

## 7. ΚΥΜΑΤΑ

### 7.1 Γενικά

Η επιφάνεια της θάλασσας φαίνεται να βρίσκεται συνέχεια σε κίνηση με διαρκείς αναταράξεις. Η πιο προφανής αιτία είναι τα ανεμογενή κύματα που διαδίδονται από άκρο σε άκρο σε μια ωκεάνια λεκάνη ώσπου να εκτονωθεί η ενέργειά τους με τη θραύση τους σε κάποια ακτή. Τα ελαστικά κύματα με την ευρεία έννοια της φυσικής είναι μεταφορά ενέργειας με περιοδική κίνηση των μορίων της ύλης. Ο άνεμος, οι μεταβολές της ατμοσφαιρικής πίεσης, η αλληλεπίδραση μεταξύ δυνάμεων που προκύπτουν από την περιστροφή της γης (Coriolis) με άλλες δυνάμεις, μεταφέρουν ενέργεια προξενώντας περιοδικές κινήσεις των μορίων του νερού.

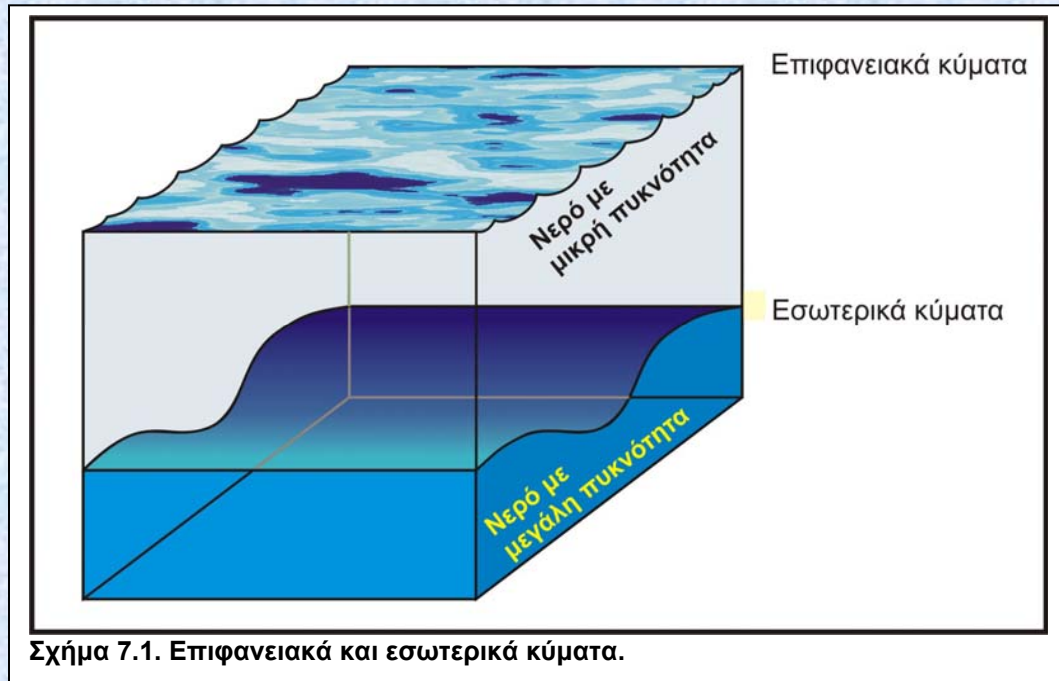
Επομένως κύματα είναι περιοδικές μηχανικές ταλαντώσεις των μορίων του νερού, στην επιφάνεια ή στο βάθος, οποιασδήποτε περιόδου, με τις οποίες γίνεται μεταφορά ενέργειας. Το φάσμα τους περιλαμβάνει περιόδους μικρότερες από 1sec, όπως οι ρυτιδώσεις που προξενεί ο ασθενής άνεμος στην ήρεμη επιφάνεια της θάλασσας, ως 3-4 μήνες σε μερικά πλανητικά κύματα που τα αποτελέσματά τους γίνονται αισθητά κυρίως σαν περιοδικές μεταβολές στην ροή και τη διεύθυνση των θαλασσίων ρευμάτων.

Σύμφωνα με τον ορισμό αυτό οι παλίρροιες θεωρούνται και αυτές κύματα, τις εξετάζουμε όμως χωριστά σε επόμενο κεφάλαιο, γιατί οι γενεσιουργές δυνάμεις βρίσκονται εκτός της γης και έχουν αστρονομικά αιτία. Τα πιο σημαντικά από την άποψη των επιπτώσεων στον άνθρωπο είναι τα ανεμογενή κύματα στην επιφάνεια της θάλασσας. Σχετικά σπάνια, αλλά επίσης σημαντικά από άποψη επιπτώσεων, είναι τα κύματα Tsunami, που προξενούνται από τους υποθαλάσσιους σεισμούς και εξετάζονται από τη σεισμολογία.

Πριν προχωρήσουμε στην περιγραφή και την ταξινόμηση των κυμάτων της θάλασσας θα αναφερθούμε περιληπτικά στα είδη των ελαστικών κυμάτων που διαδίδονται μέσα στην ύλη. Έχουμε δύο μεγάλες κατηγορίες κυμάτων:

- Τα κύματα που διαδίδονται μέσα στη μάζα της ύλης και χωρίζονται σε επιμήκη και σε εγκάρσια και
- Τα κύματα που διαδίδονται στο όριο δύο μέσων διαφορετικής πυκνότητας και ονομάζονται τροχιακά (orbital waves).

