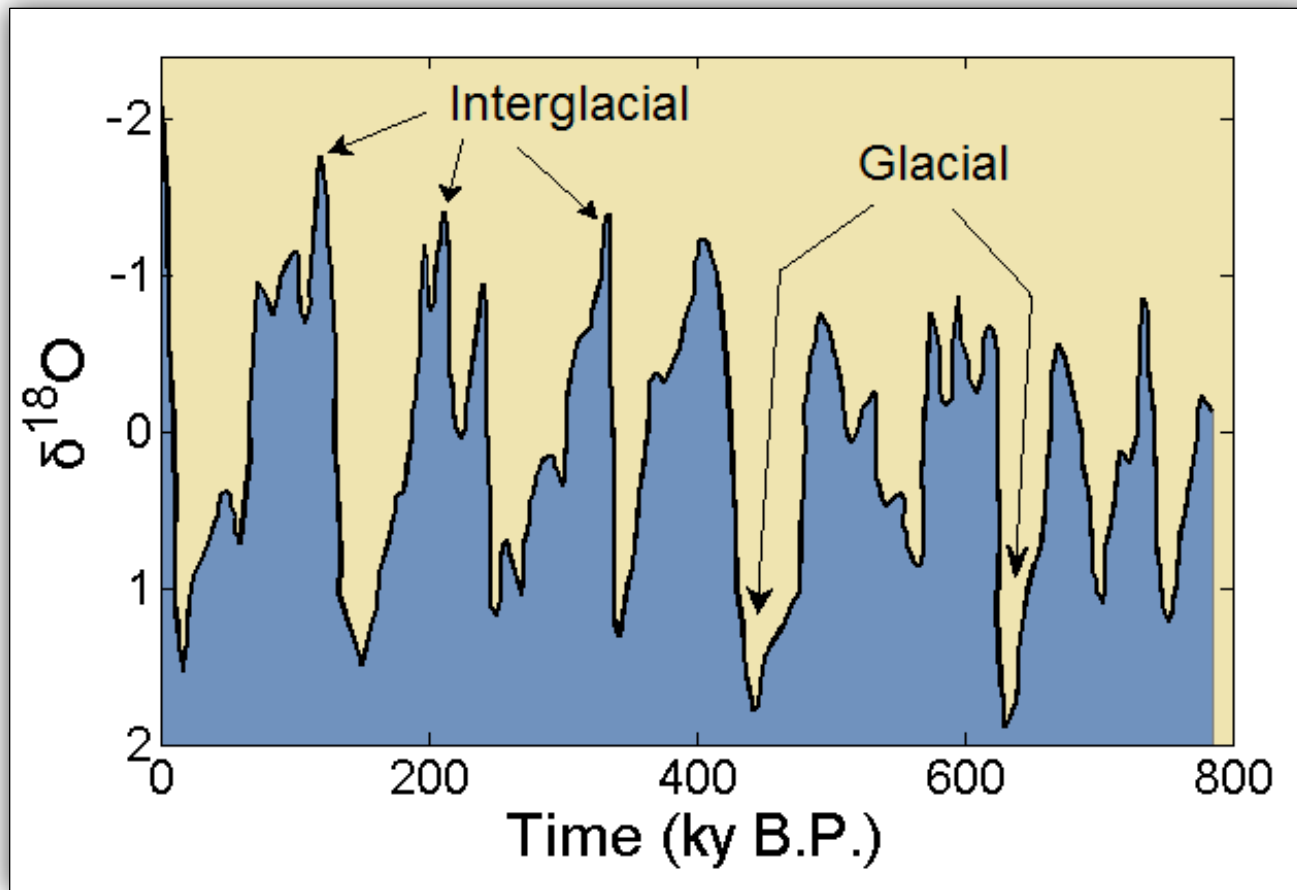
Τέλος, οι ευστατικές κινήσεις μπορεί να συνοδεύονται από ισοστατικές κινήσεις η και τεκτονικές. Το άθροισμα όλων αυτών των κινήσεων δίνει την σχετική αλλαγή της θαλάσσιας στάθμης



Σχήμα 3.17 Αλλαγή της Θαλάσσιας στάθμης τα τελευταία 18000 χρόνια. (Τροποποιημένο από SEPМ, 1996).



Σχήμα 3.18 Η επίπτωση των αλλαγών στην παράκτια γεωλογία. (Τροποποιημένο από SEPM, 1996).



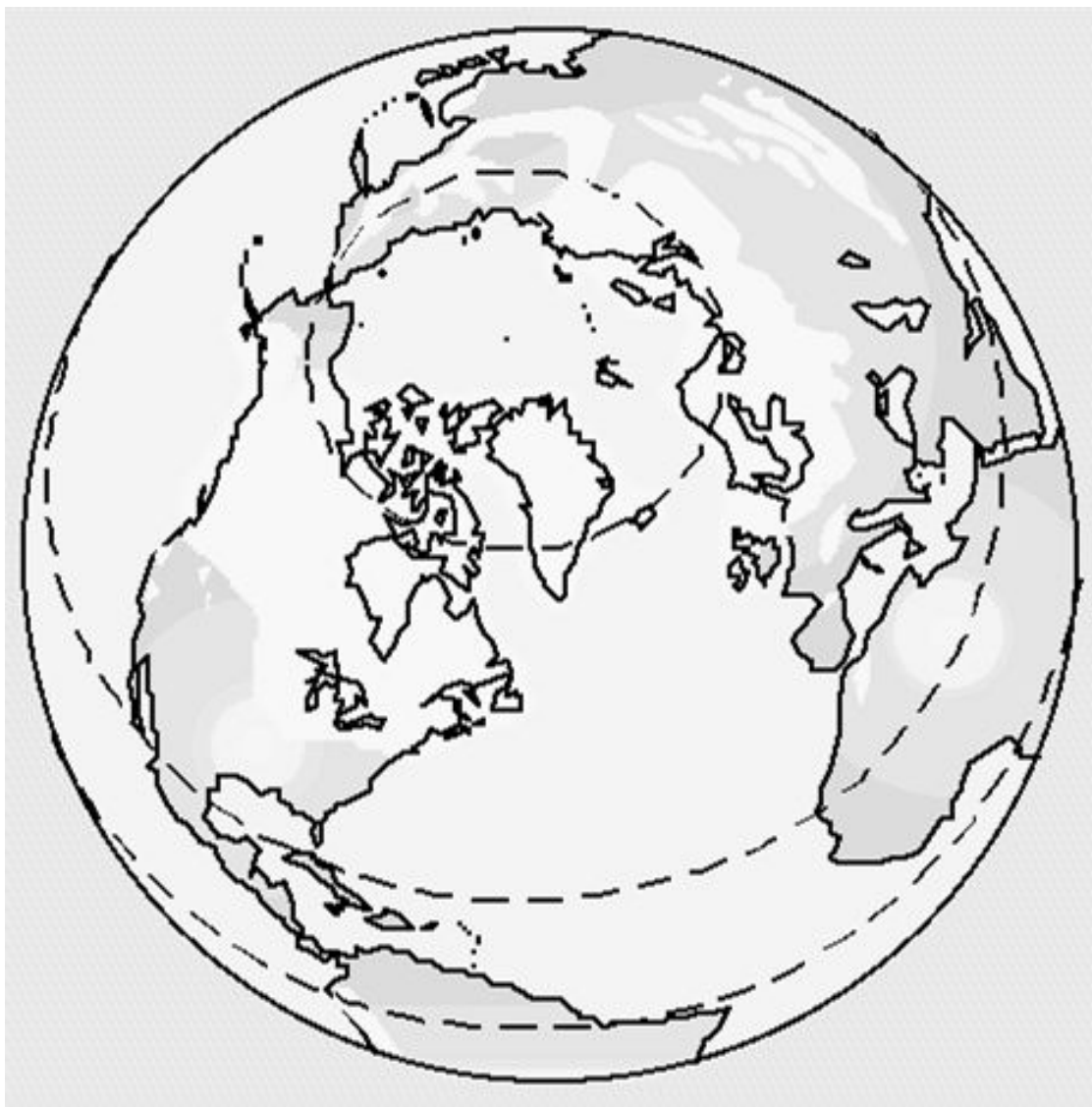
Σχήμα 3.19 Διάγραμμα των αλλαγών στη σύσταση του ισοτοπικού οξυγόνου. Επειδή ο παγετώδης πάγος παίρνει περισσότερο το αλαφρό O-16 η αύξηση των πάγων εμπλουτίζει το θαλάσσιο νερό σε O-18. Έτσι το αρχείο του ισοτοπικού οξυγόνου του θαλάσσιου νερού (μετρούμενο σε ασβεστολιθικά κατακρημνίσματα) δίνει μια έμμεση μέτρηση του όγκου των πάγων και του παγετώδους καλύμματος (και έτσι της θαλάσσιας στάθμης). Βασισμένο στο Prell et al. (1986).



