

**ΔΗΜΟΚΡΙΤΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΡΑΚΗΣ**  
**ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ**  
**ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**  
**ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ**  
**«ΥΔΡΑΥΛΙΚΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ»**

**ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟ ΜΑΘΗΜΑ: «ΗΠΣΕΣ ΜΟΡΦΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ»**  
**ΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΗ ΘΑΛΑΣΣΙΑΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ**  
**ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΡΕΥΜΑΤΟΣ**

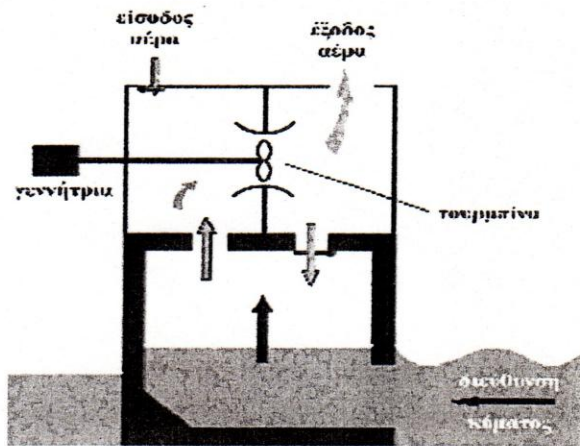
**ΞΑΝΘΗ 2019**

# ΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΗ ΤΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΤΗΣ ΘΑΛΑΣΣΑΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΡΕΥΜΑΤΟΣ

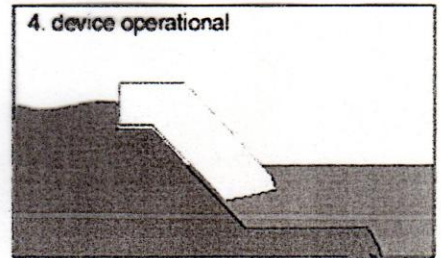
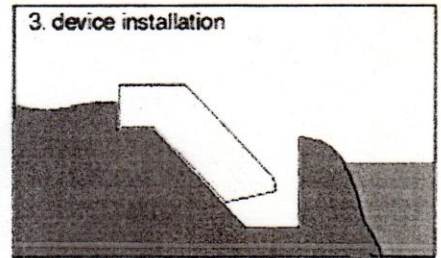
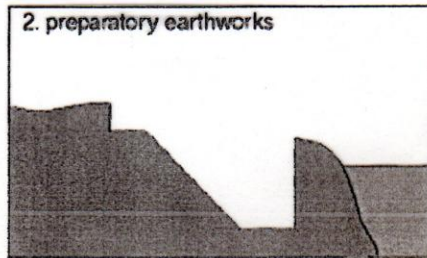
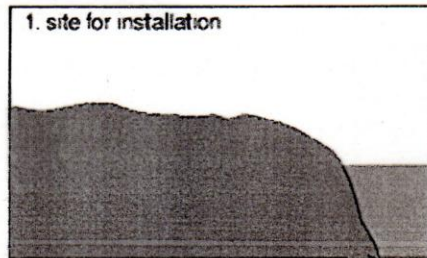
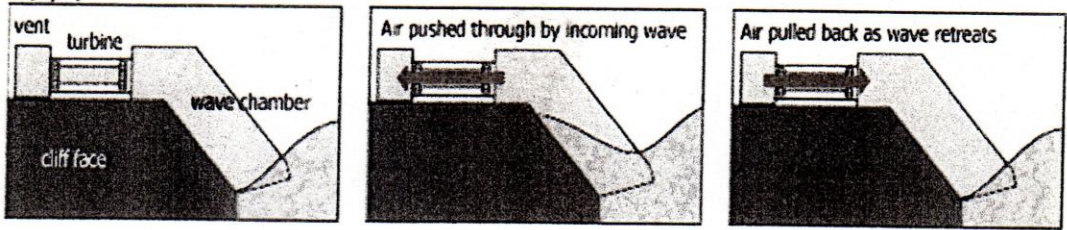
## Εισαγωγή

- Τρεις τρόποι εκμετάλλευσης της ενέργειας της θάλασσας:
  - (α) από τα κύματα
  - (β) από τις παλίρροιες
  - (γ) από τις θερμοκρασιακές διαφορές του νερού

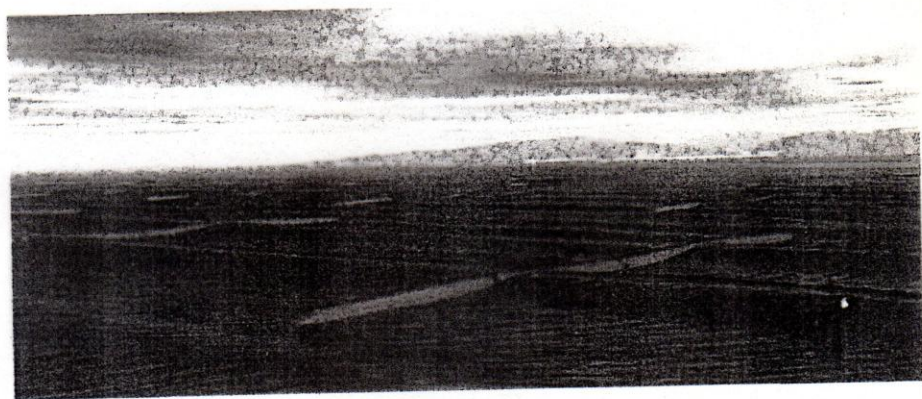
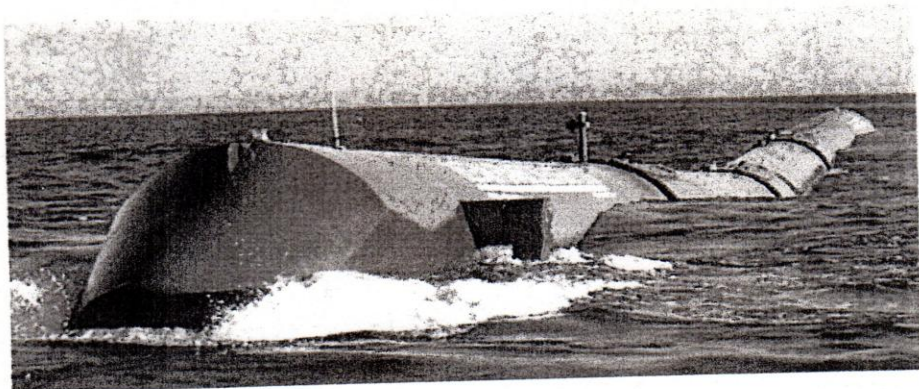
Σχηματική διάταξη παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος  
από τον κυματισμό της θάλασσας



