

ΦΥΣΙΚΗ ΩΚΕΑΝΟΓΡΑΦΙΑ

ΜΑΘΗΜΑ 12

ΠΑΛΙΡΡΟΙΕΣ ΚΑΙ ΠΑΛΙΡΡΟΙΑΚΑ ΡΕΥΜΑΤΑ

ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Γ. Συλαίος

Παλίρροιες (Tides)

Ο σχεδιασμός των παράκτιων τεχνικών έργων πρέπει να λαμβάνει υπόψη του τα κυματικά και τα παλιρροιακά χαρακτηριστικά της περιοχής μελέτης.

Το επίπεδο της θάλασσας ΔΕΝ είναι σταθερό.

Η μεταβολή του οφείλεται σε διεργασίες όπως:

α) Βραχυπρόθεσμες μεταβολές

- * Παλίρροια
- * Θυελλώδης μεταβολή (storm surge)
- * Seiche

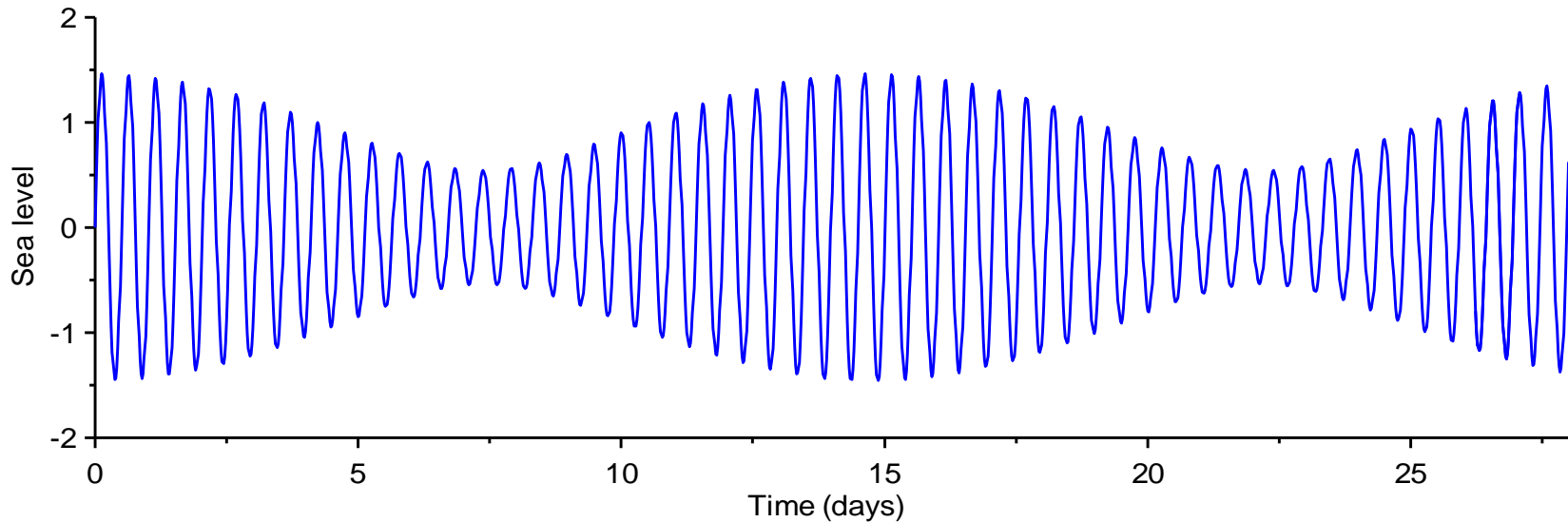
β) Εποχιακές μεταβολές

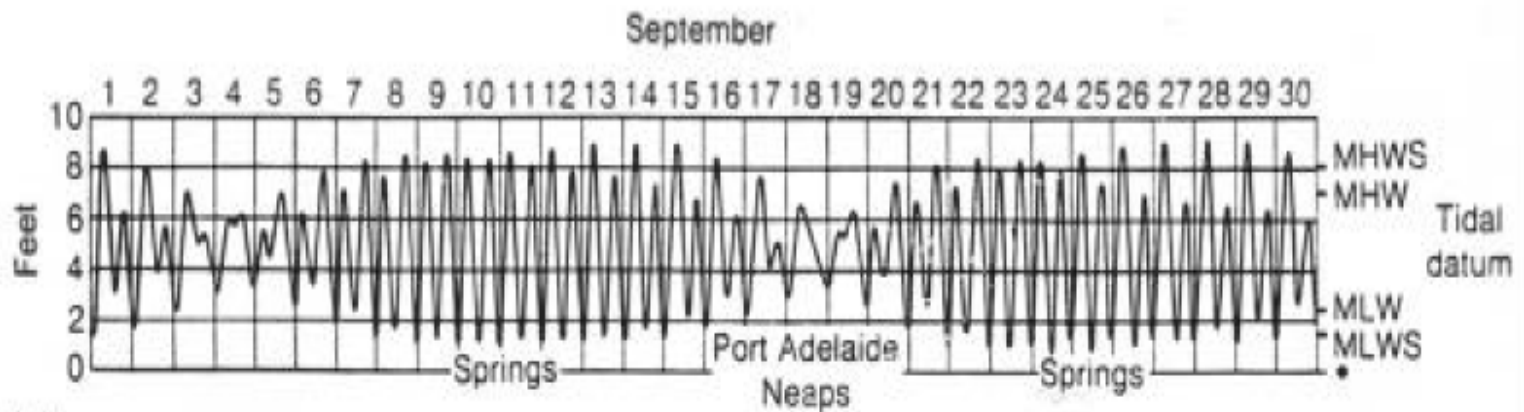
γ) Μακροπρόθεσμες μεταβολές

- * Κλιματικές Αλλαγές
- * Ευστατικές ανυψώσεις θάλασσας
- * Ισοστατικές μεταβολές (τοπικές ανυψώσεις – καθιζήσεις)

Τι είναι η Παλίρροια;

- Αστρονομικής προέλευσης μεταβολές ΜΣΘ
- Προκαλούν ανυψώσεις – καταβυθίσεις ΜΣΘ
- Προκαλούν μεγάλης έντασης ρεύματα
- Επηρεάζουν και μεταβάλλουν τη παράκτια μορφολογία, τη ναυσιπλοΐα, την αλιεία, την οικολογία & την αναψυχή.





(a)

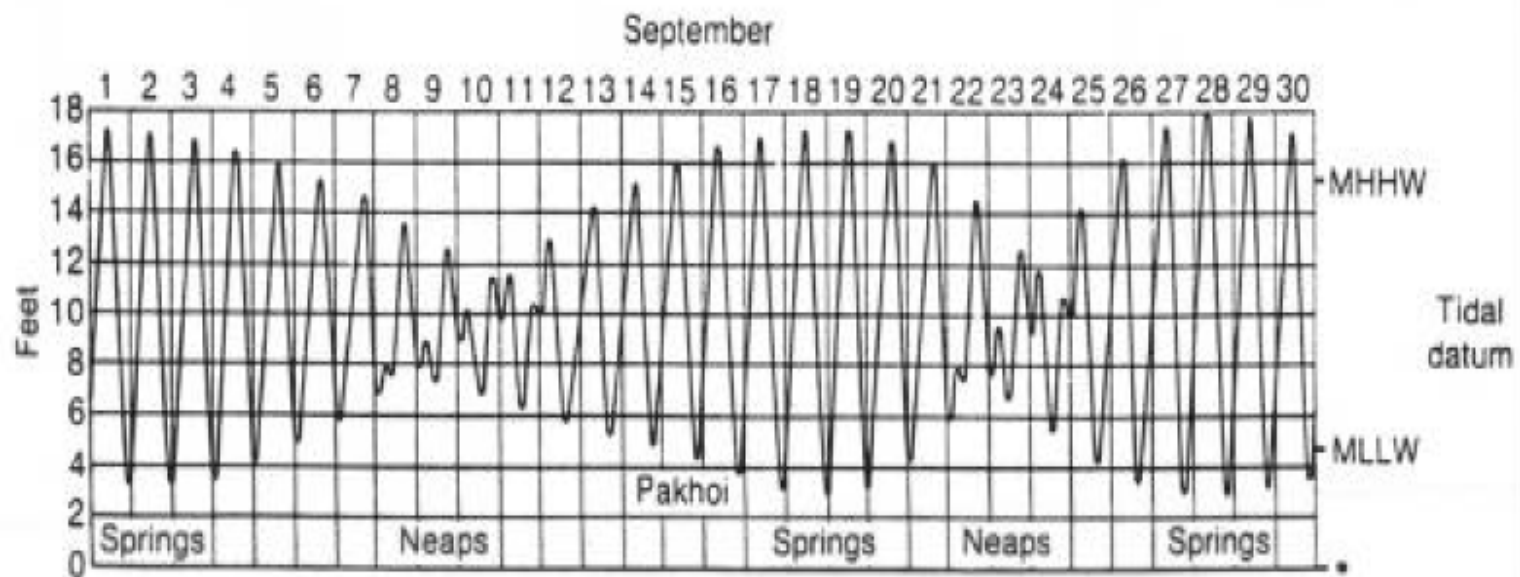
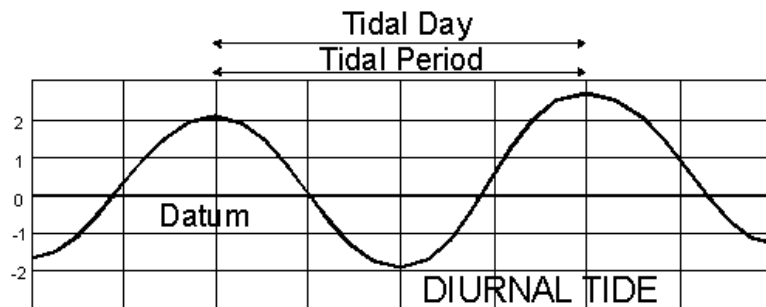
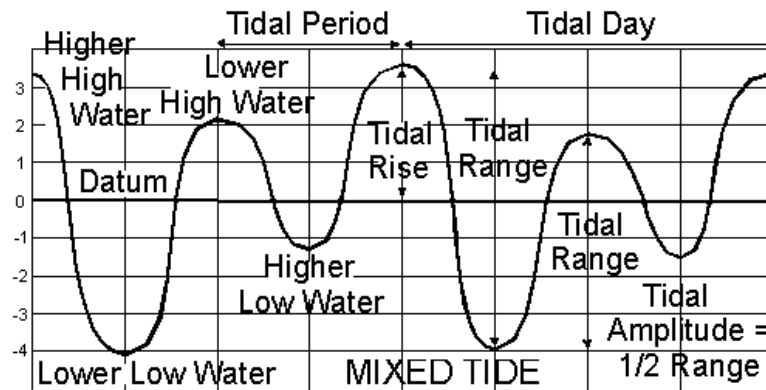
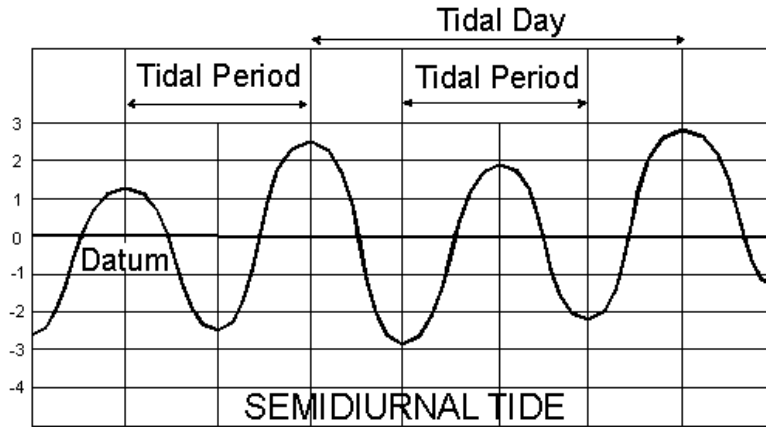


Figure 7.23 Observed tides in Port Adelaide are semidiurnal (twice-a-day) and in Pakhoi diurnal (once-a-day). Tidal ranges in both locations exhibit a spring-neap cycles that are out of phase.

Distribution of Tidal Phases

Tidal Height (in feet above or below the standard datum)



- Ανώτατη Στάθμη Πλήμμης
 - Στάθμη Πλήμμης
- Κατώτατη Στάθμη Ρηχείας
 - Στάθμη Ρηχείας
- Μέση Παλιρροιακή Στάθμη
 - Παλιρροιακό Εύρος
 - Ημερήσια Ανισότητα

Η παλίρροια μπορεί να είναι:

- ❖ ημι-ημερήσια (semi-diurnal) δηλ. να έχει δύο μέγιστα και δύο ελάχιστα στη διάρκεια της ημέρας, ή να είναι
- ❖ ημερήσια (diurnal) δηλ. να έχει ένα μέγιστο και ένα ελάχιστο την ημέρα.

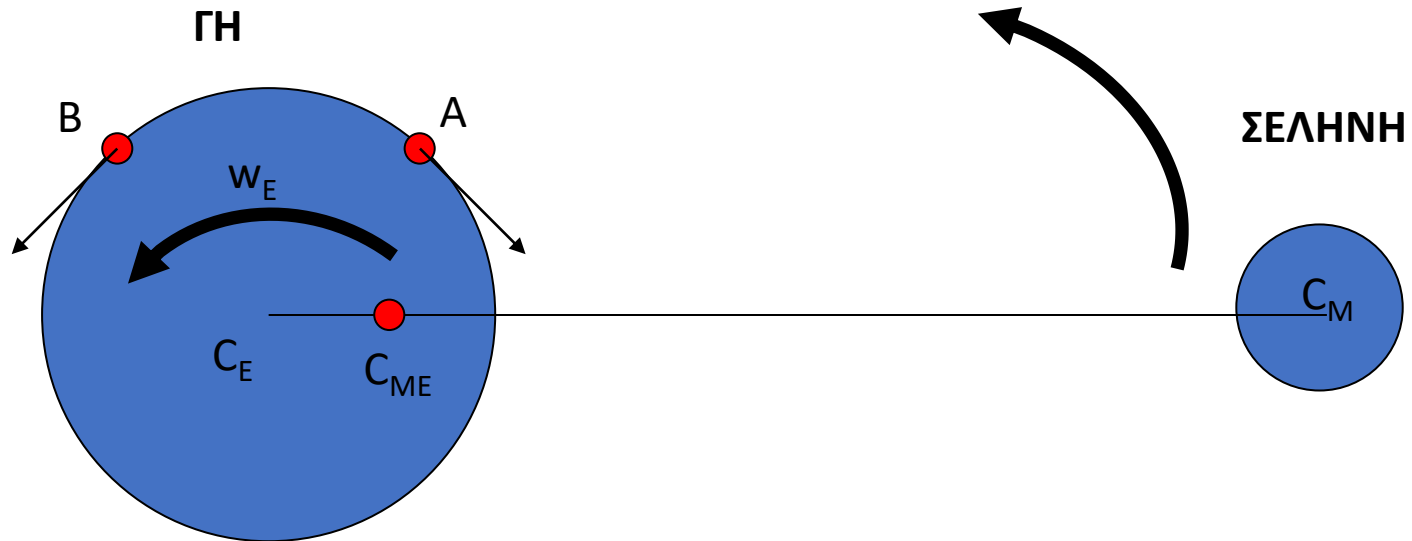
Τι είναι η Παλίρροια;

Η παλίρροια προκύπτει ως το αποτέλεσμα συνδυασμένων δυνάμεων που ενεργούν σε κάθε υδάτινη στήλη. Αυτές είναι:

- * Η έλξη της βαρύτητας της Γης
- * Η φυγόκεντρος δύναμη προκαλούμενη από τη περιστροφή του συστήματος Γη – Σελήνη.
- * Η ελκτική δύναμη του Σελήνης
- * Η ελκτική δύναμη του Ηλίου

Η θεωρία αυτή ονομάζεται θεωρία του παλιρροιακού ισοζυγίου (Tide-equilibrium theory). Συντάχθηκε από το Νεύτωνα για να εξηγήσει τη κατανομή των δυνάμεων που είναι υπεύθυνες για τη δημιουργία των παλιρροιών (tide generating forces).