Σχήμα 3.20 Κοραλλιογενής βράχος (Barbados). Προσέξτε τα κυματογενή notches στη βάση του, που είναι εξαιρετικοί δείκτες της στάθμης της θάλασσας. (Τροποποιημένο από SEPM, 1996).

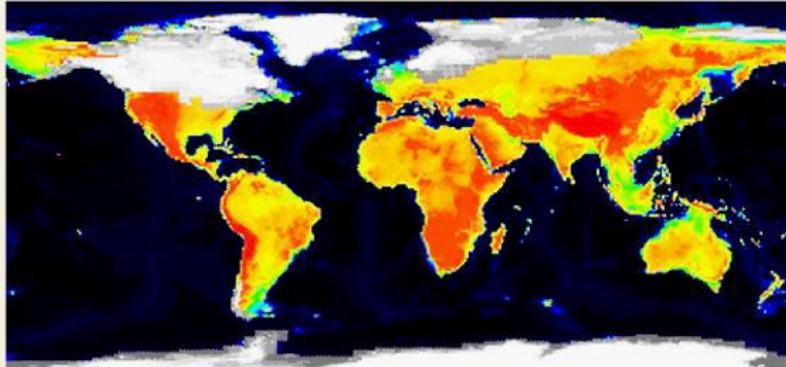


Σχήμα 3.21 Φωτογραφία από το Space Shuttle (24 March 1992) της περιοχής Finger Lake region, New York, U.S.A. (42.5°N 77.5°W), που δείχνει κλασικό τοπίο παγετώνων. (Τροποποιημένο από SEPM, 1996).

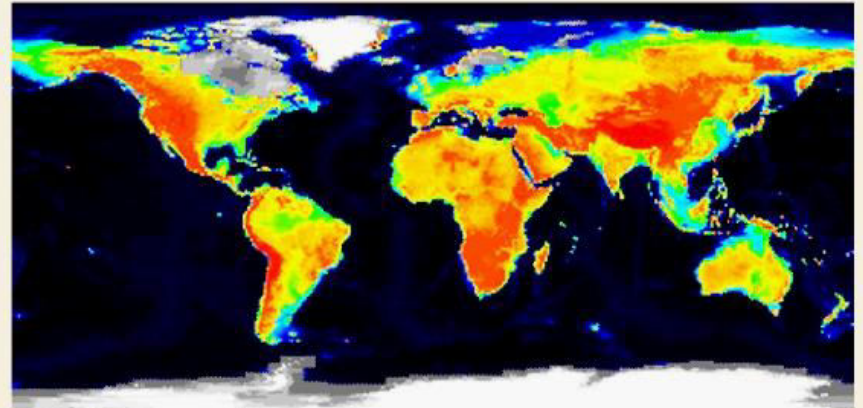


Σχήμα 3.22 Η κάλυψη των πάγων στην τελευταία παγετώδη περίοδο. (Τροποποιημένο από SEPM, 1996).

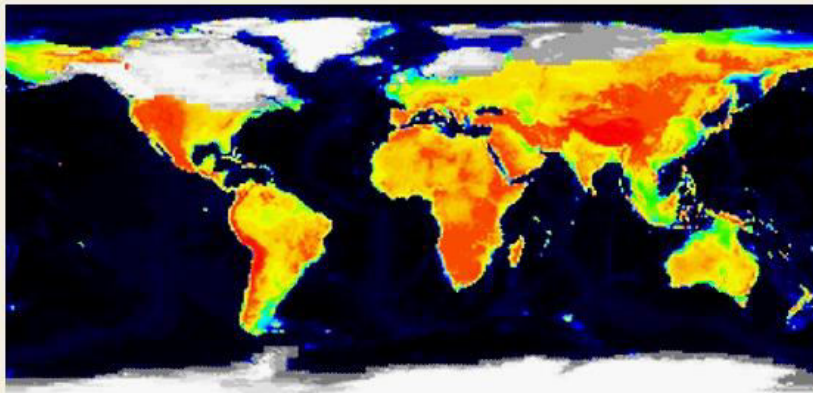
Ice Cover — 21,000 ybp



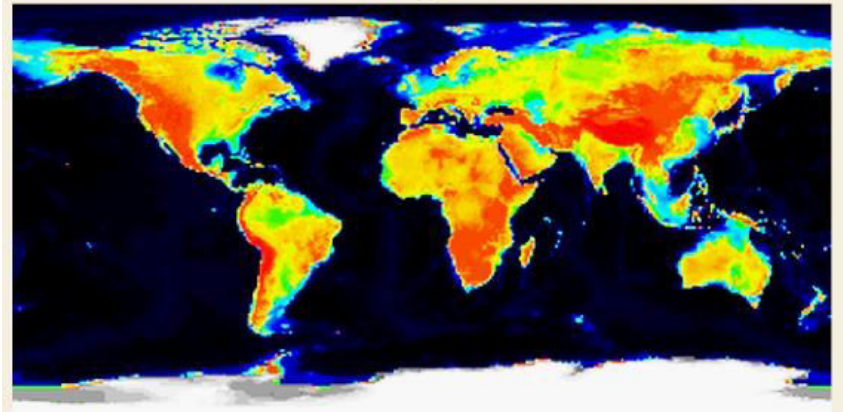
Ice Cover — 10,000 ybp



Ice Cover — 15,000 ybp



Present-Day Ice Cover



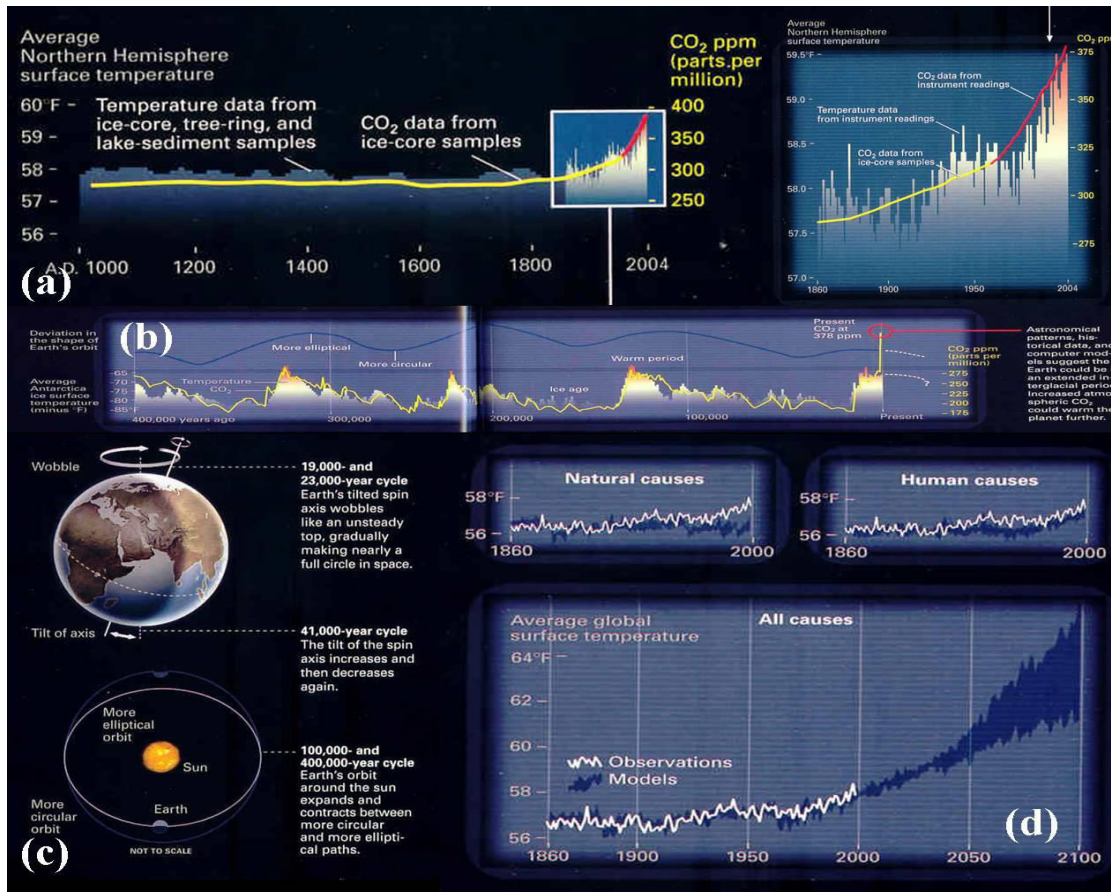
Σχήμα 3.23 Η κάλυψη πάγων τα τελευταία 21000 έτη (Τροποποιημένο από SEPM, 1996).

