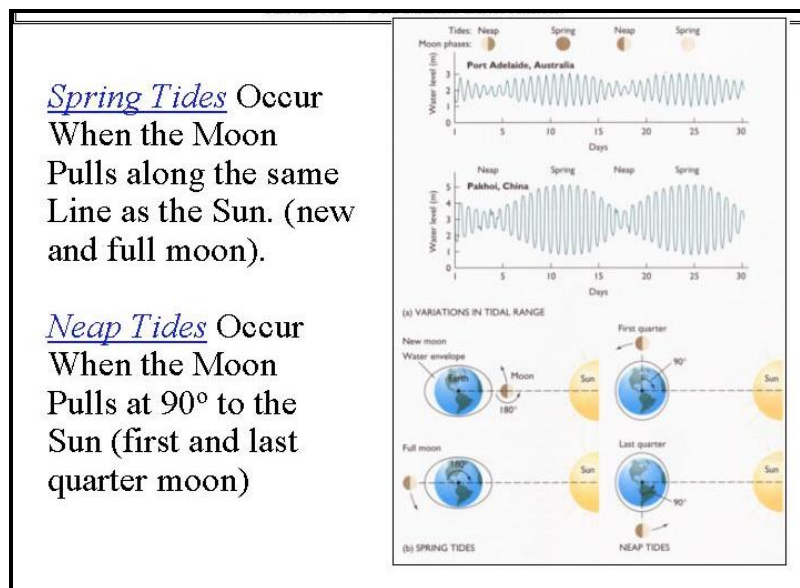


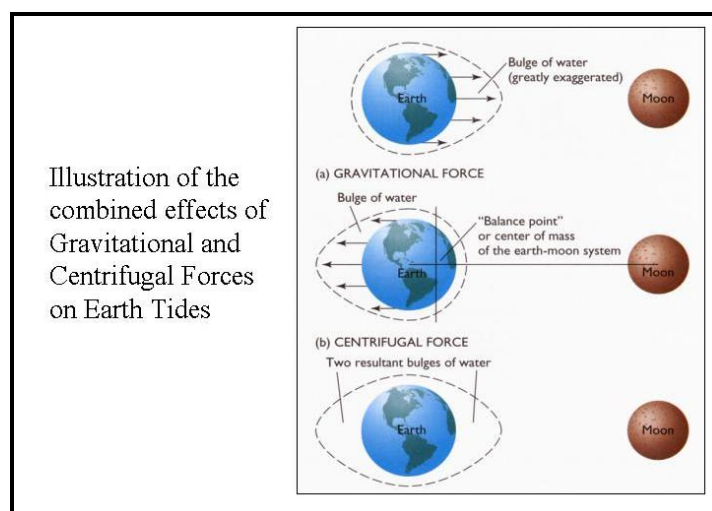
# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 12

## ΠΑΛΙΡΡΟΙΕΣ (TIDES)

Παλίρροια ονομάζεται το φυσικό φαινόμενο που προκαλεί την εναλλαγή ανύψωσης και βύθισης της επιφάνειας της θάλασσας, με μέση περίοδο 12,4 hr (ή 24,8 hr σε ορισμένες περιοχές). Η ανύψωση και βύθιση της επιφάνειας της θάλασσας κοντά στις ακτές προκύπτει από τη σύγκλιση και απόκλιση των παλιρροιακών ρευμάτων καθώς κινούνται προς ή μακριά από την ακτή (Σχήμα 12.1).



Σχήμα 12.1. Παλίρροιες μικρού και μεγάλου εύρους.



Σχήμα 12.2. Το παλιρροιακό ελλειψοειδές λόγω φυγόκεντρων και κεντρομόλων δυνάμεων.

Η θεωρία του παλιρροιακού ισοζυγίου (Tide-equilibrium theory) όπως περιγράφεται από το Νεύτωνα εξηγεί τη κατανομή των δυνάμεων που είναι υπεύθυνες για τη δημιουργία των παλιρροιών (tide generating forces). Έστω το σύστημα Γη - Σελήνη, στο οποίο η Γη περιστρέφεται γύρω από τη Σελήνη, τότε η κατανομή των δυνάμεων που δρουν σε κάθε μώριο μάζας της Γης θα είναι ως εξής (Σχήμα 12.2):