Έστω το σύστημα Γη - Σελήνη, στο οποίο η Γη είναι ολόκληρη καλυμμένη με νερό. Τότε η κατανομή των δυνάμεων που δρουν σε κάθε μόριο μάζας της Γης θα είναι ως εξής



Η συνολική δύναμη θα είναι μία ασθενής οριζόντια δύναμη.

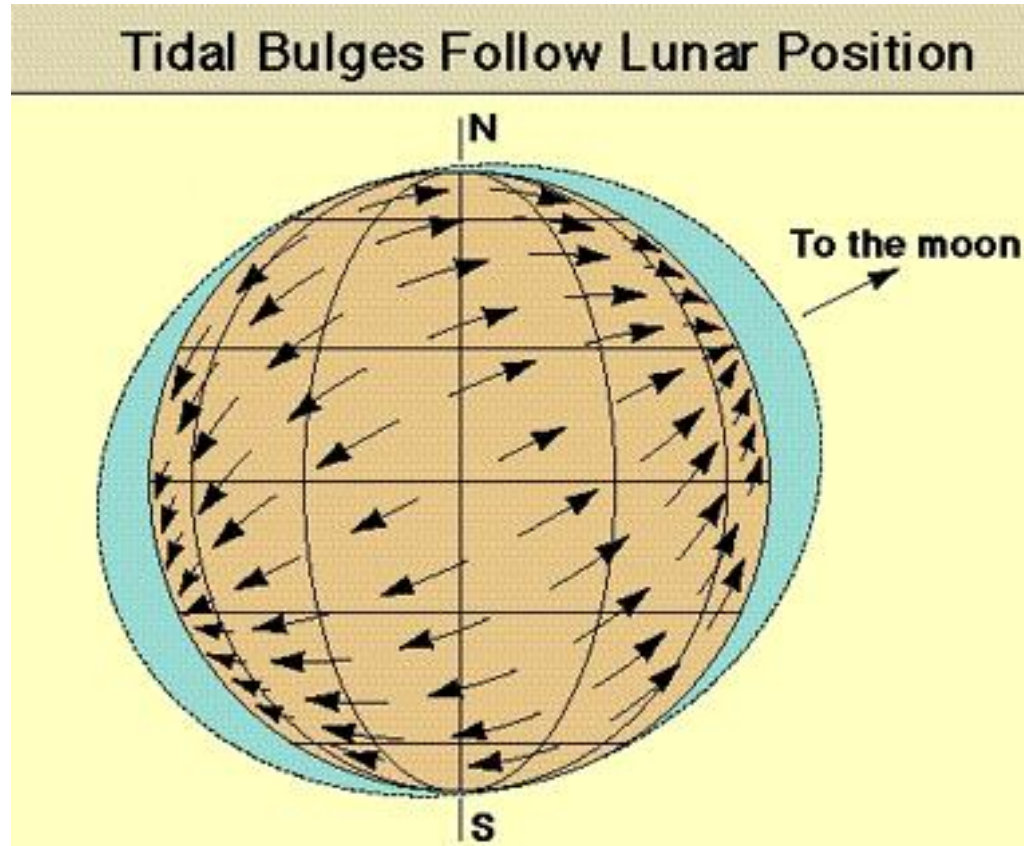
Θα μεταφέρει το Σωματίδιο A **προς** τη Σελήνη και το Σωματίδιο B **μακριά** από τη Σελήνη. Άρα:

A) Στο κέντρο της Γης θα έχουμε ότι η Βαρυντική Δύναμη έλξης της Σελήνης είναι ίση με τη Φυγόκεντρο Δύναμη που προκύπτει λόγω περιστροφής της Γης,

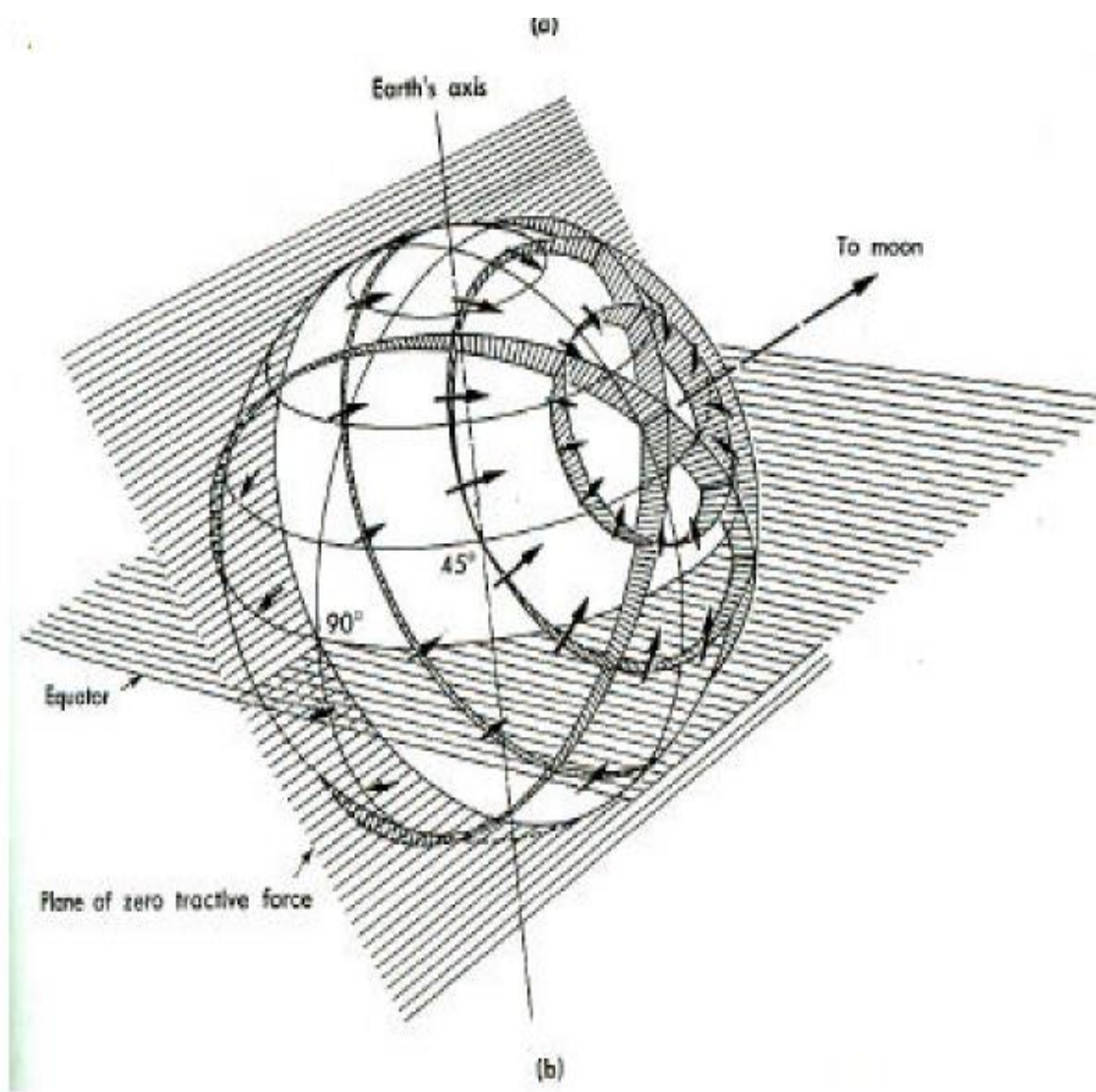
B) Στην επιφάνεια της Γης προς τη μεριά της Σελήνης έχουμε ότι η Βαρυντική Δύναμη έλξης της Σελήνης είναι μεγαλύτερη της Φυγόκεντρο Δύναμης λόγω περιστροφής της Γης, και τέλος

Γ) Στην επιφάνεια της Γης μακριά από τη Σελήνη έχουμε ότι η Βαρυντική Δύναμη έλξης της Σελήνης είναι μικρότερη της Φυγόκεντρο Δύναμης.

Η κατανομή των υπολειπόμενων παλιρροιακών δυνάμεων (residuals of tide-producing forces) δείχνει ότι οι δυνάμεις αυτές έχουν φορά προς το εσωτερικό της Γης στα σημεία κατά μήκος του άξονα Γης – Σελήνης, και προς το εξωτερικό της Γης στα σημεία κάθετα στον άξονα αυτόν.



Προκαλείται λοιπόν ένα παλιρροιακό ελλειψοειδές (tidal bulge)
Συσώρευση νερού στα σημεία του άξονα Γης-Σελήνης, έλλειμμα νερού στα σημεία κάθετα στον άξονα



Αυτή η κατανομή προκαλεί μία σειρά από ενδιαφέρουσες επιπτώσεις.

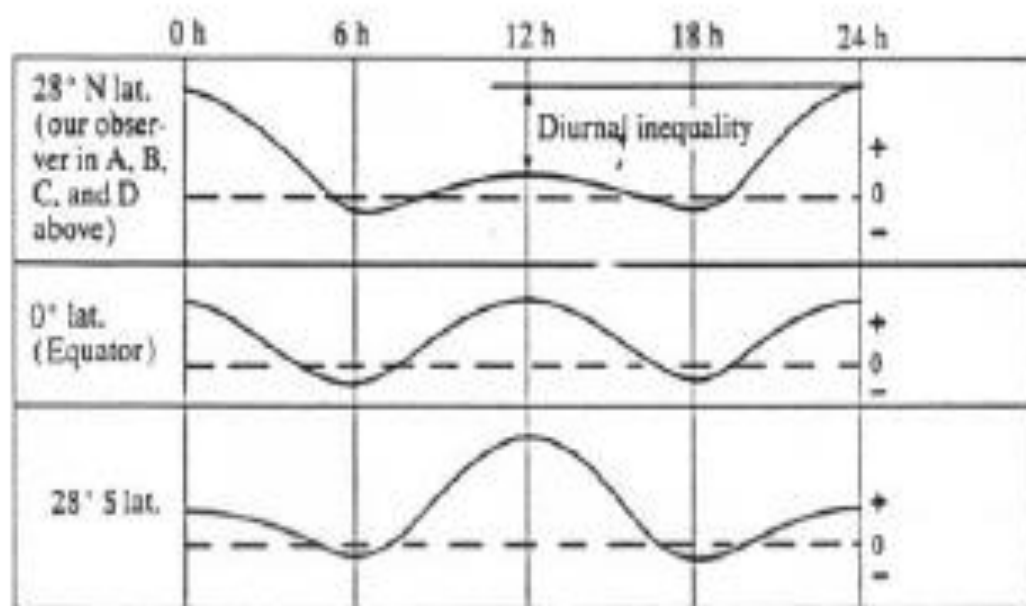
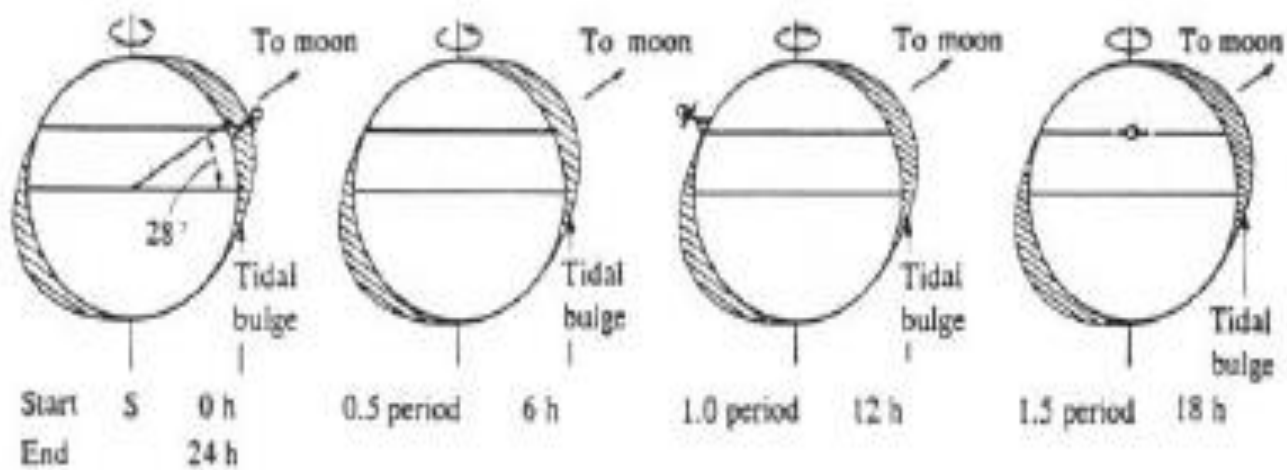
❖ Η περιστροφή της Γης ως προς τον άξονά της προκαλεί σε ένα σταθερό παρατηρητή την αίσθηση ότι σε μία ημέρα διέρχονται δύο παλιρροιακά μέγιστα και δύο παλιρροιακά ελάχιστα.

❖ Ωστόσο, η σεληνιακή ημέρα διαρκεί 24 ώρες και 50 λεπτά. Αυτό σημαίνει ότι το κάθε παλιρροιακό μέγιστο και ελάχιστο θα συμβεί την επόμενη μέρα με καθυστέρηση 50 λεπτών.