# Παραγωγή ενέργειας από κύματα - βασισμένη σε παράκτιες εγκαταστάσεις

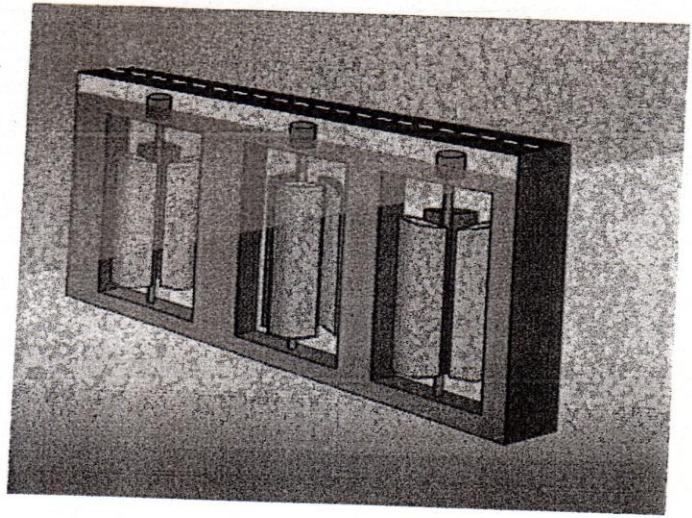


Παραγωγή ενέργειας από κύματα - βασισμένη σε θαλάσσιες  
διατάξεις

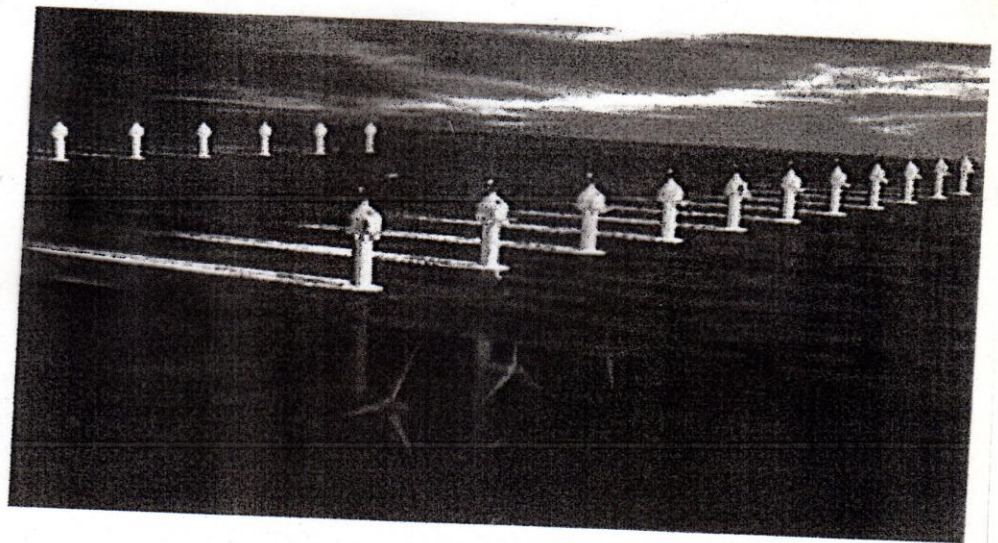


Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από την παλίρροια

Παλιρροϊκοί  
φράκτες



Παλιρροϊκοί  
ετρόβιλοι



## Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα από την παραγωγή ενέργειας μέσω των θαλασσίων κυμάτων

### Πλεονεκτήματα

- Η ενέργεια είναι δωρεάν, καθώς δεν χρησιμοποιείται κανένα είδος καύσιμης ύλης.
- Δεν είναι ακριβή η λειτουργία και η συντήρηση των μονάδων παραγωγής ενέργειας μέσω των θαλασσίων κυμάτων.
- Οι μονάδες παραγωγής ενέργειας είναι φιλικές προς το περιβάλλον, καθώς κατά τη λειτουργία τους δεν παράγονται απόβλητα.
- Δίνεται η δυνατότητα παραγωγής ενός μεγάλου ποσού ενέργειας.
- Αποθέματα της πρώτης ύλης (νερό) υπάρχουν σε αφθονία σε παγκόσμια κλίμακα, μιας και υδάτινο είναι το 75% της επιφάνειας του πλανήτη μας.
- Μικρό χρονικό διάστημα ανάμεσα στην έρευνα, την εγκατάσταση και τη λειτουργία μιας τέτοιας μονάδας.
- Οι μονάδες παραγωγής ενέργειας προστατεύουν την ακτή, στην οποία βρίσκονται, πράγμα πολύ χρήσιμο σε λιμάνια.
- Δεν δημιουργούν προβλήματα στις μετακινήσεις των ψαριών (εκτός από τα παλιρροϊκά φράγματα).
- Η κατασκευή τέτοιων εγκαταστάσεων έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία προστατευμένων υδάτινων περιοχών, οι οποίες είναι ελκυστικές για διάφορα είδη ψαριών και υδρόβιων πουλιών.