1. Στο κέντρο της Γης θα έχουμε ότι η Βαρυτική Δύναμη έλξης της Σελήνης είναι ίση με τη Φυγόκεντρος Δύναμη που προκύπτει λόγω περιστροφής της Γης,
2. Στην επιφάνεια της Γης προς τη μεριά της Σελήνης έχουμε ότι η Βαρυτική Δύναμη έλξης της Σελήνης είναι μεγαλύτερη της Φυγόκεντρος Δύναμης λόγω περιστροφής της Γης, και τέλος
3. Στην επιφάνεια της Γης μακριά από τη Σελήνη έχουμε ότι η Βαρυτική Δύναμη έλξης της Σελήνης είναι μικρότερη της Φυγόκεντρος Δύναμης.

Για έναν ιδεατό ωκεανό που καλύπτει ολόκληρη την επιφάνεια της Γης, η μορφή των δυνάμεων προκαλεί κίνηση των μαζών νερού από τα σημεία B και D προς τα σημεία A και C. Με το τρόπο αυτό δημιουργείται ένα **παλιρροιακό ελλειψοειδές** (tidal bulge) στο οποίο έχουμε συσσώρευση νερού στα σημεία A και C και έλλειμμα νερού στα σημεία B και D.

Ένας παρατηρητής στα σημεία A και C θα θεωρήσει ότι έχουμε μέγιστη ανύψωση της στάθμης της θάλασσας, ενώ στα σημεία B και D θα θεωρήσει ότι έχουμε μέγιστη βύθιση της επιφάνειας της θάλασσας. Αν τώρα αποκαταστήσουμε τη περιστροφή της Γης γύρω από τον άξονά της, τότε ο σταθερός παρατηρητής θα συναντήσει τα μέγιστα και ελάχιστα εύρη σε 12,42 hr. Η παλιρροιακή μεταβολή της στάθμης της θάλασσας με περίοδο 12,42 hr ονομάζεται **ημι-ημερήσια παλίρροια** (semi-diurnal tide). Προκύπτει συνεπώς ότι ο βασικός λόγος δημιουργίας των ημι-ημερησίων παλιρροιών είναι η περιστροφή της Γης.

Η συμφωνία μεταξύ της προβλεπόμενης παλίρροιας από τη θεωρία του παλιρροιακού ισοζυγίου και της παρατηρούμενης παλίρροιας στις περισσότερες παράκτιες περιοχές ήταν ο βασικός λόγος αποδοχής της θεωρίας αυτής από τους επιστήμονες. 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. Αυτά τα δύο ουράνια σώματα είναι και τα μόνα που εξασκούν σημαντικές παλιρροιακές δυνάμεις στην ωκεάνια μάζα.

Όταν το σύστημα Ήλιος - Γη - Σελήνη βρεθεί σχεδόν σε ευθεία γραμμή, τότε τα παλιρροιακά ελλειψοειδή της Σελήνης και του Ηλίου προστίθενται και παράγονται **παλίρροιες μεγάλου εύρους** (spring tides). Συνθήκες που ευνοούν τη δημιουργία παλιρροιών μεγάλου εύρους είναι κάθε φορά που έχουμε Πανσέληνο ή Νέα Σελήνη. Όταν το σύστημα Ήλιος - Γη - Σελήνη βρεθεί σε γωνία  $90^\circ$  (κάτι που συνήθως συμβαίνει το Πρώτο και το Τρίτο Τέταρτο) τότε ο Ήλιος και η Σελήνη παράγουν παλιρροιακές δυνάμεις που έχουν διαφορά φάσης  $\pi/2$ , οπότε και οι δημιουργούμενες παλίρροιες έχουν μικρό εύρος μεταβολής της ελεύθερης στάθμης της θάλασσας (**παλίρροιες μικρού εύρους**, near tides).

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. Οι παλιρροιακές συνιστώσες ανάλογα με τη περίοδο των δυνάμεων που τις δημιουργούν διακρίνονται σε 3 είδη :

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

Ο Πίνακας 12.1 δίνει τις πιο σημαντικές παλιρροιακές συνιστώσες, καθώς και το σύμβολο και τη περίοδό τους. Προκύπτει έτσι ότι το 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. Η φύση της παλίρροιας (ημι-ημερήσια ή ημερήσια) σε κάθε περιοχή καθορίζεται από τη κύρια παλιρροιακή συνιστώσα, δηλ. τη συνιστώσα που έχει το μεγαλύτερο παλιρροιακό εύρος.