❖ Άρα η περίοδος του κύματος είναι 12 ώρες και 25 λεπτά ή 12.42 ώρες, και η παλίρροια αυτή ονομάζεται ημι-ημερήσια (semi-diurnal tide).

❖ Ισημερινές παλίρροιες (Equatorial Tides), συμβαίνουν δύο φορές κατά τη διάρκεια του κάθε μήνα όταν η Σελήνη διέρχεται από τον Ισημερινό. Κατά τις ημέρες αυτές τα παλιρροιακά μέγιστα και ελάχιστα έχουν το ίδιο εύρος.

❖ Συνήθως, το παλιρροιακό ελλειψοειδές βρίσκεται υπό γωνία ως προς τον Ισημερινό, η οποία γωνία μεταβάλλεται στη διάρκεια της ημέρας, οπότε η ημι-ημερήσια παλίρροια μεταβάλλει το εύρος της, προκαλώντας την ημερήσια ανισότητα (diurnal inequality).



Γενικά, η ημερήσια ανισότητα δεν παρατηρείται στον Ισημερινό, ενώ αυξάνεται με το γεωγραφικό πλάτος.

Ο κύκλος της Σεληνιακής ημερήσιας ανισότητας επαναλαμβάνεται κάθε 29,3 ημέρες (Σεληνιακός μήνας).

Ο κύκλος της Ηλιακής ημερήσιας ανισότητας επαναλαμβάνεται κάθε 1 έτος.

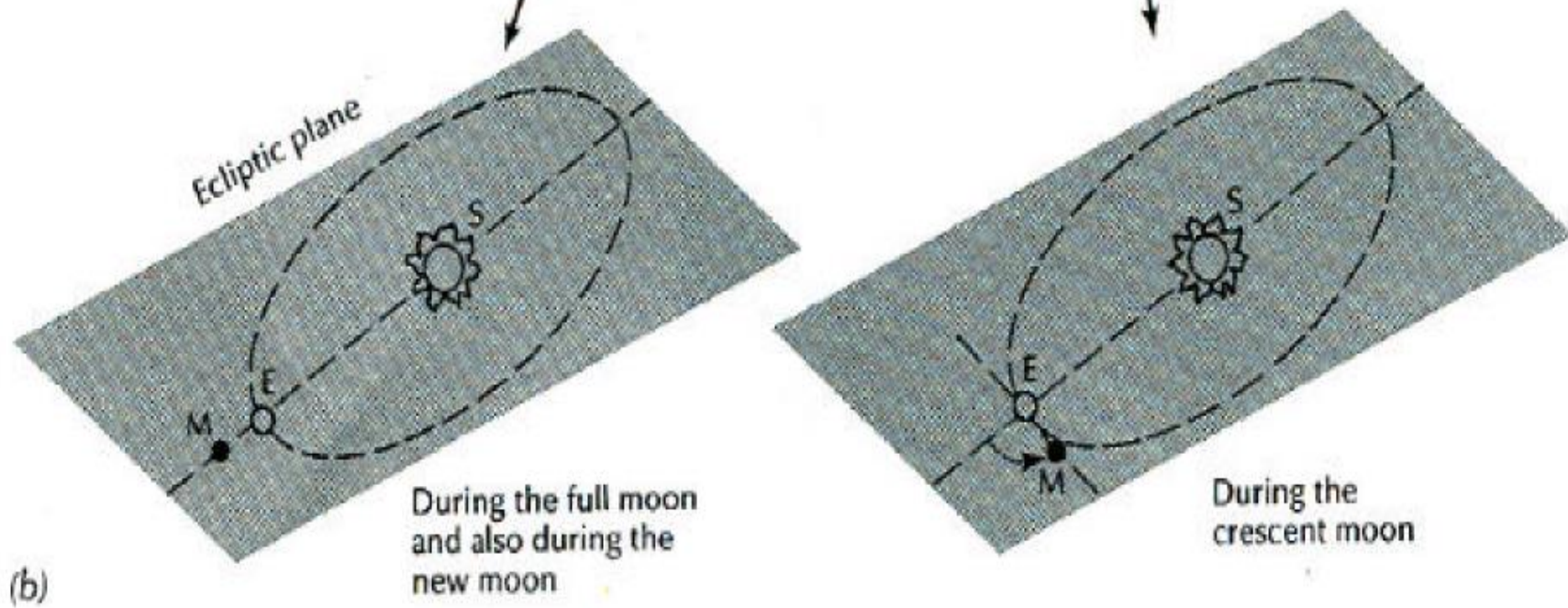
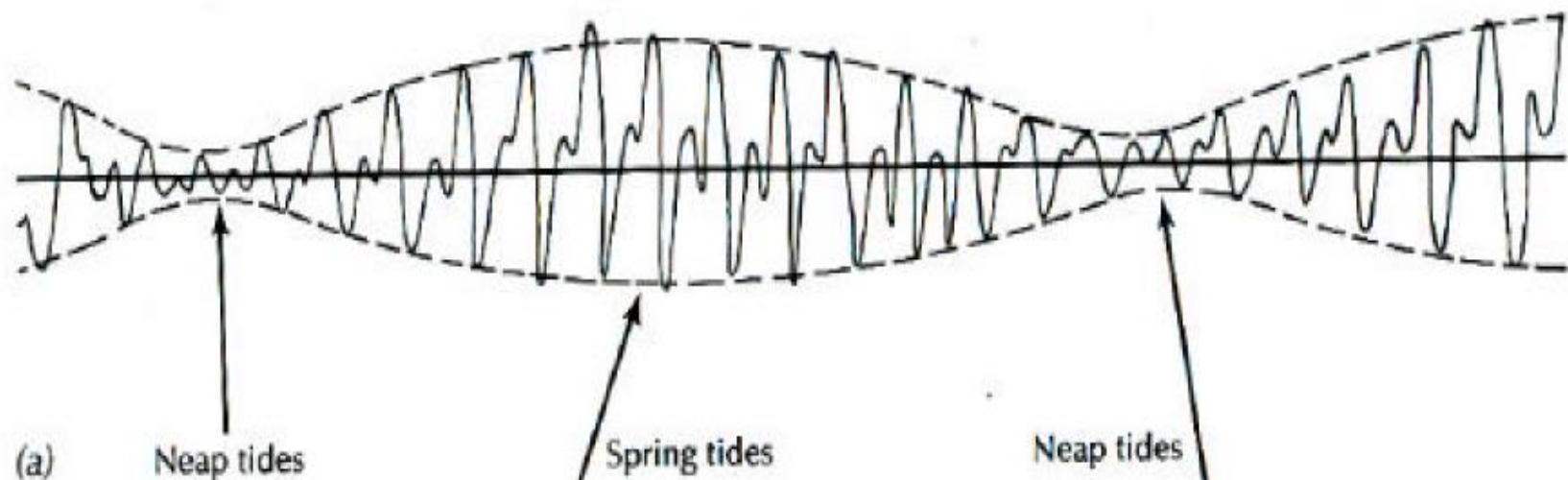
Σύστημα Γη-Σελήνη-Ήλιος

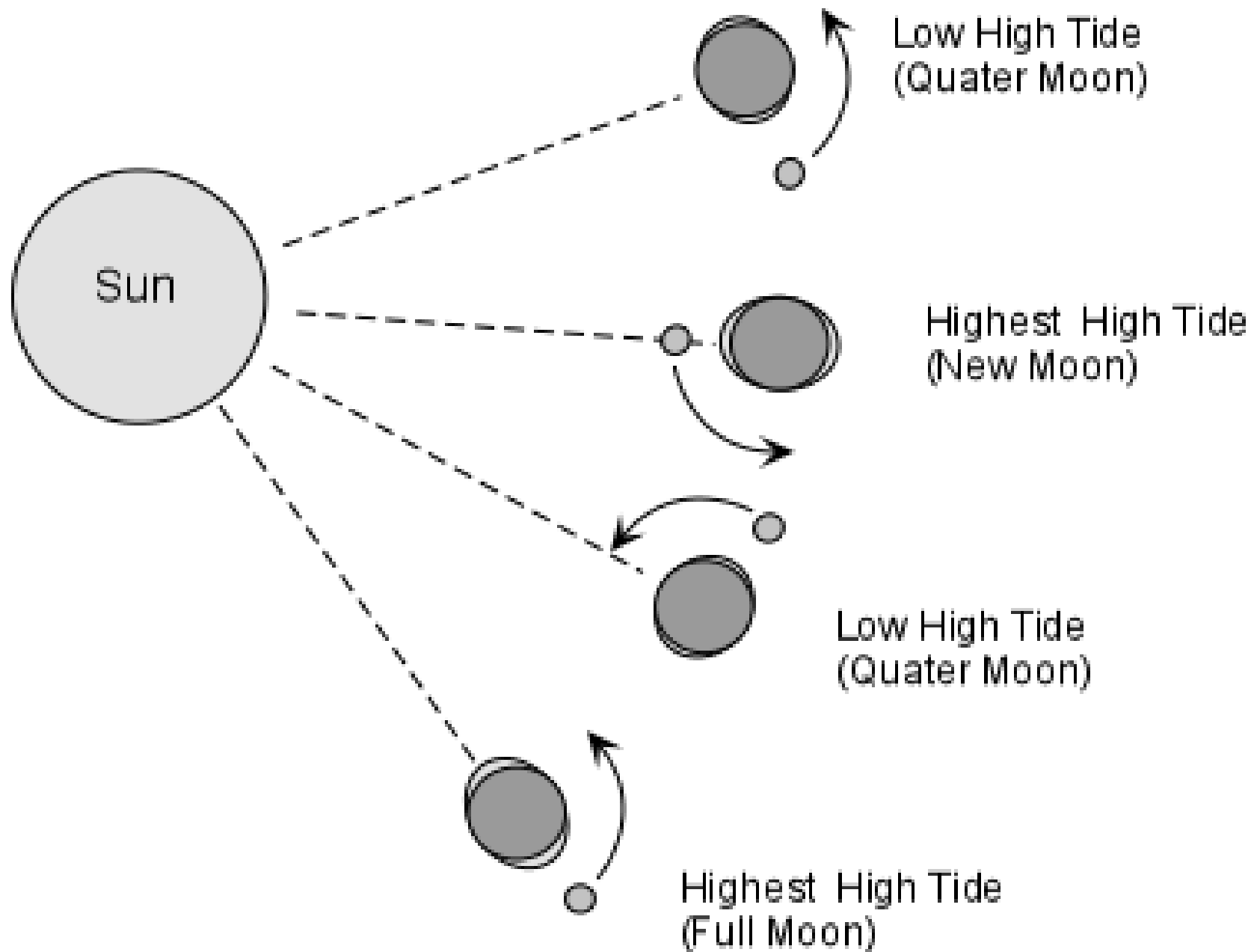
- Η βαρυντική έλξη του Ηλίου είναι η δεύτερη μεγαλύτερη μετά της Σελήνης
- Προκαλεί μικρότερα ελλειψοειδή προς και μακριά από τον Ήλιο.
- Η περίοδος των ηλιακών παλιρροιακών κυμάτων είναι 12 ώρες.

Όλες οι παραπάνω παλιρροιακές δυνάμεις συμβαίνουν ταυτόχρονα και προστίθενται (δηλ. δρουν αθροιστικά) όταν η Σελήνη και ο Ήλιος βρίσκονται σχεδόν στον ίδιο άξονα (Νέα Σελήνη, Πανσέληνος).

Τις περιόδους αυτές οι δυνάμεις προκαλούν παλίρροια μεγάλου εύρους (spring tide).

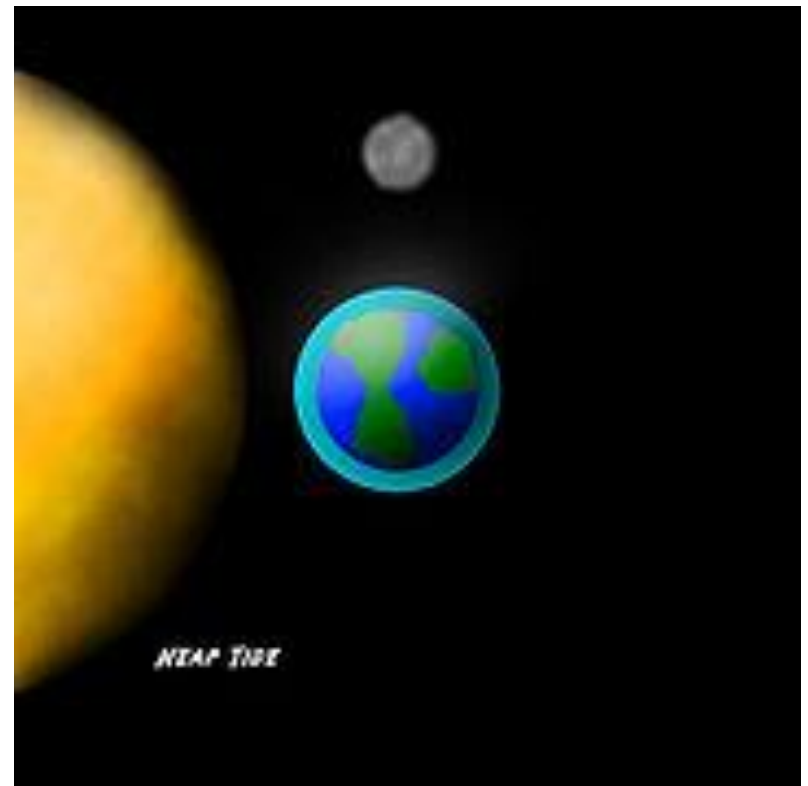
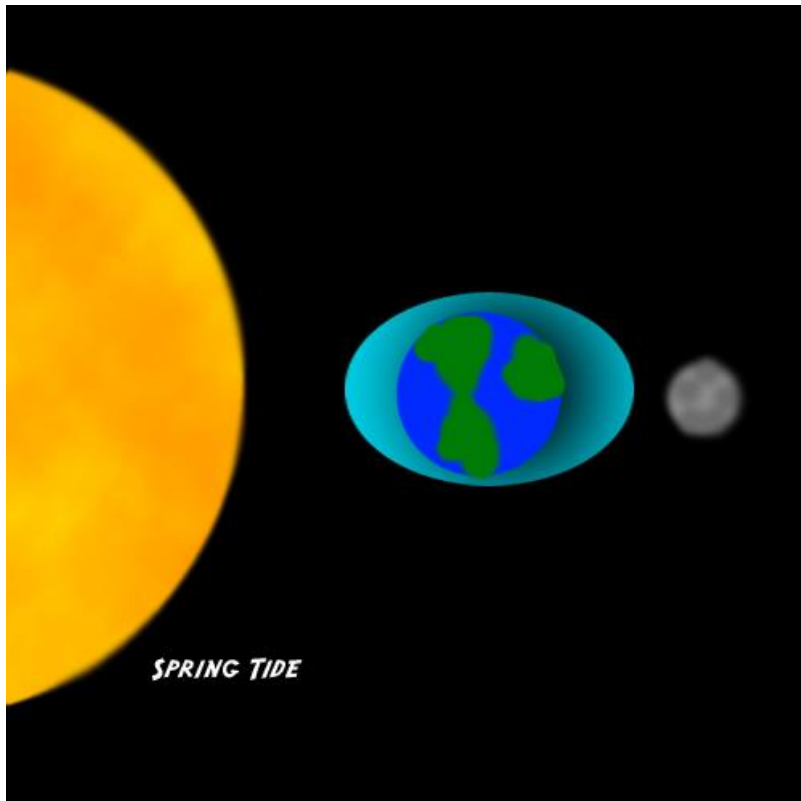
Αντίθετα, τις περιόδους που ο Ήλιος και η Σελήνη βρίσκονται υπό γωνία 90° , οι δυνάμεις δρουν αφαιρετικά μεταξύ τους και οι παλίρροιες είναι μικρού εύρους (near tides).