Επιταχυνόμενη αύξηση της θαλάσσιας στάθμης

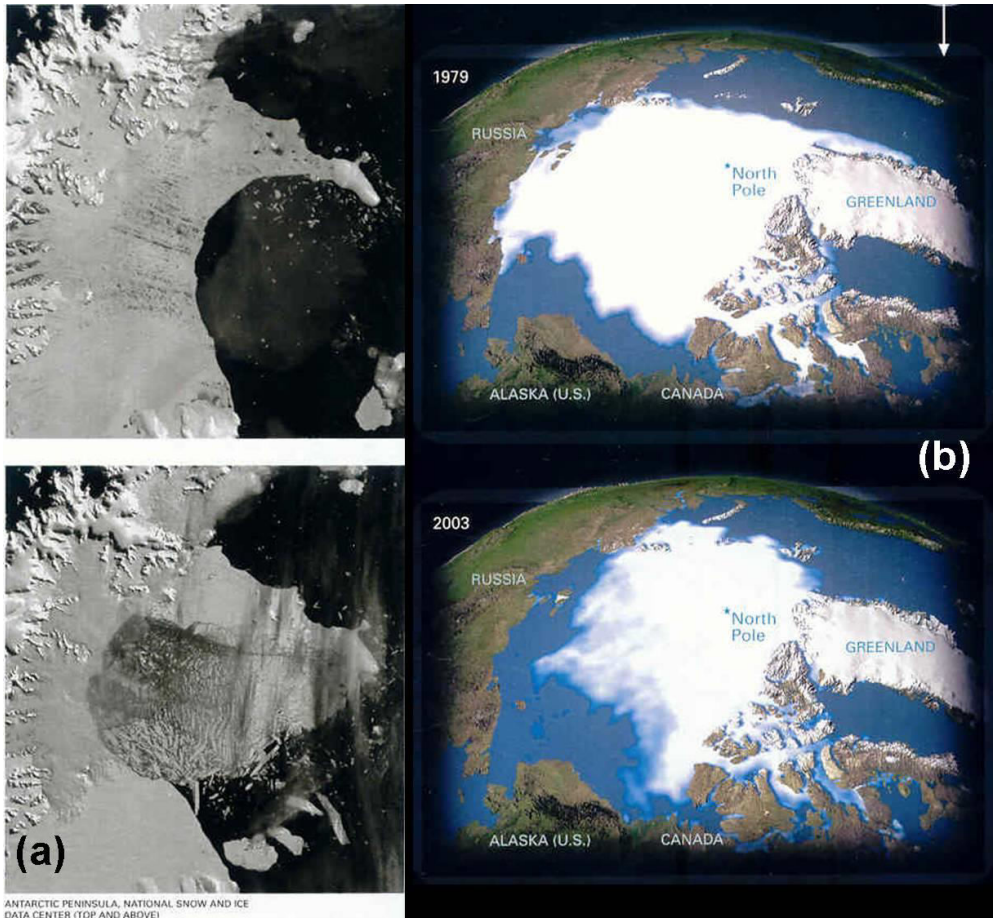
Η αύξηση της θαλάσσιας στάθμης θεωρείται ότι οφείλεται στην αύξηση της μέσης θερμοκρασίας του πλανήτη (IPCC, 2013), η οποία φαίνεται ότι οφείλεται σε

- φυσικά φαινόμενα (π.χ. στις μεταβολές της εκκεντρότητας της περιφοράς της γης γύρω από τον ήλιο, μεταβολές του άξονα περιστροφής της γης, ηλιακές κηλίδες), που μεταβάλλουν την εισερχόμενη θερμότητα στον πλανήτη, και
- ανθρωπογενή φαινόμενα (δηλ. στην αύξηση των αερίων του θερμοκηπίου)

Η αύξηση της θερμοκρασίας αυξάνει την μέση θαλάσσια στάθμη δια μέσου της θερμικής διαστολής των ωκεανών, της τήξης των ηπειρωτικών πάγων και, τοπικά, λόγω αλλαγών στην παγκόσμια θαλάσσια κυκλοφορία.



Σχήμα 3.24. (a) Αύξηση της θερμοκρασίας και περιεκτικότητας της ατμόσφαιρας σε CO₂ στο Β. Ημισφαίριο τα τελευταία 1000 χρόνια (Mann and Jones, 2003). (b) Σχέση της θερμοκρασίας και περιεκτικότητας της ατμόσφαιρας σε CO₂ (από πυρήνα πάγου από την Ανταρκτική (Petit et al., 1999, Nature)) με τους αστρονομικούς κύκλους που δείχνει καλή συσχέτιση Αστρονομικοί κύκλοι (c) Αστρονομικοί κύκλοι (Zachos and Berger, 2004). (d) Διαγνώσεις/ προγνώσεις από κλιματικά μοντέλα (Hadley Centre for Climate Prediction, UK) που δείχνουν τον έλεγχο που ασκούν στην θερμοκρασία οι φυσικές και ανθρωπογενείς διεργασίες. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι μόνον όταν χρησιμοποιηθούν μικτά μοντέλα τα αποτελέσματα συμφωνούν με τις παρατηρήσεις.