**Πίνακας 12.1.** Κύριες παλιρροιακές συνιστώσες.

Όνομα	Σύμβολο	Περίοδος (ώρες)
<i>Ημι-ημερήσιες συνιστώσες</i>		
	(δύο μέγιστα/ελάχιστα ανά ημέρα)	
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
<i>Ημερήσιες συνιστώσες</i>		
	(ένα μέγιστο/ελάχιστο ανά ημέρα)	
Συνδυασμός Ηλιακής-Σεληνιακής	$K_1$	23,93
Κύρια Σεληνιακή	$O_1$	25,82
Ηλιακή	$P_1$	24,07
<i>Παλίρροιες μεγάλης περιόδου</i>		
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

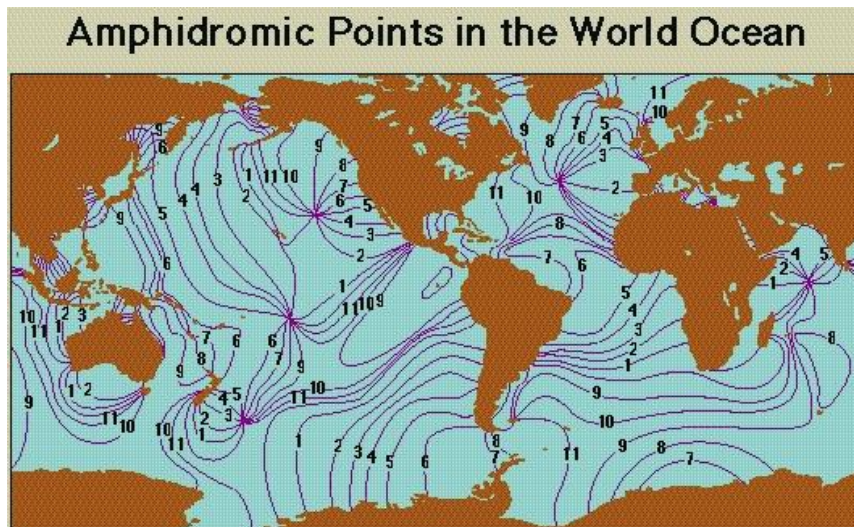
### **Δυναμική Θεωρία Παλιρροιών** (Dynamical Theory of Tides)

Η θεωρία παλιρροιακού ισοζυγίου εξηγεί τη παρουσία παλιρροιών και τη περίοδό τους. Δεν είναι όμως σε θέση να προβλέψει τη χρονική στιγμή που θα συμβεί η μέγιστη άμπωτις και πλημμυρίδα σε ένα τόπο, καθώς και τους λόγους που ορισμένες περιοχές δεν έχουν ημι-ημερήσια παλιρροιακή μεταβολή. Περίπου εκατό χρόνια μετά το Νεύτωνα, ο Laplace (1850) δημιούργησε τη δυναμική θεωρία των παλιρροιών. Σύμφωνα με αυτή, θεωρούμε και πάλι ωκεανό σταθερού βάθους να καλύπτει ολόκληρη τη Γη. Στον ωκεανό αυτό δημιουργείται κυματισμός με περίοδο ίση με αυτή των παλιρροιακών δυνάμεων. Όταν η συχνότητα του παλιρροιακού κύματος συμπίπτει με την ιδιοσυχνότητα της παράκτιας λεκάνης τότε συμβαίνει **συντονισμός** (resonance) με αποτέλεσμα τη παραμόρφωση των παλιρροιακών χαρακτηριστικών του κύματος.

Η παλιρροιακή μεταβολή θεωρείται κύμα μεγάλου μήκους κύματος, με αποτέλεσμα η ταχύτητα διάδοσης του  $C$  να εξαρτάται από το βάθος του ωκεανού στον οποίο κινείται το

παλιρροιακό κύμα. Η εξίσωση που δίνει τη ταχύτητα διάδοσης είναι  $C = \sqrt{gH}$ , όπου  $H$  το μέσο ωκεάνιο βάθος. Για  $H = 4000$  μ. προκύπτει ότι  $C = 200$  m/sec που είναι η μέση ταχύτητα διάδοσης του παλιρροιακού κύματος. Ωστόσο, η διάδοση του παλιρροιακού κύματος στον ωκεανό δεν είναι ευθύγραμμη. Η περιστροφή της Γης γύρω από τον άξονά της προκαλεί τη διάδοση του παλιρροιακού κύματος με τη μορφή **αμφιδρομικού παλιρροιακού συστήματος** (amphidromic tidal system).