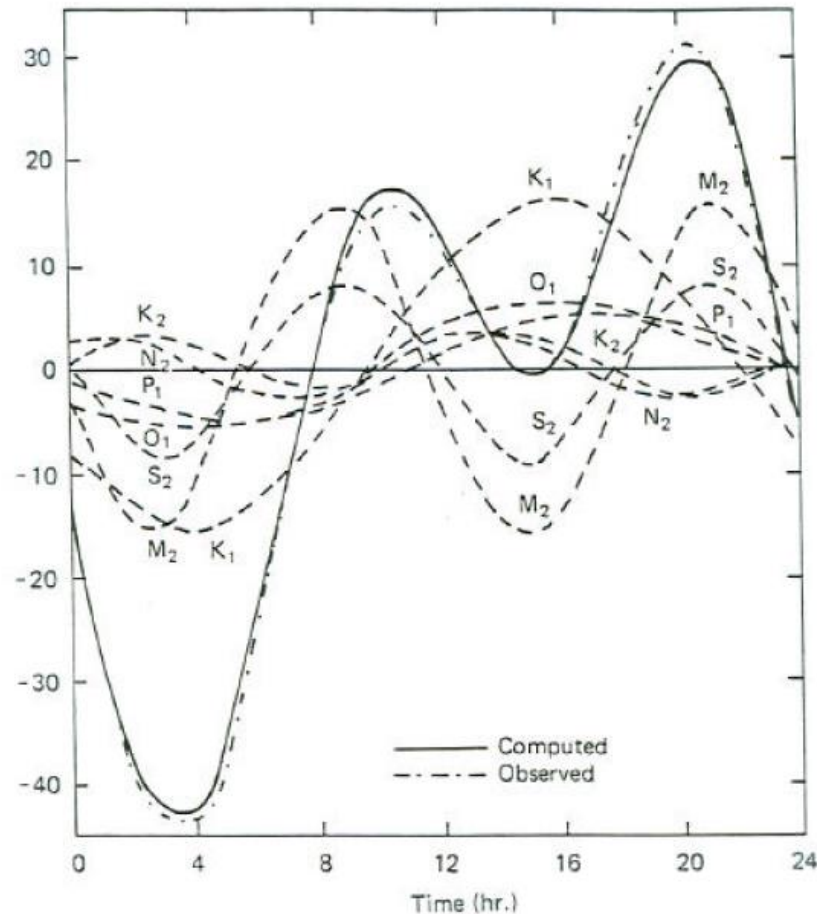


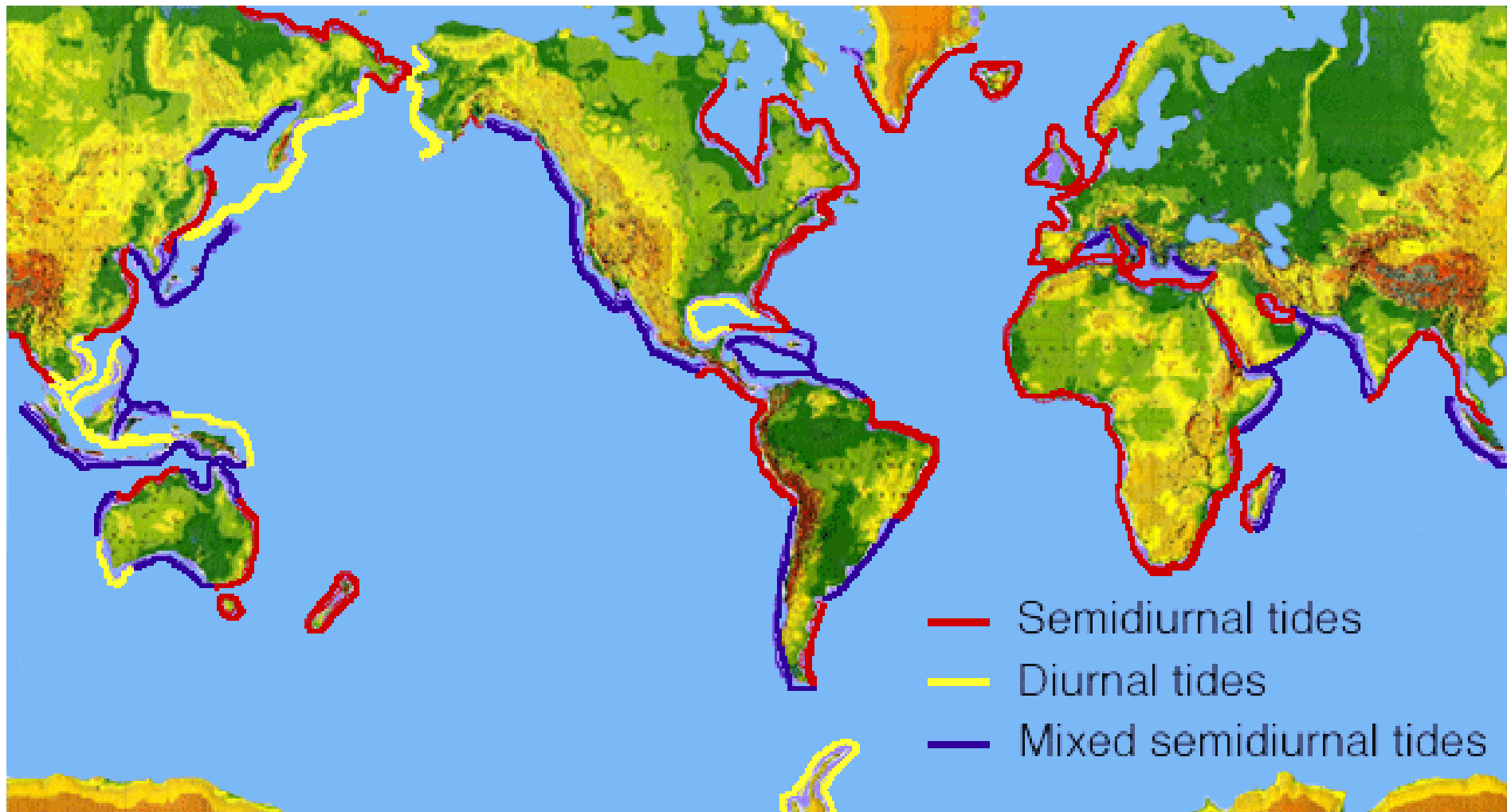
Σύστημα Γη - Σελήνη - Ήλιος

Η μαθηματική αυτή θεώρηση προβλέπει επίσης ότι το αναμενόμενο Παλιρροιακό Εύρος στον Ισημερινό λόγω επίδρασης μόνο της Σελήνης είναι της τάξης των 0,356 μ., ενώ το αναμενόμενο Παλιρροιακό Εύρος στον Ισημερινό λόγω επίδρασης μόνο του Ηλίου είναι της τάξης των 0,162 μ.



Οι μεταβολές στην απόσταση μεταξύ της Γης και της Σελήνης κατά τη διάρκεια του 27,55 ημερών κύκλου της, και μεταξύ του Ηλίου και της Γης κατά τη διάρκεια του 365,25 ημερών κύκλου, καθώς και οι μεταβολές στα επίπεδα των τροχιών τους, παράγουν παλιρροιακές συνιστώσες (tidal constituents) οι οποίες είναι ιδιαίτερα σύνθετες.





Γενικά, οι παλιρροιακές συνιστώσες ανάλογα με τη περίοδο των δυνάμεων που τις δημιουργούν διακρίνονται σε 3 είδη :

- Ημι-ημερήσιες (Semi-diurnal constituents)
- Ημερήσιες (Diurnal constituents)
- Μεγάλης περιόδου - δεκαπενθημέρου και άνω (Long period constituents)

Προκύπτει έτσι ότι η σύνθετη παλιρροιακή μεταβολή σε κάθε θέση του ωκεανού, αναλύεται σε επιμέρους ημιτονοειδή κύματα με περίοδο αντίστοιχη της παλιρροιακής συνιστώσας, και άρα το άθροισμα των ημιτονοειδών αυτών κυμάτων δίνει την αναμενόμενη παλιρροιακή μεταβολή της επιφάνειας της θάλασσας.

Πίνακας 1. Κύριες παλιρροιακές συνιστώσες.

Όνομα	Σύμβολο	Περίοδος (ώρες)
<p>Ημι-ημερήσιες συνιστώσες (δύο μέγιστα/ελάχιστα ανά ημέρα)</p>		
Κύρια Σεληνιακή	M_2	12,42
Κύρια Ηλιακή	S_2	12,00
Ελλειπτική Σεληνιακή	N_2	12,66
Συνδυασμός Ηλιακής-Σεληνιακής	K_2	11,97
<p>Ημερήσιες συνιστώσες (ένα μέγιστο/ελάχιστο ανά ημέρα)</p>		
Συνδυασμός Ηλιακής-Σεληνιακής	K_1	23,93
Κύρια Σεληνιακή	O_1	25,82
Ηλιακή	P_1	24,07
<p>Παλίρροιες μεγάλης περιόδου</p>		
Σεληνιακή δεκαπενθημέρου	M_f	327,86
Ηλιακή - Σεληνιακή δεκαπενθημέρου	M_{Sf}	354,36
Σεληνιακή μηνιαία	M_m	661,30
Ηλιακή ημιετήσια	S_{Sa}	4384,90
Ηλιακή ετήσια	S_a	365,242

Αρμονική Ανάλυση Παλιρροιών και Πρόγνωση

Παλιρροιακή ανάλυση ονομάζεται η διαδικασία διαχωρισμού των επιμέρους παλιρροιακών συνιστωσών σε ένα παλιρροιακό σήμα.

Κάθε συνιστώσα ονομάζεται αρμονική.

$$y = A_i \cos (\omega_i t + \theta_i)$$

Όπου A το εύρος κάθε παλιρροιακής συνιστώσας και θ_i η διαφορά φάσης της.
Η συνολική παλίρροια προκύπτει από το άθροισμα των επιμέρους αρμονικών.

$$y = \sum_{n=1}^N A_n \cos (\omega_n t + \theta_n)$$

Αρμονική Ανάλυση Παλιρροιών και Πρόγνωση

Έστω η ημι-ημερήσια παλιρροιακή συνιστώσα M_2 με περίοδο 12.42 ώρες.

$$\omega_{M_2} = \frac{2\pi}{(3600 \times 12.42)} = 1.405 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$$

Άρα το ω_i είναι γνωστό.

Η παλιρροιακή ανάλυση συνίσταται στο προσδιορισμό των μεγεθών A_i και θ_i .

Οι πιο σημαντικές παλιρροιακές συνιστώσες είναι:

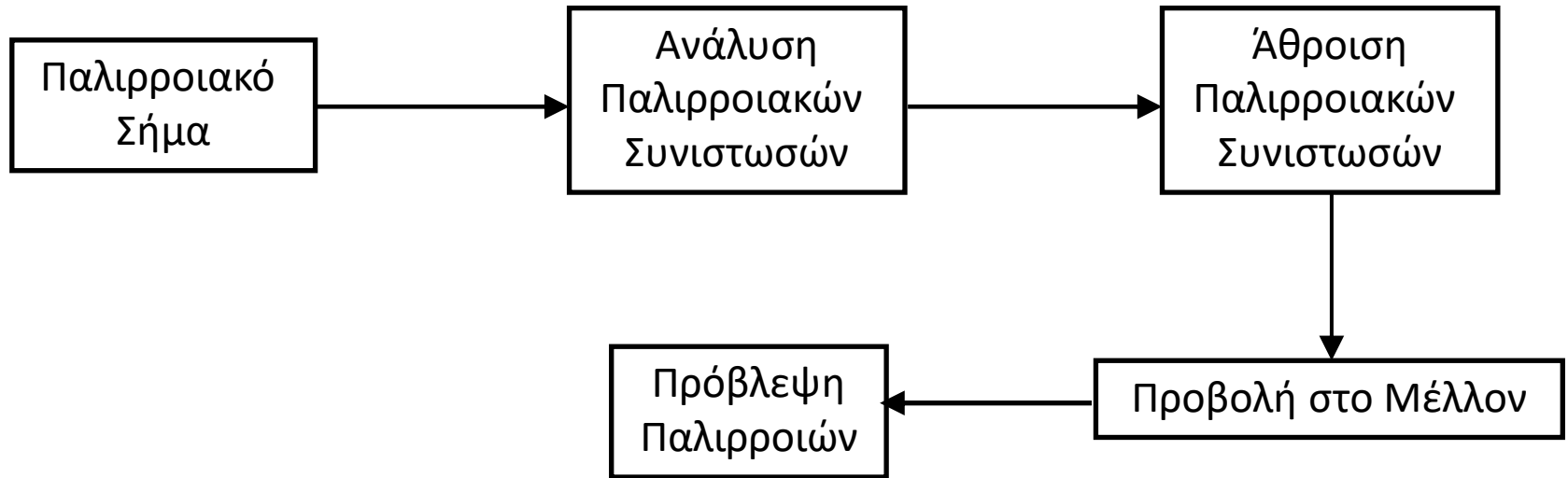
$$M_2 \rightarrow T_{M_2} = 12.42 \text{ hrs}$$