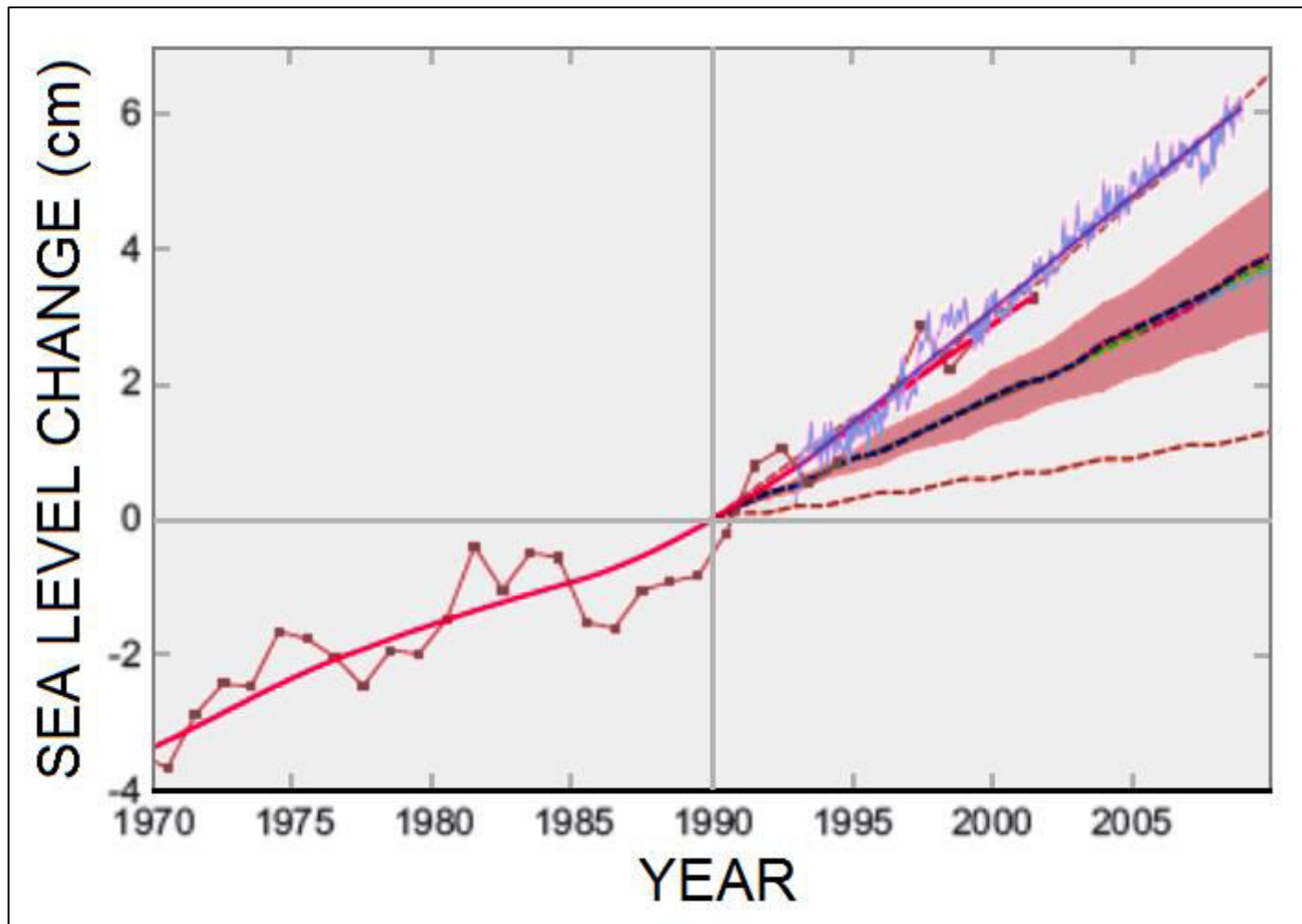


Σχήμα 3.25

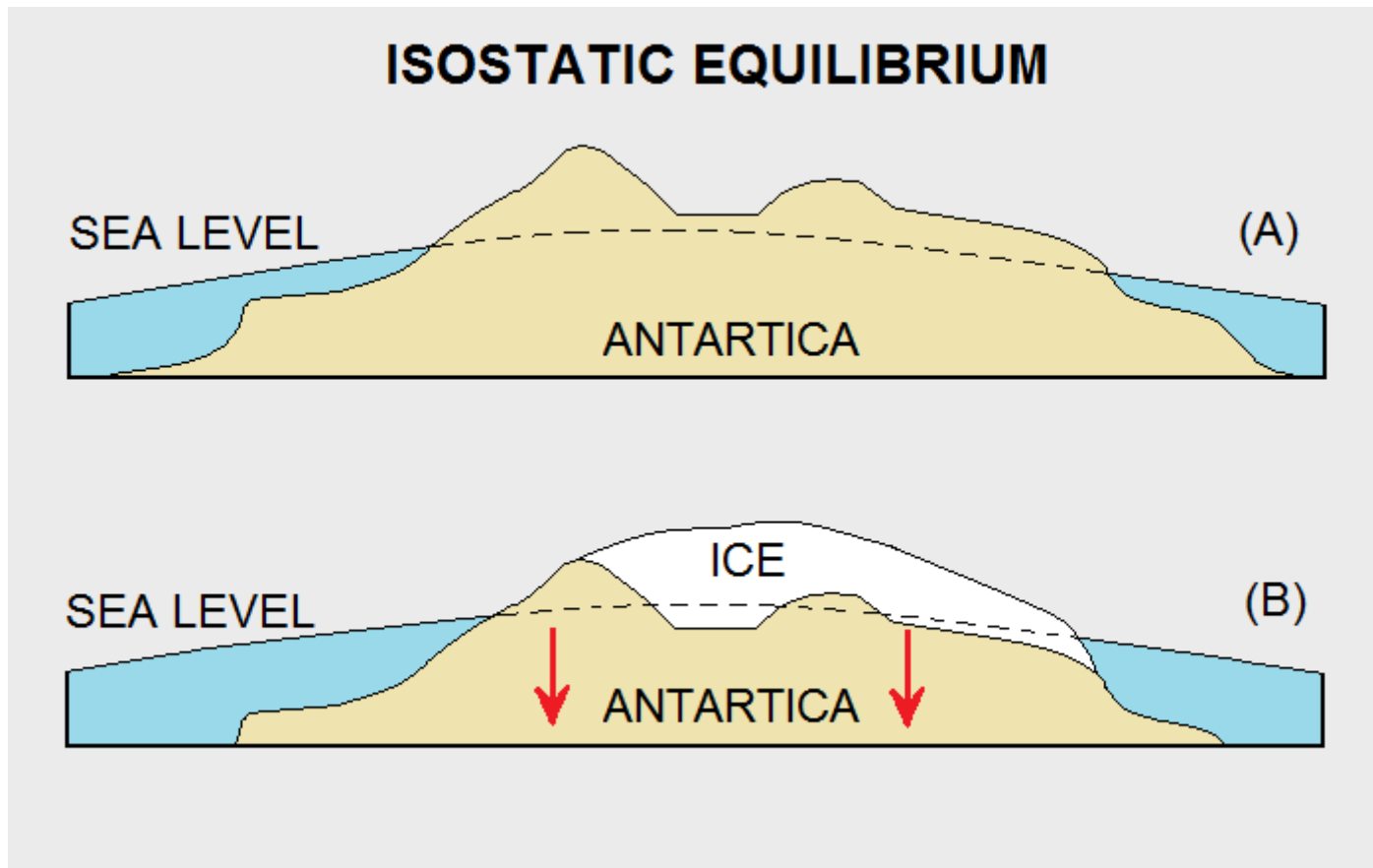
(a) Καταστροφή στο Larsen Ice Shelf, Antarctic την αρχή του 2002 (National Snow and Ice Data Center, USA).

(b) Η μεταβολή της παγοκάλυψης στον Αρκτικό Ωκεανό 1979-2003 (J. Comiso, NASA).

Και στις δύο περιπτώσεις, η τήξη των πάγων δεν έφερε μεταβολή της θαλάσσιας στάθμης αφού πρόκειται για θαλάσσιους πάγους.



Σχήμα 3.26 Αύξηση της θαλάσσιας στάθμης 1970-2008 σχετικά με το 1990. Προσέξτε την διαφορά των παρατηρήσεων μετά το 1990 με την πρόγνωση του IPCC (1990) ((Τροποποιημένο από Richardson et al., 2009).



Σχήμα 3.27 Διάγραμμα που δείχνει την αρχή της ισοστατικής ισορροπίας στην Ανταρκτική. Χωρίς το κάλυμμα από πάγο, (α) η ήπειρος θα ανασηκωθεί πάνω από το επίπεδο της θάλασσας (β) το μεγάλο βάρος του πάγου αναγκάζει την ήπειρο να βυθισθεί βαθύτερα στην ασθενόσφαιρα (Τροποποιημένο από SEPM, 1996).



Σχήμα 3.28 Hanning Bay fault scarp, SW Montague Island, Prince William Sound, Alaska, US. Ο σεισμός της 28 Μαρτίου 1964 (8.4 Richter) σκότωσε 131 και έκανε ζημιές \$350-500000000. Η φωτογραφία δείχνει ΝΔ, παράλληλα προς το ρήγμα που επανενεργοποιήθηκε στον σεισμό. Το ρήγμα βρίσκεται μεταξύ της κυματογενούς (λευκό) πλατφόρμας και της παραλίας (άμμοι / πηλοί). Το έδαφος στα δεξιά του ρήγματος ανέβηκε 4.8 m σχετικά με την άλλη πλευρά αλλά και οι δυο πλευρές ανέβηκαν 6 m (Τροποποιημένο από SEPM, 1996).