## ΜΕΛΟΝΕΚΤΗΡΑΤΑ

- Η παραγωγή ενέργειας εξαρτάται από τη δύναμη των κυμάτων, με αποτέλεσμα, άλλες φορές να παίρνουμε μεγάλα ποσά ενέργειας και άλλες φορές μηδενικά. Αντίστοιχα στην παλίρροια εξαρτάται από την κίνηση των υδάτων.
- Απαιτείται προεκτική επιλογή της τοποθεσίας εγκατάστασης της μονάδας, καθώς θα πρέπει να έχουμε δυνατά κύματα ή να εμφανίζονται τα φαινόμενα της πλημμυρίδας και της άμπωτης (παλίρροια).
- Πολλές από τις εγκαταστάσεις είναι θορυβώδεις.
- Οι εγκαταστάσεις πρέπει να κατασκευάζονται με ειδικό τρόπο, ώστε να αντέχουν στις δύσκολες καιρικές συνθήκες που θα αντιμετωπίσουν.
- Το κόστος μεταφοράς της παραχόμενης ενέργειας στη στεριά είναι πολύ υψηλό.



## Κίνηση κυμάτων

- Οι περισσότερες διατάξεις ενέργειας κυμάτων σχεδιάζονται έτσι ώστε να εξαγάγουν ενέργεια από κύματα βαθέν υδάτων.
- Στα κύματα βαθέν υδάτων, το μέσο βάθος  $D$  της θάλασσας ως προς τον πυθμένα είναι μεγαλύτερο από το μισό του μήκους κύματος  $\lambda$ , δηλ.  $D > 0.5\lambda$ .

## Βασικές σχέσεις κυμάτων

$$\lambda = \frac{2\pi g}{\omega^2}$$

$\lambda$ : μήκος κύματος

$\omega$ : γωνιακή ταχύτητα σωματιδίων νερού

$g$ : επιτάχυνση βαρύτητας

$$T = \frac{2\pi}{\omega}$$

$T$ : περίοδος κίνησης

$$T = \left(\frac{2\pi\lambda}{g}\right)^{1/2}$$

$$u = a\omega$$

$u$ : ταχύτητα ενός σωματιδίου στην κορυφή ενός κύματος

$a$ : πλάτος κύματος

$$c = \frac{\omega\lambda}{2\pi} = \frac{g}{\omega}$$

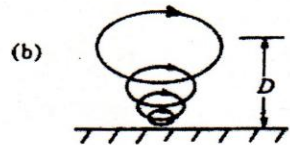
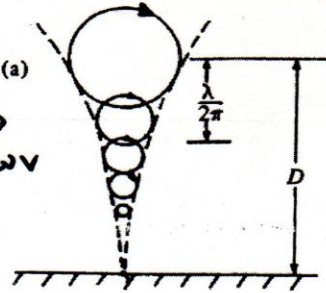
$c$ : ταχύτητα επιφανειακού κύματος κατά τη διεύθυνση  $x$ , ταχύτητα φάσης

$$k = \frac{2\pi}{\lambda}$$

$k$ : αριθμός κύματος

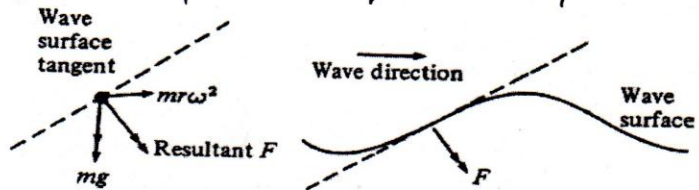
# Κίνηση υγρών σωματιδίων σε κύματα

- Βαθύ νερό
- Κυκλική κίνηση υγρών σωματιδίων

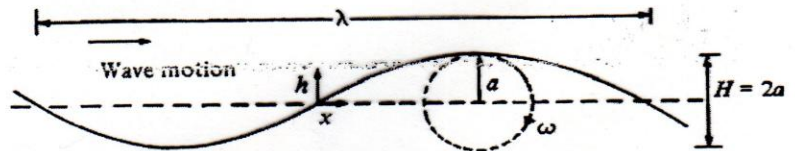


- Αβαθές νερό
- Ελλειπτική κίνηση υγρών σωματιδίων

Επιφάνεια νερού κάθετη προς τη συνισταμένη της δύναμης βαρύτητας και της φυγόκεντρης δύναμης (που δρα σ' ένα στοιχείο νερού μάζας m)



## Χαρακτηριστικά κύματος



## Ενέργεια και Ισχύς κυμάτων

- Στοιχειώδης όγκος νερού ανά μονάδα πλάτους μετώπου κύματος:

$$dV = dx dz$$

- Στοιχειώδης μάζα:  $dm = \rho dV = \rho dx dz$        $\rho$ : πυκνότητα νερού
- $E_k$ : κινητική ενέργεια της ολικής κίνησης κύματος προς τον πυθμένα της θάλασσας, ανά μονάδα μήκους κατά τη διεύθυνση  $x$ , ανά μονάδα πλάτους του μετώπου κύματος
- $E_k dx$ : ολική κινητική ενέργεια για το μήκος  $dx$
- $\delta E_k dx$ : στοιχειώδης κινητική ενέργεια ενός στοιχείου νερού ύψους  $dz$ , μήκους  $dx$  και μοναδιαίου πλάτους, το οποίο εκτελεί κυκλική κίνηση με σταθερή γωνιακή ταχύτητα  $\omega$ , ακτίνα κυκλικής τροχιάς  $r$  και ταχύτητα  $u = r\omega$

$$\delta E_k dx = \frac{1}{2} m u^2 = \frac{1}{2} (\rho dz dx) r^2 \omega^2$$

$$\delta E_k = \frac{1}{2} \rho r^2 \omega^2 dz$$

$$r = a e^{kz}$$

$a$ : πλάτος κύματος

$z$ : αρνητικό, κάτω από την επιφάνεια του νερού  
(Σχήμα 12.6α)

$$\delta E_k = \frac{1}{2} \rho (a^2 e^{2kz}) \omega^2 dz$$

- Ολική κινητική ενέργεια στη στήλη νερού (Σχήμα 12.6β):

$$E_k dx = \int_{z=-\infty}^0 \frac{\rho \omega^2 a^2}{2} e^{2kz} dz dx = \frac{1}{4} \rho \frac{\omega^2 a^2}{k} dx$$