$$S_2 \rightarrow T_{S_2} = 12.00 \text{ hrs}$$

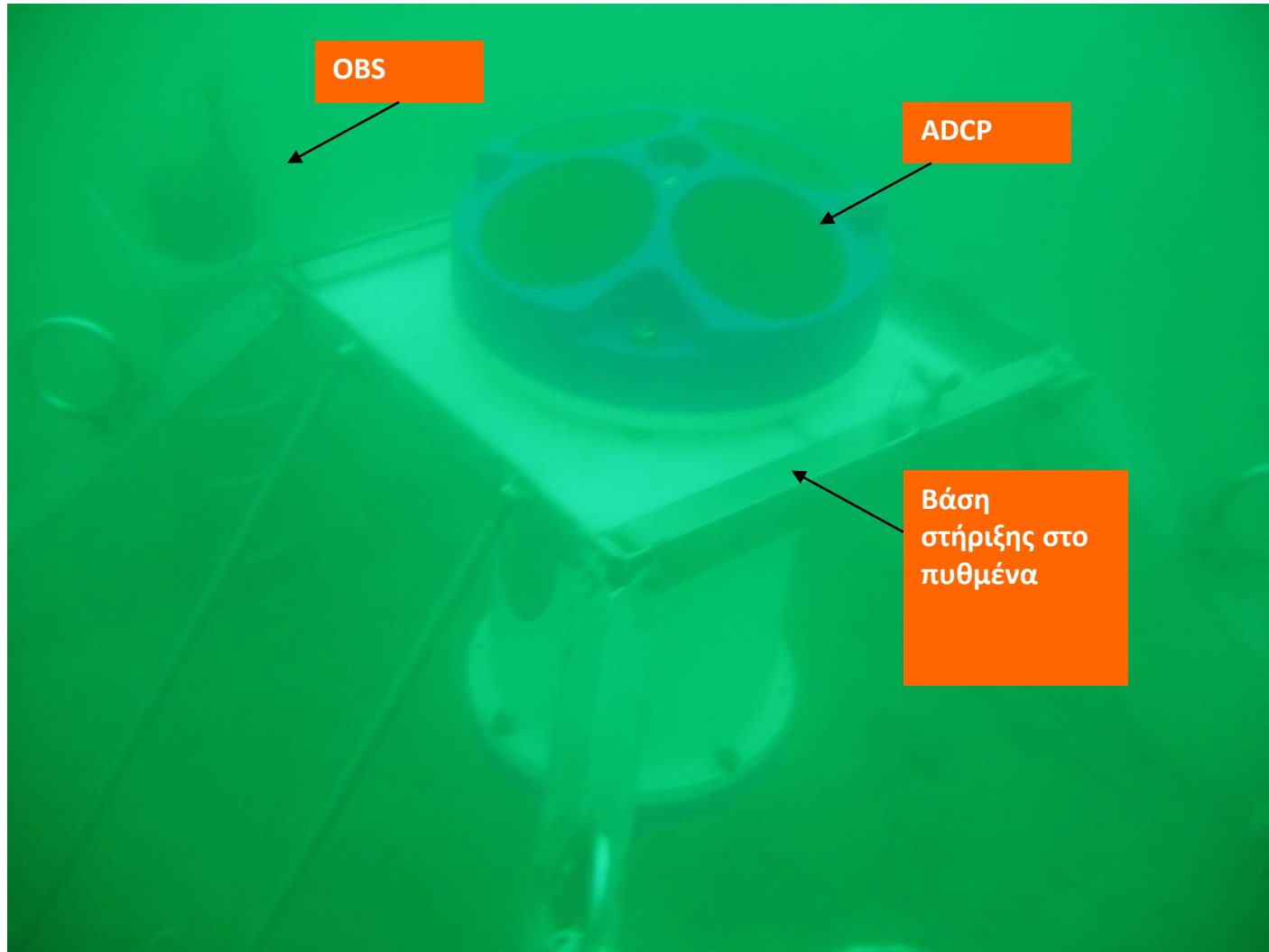
$$M_1 \rightarrow T_{M_1} = 24.48 \text{ hrs}$$

$$S_1 \rightarrow T_{S_1} = 24.00 \text{ hrs}$$

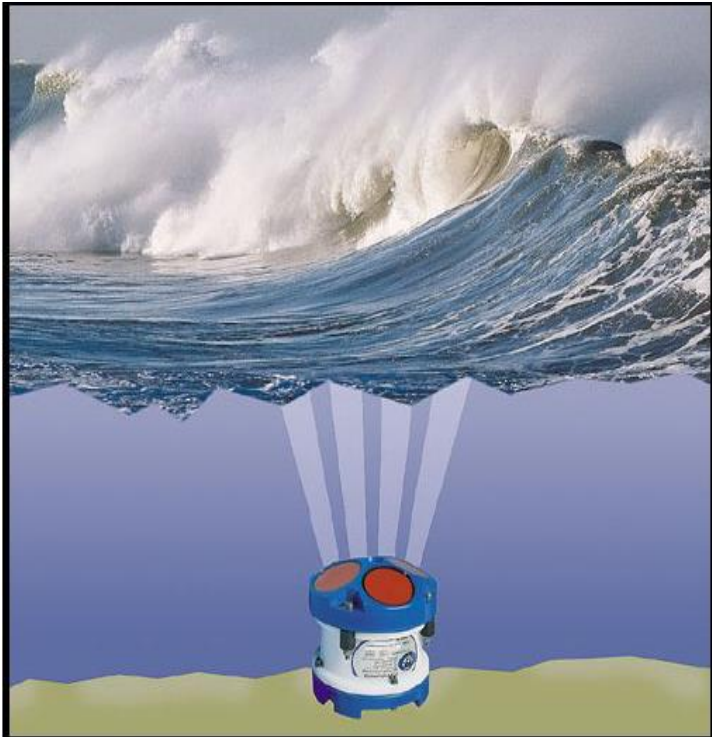
Αρμονική Ανάλυση Παλινδρομών και Πρόγνωση



IV. Πόντιση Συστήματος Συνεχούς Παρακολούθησης Κυμάτων & Ρευμάτων – Ο Σταθμός ‘ΤΡΙΤΩΝ’



ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ 'TRITON'



Σύστημα ADCP Sentinel 300 KHz (TRDI)

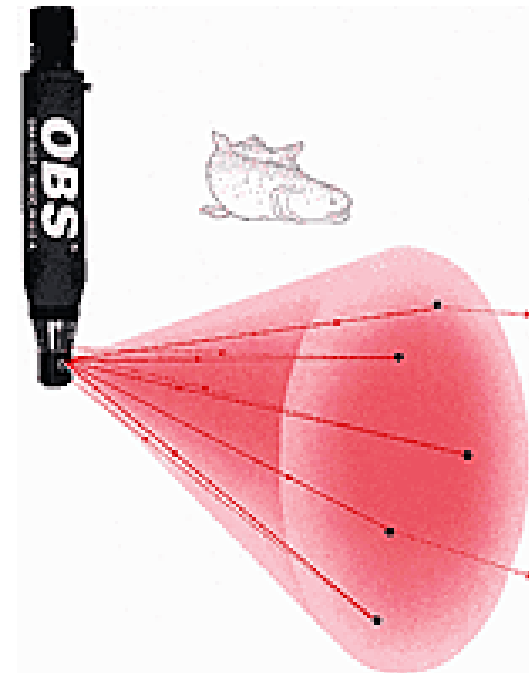
Περιλαμβάνει:

- κατευθυντικό κυματογράφο (Wave Array)
- κατευθυντικό ρευματογράφο σε ολόκληρη την υδάτινη στήλη (directional current-meter)
- παλιρροιογράφο (tide gauge)
- αισθητήρα μέτρησης θερμοκρασίας νερού πυθμένα

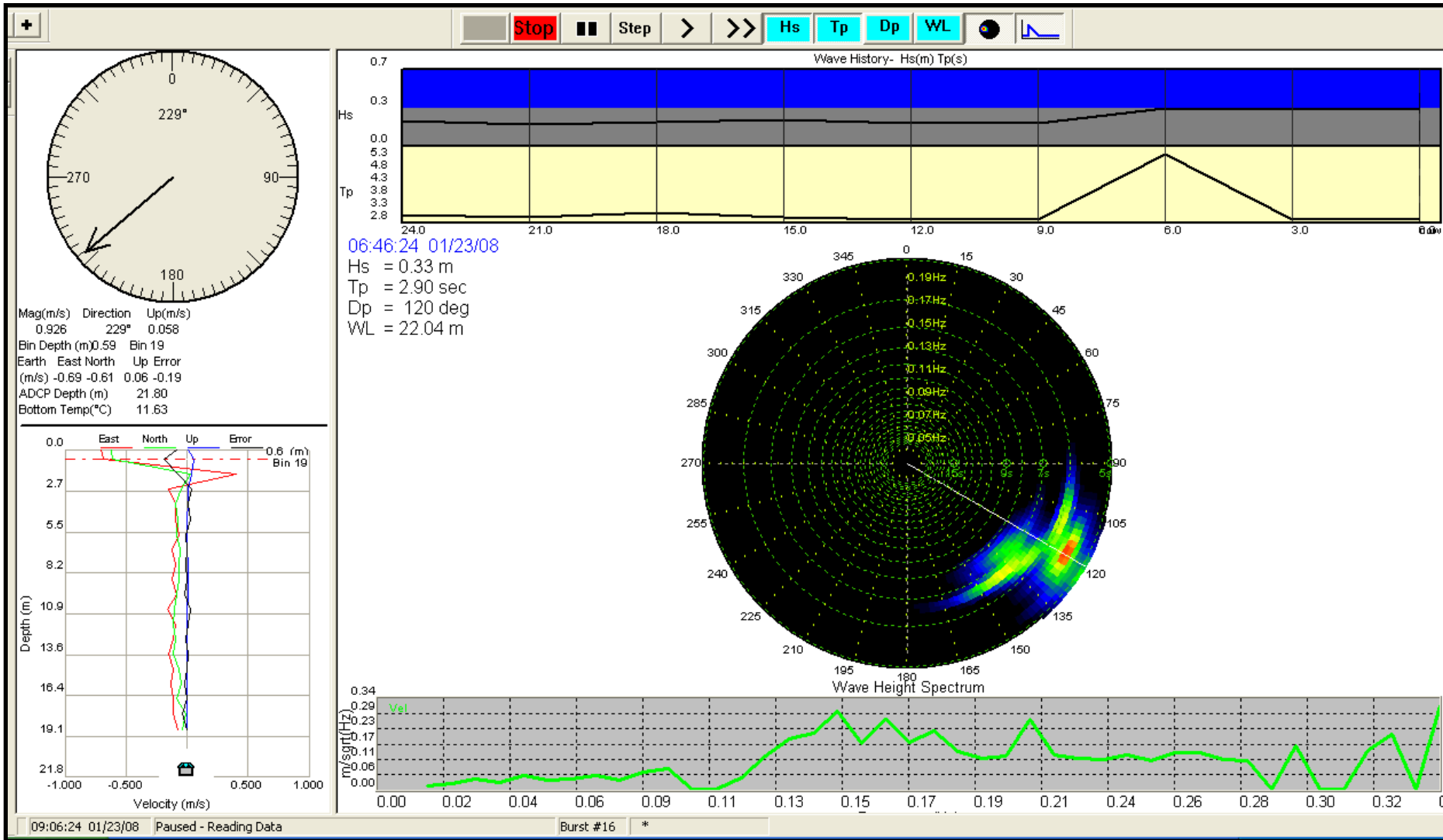
Σύστημα καταγραφής θολερότητας OBS 3A

Περιλαμβάνει:

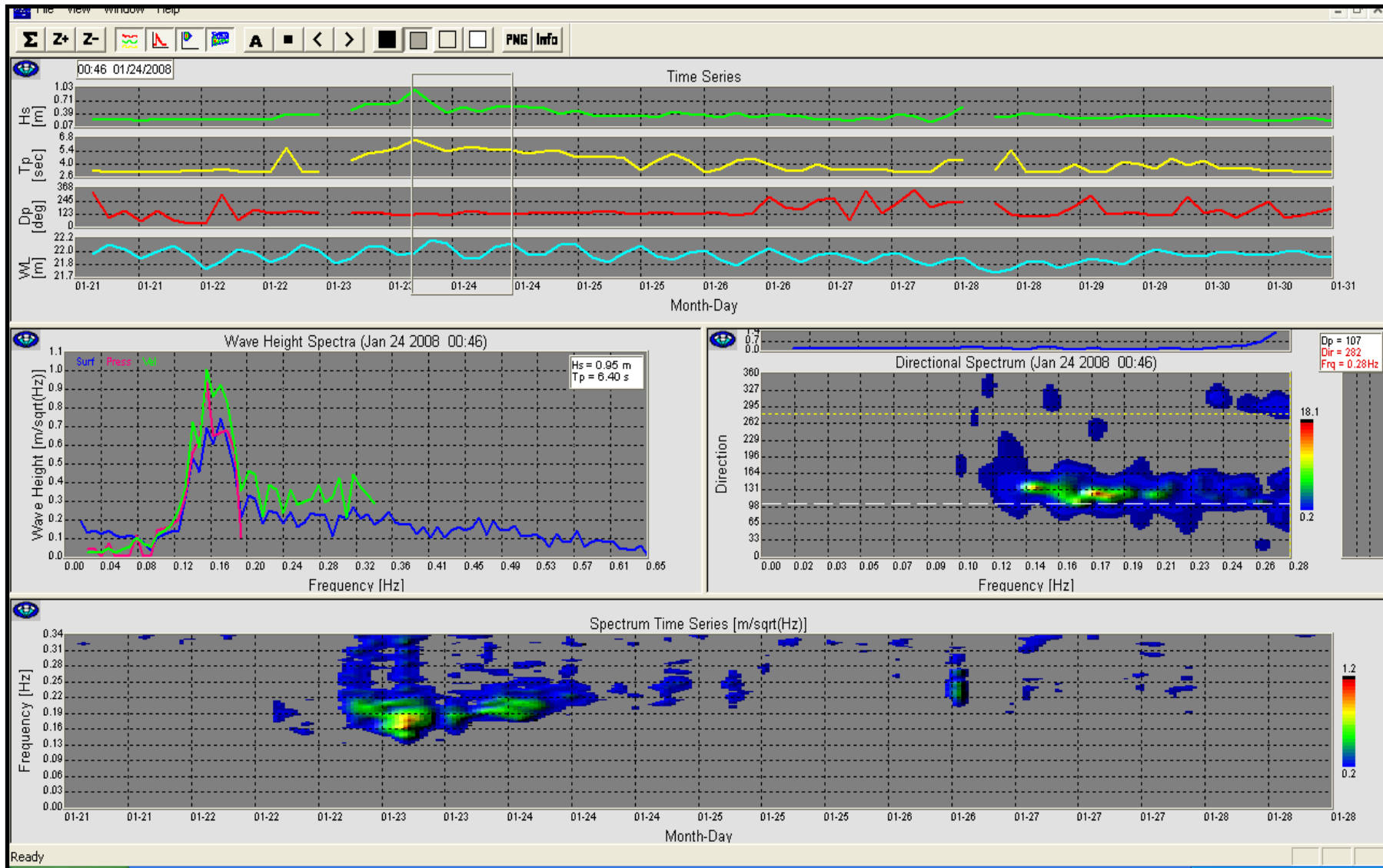
- Αισθητήρα πίεσης
- Αισθητήρα αγωγιμότητας
- Αισθητήρα θερμοκρασίας