3.5 Η παράκτια (παραλιακή) αντίδραση στην αλλαγή

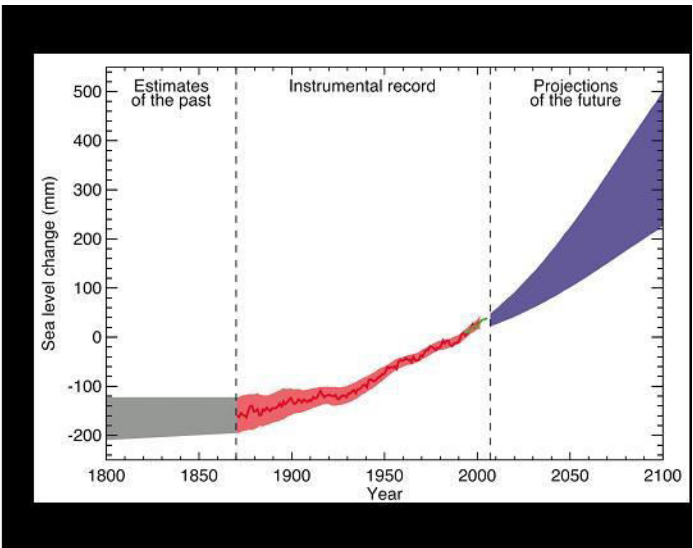
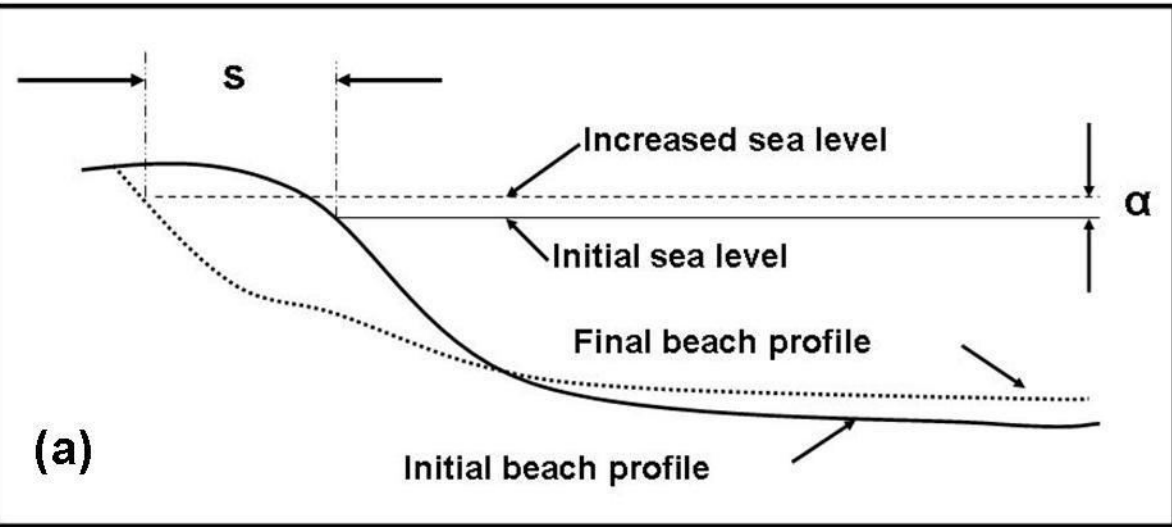
Η προφανής αντίδραση των ακτών στις αλλαγές της θαλασσιάς στάθμης είναι η οπισθοχώρηση τους (σε περίπτωση ανύψωσης) ή η προέλαση τους σε περίπτωση μείσης.

Στο γεωλογικό παρελθόν έχουν συμβεί και οι δυο μετατοπίσεις ακτής, το εύρος των οποίων εξαρτιόταν από το μέγεθος της αλλαγής

Είναι λογικό ότι οι μεγαλύτερες αλλαγές αναμένονται στις χαμηλές ακτές, ιδιαίτερα σε αυτές που σχετίζονται με παράκτιες πεδιάδες (coastal plains) και ποταμόκολπους (estuaries)

Υπάρχουν μοντέλα που εξηγούν (προβλέπουν) τη εξέλιξη ακτών κάτω από αυξανούσα θαλάσσια στάθμη, με το πλέον γνωστά το μοντέλα του Bruun (1962, 1988), Edelman (1972), Kriebel and Dean, (1985), SBeach (1989), Leontiev (1996), (Karambas and Koutitas, 2002) κα.

Υπάρχει όμως πρόβλημα δεδομένων για την αξιολόγηση των μοντέλων



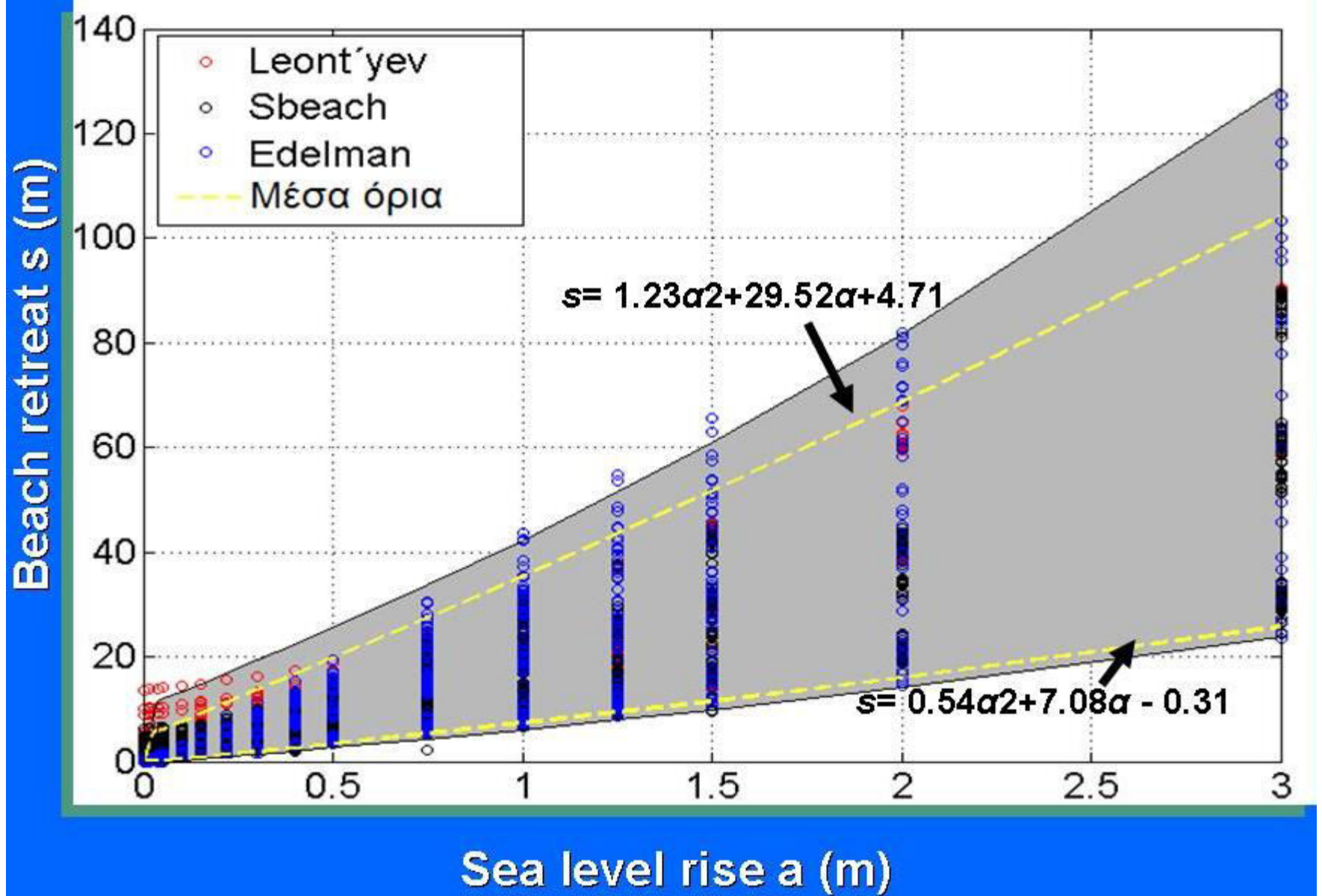
Σχήμα 3.29 Η ανταπόκριση της παραλίας στην αύξηση της θαλάσσιας στάθμης. Αν η θαλάσσια στάθμη αυξηθεί, το παραλιακό ίζημα διαβρώνεται και μεταφέρεται στα ανοικτά με αποτέλεσμα η ακτογραμμή να υποχωρήσει κατά Δx , το οποίο είναι αρκετές τάξεις μεγέθους μεγαλύτερο από την άνοδο της θαλάσσιας στάθμης.

