



ΑΝΩΤΑΤΗ ΣΧΟΛΗ ΠΑΙΔΑΓΩΓΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΗΣ ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗΣ

Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας

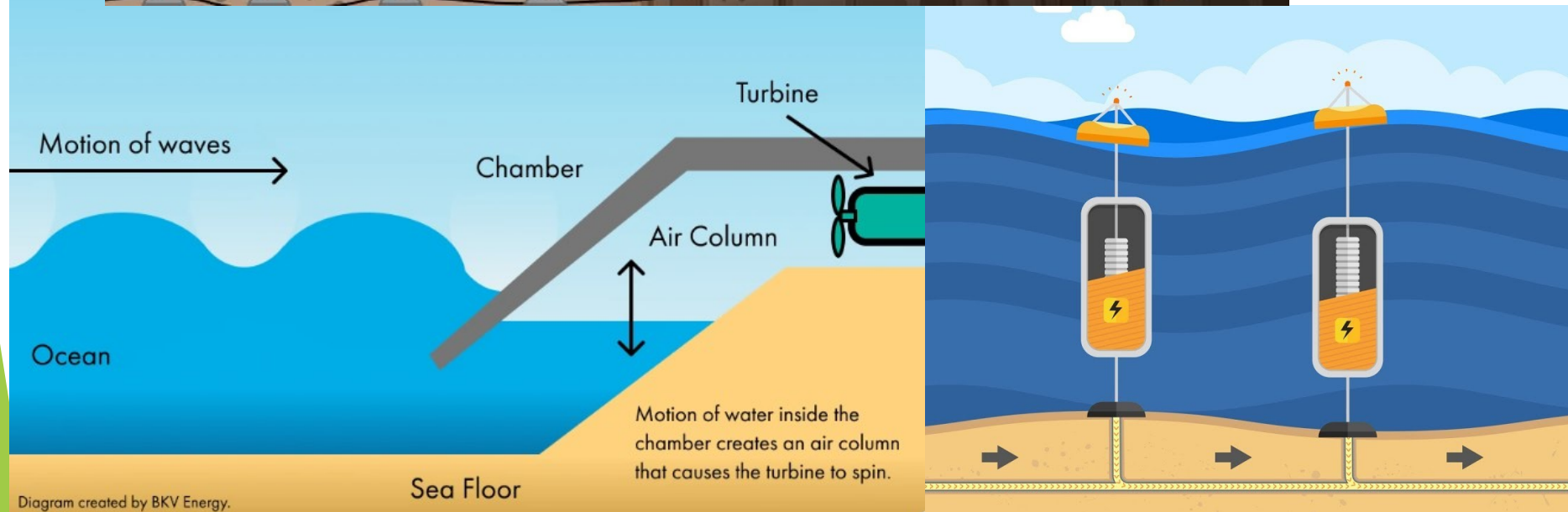
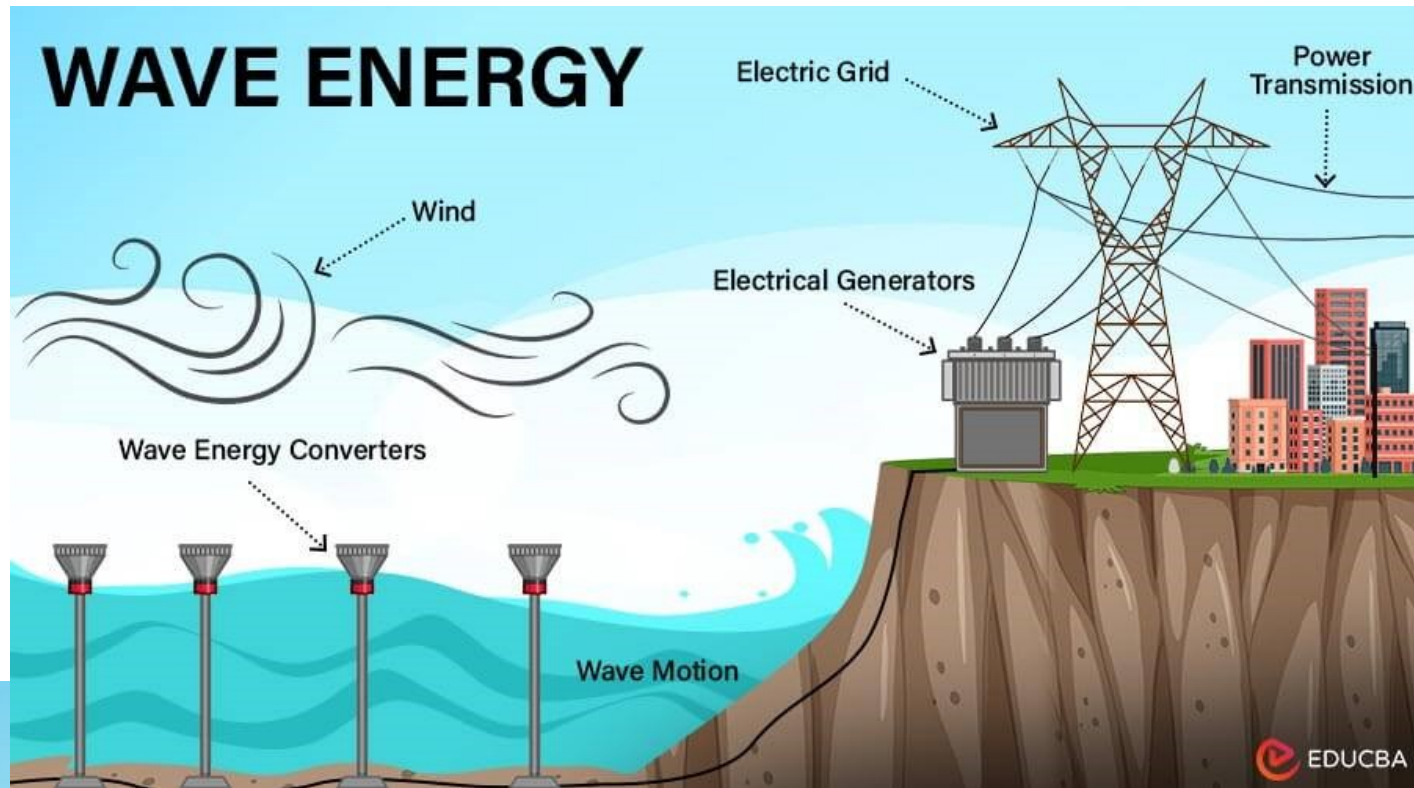
Ενότητα 8: Κυματική - Παλιρροϊκή - Ωκεάνια Ενέργεια