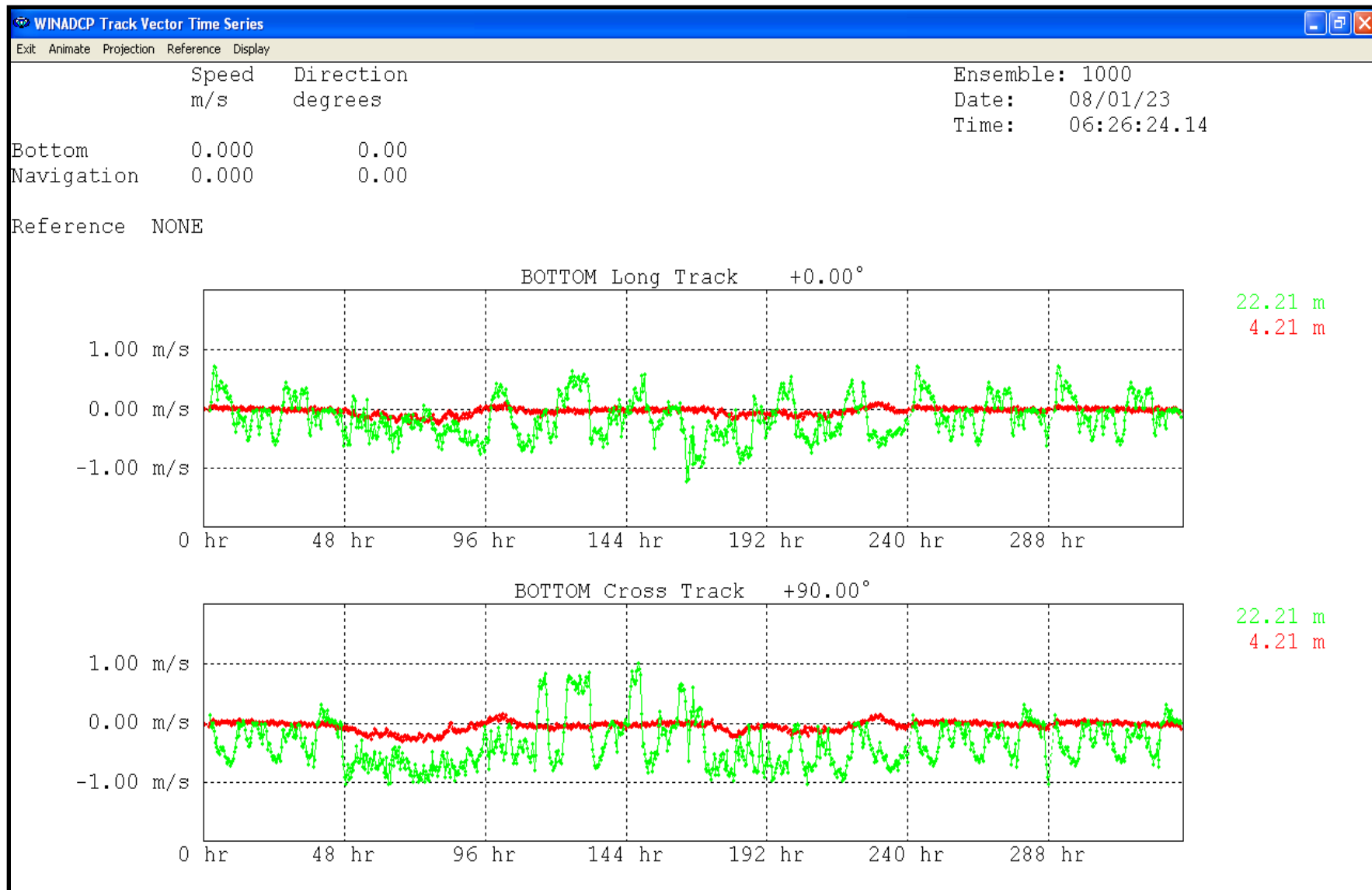
ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΚΥΜΑΤΙΚΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ



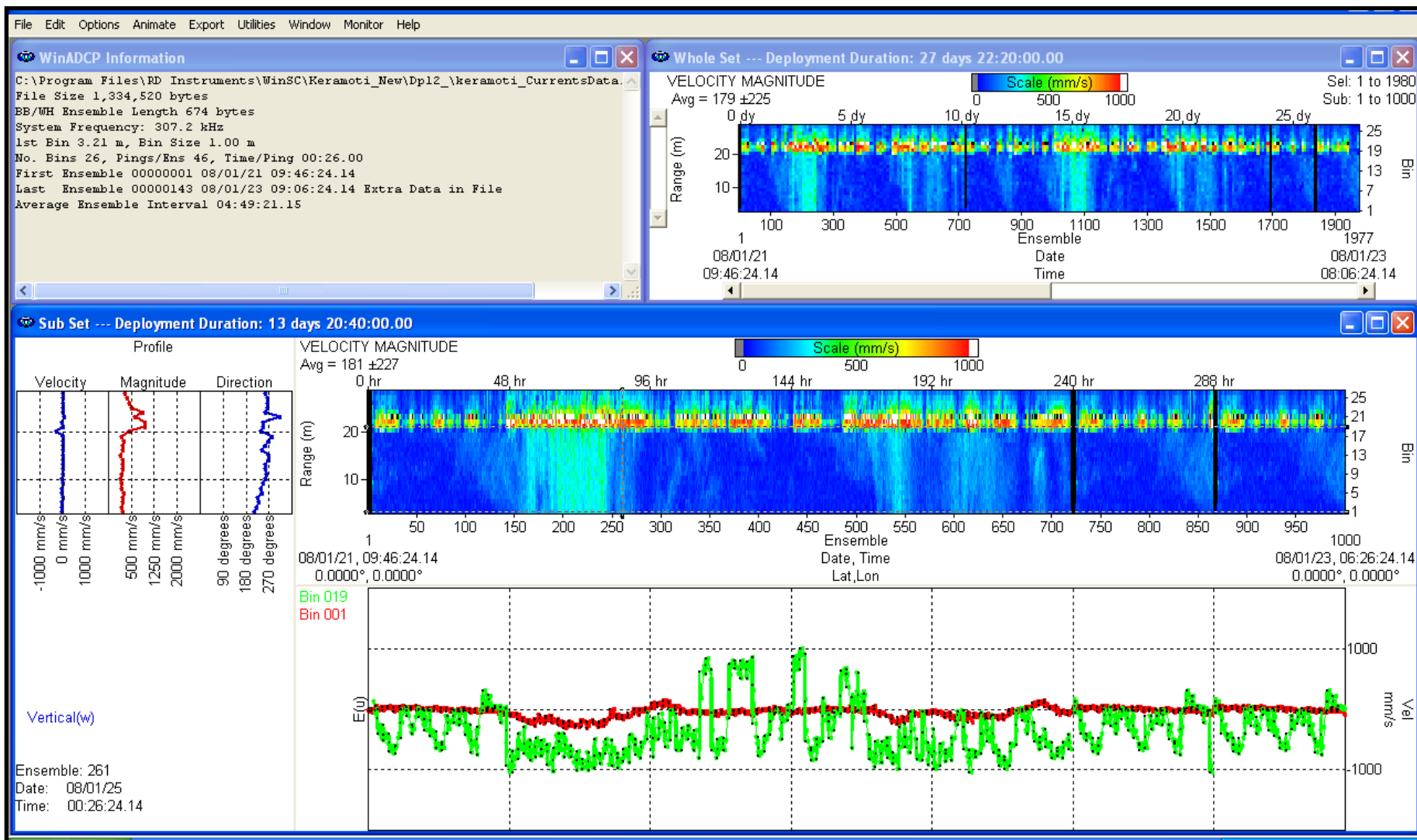
ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΚΥΜΑΤΙΚΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ



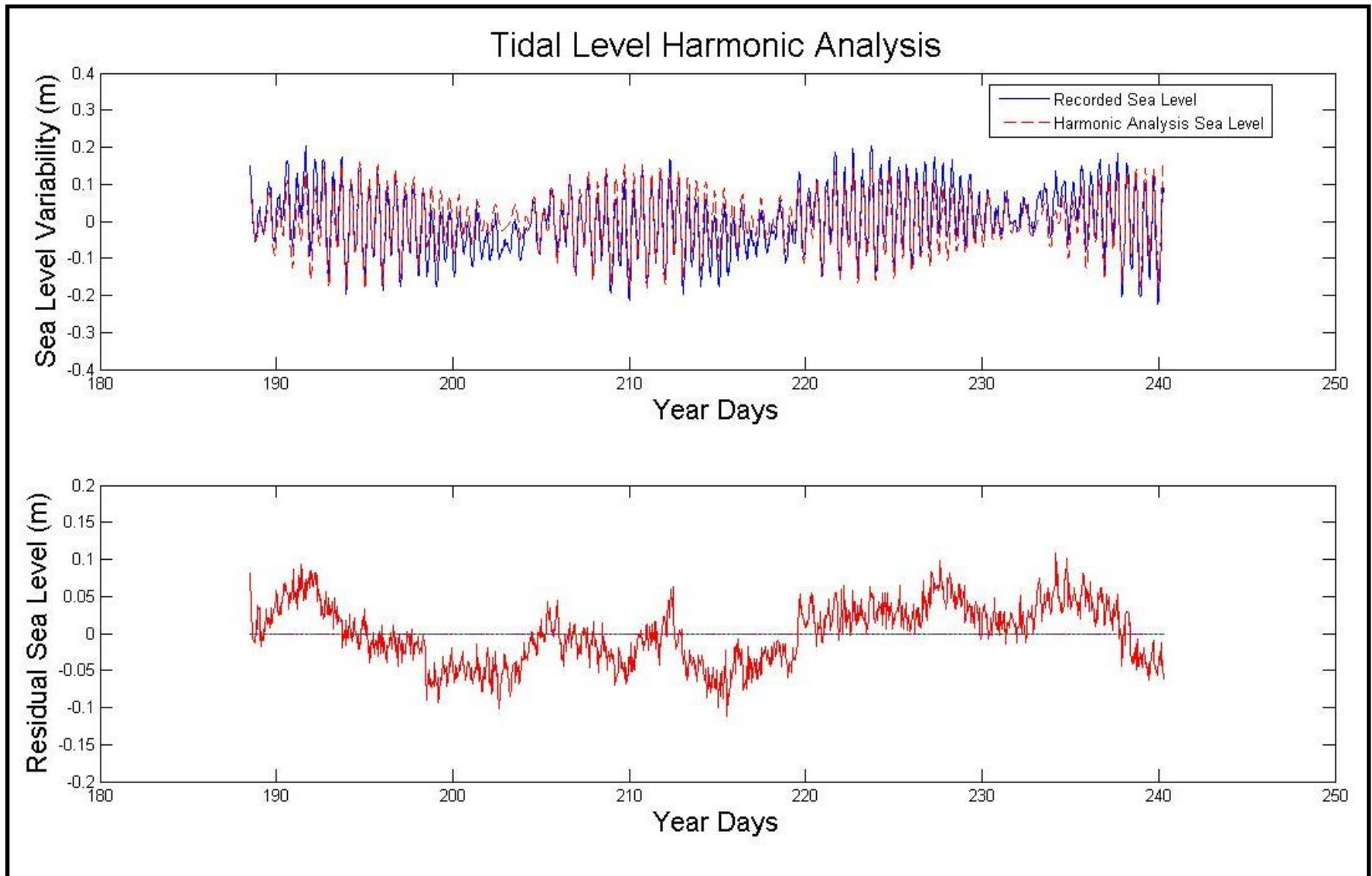
ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΡΕΥΜΑΤΩΝ ΥΔΑΤΙΝΗΣ ΣΤΗΛΗΣ



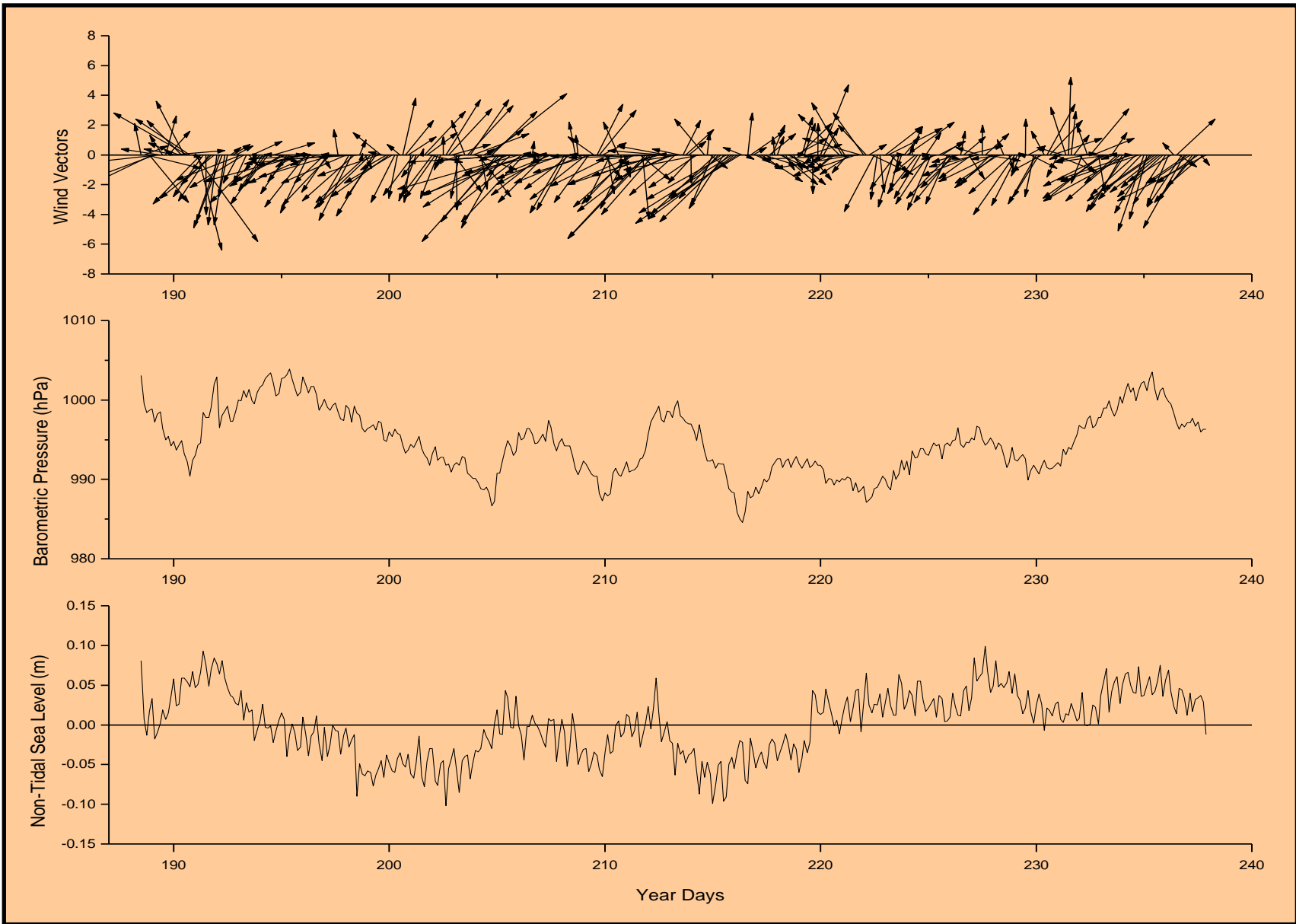
ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΡΕΥΜΑΤΩΝ ΥΔΑΤΙΝΗΣ ΣΤΗΛΗΣ



Αρμονική Ανάλυση και Προσδιορισμός Μη-Παλιρροιακής Μεταβολής



ΣΧΕΣΗ ΑΝΕΜΟΥ – ΜΗ-ΠΑΛΙΡΡΟΙΑΚΗΣ ΣΤΑΘΜΗΣ



Παλιρροιακά Ρεύματα

Η άνοδος και η πτώση της στάθμης της θάλασσας προκαλεί πολύ έντονα ρεύματα.