Το μοντέλο του Bruun (1962, 1988)

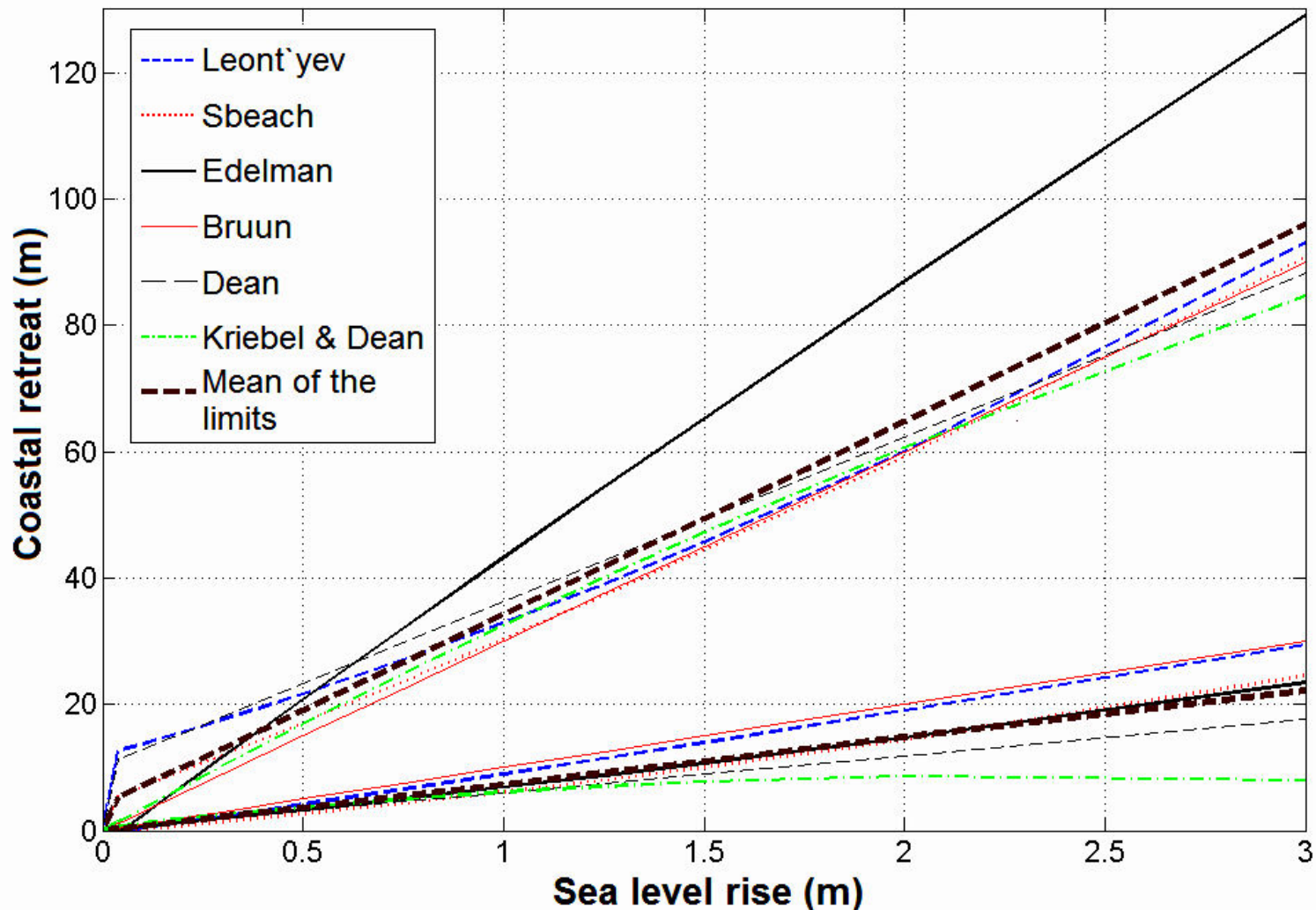
Οι παραδοχές του μοντέλου είναι

- Η άνω παραλία διαβρώνεται λόγω της μεταβολής του προφίλ προς τα έσω
- Το διαβρωμένο υλικό μεταφέρεται αμέσως προς την θάλασσα και αποτίθεται έτσι ώστε οι όγκοι διάβρωσης-απόθεσης να είναι ίσοι
- Η άνοδος στο ύψος του πυθμένα (ελάττωση του βάθους) λόγω της απόθεσης είναι ίση με την άνοδο της θαλάσσιας στάθμης, ώστε το βάθος του πυθμένα να παραμένει το ίδιο
- Αν R είναι ο ρυθμός οπισθοχώρησης, L_* είναι η απόσταση μέχρι το βάθος h_* (το βάθος που υπάρχουν παραλιακά ιζήματα (closure depth) και B είναι το ύψος του διαβρωμένου υβώματος η άλλη εκτίμηση ύψους διάβρωσης τότε

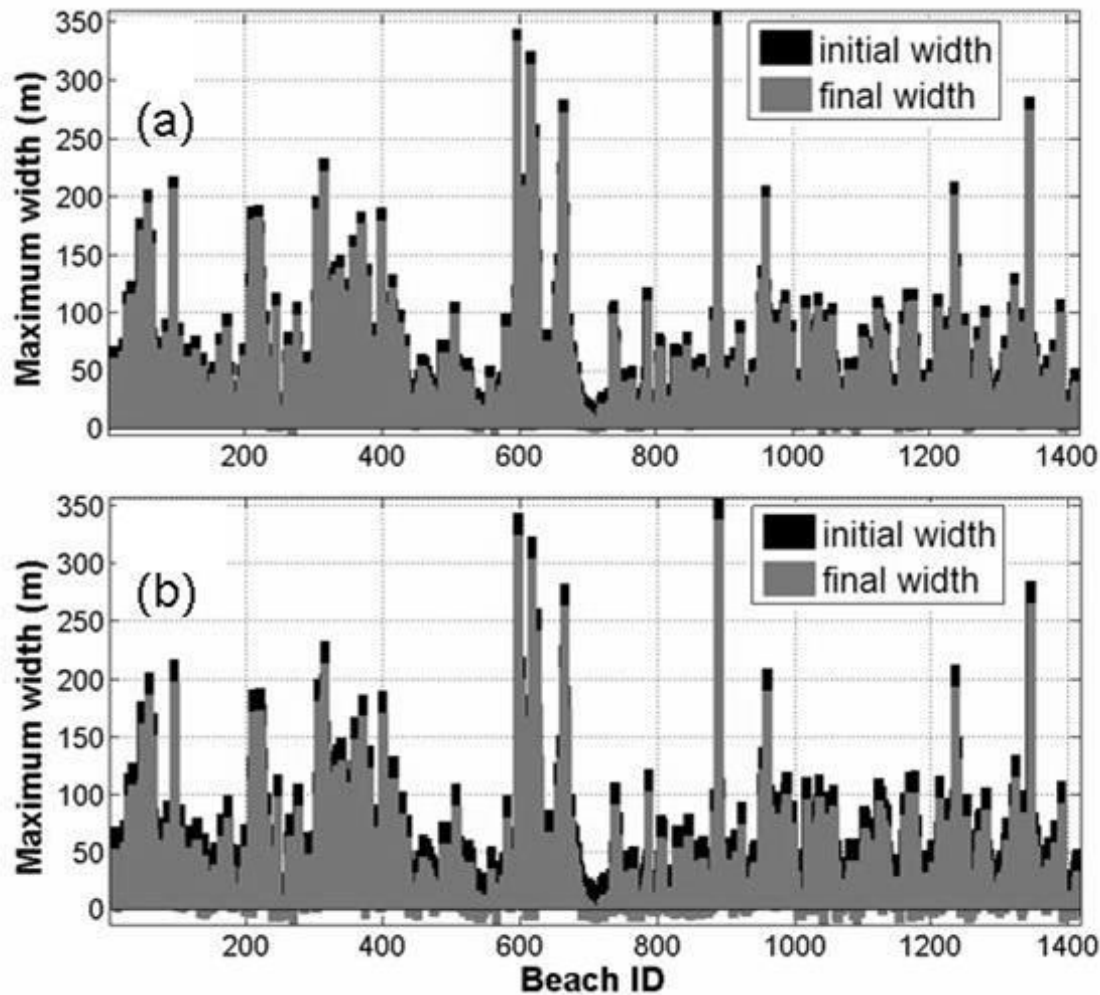
$$R = \frac{L_*}{B + h_*} S$$



Σχήμα 3.30 Προγνώσεις παραλιακής οπισθοχώρησης από φουσκοθαλασιές (16384 πειράματα) με τα μοντέλα Leont'yev, SBEACH και Edelman. (Monioudi et al., 2009; 2011)