Τα επιμήκη κύματα χαρακτηρίζονται από την ταλάντωση των μορίων της ύλης κατά μήκος της διεύθυνσης διάδοσής τους π.χ. όπως τα ηχητικά κύματα, δημιουργώντας περιοδικά μεταβαλλόμενες ζώνες συμπίεσης και αραιώσης. Τα κύματα αυτά διαδίδονται σε όλα τα μέσα, στερεά, υγρά και αέρια.

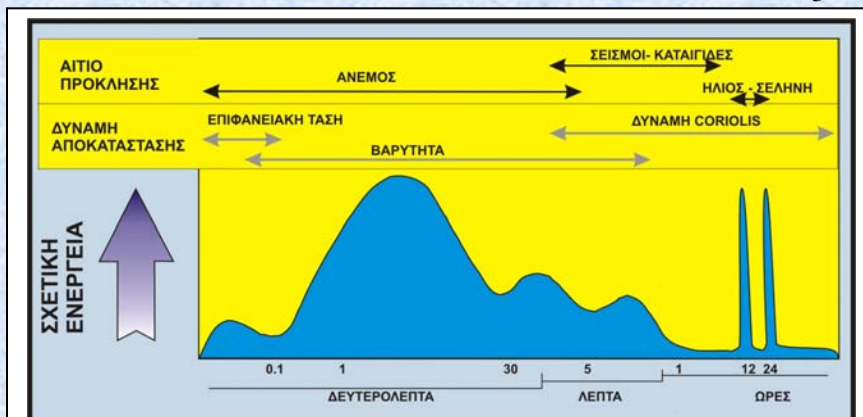


Τα εγκάρσια κύματα χαρακτηρίζονται από ταλαντώσεις κάθετες στη διεύθυνση διάδοσης της κύμανσης, όπως για παράδειγμα οι αναταράξεις σε ένα σχοινί δεμένο στο ένα άκρο το οποίο κρατούμε τεντωμένο από το άλλο άκρο και το ταλαντώνουμε. Τα εγκάρσια κύματα διαδίδονται μόνο στα στερεά σώματα γιατί προϋποθέτουν μεγάλη συνεκτικότητα μεταξύ των μορίων της ύλης. Επομένως τα κύματα αυτά δε διαδίδονται στη θάλασσα.

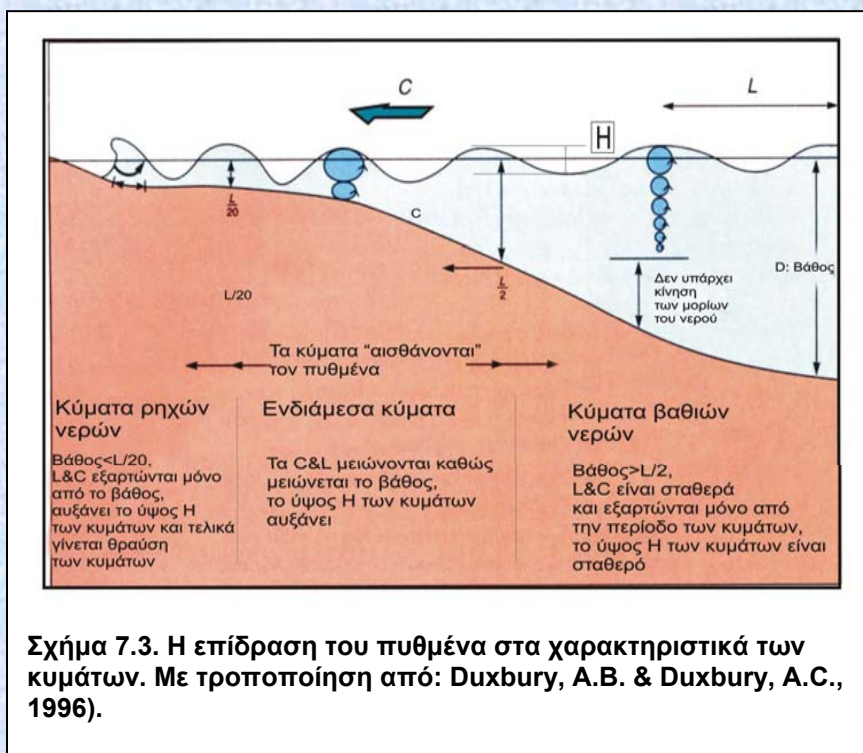
Τα τροχιακά κύματα αναπτύσσονται στο όριο μεταξύ δυο μέσων διαφορετικής πυκνότητας όπως η θάλασσα και ο αέρας αλλά και μέσα στη θάλασσα μεταξύ επιφανειακού και βαθύτερου νερού στο όριο του θερμοκλινούς (Σχήμα 7.1). Οι κινήσεις των μορίων ακολουθούν κυκλικές ή ελλειπτικές τροχιές οι οποίες περιορίζονται σε μια ζώνη στην περιοχή του ορίου επάνω στο οποίο διαδίδονται.

Στο κεφάλαιο αυτό θα ασχοληθούμε με τα κύματα στην επιφάνεια της θάλασσας τα οποία έχουν και τη μεγαλύτερη σημασία για τις παράκτιες διεργασίες, τη διάβρωση τη μεταφορά και την απόθεση κλαστικών υλικών στον παράκτιο χώρο.