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad \lambda = \frac{2\pi g}{\omega^2} \Rightarrow \omega^2 = \frac{2\pi g}{\lambda} \Rightarrow$$

$$E_k = \frac{1}{4} \rho a^2 \frac{2\pi g}{\lambda} \frac{\lambda}{2\pi} = \frac{1}{4} \rho a^2 g$$

- Δυναμική ενέργεια ανά μονάδα πλάτους (του μετώπου κύματος) και ανά μονάδα μήκους:

$$E_p = \frac{1}{4} \rho a^2 g$$

- Ολική ενέργεια ανά μονάδα μήκους και πλάτους του μετώπου κύματος, δηλ. ολική ενέργεια ανά μονάδα επιφάνειας (E):

$$E = E_x + E_p = \frac{1}{2} \rho a^2 g$$

- Για αρμονικές κινήσεις, η μέση κινητική ενέργεια ισούται προς τη μέση δυναμική ενέργεια.

- Ρίζα μέσου τετραγωνικού πλάτους (root mean square amplitude):

$$\sqrt{\frac{a^2}{2}} \Rightarrow E = \rho g (\text{ρίζα μέσου τετραγωνικού πλάτους})^2$$

- $E_\lambda$ : ολική ενέργεια ανά μονάδα πλάτους του μετώπου κύματος

$$E_\lambda = E \lambda = \frac{1}{2} \rho a^2 g \lambda$$

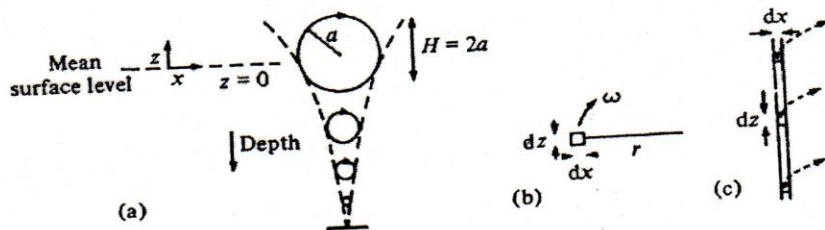
$$\lambda = \frac{2\pi g}{\omega^2} \Rightarrow E_\lambda = \frac{\pi \rho a^2 g^2}{\omega^2}$$

$$T = \frac{2\pi}{\omega} \Rightarrow E_\lambda = \frac{1}{4\pi} \rho a^2 g^2 T^2$$

- Οι ενέργειες που υπολογίστηκαν ανωτέρω, ισχύουν για νερό που παραμένει στην ίδια θέση κατά μέσο όρο ως προς τον χρόνο.
- Οι ως άνω εξισώσεις δεν αναφέρονται στη μεταφορά ενέργειας (ισχύος) σε κατακόρυφες διατομές του νερού.

# Στοιχειώδης κίνηση νερού (Σχήμα 12.6)

- (a) Εκθετική μείωση πλάτους κύματος με το βάθος
- (b) Στοιχειώδης όγκος νερού, για μοναδιαίο πλάτος μετώπου κύματος, ύψους  $dz$  και μήκους  $dx$  στη θέση  $(x, z)$
- (c) Στήλη νερού



## Παραγωγή ισχύος από τα κύματα

$\tau = ae^{kz}$   $\tau$ : ακτίνα κίνησης σωματιδίου κάτω από την επιφάνεια, για ένα επιφανειακό κύμα πλάτους  $a$  και αριθμού  $k$

- Η κατακόρυφη μετατόπιση από τη μέση θέση είναι (Σχήμα 12.7b):

$$\Delta z = \tau \sin \omega t = ae^{kz} \sin \omega t$$

- Η οριζόντια συνιστώσα της ταχύτητας,  $u_x$ , δίδεται από τη σχέση:

$$u_x = \tau \omega \sin \omega t = \omega ae^{kz} \sin \omega t$$

- Ισχύς κύματος στη θέση  $x$  ανά μονάδα πλάτους του μετώπου κύματος σε τυχούσα στιλμνή:

$$P' = \int_{z=-\infty}^{z=0} (\rho_1 - \rho_2) u_x dz$$

$\rho_1, \rho_2$ : τοπικές πιέσεις στο στοιχείο ύψους  $dz$  και μοναδιαίου πλάτους μετώπου κύματος

$\rho_1 - \rho_2$ : διαφορά πίεσης στο στοιχείο πλάτους  $\Delta y = 1 \text{ m}$  στην οριζόντια διεύθυνση

- Νόμος διατήρησης της ενέργειας:

$$\rho_1 - \rho_2 = \rho g \Delta z \Rightarrow \rho_1 - \rho_2 = \rho g a e^{kz} \sin \omega t$$

$$P' = \int_{z=-\infty}^{z=0} (\rho g a e^{kz} \sin \omega t) (\omega a e^{kz} \sin \omega t) dz = \rho g a^2 \omega \int_{z=-\infty}^{z=0} e^{2kz} \sin^2 \omega t dz$$

- Ο μέγος όρος ως προς τον χρόνο του  $\sin^2 \omega t$  για πολλές περιόδους ισούται προς  $1/2$ .

$$P' = \frac{\rho g a^2 \omega}{2} \int_{z=-\infty}^{z=0} e^{2kz} dz = \frac{\rho g a^2 \omega}{2} \frac{1}{2k}$$

Ταχύτητα φάσης του κύματος:  $c = \frac{\omega}{k} = \frac{\lambda}{T}$

$$P' = \frac{\rho g a^2}{2} \frac{c}{2} = \frac{\rho g a^2 \lambda}{4T}$$

$P'$ : ισχύς μεταφερόμενη προς τα εμπρός, στο κύμα, ανά μονάδα πλάτους μετώπου κύματος

$$P' = E \frac{c}{2} = E u$$

$\frac{c}{2}$ : ομαδική ταχύτητα κύματος βαθένων υδάτων, ταχύτητα για την οποία η ενέργεια της ομάδας κυμάτων μεταφέρεται προς τα εμπρός.