Δρ. Γεώργιος Μητσόπουλος

Εισαγωγή

- ▶ Η ωκεάνια ενέργεια αποτελεί έναν από τους μεγαλύτερους ανεξερεύνητους πόρους ΑΠΕ.
- ▶ Η κυματική ενέργεια έχει **υψηλή ενεργειακή πυκνότητα**, έως και 20-70 kW/m κύματος.
- ▶ Οι τεχνολογίες κυματικής βρίσκονται σε στάδιο pre-commercial.
- ▶ Παρουσίαση:
 - ▶ Κυματική Ενέργεια (κύριο μέρος)
 - ▶ Παλιρροϊκή
 - ▶ Θερμική Ωκεάνια Ενέργεια (OTEC)

WAVE ENERGY

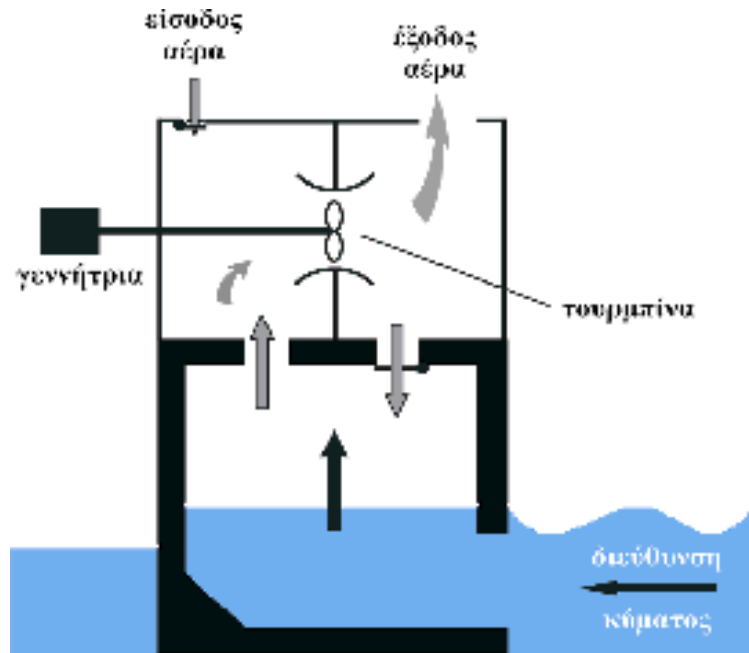


Φυσική των κυμάτων



- ▶ Τα κύματα δημιουργούνται λόγω ανέμου → μεταφοράς ορμής → επιφανειακών ταλαντώσεων.
- ▶ Η διάδοση βασίζεται στη βαρυτική επαναφορά και στο φαινόμενο capillary-gravity waves.
- ▶ Η μεταφορά ενέργειας γίνεται μέσω ομαδικής ταχύτητας (c_g).

Παράμετροι κυματισμού



Κύριες παράμετροι:

- ▶ Ύψος κύματος H (m)
- ▶ Περίοδος T (s)
- ▶ Μήκος κύματος λ (m)
- ▶ Ταχύτητα κύματος $c = \lambda / T$ (m/s)
- ▶ Πυκνότητα ενέργειας κύματος E (J/m²)

Σχέση μήκους κύματος βαθιάς θάλασσας:

$$\lambda = \frac{gT^2}{2\pi}$$

Πυκνότητα ενέργειας κύματος

Η μέση πυκνότητα ενέργειας ενός κύματος είναι:

$$E = \frac{1}{8} \rho g H^2$$

όπου:

- ▶ ρ : πυκνότητα νερού (1025 kg/m^3)
- ▶ g : 9.81 m/s^2
- ▶ H : ύψος κύματος

Ανάλυση: Η ενέργεια αυξάνει **αναλογικά με H^2** → τα υψηλά κύματα αποδίδουν δραματικά περισσότερη ενέργεια.

Ισχύς κυματισμού ανά μέτρο μετώπου

$$P = \frac{\rho g^2}{64\pi} H^2 T$$

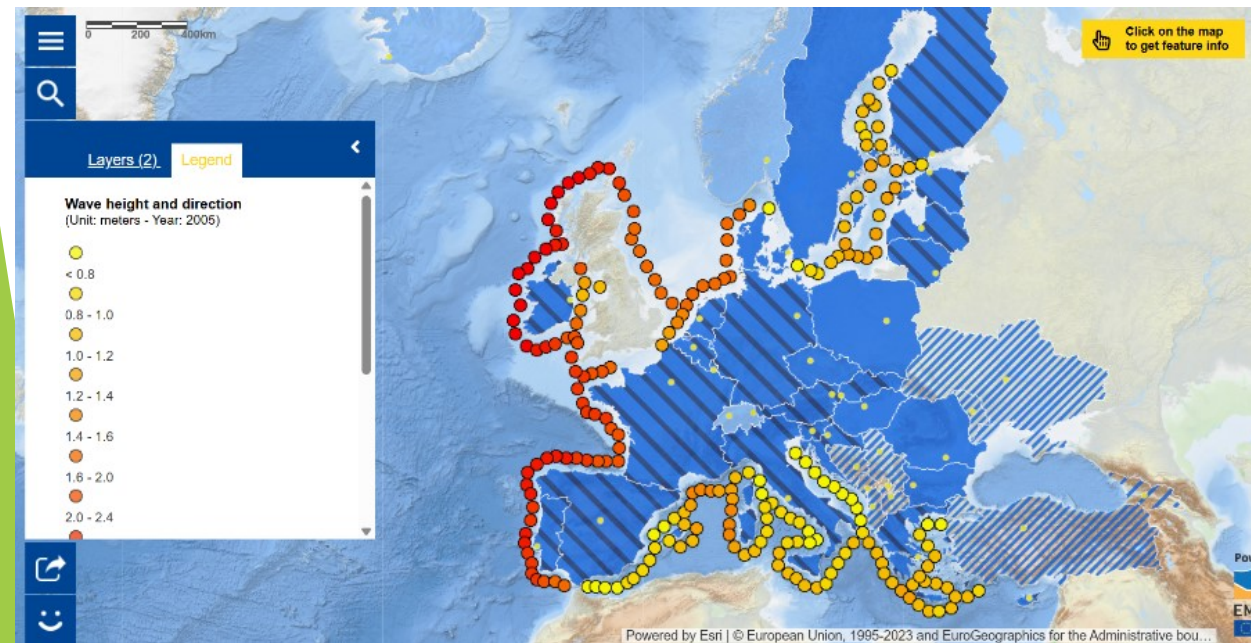
ή σε πρακτική μορφή:

$$P \approx 0.5 H^2 T \text{ [kW/m]}$$

Σημασία: Για Ελλάδα, σε νησιωτικές περιοχές, $P \approx 5\text{-}15 \text{ kW/m}$.

Ενεργειακό δυναμικό στην Ευρώπη

- ▶ Βορειοδυτική Ευρώπη → 40-70 kW/m
- ▶ Μεσόγειος → πιο ήπιο, αλλά σταθερότερο
- ▶ Αιγαίο & Ιόνιο → τοπικές περιοχές με 10-20 kW/m



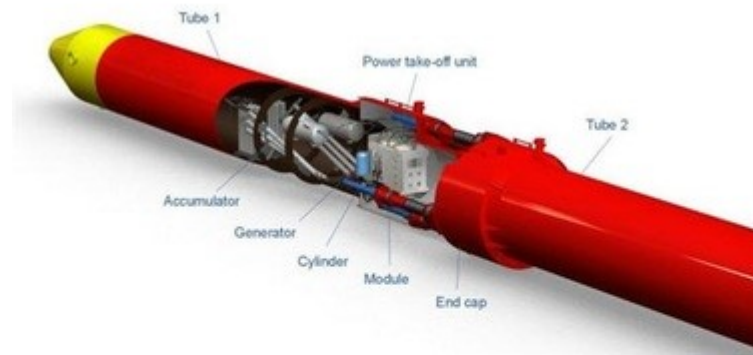
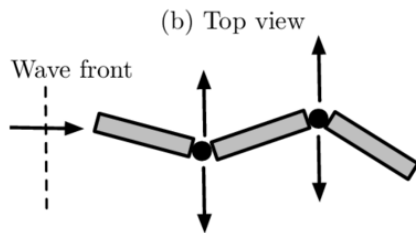
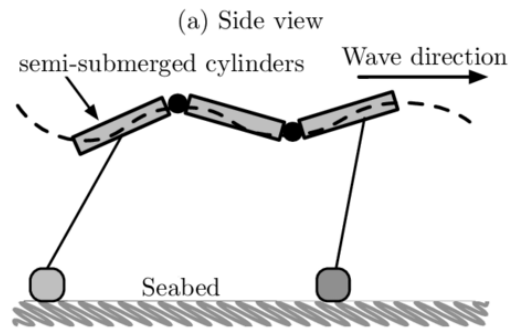
Τύποι συσκευών WEC (Wave Energy Convert)

1. Οριζόντιας ώθησης
(Attenuators)
2. Point absorbers
3. Oscillating Water Column (OWC)
4. Overtopping Devices
5. Υποθαλάσσιοι ταλαντωτές
(oscillating wave surge
converters)
6. Fixed terminators