Τα παλιρροιακά κύματα είναι κύματα μεγάλου μήκους > 100 χλμ. οπότε η ταχύτητα διάδοσής τους είναι ίδια με αυτή των κυμάτων μικρού βάθους:

$$C = \sqrt{gh}$$

Όπου h το βάθος του νερού.

$$\lambda = CT$$

Άρα σε ωκεανό $h = 4$ km $\rightarrow C = 200$ m/s

Οπότε για $T = 12.42$ hrs. $\rightarrow \lambda = 9.000$ km

Στα ρηχά νερά $h = 3$ m $\rightarrow C = 5,5$ m/s

Οπότε για $T = 12.42$ hrs. $\rightarrow \lambda = 245$ km

Παλιρροιακή Ενέργεια

Μακρο-παλίρροιες είναι οι παλίρροιες με εύρη άνω των 4 μ.

- Ατλαντικός Ωκεανός (ακτές Βρετανίας, Γαλλίας, Βραζιλίας, Αργεντινής.
- Bay of Fundy → 15,6 μ
- Ακτές Τανζανίας → 12,0 μ
- ΒΔ Αυστραλία → 12,0 μ
- Ειρηνικός Ωκεανός (ακτές Αλάσκα, Κόλπος Καλιφόρνιας, Ν. Ζηλανδία) → 12,0 μ

Η ιδέα χρήσης της παλιρροιακής ενέργειας βασίζεται στη δημιουργία ενός απλού φράγματος σε μία παράκτια περιοχή, το οποίο αφήνει το νερό να φθάσει στο μέγιστο παλιρροιακό ύψος και κατόπιν κλείνει μη επιτρέποντας την έξοδο του νερού κατά την άμπωτη.

Μόλις η γειτονική περιοχή φθάσει στο ελάχιστο παλιρροιακό ύψος, τότε η υδατόπτωση του νερού από το μέγιστο προς το ελάχιστο παλιρροιακό ύψος είναι σε θέση να κινήσει τις τουρμπίνες του υδροηλεκτρικού σταθμού.

Δυναμική Θεωρία Παλιρροιών (Dynamical Theory of Tides)

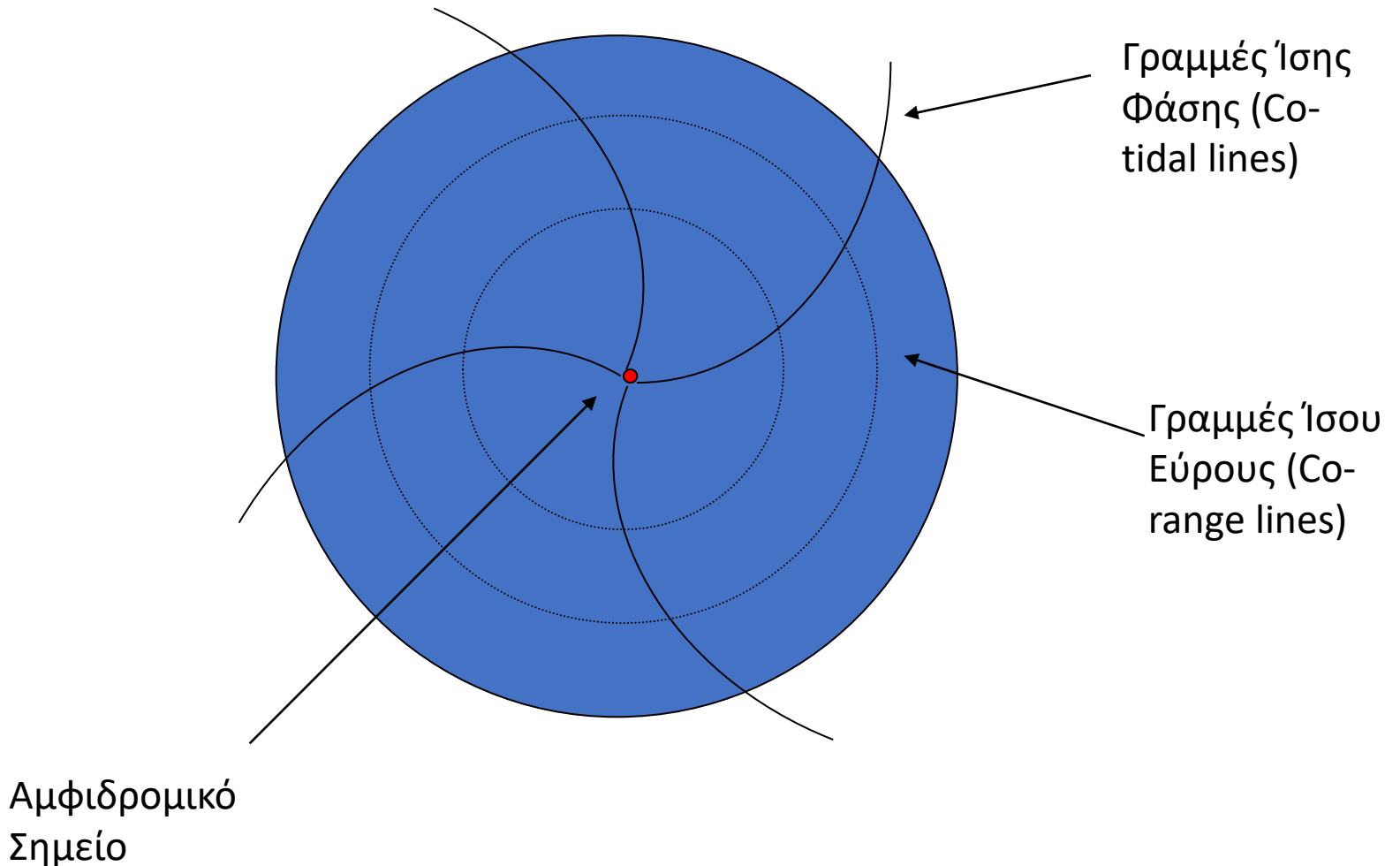
Η θεωρία των παλιρροιακών ελλειψοειδών εξηγεί τη παρουσία παλιρροιών και τη περίοδό τους.

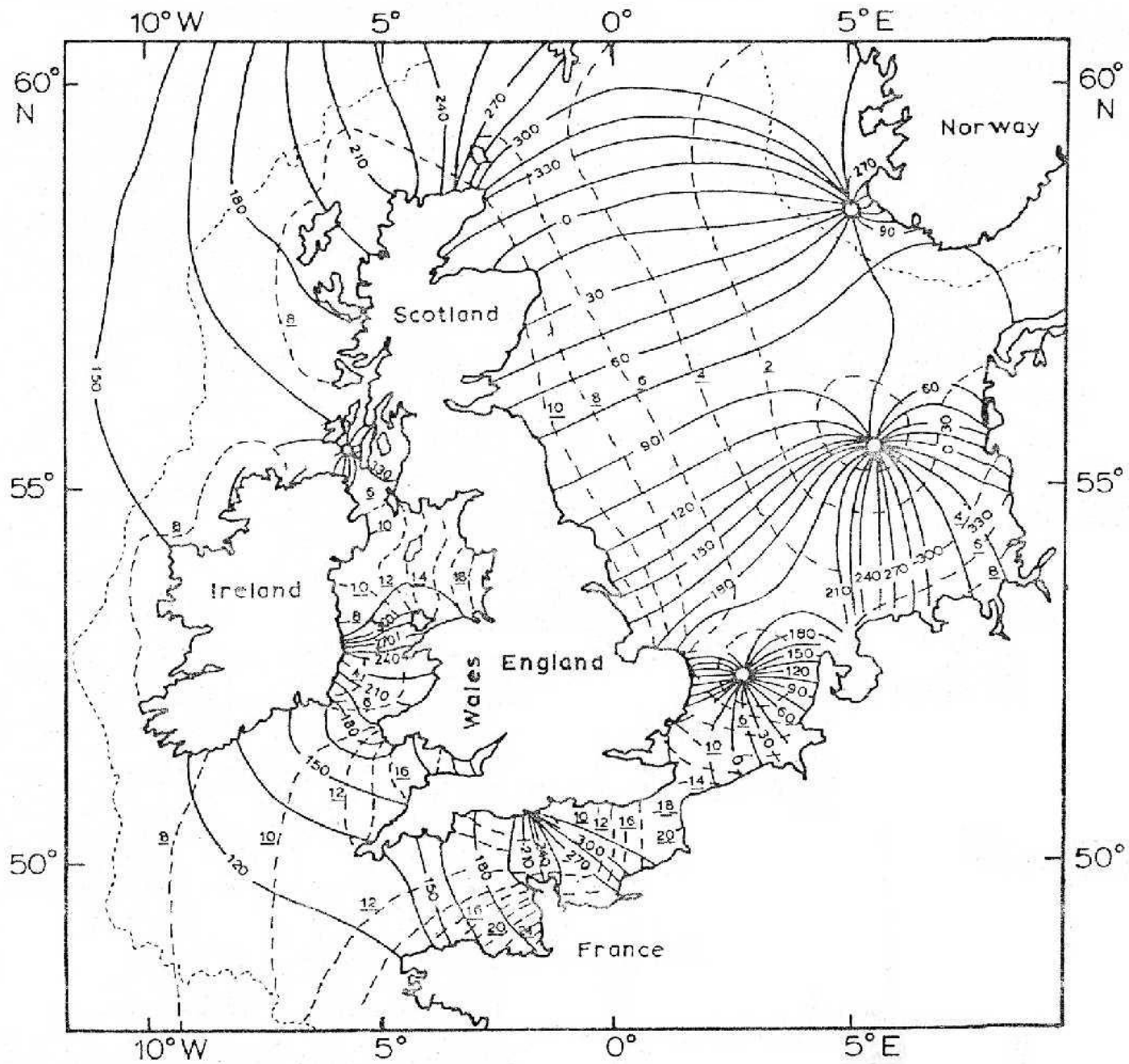
Δεν είναι όμως σε θέση να εξηγήσει τις διαφορές στα παλιρροιακά εύρη που απαντώνται κατά μήκος μιας ακτογραμμής ούτε να προβλέψει τη χρονική στιγμή που θα συμβεί η μέγιστη άμπωτη και πλημμυρίδα σε ένα τόπο.

Αυτό συμβαίνει γιατί η προηγούμενη θεωρία δεν λαμβάνει υπόψη της τη παραμόρφωση του παλιρροιακού κύματος λόγω:

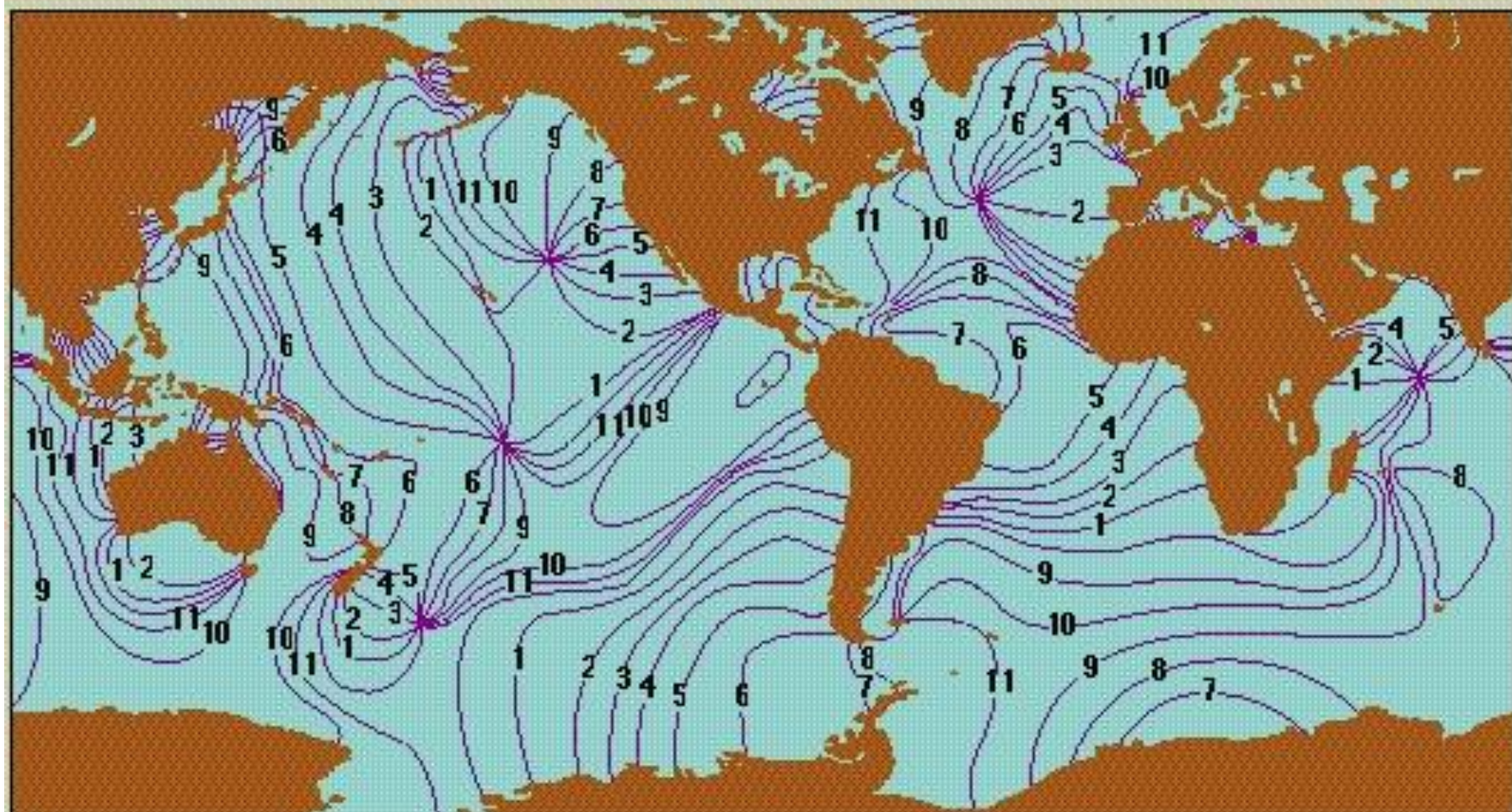
- α) της περιστροφή της Γης,
- β) της επίδρασης της τοπογραφίας και βαθυμετρίας μίας παράκτιας λεκάνης