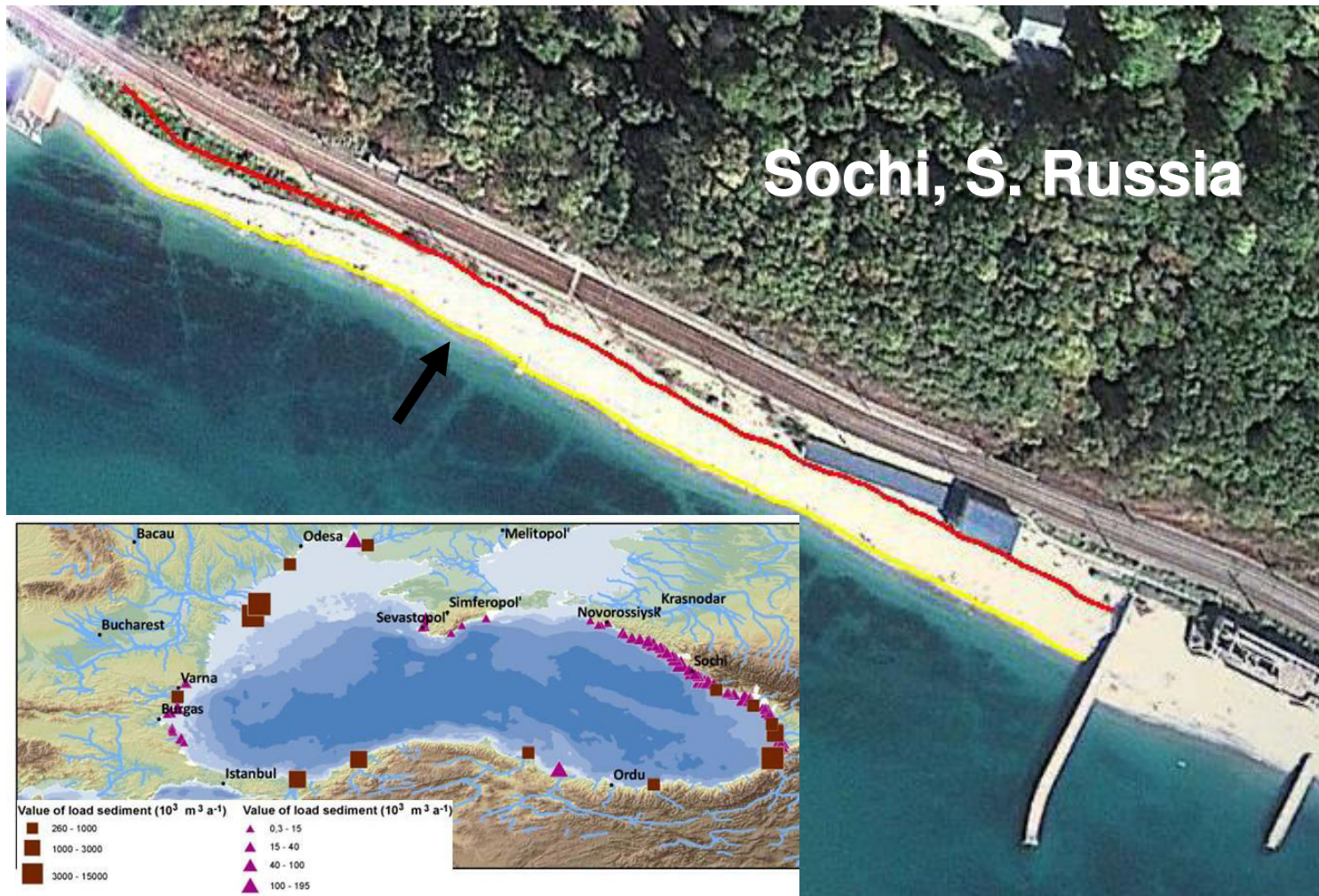
Σχήμα 3.31 Αποτελέσματα συστοιχίας μοντέλων για διαφορετικές παραλιακές κλίσεις (1/10, 1/20 and 1/30), κυματικές συνθήκες και κοκκομετρίες. Το μέσο χαμηλό όριο (i.e. the best fit) είναι $S = 0.01 \alpha^2 + 7.4 \alpha - 0.04$ ($R^2 = 0.99$) και το μέσο υψηλό $S = 0.26 \alpha^2 + 29.9 \alpha + 4.1$ ($R^2 = 0.99$), όπου S η παραλιακή οπισθοχώρηση (Velegrakis et al., 2009).



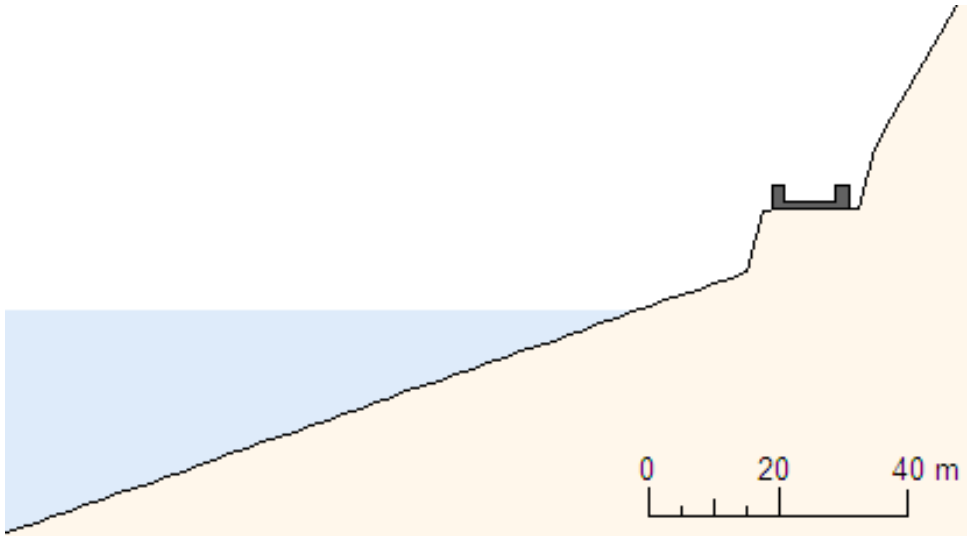
Σχήμα 3.32 Μέγιστη οπισθοχώρηση των παραλιών της Μαύρης Θάλασσας για αύξηση (a) 0.22 m και (b) of 0.50 m

Παραλιακή ID clockwise από το Turkish-Bulgarian σύνορα.