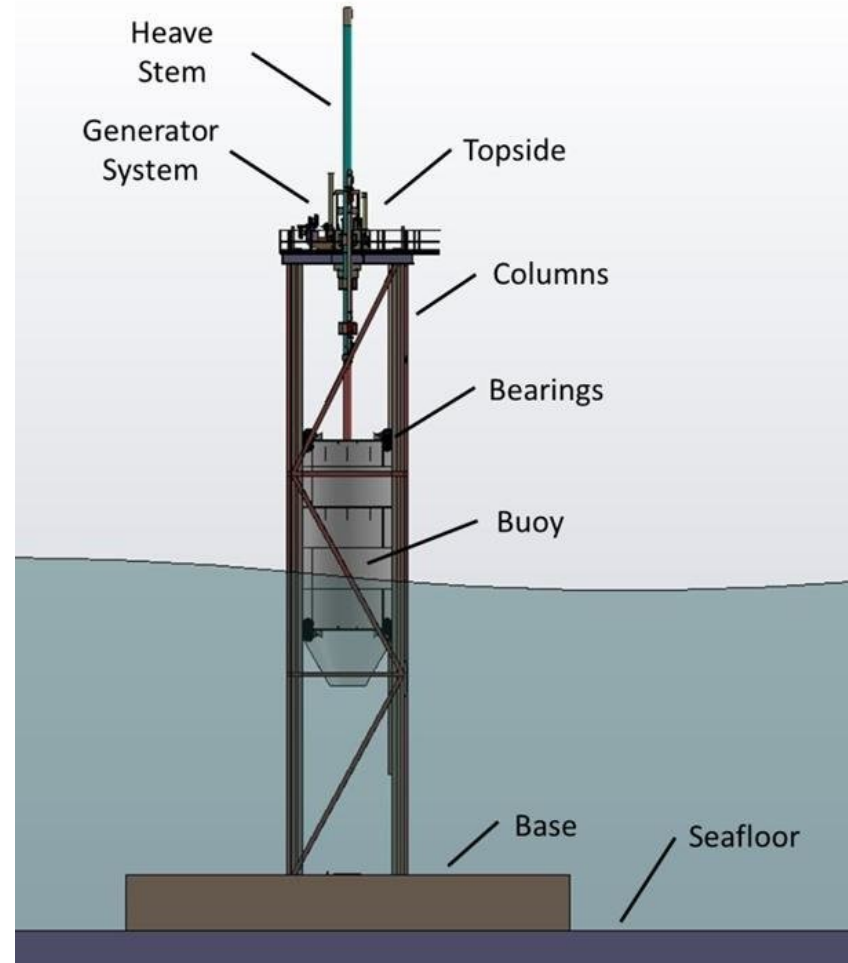
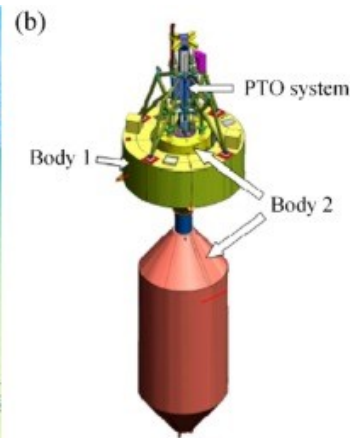
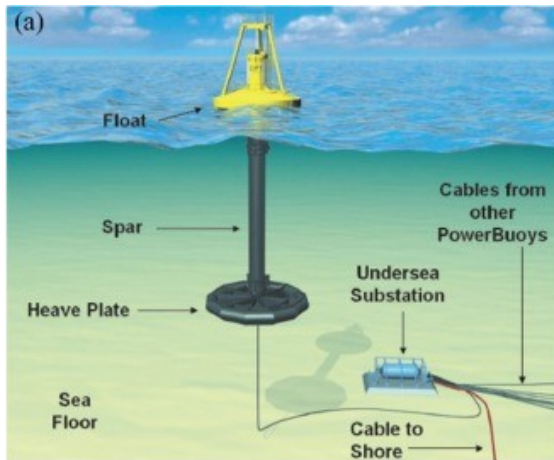


Οριζόντιας ώθησης (Attenuators)

icity by means of hydraulic power take-off systems housed inside each [107,154,44]. The generated electric power is transmitted to shore by subsea cables.