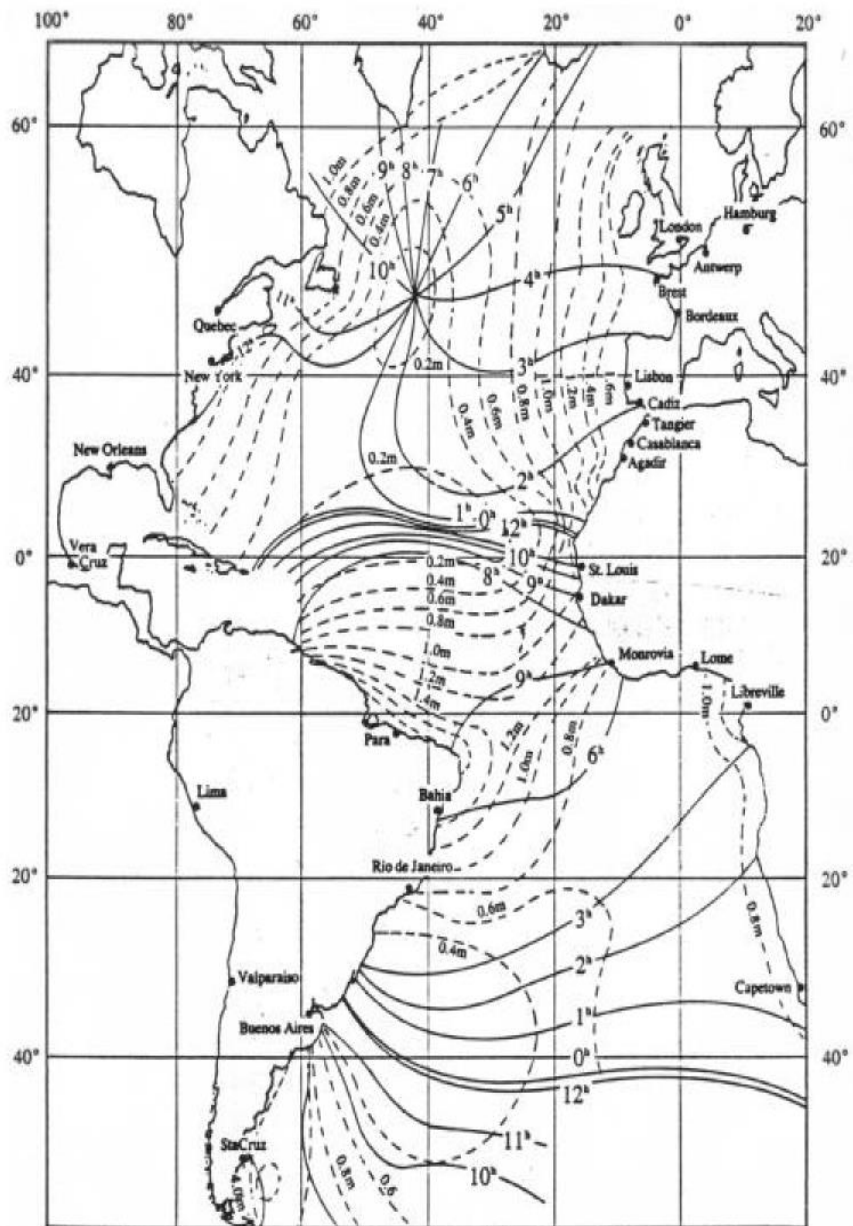
Έστω μία περιστρεφόμενη με σταθερή γωνιακή ταχύτητα λεκάνη.
Λόγω περιστροφής δημιουργείται κύμα στην άκρη της λεκάνης που ταξιδεύει με φορά τη φορά περιστροφής.





Amphidromic Points in the World Ocean



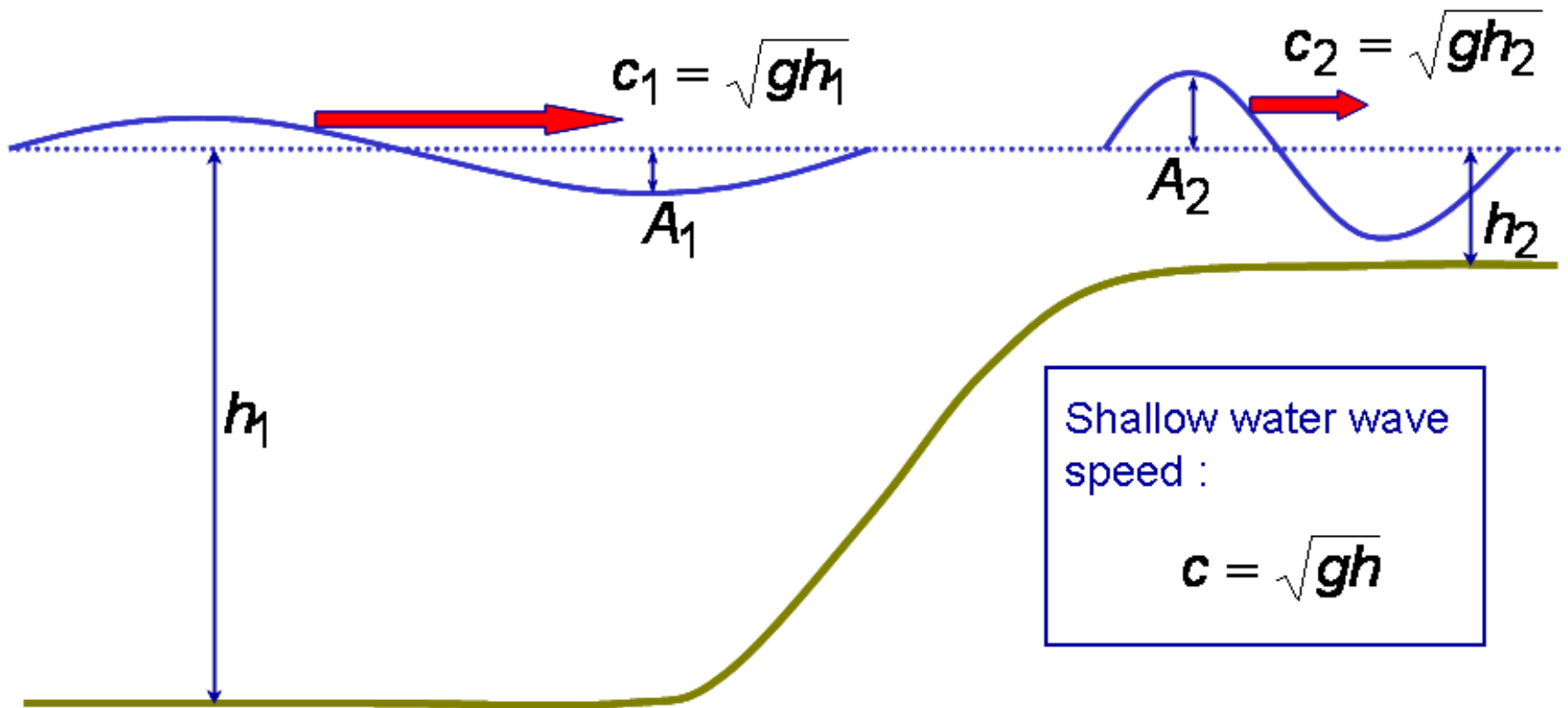


Cotidal and corange lines of the M_2 Atlantic. The times of high water refer to the moon's transit through the Greenwich meridian, the co-range lines are in meters.

Παλίρροιες σε Παράκτιες Περιοχές

Γενικά η είσοδος του παλιρροιακού κύματος σε μία λεκάνη (κόλπος) η οποία μειώνει σταδιακά το βάθος και το πλάτος της προκαλεί αύξηση του παλιρροιακού εύρους ανάντι του κόλπου.

Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται funneling effect.



Αν θεωρήσουμε αμελητέες τις απώλειες λόγω τριβής, η ροή ενέργειας θα παραμείνει σταθερή ανάντι του κόλπου. Η ενέργεια του παλιρροιακού κύματος είναι:

$$E = \frac{\rho g A^2}{2}$$

Η παλιρροιακή ενέργεια σε μία διατομή πλάτους B είναι: (Eb)

Άρα, η ροή ενέργειας ανάντι που παραμένει σταθερή ισούται με EbC όπου C η ταχύτητα παλιρροιακού κύματος.

Άρα, η ροή ενέργειας γράφεται :

$$EbC = \frac{(\rho g A^2) b (gh)^{1/2}}{2} = \text{const} \Rightarrow A \approx Kb^{-1/2} h^{-1/4}$$

Άρα, η μεταβολή του πλάτους κόλπου είναι σημαντικότερη από τη μεταβολή βάθους στο προσδιορισμό του παλιρροιακού εύρους.

Επίσης, επειδή $C = f \lambda$, όπου f η συχνότητα του παλιρροιακού κύματος, $f = 1/T$ και λ το μήκος κύματος.

$$\text{Άρα } \lambda = C/f = \sqrt{gh}/f \rightarrow \lambda \propto O(h^{1/2})$$

Άρα, μείωση βάθους \rightarrow αύξηση παλιρροιακού εύρους \rightarrow μείωση μήκους κύματος \rightarrow αύξηση κλίσης κύματος

$$A / \lambda \approx O(h^{-3/4})$$

Η ανάλυση αυτή αγνοεί τη τριβή και τις μη-γραμμικές επιδράσεις οι οποίες μεταβάλλουν το σχήμα του παλιρροιακού κύματος από ημιτονοειδές σε μη-συμμετρικό.

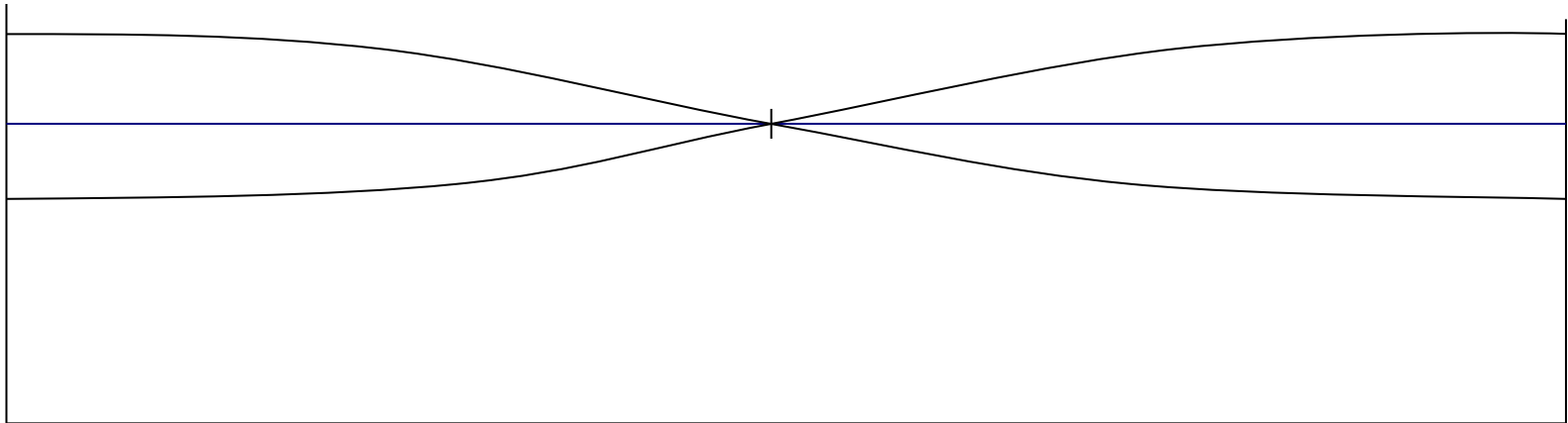
Συντονισμός (Resonance)

Σε ορισμένες περιοχές το παλιρροιακό εύρος είναι πολύ μεγαλύτερο σε σχέση με αυτό της παρακείμενης ωκεάνιας περιοχής.

Το φαινόμενο αυτό που είναι γνωστό ως συντονισμός οφείλεται στο γεγονός ότι η ιδιοσυχνότητα της λεκάνης του κόλπου που εισέρχεται το παλιρροιακό κύμα είναι σχεδόν ίση με τη συχνότητα ταλάντωσης του παλιρροιακού κύματος.

Έστω λίμνη μήκους L , βάθους h και σταθερού πλάτους b .

Έστω ότι η λίμνη έχει επιπέδο πυθμένα και κατακόρυφα πλευρικά όρια.



Στάσιμα κύματα (Standing waves) ή seiche

Συντονισμός προκύπτει όταν ο χρόνος κίνησης του κύματος κατά το μήκος της λίμνης (ανάντι και κατάντι) ισούται με ακέραιο αριθμό παλιρροιακών περιόδων.

$$t = \frac{2L}{C} = nT \Rightarrow T = \frac{2L}{nC} = \frac{2L}{n\sqrt{gh}} \quad \text{Merian Formula}$$

$$T = \frac{2L}{\sqrt{gh}} \quad \text{Κριτήριο Συντονισμού}$$

Στη περίπτωση ενός ανοικτού κόλπου, για να δημιουργηθεί συντονισμός απαιτείται :

$$T = \frac{4 L_c}{(g h)^{1/2}} \quad \text{διότι } L_c = 0.5 L$$

Για την M2 - παλιρροιακή συνιστώσα με περίοδο $T = 12.42$ ώρες έχουμε τους παρακάτω συνδυασμούς L_C και h .

$H = 50$	100	200	500	1000 m
$L_C = 247$	350	495	782	1110 km