Στο σχήμα 7.2 είναι ένα διάγραμμα που δείχνει τη σχετική κατανομή της ενέργειας των επιφανειακών κυμάτων σε σχέση με την περίοδό τους. Στο ίδιο σχήμα είναι επίσης ταξινομημένες η αιτία που προκαλεί την ανατάραξη και το είδος της δύναμης που προσπαθεί να αποκαταστήσει το αποτέλεσμα της ανατάραξης. Βλέπουμε ότι στις πολύ μικρής περιόδου ρυτιδώσεις της επιφάνειας του νερού η επιφανειακή τάση τείνει να αποκαταστήσει την ανατάραξη από τον άνεμο, ενώ στα συνήθη ανεμογενή κύματα η βαρύτητα έχει τον πρωτεύοντα ρόλο. Για το λόγο αυτό και τα ανεμογενή κύματα συνήθως αναφέρονται και σαν κύματα βαρύτητας. Σε πολύ μεγαλύτερες περιόδους (>5min) η δύναμη Coriolis παίζει πολύ σημαντικό ρόλο.



Σχήμα 7.2. Σχετική κατανομή της ενέργειας των επιφανειακών κυμάτων σε σχέση με την περίοδό τους.



Σχήμα 7.3. Η επίδραση του πυθμένα στα χαρακτηριστικά των κυμάτων. Με τροποποίηση από: Duxbury, A.B. & Duxbury, A.C., 1996).

Τα κύματα βαρύτητας παίζουν το σημαντικότερο λόγο στη διαμόρφωση της μορφολογίας της ακτής, καθώς και στις παράκτιες τεχνικές κατασκευές και γι' αυτό έχει γίνει σημαντική προσπάθεια να βρεθούν μαθηματικές εκφράσεις που να τα περιγράφουν, ώστε να κατανοηθεί και να προβλεφθεί η συμπεριφορά τους.

Κάθε κύμα έχει τέσσερα κύρια χαρακτηριστικά (Σχήμα 7.3).

Το ύψος  $H$ , που είναι η κατακόρυφη απόσταση από τη κορυφή ως το βαθύτερο σημείο της κοιλίας.

Το μήκος κύματος  $L$ , που είναι η οριζόντια απόσταση από κορυφή σε κορυφή.

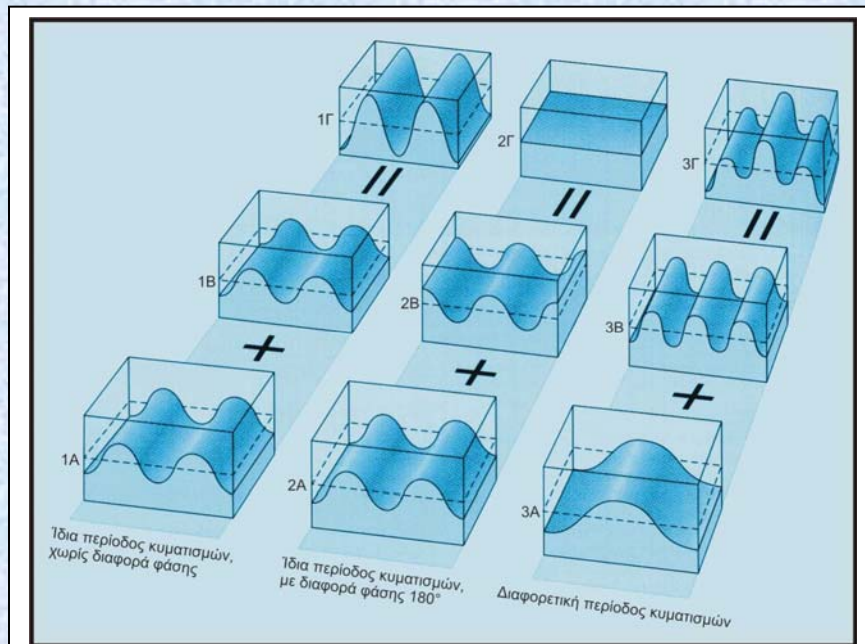
Η περίοδος  $T$ , που είναι ο χρόνος σε δευτερόλεπτα που χρειάζεται για να περάσουν από ακίνητο παρατηρητή δύο διαδοχικές κορυφές.

Και τέλος η ταχύτητα, η οποία διαχωρίζεται στην ταχύτητα φάσης και στην ταχύτητα ομάδας.

Για όλες τις μορφές των κυμάτων υπάρχει μια απλή σχέση μεταξύ της ταχύτητας, του μήκους κύματος και της περιόδου:

$$C = \frac{L}{T}$$

Παρατηρώντας την επιφάνεια της θάλασσας δεν φαίνεται να υπάρχει ομοιογένεια στις μορφές των κυμάτων. Κυριότερη αιτία είναι ότι στην πράξη έχουμε διαφόρους κυματισμούς που συμβάλλουν μεταξύ τους με διάφορους συνδυασμούς διαφοράς φάσης, με αποτέλεσμα η μορφή της επιφάνειας να είναι το προϊόν της συμβολής (Σχήμα 7.4).



Σχήμα 7.4. Συμβολή κυμάτων.

Εξαιτίας της τεράστιας ποικιλίας των μορφών που έχουν τα κύματα καθώς και της διαρκούς μεταβολής των χαρακτηριστικών τους όταν πλησιάζουν σε ρηχά νερά, δεν είναι επαρκής μία μόνο θεωρία που να περιγράψει όλες τις μεταβολές. Για τη δημιουργία κάθε θεωρίας είναι αναγκαίο να γίνουν ορισμένες παραδοχές όσον αφορά τη σχέση του ύψους του κύματος ως προς το βάθος του νερού, ή το βάθος του νερού ως προς το μήκος κύματος.