Point absorbers

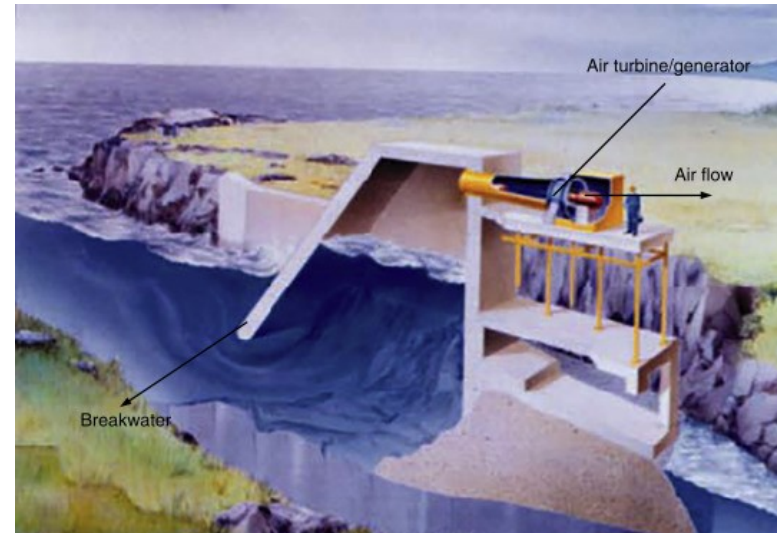
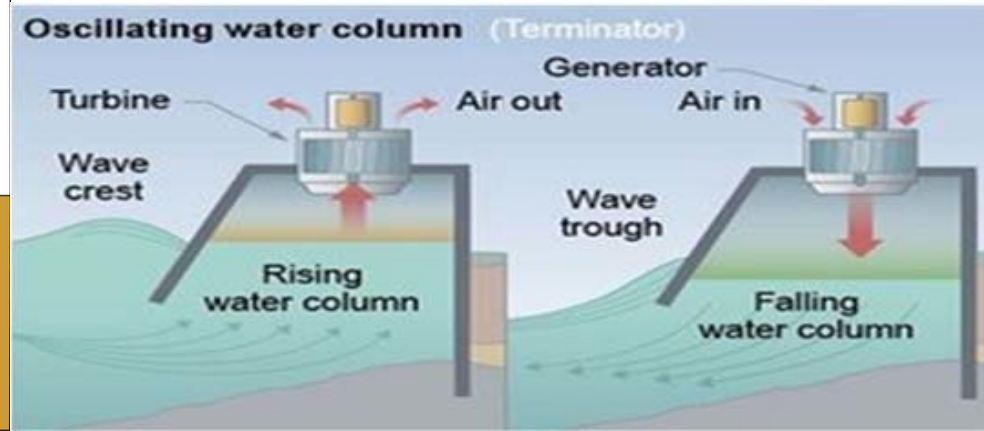
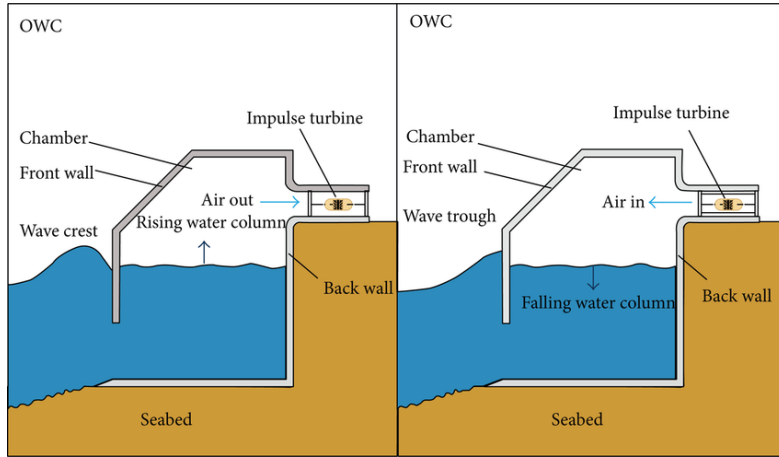