(Velegrakis et al., 2009)

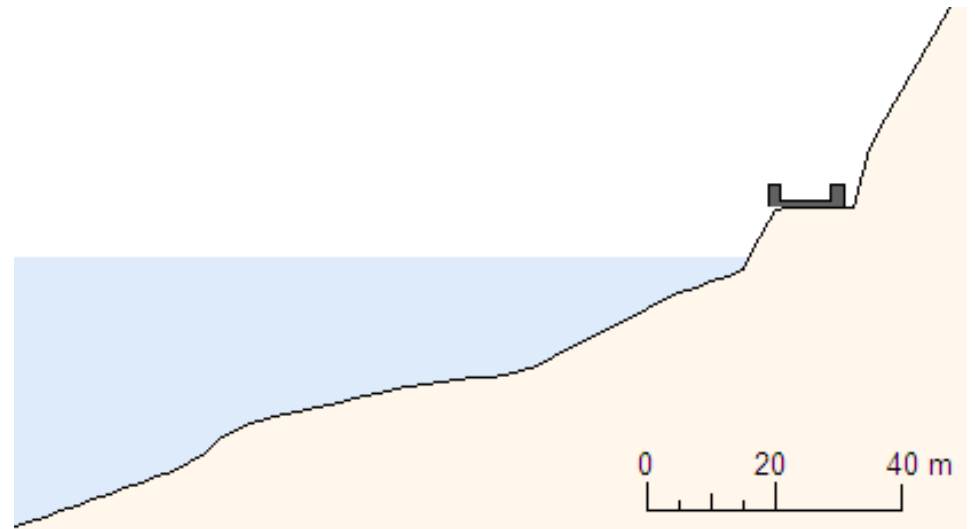


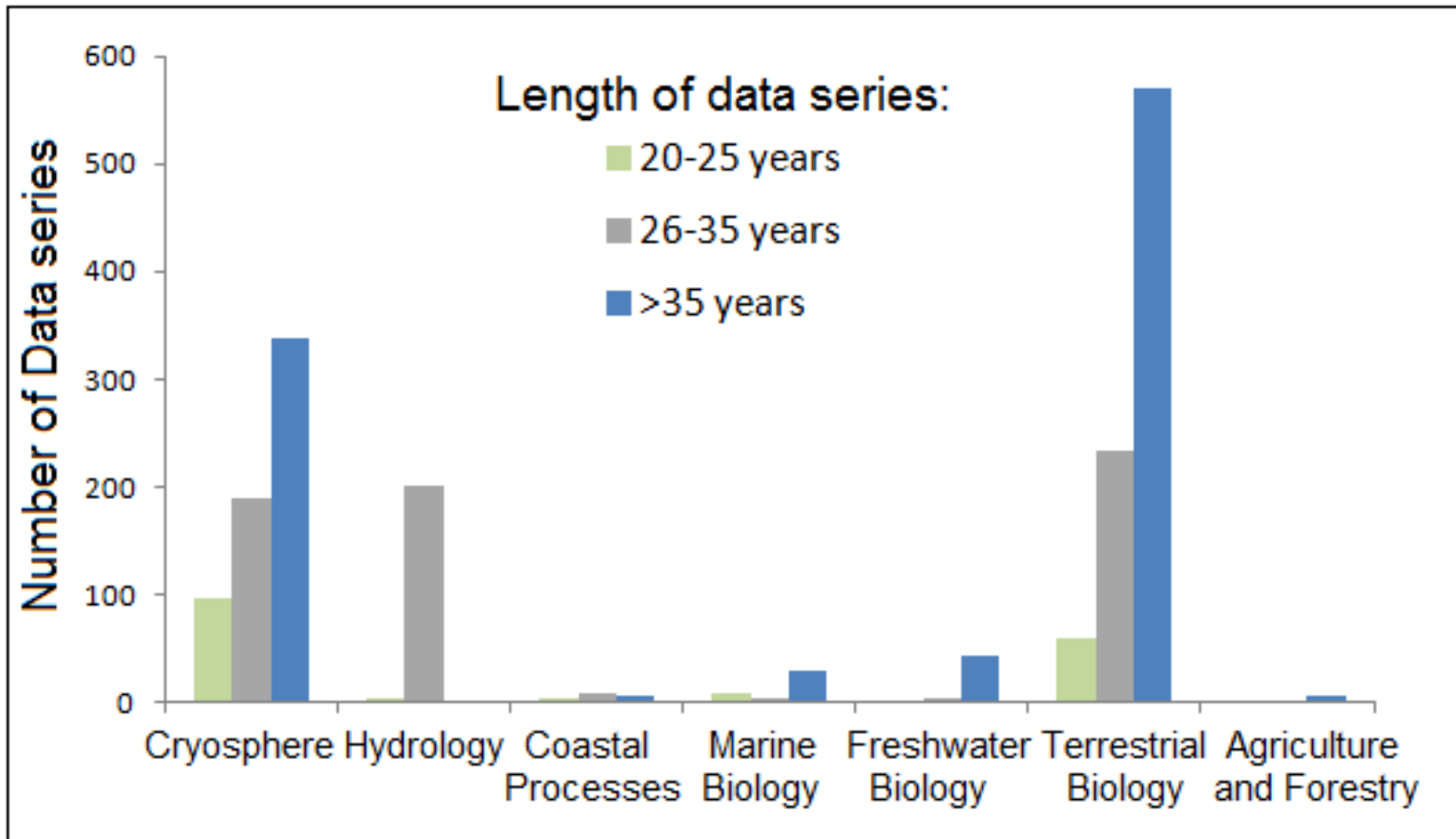
Σχήμα 3.33. Η σιδηροδρομική γραμμή Moscow-Sochi (Black Sea). Η κόκκινη γραμμή δείχνει την οπισθοχώρηση κάτω από 1 m φουσκοθαλασσιά και κύματα (στα ανοικτά) με ύψος $H = 4 \text{ m}$ and περίοδο $T = 7.9 \text{ s}$, σύμφωνα με το μοντέλο Leont' yev (1996) (Velegrakis, 2011)



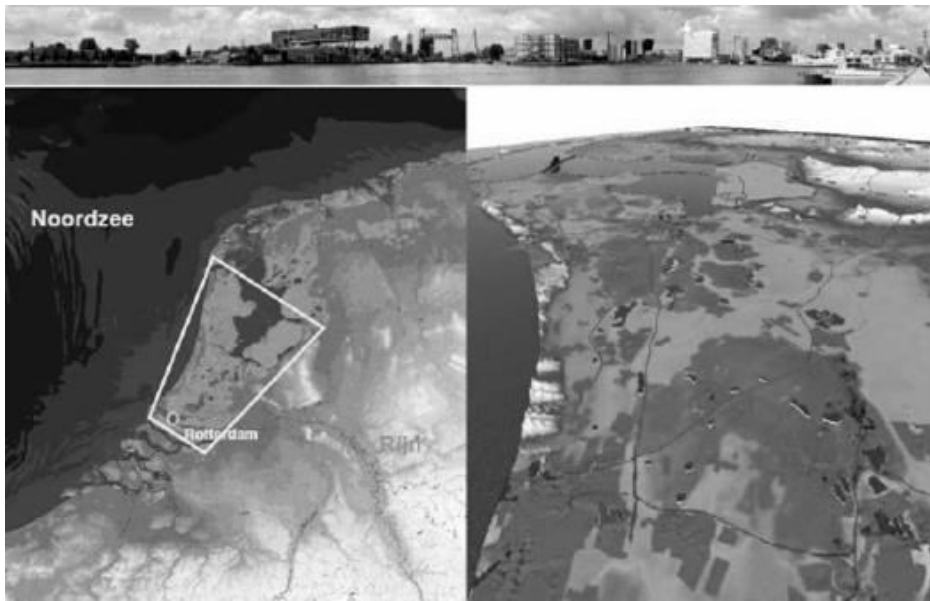
← Κανονική στάθμη

Φουσκοθαλασσιά (Storm surge) 1 m





Σχήμα 3. 34 Παγκόσμιες σειρές δεδομένων περιβαλλοντικής αλλαγής (βασισμένο στους Rosenzweig et al., 2008, Nature 453).



If we do nothing



Σχήμα 3.35 Αν χαθούν οι παραλίες, (και/η τα παράκτια προστατευτικά έργα αλωθούν) τότε μεγάλες περιοχές των παράκτιων χαμηλών ακτών/συστημάτων απειλούνται με πλημμύρες (Τροποποιημένο από Mollema, 2009).



Σχήμα 3.36 Το φράγμα του Τάμεση (Thames Barrage) που έγινε για να προστατεύσει τον ποταμόκολπο από πλημμύρες σε περιπτώσεις μεγάλης φουσκοθαλασσιάς η γενικότερης αλλαγής της θαλάσσιας στάθμης. (Τροποποιημένο από SEPM, 1996).