## 7.2 Η θεωρία του Airy

Η θεωρία αυτή ισχύει όταν το ύψος του κύματος  $H$ , είναι πολύ μικρό σε σχέση με το βάθος του νερού  $D$  και το μήκος κύματος  $L$ , δηλαδή όταν  $H < D$  και  $H < L$ . Η θεωρία του Airy καλύπτει όλες τις περιπτώσεις του  $D/L$ . Κατά τη θεωρία αυτή το κύμα αποτελεί ημιτονοειδή ταλάντωση και το προφίλ του δίνεται από τη σχέση:

$$\eta = \frac{H}{2} \eta \mu \left( \frac{2\pi x}{L} - \frac{2\pi t}{T} \right)$$

όπου  $\eta$  το ύψος του κύματος τη χρονική στιγμή  $t$ , σε οριζόντια απόσταση  $x$ .

Οι γενικές εξισώσεις της ταχύτητας και του μήκους κύματος είναι:

$$C = \frac{gL}{2\pi} \varepsilon \phi h \left( 2\pi \frac{D}{L} \right)$$

και

$$L = \frac{gT}{2\pi} \varepsilon \phi h \left( 2\pi \frac{D}{L} \right)$$

όπου  $g$  η επιτάχυνση της βαρύτητας..

Οι εξισώσεις της ταχύτητας και του μήκους κύματος επιδέχονται απλοποιήσεις. Εξετάζεται η τιμή που παίρνει η υπερβολική εφαπτόμενη ( $\varepsilon \phi h$ ) καθώς ο λόγος ( $D/L$ ) του βάθους προς το μήκος κύματος αυξάνεται ή ελαττώνεται.

Η τιμή της υπερβολικής εφαπτομένης πλησιάζει τη μονάδα όταν ο λόγος  $D/L$  γίνει μεγαλύτερος από 0.3. Όταν όμως η τιμή του γίνει μεγαλύτερη από το  $1/2$  τότε πλέον και στην πράξη θεωρούμε ότι η υπερβολική εφαπτομένη έχει σταθερή τιμή 1. Άρα όταν το βάθος του νερού είναι μεγαλύτερο από το  $1/2$  του μήκους κύματος τότε τόσο η ταχύτητα όσο και το μήκος κύματος είναι ανεξάρτητα από το βάθος του νερού:

$$L = 1.56 T \quad \text{και} \quad C = 1.56 T$$

Αντίθετα, μικραίνοντας τις τιμές του λόγου  $D/L$  κάτω από  $1/20$  τότε η τιμή της υπερβολικής εφαπτομένης ισούται με την τιμή του τόξου της, οπότε:

$$L = T \sqrt{gD} \quad \text{και} \quad C = \sqrt{gD}$$

Βλέπουμε λοιπόν ότι στην περίπτωση ρηχών νερών ( $L=D/20$ ) το μήκος κύματος είναι συνάρτηση της περιόδου και του βάθους, ενώ η ταχύτητα είναι αποκλειστικά συνάρτηση του βάθους.

Οι μετασχηματισμοί που αναφέραμε συνοψίζονται στον πίνακα 7.2.1.

**Πίνακας 7.2.1. Μετασχηματισμός της ταχύτητας και του μήκους κύματος.**

$D \ll \frac{L}{20} \ll D$	$D \ll \frac{L}{2} \ll D$	
Ρηχά	Ενδιάμεσα	Βαθιά
$L = T \sqrt{gD}$	$L = \frac{gT^2}{2\pi} \epsilon\phi h\left(\frac{2\pi D}{L}\right)$	$L = \frac{g}{2\pi} T^2 = 1.56T^2$
$C = \sqrt{gD}$	$C^2 = \frac{gL}{2\pi} \epsilon\phi h\left(\frac{2\pi D}{L}\right)$	$C^2 = \frac{gL}{2\pi} \rightarrow C = 1.56T$

Η κίνηση των μορίων του νερού στη θεωρία του Airy είναι κυκλική, με διάμετρο που μειώνεται εκθετικά με το βάθος:

$$R = H \cdot e^{-\left(\frac{2\pi Z}{L}\right)}$$

όπου  $R$  είναι η ακτίνα της κυκλικής τροχιάς σε βάθος  $Z$  κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας,  $L$  το μήκος και  $H$  το ύψος του κύματος (Σχήμα 7.3).

ΠΙΝΑΚΑΣ 7.2.2

Z/L	1/4	1/3	1/2	1
R	0.21H	0.123H	0.043H	0.002H

Από τον παραπάνω πίνακα 7.2.2 φαίνεται ότι σε βάθη μεγαλύτερα από το μισό του μήκος κύματος, η κίνηση των μορίων αρχίζει να γίνεται τόσο μικρή που πρακτικά μπορούμε να τα θεωρήσουμε ακίνητα.

Αν το βάθος του πυθμένα είναι μικρό τότε η τριβή των μορίων στον πυθμένα παραμορφώνει την κυκλική τους κίνηση. Οι τροχιές σ' αυτή την περίπτωση είναι ελλείψεις με το μεγάλο τους άξονα παράλληλο στον πυθμένα.