Για να κατανοήσουμε τη κίνηση του παλιρροιακού κύματος, λόγω περιστροφής της Γης, θεωρούμε μία λεκάνη που περιστρέφεται με σταθερή γωνιακή ταχύτητα. Λόγω περιστροφής δημιουργείται κύμα στην άκρη της λεκάνης που ταξιδεύει με φορά τη φορά περιστροφής. Το κέντρο της λεκάνης παραμένει αμετάβλητο και θεωρείται σημείο χωρίς παλιρροιακή μεταβολή και καλείται **αμφιδρομικό σημείο** (nodal point). Γύρω από το αμφιδρομικό σημείο υπάρχουν **ισοφασικές γραμμές** (Co-tidal lines), δηλ. γραμμές που ενώνουν σημεία ίσης παλιρροιακής φάσης και **γραμμές ίσου εύρους** (co-range lines), δηλ. γραμμές που ενώνουν σημεία ίσου παλιρροιακού εύρους.



Σχήμα 12.3. Αμφιδρομικά σημεία, ισοφασικές γραμμές και γραμμές ίσου παλιρροιακού εύρους από μαθηματική προσομοίωση των ωκεανών.

Το Σχήμα 12.3 δείχνει τα θεωρητικά αποτελέσματα της διάδοσης της  $M_2$ -παλιρροιακής συνιστώσας στους πραγματικούς ωκεανούς της Γης. Υπάρχουν πολλά σημεία που δεν συμφωνούν με πραγματικά δεδομένα, όπως η ωρολογιακή περιστροφή στις ακτές της Καλιφόρνιας και της Βραζιλίας.

## Παλιρροιακή Ανάλυση και Πρόγνωση

Αν και η επιστημονική γνώση σε ότι αφορά τις παλίρροιες είναι ακόμα ελλιπής, είμαστε σε θέση να προγνώσουμε με σημαντικό βαθμό ακρίβειας τη παλιρροιακή μεταβολή σε κάθε τόπο. Για να είναι επιτυχής η παλιρροιακή πρόγνωση απαιτούνται ωριαίες τιμές παλιρροιακού ύψους για περίοδο τουλάχιστον 2 ετών. Το σετ αυτό των δεδομένων αναλύεται στις κύριες παλιρροιακές συνιστώσες με συγκεκριμένη περίοδο, που ονομάζονται **αρμονικές (harmonics)**, της μορφής :

$$y = A \cos\left(\frac{360^\circ t}{T}\right)$$

όπου  $T$  η περίοδος της συνιστώσας και  $A$  το εύρος της. Για κάθε παλιρροιακή συνιστώσα η περίοδος και το εύρος θα είναι διαφορετικά. Έτσι, θεωρούμε ότι η συνολική παλίρροια θα είναι το άθροισμα των επιμέρους συνιστωσών της μορφής :

$$y = \sum_{n=1}^N A_n \cos\left(\frac{360^\circ t}{T} - \theta_n\right)$$

όπου  $\theta_n$  η διαφορά φάσης.

Όσες περισσότερες συνιστώσες χρησιμοποιήσουμε τόσο πιο ακριβής θα είναι η πρόγνωση.

## Παλιρροιακή Ενέργεια

Η χρήση της παλιρροιακής μεταβολής της ελεύθερης στάθμης της θάλασσας στις παράκτιες περιοχές απαιτεί μακρο-παλιρροιακά εύρη της τάξης των 4 μ. και άνω (macro-tidal ranges). Τέτοιες περιοχές βρίσκονται στον Ατλαντικό ωκεανό (ακτές Βρετανίας, Γαλλίας, Βραζιλίας, Αργεντινής) καθώς και στο Bay of Fundy στον Canada (με παλίρροια μεγάλου εύρους : 15,6 μ). Στον Ινδικό ωκεανό τέτοιες μακρο-παλιρροιακές περιοχές υπάρχουν στις ακτές Τανζανίας και ΒΔ Αυστραλίας με εύρος 12 μ., και στον Ειρηνικό ωκεανό στις ακτές της Αλάσκας, τον Κόλπο Καλιφόρνιας και τη Ν. Ζηλανδία. Η δημιουργία ασυνήθιστα μεγάλων παλιρροιακών ευρών σε δεδομένες περιοχές οφείλεται στην επίδραση του συντονισμού και της σύγκλισης των ωκεάνιων ρευμάτων. 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.