$$k = \frac{\omega^2}{g} \Rightarrow c = \frac{\omega}{k} = \frac{g}{\omega} = \frac{g}{2\pi/T} \Rightarrow$$

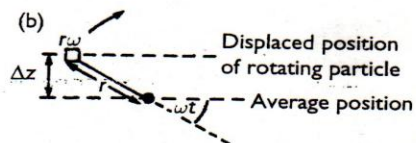
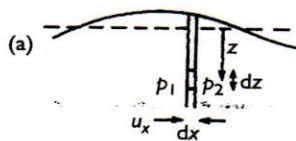
$$P' = \frac{\rho g a^2}{2} \frac{1}{2} \left( \frac{gT}{2\pi} \right) = \frac{\rho g^2 a^2 T}{8\pi}$$

$$P' = \frac{\rho g^2 a^2}{8\pi} \left( \frac{2\pi\lambda}{g} \right)^{1/2}$$

Τοπικές διακυρήξεις πίεσης σ' ένα κύμα (Σχήμα 12.7)

(a) Πιέσεις στο κύμα

(b) Τοπική μετατόπιση υγρού σωματιδίου





### Αριθμητικό παράδειγμα 1

Ποια είναι η περίοδος και η ταχύτητα φάσης ενός κύματος βαθέων υδάτων, με μήκος κύματος ίσο προς 100 m;

#### Λύση

$$\omega^2 = \frac{2\pi g}{\lambda} = \frac{2\pi \times 9.81}{100} \quad g: [m/s^2] \quad \lambda: [m]$$

$$\omega = 0.625^{-1}$$

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = 10.13 \text{ s}$$

$$c = \frac{\omega \lambda}{2\pi} = \frac{g}{\omega} = g \left( \frac{\lambda}{2\pi g} \right)^{1/2} = \left( \frac{\lambda g}{2\pi} \right)^{1/2}$$

$$c = \left( \frac{100 \times 9.81}{2\pi} \right)^{1/2} = 12.5 \text{ m/s}$$

### Αριθμητικό παράδειγμα 2

Ποια είναι η ισχύς ενός κύματος βαθέων υδάτων, με μήκος κύματος 100 m και πλάτος 1.5 m;

#### Λύση

$$\lambda = 100 \text{ m} \quad a = 1.5 \text{ m}$$

Από το αριθμητικό παράδειγμα 1,  $c = 12.5 \text{ m/s}$

$$u = \frac{c}{2} = 6.25 \text{ m/s}$$

$u$ : ομαδική ταχύτητα ενέργειας

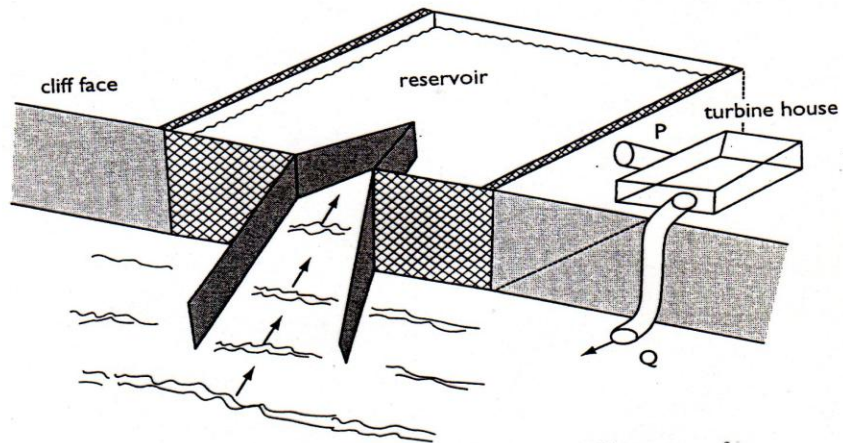
$c$ : ταχύτητα φάσης

$$P' = \frac{\rho g a^2}{2} \frac{c}{2} = \frac{1}{2} 1025 \times 9.81 \times 1.5^2 \times 6.25 = 70.7 \text{ kW/m}$$

$$\rho = 1025 \text{ kg/m}^3$$

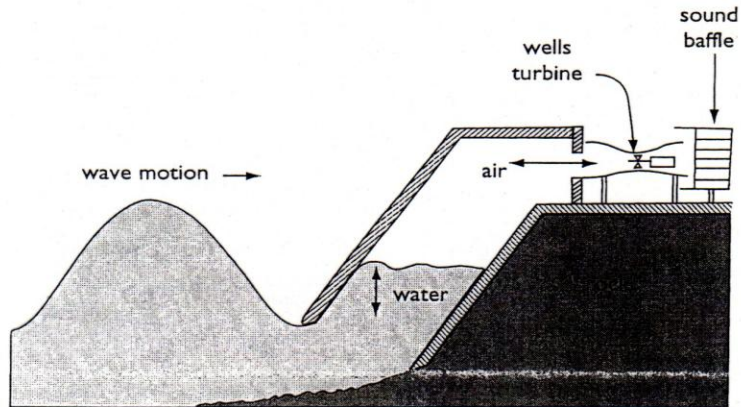
Διατάξεις για την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος μέσω της  
ενέργειας των κυμάτων

Σχηματικό διάγραμμα για το σύστημα παγίδευσης κυμάτων  
"Tarshaw" (Νορβηγία)