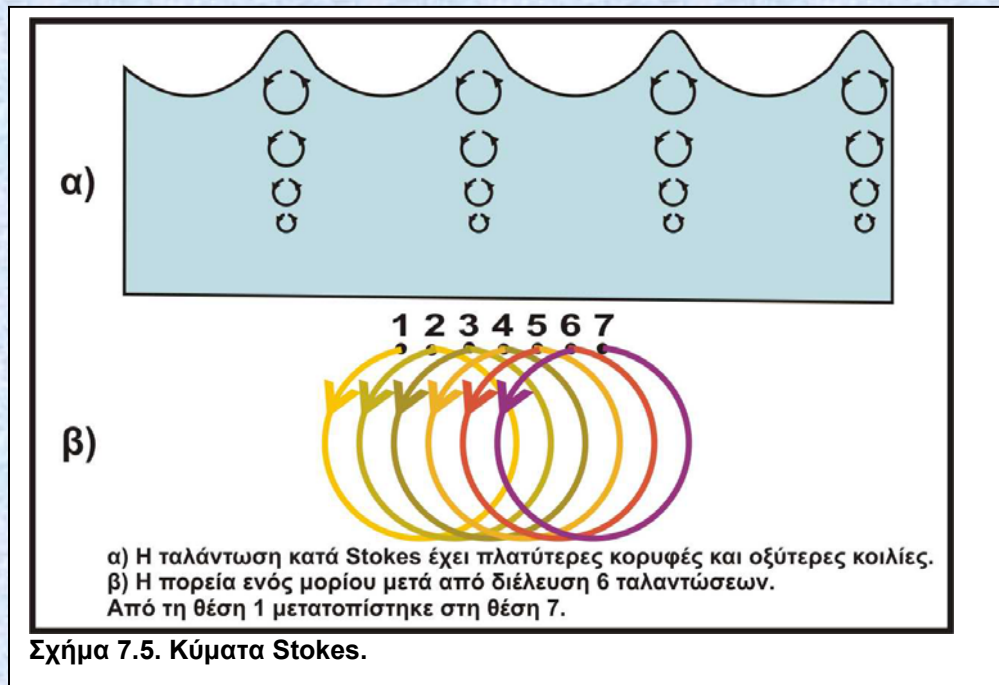
### 7.3 Η θεωρία του Stokes

Ο Stokes παρατήρησε ότι η θεωρία του Airy δεν είναι αρκετή για να εξηγήσει τις περιπτώσεις στις οποίες έχουμε μεταφορά μάζας κατά τη διεύθυνση διάδοσης των κυμάτων. Η ανεπάρκεια της θεωρίας του Airy προέρχεται από την προϋπόθεση ότι το ύψος του κύματος πρέπει να είναι πολύ μικρότερο από το μήκος του. Αυτό δε συμβαίνει πάντα στην πράξη και έτσι ο Stokes έλαβε υπόψη στους υπολογισμούς του και το ύψος του κύματος. Η προϋπόθεση που έθεσε για να ισχύει η θεωρία του είναι ότι το βάθος πρέπει να είναι μεγάλο σε σχέση με το μήκος κύματος, συγκεκριμένα  $D/L > 0.1$ , και υπολόγισε την ταχύτητα διάδοσης των κυμάτων:

$$C = \sqrt{\frac{gL}{2\pi} \left( 1 + \frac{\pi^2 H^2}{2L^2} \right)}$$

η οποία είναι σε συμφωνία με την εξίσωση Airy όταν το ύψος του κύματος είναι μικρό.

Κατά την θεωρία του Stokes οι κινήσεις των μορίων είναι μεν κυκλικές τροχιές (όπως του Airy) αλλά τα μόρια δεν διαγράφουν πλήρεις κύκλους σε μια πλήρη περίοδο, αλλά τόξα λίγο μικρότερα από  $360^\circ$ . Το αποτέλεσμα είναι τα μόρια του νερού κάθε φορά που διαγράφουν μια πλήρη τροχιά της ταλάντωσης να σταματούν λίγο πιο μπροστά από εκεί που ξεκίνησαν. Με τον τρόπο αυτό γίνεται σταδιακή μετάδοση μάζας κατά τη διεύθυνση διάδοσης του κύματος, (Σχήμα 7.5).



Η ταχύτητα μετάδοσης της μάζας  $C_m$  είναι:

$$C_m = \frac{\pi H^2}{L^2} C$$

όπου  $C$  η ταχύτητα φάσης του κύματος. Παρατηρούμε ότι για πολύ μικρό ύψος κύματος σε σχέση με το μήκος του η ταχύτητα μετάδοσης της μάζας τείνει στο μηδέν.

Η μορφή της ταλάντωσης κατά Stokes μοιάζει με ημιτονοειδή καμπύλη αλλά έχει πεπλατυσμένες κοιλιές και οξύτερες κορυφές.

#### 7.4 Θεωρία των Μεμονωμένων Κυμάτων (Solitary Waves)

Στη θεωρία αυτή εξετάζεται κάθε κύμα χωριστά. Το κύμα διαδίδεται πάνω στην ελεύθερη επιφάνεια του νερού σαν μια έξαρση χωρίς να υπάρχει κοιλία. Τα μόρια του νερού είναι ακίνητα και μόλις περάσει από επάνω τους το κύμα κινούνται προς τα εμπρός διαγράφοντας μια πορεία σε σχήμα τόξου, εφόσον βρίσκονται στην επιφάνεια και ένα ευθύγραμμο τμήμα, όταν βρίσκονται στον πυθμένα, (Σχήμα 7.6). Η απόσταση που μετακινούνται προς τα εμπρός είναι:

$$x = 4\sqrt{\frac{DH}{3}}$$

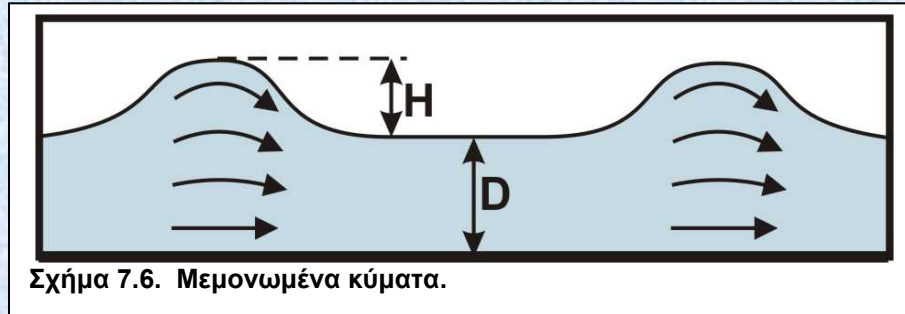
Η ταχύτητα του μεμονωμένου κύματος είναι:

$$C = \sqrt{g(D + H)}$$

Τα μεμονωμένα κύματα στη θεωρητική τους μορφή δε συναντώνται συχνά στη φύση. Στην πράξη όμως μπορούν να θεωρηθούν σαν μεμονωμένα κύματα που βρίσκονται σε πολύ ρηχά νερά και οι κορυφές τους απέχουν περισσότερο από απόσταση  $s$ , όπου:

$$s \geq 2\pi D \sqrt{\frac{D}{3H}}$$

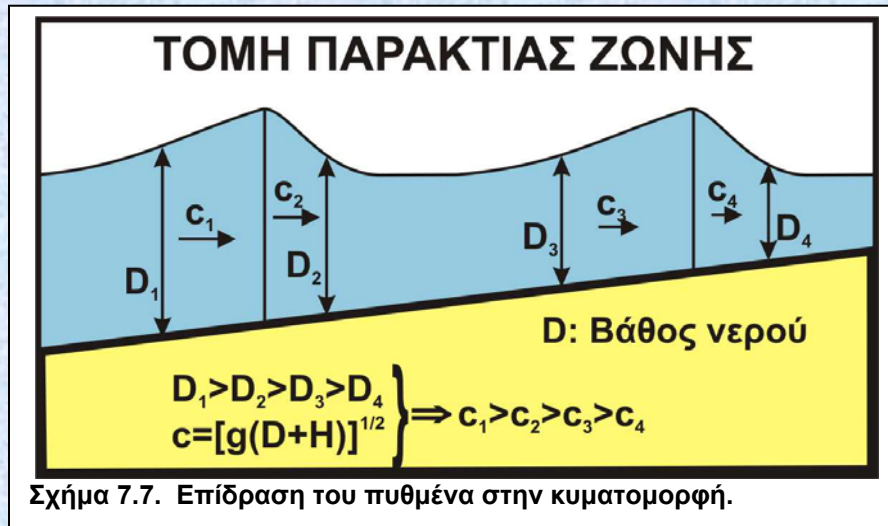




Σχήμα 7.6. Μεμονωμένα κύματα.

Τα κύματα καθώς πλησιάζουν την ακτή παίρνουν ένα ασύμμετρο σχήμα. Αν κάνουμε μια τομή κατά τη διεύθυνση διάδοσης, το εμπρόσθιο τμήμα του κύματος είναι πιο συμπυκνόμενο από ότι το οπίσθιο τμήμα.

Στο σχήμα 7.7 εξηγείται αυτή η ασυμμετρία η οποία οφείλεται στη διαφορά της ταχύτητας των εμπρόσθιων τμημάτων του κύματος από τα πίσω. Η διαφορά στην ταχύτητα προκύπτει λόγω της συνεχούς ελάττωσης βάρους, όσο το κύμα προχωρά προς τα ρηχά. Το τμήμα του κύματος που βρίσκεται προς την ακτή (μέτωπο του κύματος) έχει μικρότερη ταχύτητα, γιατί βρίσκεται σε μικρότερο βάθος, από το υπόλοιπο τμήμα που ακολουθεί.



Σχήμα 7.7. Επίδραση του πυθμένα στην κυματομορφή.

### 7.5 Θραύση των Κυμάτων

Ένα πολύ συνηθισμένο φαινόμενο όχι μόνο στην παράκτια ζώνη αλλά και στον ανοικτό ωκεανό είναι η θραύση των κυμάτων. Η θραύση ενός κύματος συμβαίνει για δύο κυρίως αιτίες.

Η μια αιτία είναι η αστάθεια που εμφανίζεται στο κύμα, σαν σώμα ρευστού, όταν ξεπεραστούν ορισμένα όρια στο σχήμα του, από γεωμετρική άποψη. Έχει σχέση με το ιξώδες και το συντελεστή εσωτερικής τριβής. Το υψηλότερο σημείο στο οποίο μπορεί να κρατηθεί σε συνοχή ένα σώμα νερού σε τριγωνική παραμόρφωση, είναι η κορυφή ενός ισοσκελούς τριγώνου με γωνία μεγαλύτερη από 120°. Αν θεωρήσουμε την

κορυφή του κύματος σαν την κορυφή του τριγώνου, τότε ορίζουμε μια παράμετρο, την οξύτητα του κύματος, σαν το λόγο του ύψους  $H$  ως προς το μήκος  $L$ . Ο λόγος αυτός, για να διατηρείται η γωνία της κορυφής μεγαλύτερη από  $120^\circ$ , δεν πρέπει να είναι μεγαλύτερος από  $1/7$ . Στην πράξη όμως δεν επιτυγχάνεται το θεωρητικό  $1/7$  και θραύση συμβαίνει όταν ξεπεραστεί το  $1/12$ , δηλαδή το όριο για τη σταθερότητα του κύματος είναι:

$$\frac{H}{L} \leq \frac{1}{7} \quad \text{θεωρητική τιμή}$$

$$\frac{H}{L} \leq \frac{1}{12} \quad \text{συνήθης τιμή στην πράξη}$$

Η θραύση στα βαθιά συμβαίνει συνήθως με θυελλώδης ανέμους που αυξάνουν διαρκώς το ύψος των κυμάτων ώσπου να γίνουν ασταθή. Μπορεί επίσης να συμβεί με τη συμβολή δύο κυματισμών, στα σημεία όπου η διαφορά φάσης είναι τέτοια ώστε να προστίθενται και το παραγόμενο κύμα να ξεπερνά το όριο της σταθερότητας. Αντίθετα, στην παράκτια ζώνη, όπως είδαμε, η ταχύτητα του κύματος είναι συνάρτηση του βάθους του νερού που προκαλεί μια συνεχή μείωση της ταχύτητας καθώς το κύμα πλησιάζει στην ακτή. Η μείωση της ταχύτητας προκαλεί ελάττωση στο μήκος κύματος, οπότε, για να διατηρηθεί η ενέργεια σταθερή γίνεται αύξηση του ύψους, με αποτέλεσμα πέρα από ένα όριο το κύμα να γίνει ασταθές.