Οι μόνοι σταθμοί ηλεκτροπαραγωγής από παλιρροιακά φράγματα στο κόσμο βρίσκονται στη Ρωσία και στη La Rance της Γαλλίας, όπου παράγονται 65 MW ενέργειας ετησίως.

### Παλίρροιες σε Παράκτιες Περιοχές

Οι ωκεάνιες παλίρροιες προκαλούν μεταβολές της ελεύθερης στάθμης της θάλασσας που κινούνται ανάντη της παράκτιας ζώνης (σε περιπτώσεις εκβολών ποταμών έως και 800 χλμ ανάντη του Αμαζόνιου Ποταμού). Η διάδοση του παλιρροιακού κύματος στη παράκτια ζώνη μεταβάλλεται λόγω των απότομων μεταβολών του βάθους και του πλάτους της παράκτιας περιοχής. Έτσι, η είσοδος της παλίρροιας σε έναν κόλπο που μειώνει διαρκώς το βάθος και το πλάτος του, αυξάνει το παλιρροιακό εύρος ανάντη του κόλπου, ένα φαινόμενο γνωστό ως funneling effect. Αν θεωρήσουμε αμελητέες τις απώλειες λόγω τριβής, η ροή ενέργειας θα παραμείνει σταθερή ανάντη του κόλπου. Η ενέργεια του παλιρροιακού κύματος είναι  $E = (\rho g A^2)/2$  όπου  $A$  το παλιρροιακό εύρος, ενώ η παλιρροιακή ενέργεια σε μία διατομή =  $(Eb)$  όπου  $b$  το πλάτος του κόλπου. Προκύπτει έτσι ότι η ροή ενέργειας ανάντη που παραμένει σταθερή ισούται με  $EbC$ , όπου  $C$  η ταχύτητα παλιρροιακού κύματος. Άρα, η ροή ενέργειας γράφεται :

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

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,  $f = 1/T$

$\lambda$  το μήκος κύματος

άρα  $\lambda = C/f = \sqrt{gh}/f \rightarrow \lambda \propto h^{1/2}$

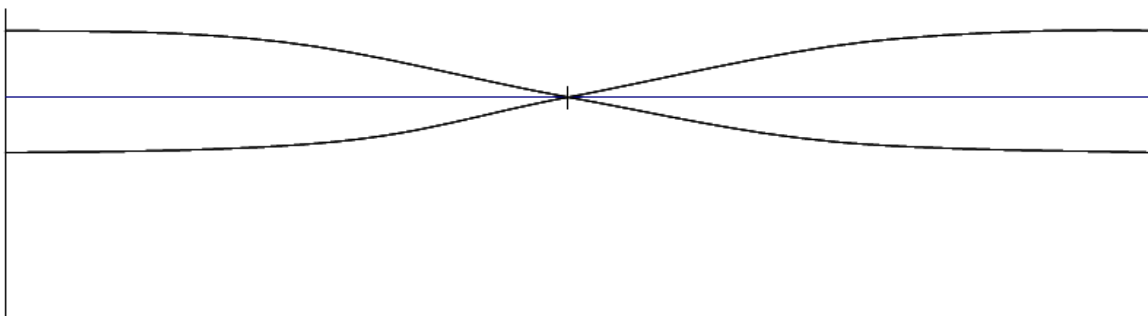
Άρα, η μείωση βάθους κατά την ανάντη διεύθυνση αυξάνει το παλιρροιακό εύρος ενώ το μήκος κύματος μειώνεται.

Έτσι, το εισερχόμενο παλιρροιακό κύμα αποκτά μεγαλύτερη κλίση, διότι  $A/\lambda \propto h^{-3/4}$ . 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. Για να κατανοήσουμε καλύτερα το φαινόμενο του συντονισμού θεωρούμε μία λίμνη μήκους  $L$ , βάθους  $h$  και σταθερού πλάτους  $b$ . Έστω ότι η λίμνη έχει επίπεδο πυθμένα και κατακόρυφα πλευρικά όρια. Έστω ότι το νερό της λίμνης ταλαντώνεται, θα δημιουργηθεί μία δομή όπου τα σημεία  $A$  και  $E$  στα όρια της λίμνης έχουν μέγιστες κατακόρυφες ταλαντώσεις και το σημείο  $C$  στο κέντρο της έχει μηδενική κατακόρυφη ταλάντωση. Η κατάσταση μέγιστης απόκρισης στην εφαρμοζόμενη περιοδική δύναμη είναι γνωστή ως συντονισμός και τα κύματα που προκύπτουν ονομάζονται **στάσιμα κύματα** (standing waves ή seiches).