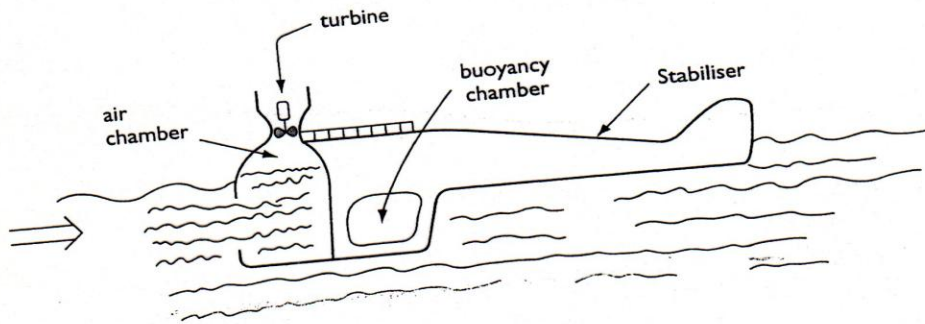


Σχηματικό διάγραμμα ενός ευετήματος ισχύος κυμάτων  
στην ακτή, με χρήση μιας στήλης ταλαντευόμενου νερού  
(Oscillating Water Column, OWC), (εσκευή Limpet)

- Νησί Islay, δυτικά της Σκωτίας

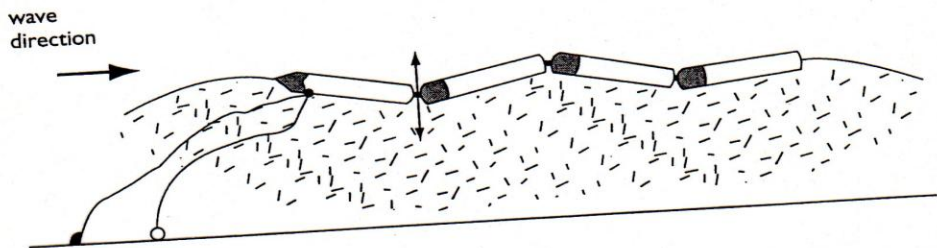


ΣΥΣΚΕΥΉ W\_hale: ΕΠΙΠΛΕΟΝ ΣΥΣΤΗΜΑ ΚΥΜΑΤΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ  
(κόλπος Γοκασχο, Ιαπωνία, 1998)



# Σχηματικό διάγραμμα συσκευής κυματικής ισχύος Pelamis

- Η κίνηση στους εύκαμπτους συνδέσμους παρόχει υδραυλική ισχύ που τροφοδοτεί πλεκτρογεννήτριες



## Παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος μέσω της παλίρροιας

### Εισαγωγή

- Η στάθμη του νερού στους μεγάλους ωκεανούς της Γης ανυψώνεται και πέφτει σύμφωνα με προβλέψιμα πρότυπα.
- Οι κύριες περιόδους,  $\tau$ , αυτών των παλίρροιών είναι ημερήσιες, δηλ.  $24\text{h}$ , και ημι-ημερήσιες, δηλ.  $12\text{h}$  και  $25\text{min}$ .
- Η μεταβολή του ύψους μεταξύ διαδοχικών υψηλών και χαμηλών παλίρροιών είναι το εύρος (διακύμανση)  $R$ .
- Το  $R$  μεταβάλλεται μεταξύ  $0.5\text{m}$  εν γένει και περίπου  $10\text{m}$  σε ειδικές θέσεις κοντά σε ηπειρωτικές μάζες γης.
- Η κίνηση του νερού δημιουργεί παλίρροϊκά ρεύματα, τα οποία επιτυγχάνουν ταχύτητες περίπου  $5\text{m/s}$  σε παράκτια και νησιωτικά κανάλια.
- Το νερό της θάλασσας μπορεί να παγιδευθεί, κατά την υψηλή παλίρροια, σε μια λεκάνη έκτασης  $A$ , στις εκβολές ποταμών, πίσω από ένα φράγμα για να παράγει παλίρροϊκή ισχύ λόγω εύρους (tidal power).
- Εάν το νερό πυκνότητας  $\rho$  ρέει μέσω υδροτροβίλων κατά τη χαμηλή παλίρροια, τότε η μέση παραχόμενη ισχύς είναι

$$\bar{P} = \rho A R^2 g / (2\tau)$$

Π.χ., εάν  $A = 10\text{km}^2$ ,  $R = 4\text{m}$ ,  $\tau = 12\text{h } 25\text{min}$ , τότε  $\bar{P} = 18\text{MW}$   
 $\rho = 1025\text{kg/m}^3$

- Προφανώς, θέσεις μεγάλου εύρους  $R$  παρέχουν το μέγιστο δυναμικό για παλίρροϊκή ισχύ (tidal power).

- Η ισχύς παλιρροϊκών ρευμάτων (tidal current power ή tidal stream power) μπορεί να αξιολογηθεί μ' έναν τρόπο παρόμοιο προς την ισχύ ανέμου (wind power).
- Πρακτικά, ένα παλιρροϊκό ρεύμα μπορεί να συμβφέρει στην παραγωγή ισχύος μόνο όταν η ταχύτητά του αυξάνει από την κίνηση του νερού σε περιοχές μεταξύ νησιών και ηπειρωτικής χώρας ή μεταξύ σχετικά μεγάλων νησιών.

### Κύρια μελενεκτήματα παλιρροϊκής ισχύος (tidal power):

1. Ασυμφωνία των κύριων περιόδων της βελήνης, 12h 25 min και 24 h 50 min, με την ανθρωπίνη (ηλιακή) περίοδο 24 h, έτσι ώστε η βέλτιστη παραγωγή παλιρροϊκής ισχύος δεν βρίσκεται στην ίδια φάση με τη ζήτηση.
2. Το μεταβαλλόμενο παλιρροϊκό εύρος και η μεταβαλλόμενη παροχή σε μια περίοδο δύο εβδομάδων, τα οποία παράχουν μεταβαλλόμενη ισχύ.
3. Η απαίτηση για παροχή μεγάλου όγκου νερού με χαμηλή ενέργεια, πράγμα που απαιτεί πολλούς ειδικά κατασκευασμένους υδροτροβίλους σε παράλληλη διάταξη.
4. Το πολύ μεγάλο κόστος κεφαλαίου των πλείστων δυνατικών εγκαταστάσεων.
5. Οι θέσεις με μεγάλο εύρος (range) μπορεί να είναι απομακρυσμένες από τη ζήτηση ισχύος.
6. Δυναμική οικολογική ζημιά και αναστάτωση σε εκτεταμένες εκβολές ποταμών ή θαλάσσιες περιοχές.