Η άλλη αιτία που γίνεται η θραύση των κυμάτων είναι αν τα κορυφαία τμήματα του κύματος αποκτήσουν μεγαλύτερη ταχύτητα από την ταχύτητα διάδοσης της υπόλοιπης μάζας του κύματος. Αυτό προκύπτει σαν ακραία κατάσταση της ασυμμετρίας που παίρνει η κυματομορφή στα ρηχά νερά που είδαμε παραπάνω. Το όριο που συμβαίνει η θραύση είναι όταν το κύμα φθάσει σε βάθος που είναι κατά 25% μεγαλύτερο από το ύψος του ή:

$$\frac{H}{D} = 0.8$$

Και οι δύο περιπτώσεις θραύσης ισχύουν ταυτόχρονα στα ρηχά νερά. Τελικά η θραύση συμβαίνει ανάλογα με το πια συνθήκη θα ικανοποιηθεί πρώτη.

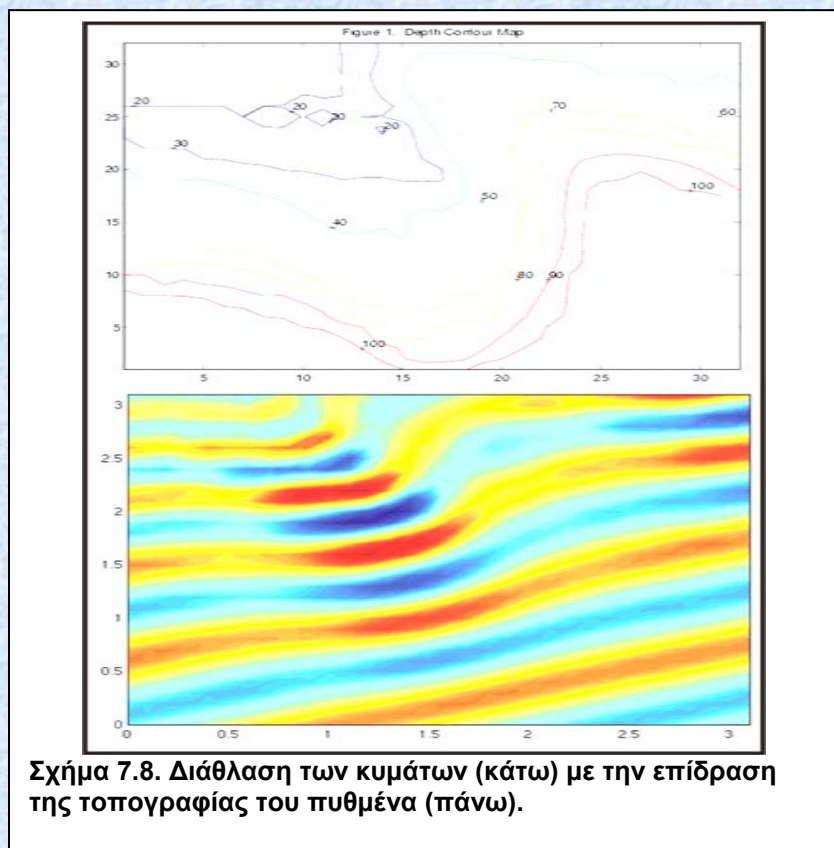
## 7.6 Διάθλαση των Κυμάτων

Όταν τα κύματα διαδίδονται σε επαρκές βάθος, δηλαδή όταν ο πυθμένας βρίσκεται σε βάθος  $D$  μεγαλύτερο από το μισό του μήκους κύματος  $L$ ,  $[D > (L/2)]$ , τότε ο πυθμένας δεν έχει καμία επίπτωση στον κυματισμό. Καθώς τα κύματα πλησιάζουν την ακτή και το βάθος ελαττώνεται πέρα από την κρίσιμη τιμή, αρχίζει ο πυθμένας να επιδρά στην ταχύτητα διάδοσης του κύματος. Η ταχύτητα πλέον στα ρηχά νερά είναι συνάρτηση του βάθους:  $C = (gD)^{0.5}$ . Αποτέλεσμα αυτού είναι η επιβράδυνση τμημάτων του μετώπου του κύματος που βρίσκονται σε ρηχά νερά σε σχέση με τα

τμήματα που βρίσκονται σε βαθύτερα νερά. Έτσι δημιουργείται μια παραμόρφωση στο αρχικό μέτωπο του κύματος ανάλογα με τα βάθη επάνω από τα οποία περνά (Σχήμα 7.8). Στην πράξη δημιουργείται η τάση το μέτωπο του κύματος να γίνει σχεδόν παράλληλο με τις ισοβαθείς χωρίς ποτέ να το κατορθώνει τελείως.