Η δημιουργία των στάσιμων αυτών κυμάτων οφείλεται στην διάδοση των κυμάτων, την ανάκλασή τους στα σταθερά όρια της λίμνης και την επιστροφή τους κατά την αντίθετη διεύθυνση με αποτέλεσμα να προκύπτει κύμα που να αποτελείται από το άθροισμα των επιμέρους κυμάτων (Σχήμα 12.4).



Στάσιμα κύματα (Standing waves) ή seiche

Σχήμα 12.4. Στάσιμα κύματα.



Συντονισμός επιτυγχάνεται όταν ο χρόνος κίνησης του κύματος από τη μία άκρη της λίμνης στην άλλη ισούται με ακέραιο αριθμό παλιρροιακών περιόδων. Γνωρίζουμε ότι το κύμα για να ταξιδέψει από τη μία πλευρά της λίμνης στην άλλη, να ανακλαστεί και να επιστρέψει απαιτεί χρόνο :

$$t = 2 L/C = n T$$

όπου C η ταχύτητα κύματος, n θετικός αριθμός και T η περίοδος του κύματος.

Άρα  $T = 2L/nC = 2L/(n\sqrt{gh})$  γνωστή ως Merian formula

Για να συμβεί συντονισμός πρέπει :  $T = \frac{2 L}{\sqrt{gh}}$

Ο Πίνακας 12.2 παρουσιάζει τις τιμές της περιόδου T που είναι σε θέση να δώσουν συντονισμό όταν το μήκος της λεκάνης είναι L και το βάθος της h.

**Πίνακας 12.2.** Τιμές Περιόδου  $T = 2L/(gh)^{1/2}$  για διάφορους συνδυασμού L και h.

	L = 10 km	L = 100 km	L = 500 km	L = 1000 km
h (m)		(Περίοδος T)	σε ώρες	
50	0,25	2,5	12,6	25,1
100	0,18	1,8	8,9	17,7
200	0,13	1,3	6,3	12,6
500	0,08	0,8	4,0	7,9
1000	0,06	0,6	2,3	5,6

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

$$T = \frac{4 L_c}{(g h)^{1/2}}$$

διότι  $L_c = 0.5 L$

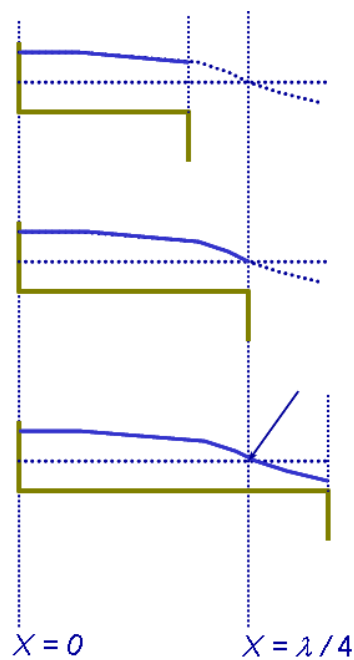
Το Σχήμα 12.5 δίνει διάφορες περιπτώσεις συντονισμού σε ανοικτή λεκάνη, όπου το σημαντικό στοιχείο είναι ότι το παλιρροιακό εύρος είναι μεγαλύτερο στο κλειστό άκρο ( $x=0$ ) παρά στο ανοικτό όριο ( $x=L/4$ ). Με άλλα λόγια έχουμε ενίσχυση του παλιρροιακού εύρους στην ανάντη διεύθυνση.

Για την ενίσχυση αυτή, το μήκος συντονισμού  $L_c$  σχετίζεται με το βάθος από την εξίσωση:

$$T = \frac{4 L_c}{(g h)^{1/2}}$$

Για την  $M_2$  - 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



Σχήμα 12.5. Συντονισμός κύματος σε ανοικτή λεκάνη.