## Ισχύς παλιρροϊκού ρεύματος (tidal current/stream power)

- Κοντά στην ακτογραμμή και μεταξύ νησιών, οι παλίρροιες μπορούν να παράχουν ισχυρά ρεύματα νερού, τα οποία πάλι μπορούν να παράχουν ισχύ. Η ολική ισχύς που παράχεται, μπορεί να μην είναι μεγάλη, η παραγωγή, όμως, σε ανταγωνιστικές τιμές προς εξαγωγή ε' ένα δίκτυο ή προς τοπική κατανάλωση είναι εφικτή.

### Πλεονεκτήματα της ισχύος παλιρροϊκού ρεύματος

- (α) Προβλέψιμες ταχύτητες νερού κι επομένως προβλέψιμη παραγωγή ισχύος  
(β) Η πυκνότητα νερού είναι 1000 φορές μεγαλύτερη της πυκνότητας του αέρα κι επομένως χρειάζονται υδροστρόβιλοι μικρότερης κλίμακας.

### Κύρια μειονεκτήματα της ισχύος παλιρροϊκού ρεύματος

- (α) Μικρή ταχύτητα νερού  
(β) Δυσμενές θαλάσσιο περιβάλλον

### Πυκνότητα ισχύος ρεύματος: $q = \rho v^3 / 2$

π.χ. για παλιρροϊκό ρεύμα με ταχύτητα 3 m/s,

$$q = \frac{1025 \times 3^3}{2} = 13.8 \text{ kW/m}^2 \quad (\rho = 1025 \text{ kg/m}^3)$$

Ένα ποσοστό "η" της ισχύος του ρεύματος νερού μπορεί να καταστεί ωφέλιμο. Στην πράξη, η μέγιστη τιμή του "η" είναι 40%.



$$u = u_0 \sin(2\pi t / \tau)$$

$u$ : ταχύτητα παλινδρομικού ρεύματος

$u_0$ : μέγιστη ταχύτητα ρεύματος

$\tau$ : περίοδος φυσικής παλινδρομίας, 12 h 25 min για ημi-ημερήσια παλινδρομια

Παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος ανά μονάδα διατομής:

$$q = \rho u^3 / 2 \quad \tilde{q} = \frac{0.4}{2} \rho u_0^3 \frac{\int_{t=0}^{t=\tau/4} \sin^3(2\pi t / \tau) dt}{\int_{t=0}^{t=\tau/4} dt} = 0.2 \rho u_0^3 (\tau/3\pi) (4/\tau) = 0.1 \rho u_0^3$$

$$\int \sin^3(ax) dx = -\frac{1}{a} \cos(ax) + \frac{1}{3a} \cos^3(ax)$$

$$a = \frac{2\pi}{\tau}$$

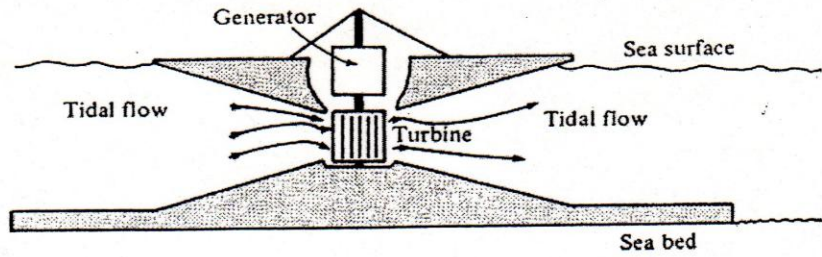
$$\tilde{q} \approx 0.1 \rho u_0^3$$

Για  $u_0 = 3 \text{ m/s} \Rightarrow \tilde{q} \approx 2.8 \text{ kW/m}^2$

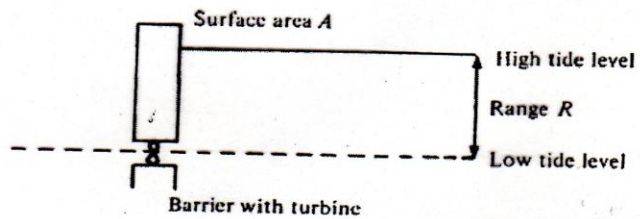
Για  $u_0 = 5 \text{ m/s} \Rightarrow \tilde{q} \approx 12.8 \text{ kW/m}^2$

$(\rho = 1025 \text{ kg/m}^3)$

## Διάταξη ισχύος παλιρροϊκού ρεύματος



## Παραγωγή ισχύος από παλίρροιες



## Ισχύς παλιρροϊκού εύρους (tidal range power)

- Νερό παγιδεύεται σε μια λεκάνη κατά την υψηλή παλίρροια (πλημμυρίδα) και εκρέει μέσω ενός υδροτροβίλου κατά τη χαμηλή παλίρροια (άμπωτη).
- Το παγιδευμένο νερό, μάζας  $\rho AR$ , με κέντρο βάρους σε απόσταση  $R/2$  πάνω από τη στάθμη χαμηλής παλίρροιας, γίνεται δεκτό ότι όλο εκρέει κατά τη χαμηλή παλίρροια.