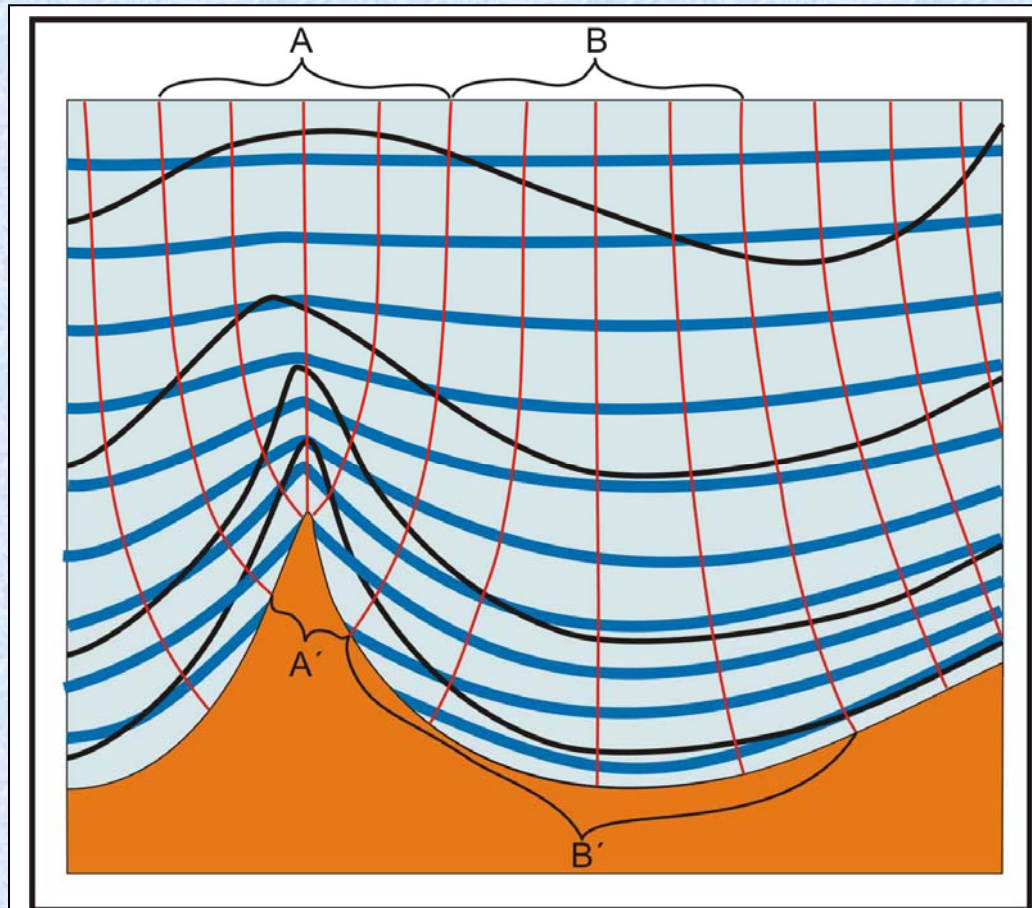
Για να περιγραφεί η πορεία των κυμάτων που διαθλούνται σε χάρτη, χαράσσονται καμπύλες που κάθε φορά είναι κάθετες στο μέτωπο του κύματος. Οι καμπύλες αυτές ονομάζονται **ορθόγωνες**. Η χάραξη τους ξεκινά από τα βαθιά νερά όπου δεν υφίσταται διάθλαση και γίνεται σε κανονικά διαστήματα. Εκεί όπου τα κύματα δεν επηρεάζονται από τον πυθμένα οι ορθόγωνες καμπύλες είναι ευθείες παράλληλες μεταξύ τους σε σταθερές αποστάσεις. Μόλις κάποιο σημείο στο μέτωπο του κύματος φθάσει σε βάθος όπου αρχίζει η επίδραση του πυθμένα [ $D > (L/2)$ ], τότε το σημείο εκείνο επιβραδύνεται σε σχέση με το υπόλοιπο μέτωπο του κύματος. Έτσι αρχίζει η διάθλαση η οποία καταγράφεται σαν παραμόρφωση των ορθόγωνων καμπύλων.

Οι ορθόγωνες συγκλίνουν ή αποκλίνουν όταν τελικά το μέτωπο του κύματος φθάσει στην ακτή. Η σύγκλιση συμβαίνει στα ακρωτήρια και συνεπάγεται αύξηση της προσπίπουσας κυματικής ενέργειας ενώ η απόκλιση συμβαίνει σε κόλπους ή σε υποθαλάσσιες κοιλάδες και έχει σαν αποτέλεσμα την εξασθένηση της κυματικής ενέργειας.



Σχήμα 7.8. Διάθλαση των κυμάτων (κάτω) με την επίδραση της τοπογραφίας του πυθμένα (πάνω).

Στο σχήμα 7.9 βλέπουμε την παραμόρφωση των κυμάτων λόγω διάθλασης και τις ορθόγωνες καμπύλες. Παρατηρούμε ότι στους κόλπους έχουμε μείωση της κυματικής δράσης με αποτέλεσμα απόθεση υλικών και ανάπτυξη παραλίας, ενώ στα ακρωτήρια έχουμε διάβρωση γιατί γίνεται συγκέντρωση της κυματικής ενέργειας .



Σχήμα 7.9. Παραμόρφωση των κυμάτων λόγω διάθλασης και ορθόγωνες καμπύλες. Στο ακρωτήριο A' έχουμε διάβρωση λόγω της συγκέντρωσης κυματικής ενέργειας ανά μονάδα μήκους παραλίας. Στον κόλπο B' έχουμε απόθεση υλικών λόγω της μείωσης της κυματικής ενέργειας ανά μονάδα μήκους παραλίας.