Δυναμική μέγιστη διαθέσιμη ενέργεια ανά παλίρροια (εάν όλο το νερό πέφτει κατά  $R/2$ )

- Ενέργεια ανά παλίρροια =  $(\rho AR)g \frac{R}{2}$  (συνήθως  $\rho = 1025 \text{ kg/m}^3$ )
- Μέση δυναμική ισχύς για μια παλιρροϊκή περίοδο  $\tau$ :

$$\bar{P} = \frac{\rho AR^2 g}{2\tau}$$

- Το εύρος μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια ενός μήνα από μια μέγιστη τιμή  $R_s$  για τις ανοιξιάτικες παλίρροιας (πλημμυρίδες) έως μια ελάχιστη τιμή  $R_n$  για την άμπωτη.
- Αυτή η μεταβολή είναι ημιτονοειδής, σύμφωνα με το σχήμα 13.8, με μια περίοδο ίση προς το μισό του βεληνιακού μήνα.
- Σε χρόνο  $t$  μετά μια μέση υψηλή παλίρροια (πλημμυρίδα), κατά τον βεληνιακό μήνα περιόδου  $T$  (29.53 ημέρες), το εύρος δίδεται από τη σχέση:

$$\frac{R}{2} = \left(\frac{R_s + R_n}{4}\right) + \left(\frac{R_s - R_n}{4}\right) \sin(4\pi t/T)$$

$$\text{Εάν } R_n = aR_s, \text{ τότε } R = \frac{R_s}{2} [(1+a) + (1-a)\sin(4\pi t/T)]$$

- Η ισχύς λαμβάνεται από το μέσο τετραγωνικό εύρος:

$$\bar{R}^2 = \frac{R_s^2}{4} \frac{\int_{t=0}^T [(1+a) + (1-a)\sin(4\pi t/T)]^2 dt}{\int_{t=0}^T dt}$$

$$\bar{R}^2 = \frac{R_s^2}{8} (3+2a+3a^2)$$

- Μέση μηνιαία ισχύς:  $\bar{P}_{month} = \frac{\rho A g}{2\tau} \frac{R_s^2}{8} (3+2a+3a^2)$  (1)

όπου  $R_\eta = aR_s$  και  $\tau$  παλιρροϊκή περίοδος

- Επειδή  $a \approx 0.5$ , η προηγούμενη σχέση διαφέρει λίγο από τις προερχόμενες που χρησιμοποιούνται συχνά στη βιβλιογραφία, δηλ.

(2)  $\bar{P} \approx \frac{\rho A g}{2\tau} (\bar{R})^2$  όπου  $\bar{R}$  είναι το μέσο εύρος όλων των παλιρροϊών

(3)  $\bar{P} \approx \frac{\rho A g}{2\tau} \frac{(R_{max}^2 + R_{min}^2)}{2}$  όπου  $R_{max}$  το μέγιστο εύρος και  $R_{min}$  το ελάχιστο εύρος

Αριθμητικό παράδειγμα 3: Τυπικές τιμές μέσης παλιρροϊκής ισχύος

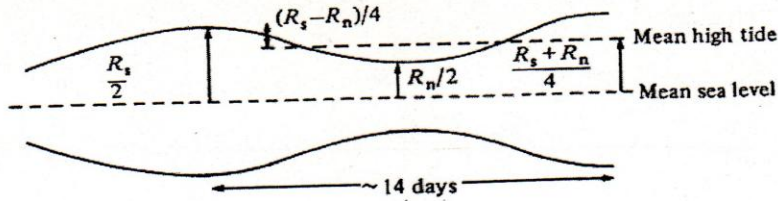
Έστω  $R_s = 5 \text{ m}$ ,  $R_\eta = 2.5 \text{ m}$ ,  $a = 0.5$ ,  $\bar{R} = 3.7 \text{ m}$ ,  $R_{max} = 5 \text{ m}$ ,

$R_{min} = 2.5 \text{ m}$ ,  $A = 10 \text{ km}^2$ ,  $\rho = 1030 \text{ kg/m}^3$  και  $\tau = 12 \text{ h } 25 \text{ min} = 4.47 \times 10^4 \text{ s}$

- Η Εξίσωση (1) δίδει  $\bar{P} = 16.8 \text{ MW}$
- Η Εξίσωση (2) δίδει  $\bar{P} = 15.5 \text{ MW}$
- Η Εξίσωση (3) δίδει  $\bar{P} = 17.7 \text{ MW}$

# Ημιτονοειδής μεταβολή του παλιρροϊκού εύρους

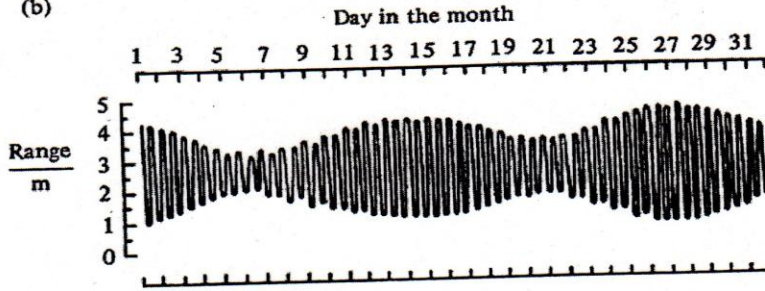
(a)



(Σχήμα 13.8)

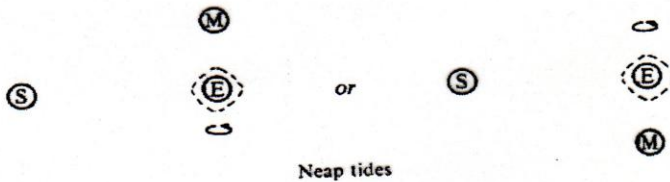
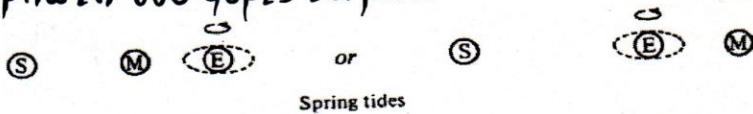
## Μεταβολή παλιρροϊκού εύρους ε' ένα μήνα για μια κανονική ημι-ημερήσια παλίρροια

(b)



- μεγάλο εύρος σε ανοιξιάτικες παλίρροιας
- μικρό εύρος στην άμνηστη

Θέσεις του ήλιου, σελήνης και γης, που παράγουν ανοιξιάτικες παλίρροιας και (c) σμνηστη δύο φορές τον μήνα



- S: ήλιος (sun)
- M: σελήνη (moon)
- E: γη (earth)