Point Absorbers

- ▶ Μικρές συσκευές που ταλαντώνονται σε όλες τις διευθύνσεις.
- ▶ Κατακόρυφη ταλάντωση → μετατροπή σε υδραυλική ή ηλεκτρική ενέργεια.
- ▶ Πλεονεκτήματα: ευελιξία, modular.
- ▶ Μειονεκτήματα: συντήρηση, αγκυροβολήση.

Εικόνα: PowerBuoy / Wavebob.

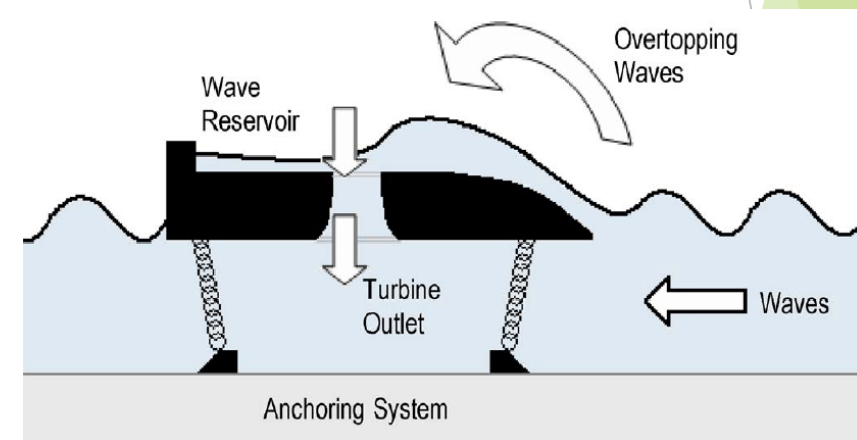
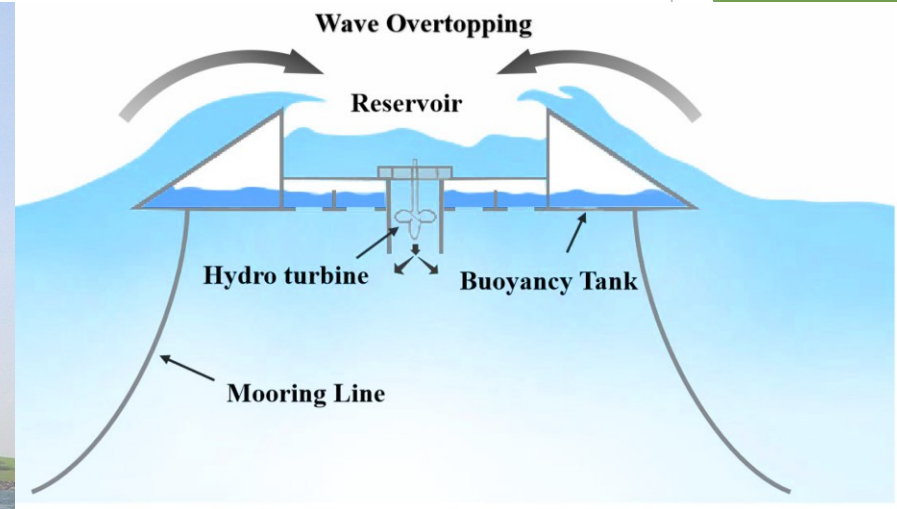
Oscillating Water Column (OWC)



OWC (Oscillating Water Column)

- ▶ Αέρας παγιδευμένος σε θάλαμο.
- ▶ Το κύμα συμπιέζει/εκτονώνει τον αέρα → στρόβιλος Wells.
- ▶ Υψηλή αξιοπιστία, λίγα κινούμενα μέρη.
- ▶ Μπορεί να ενσωματωθεί σε λιμενικά έργα.

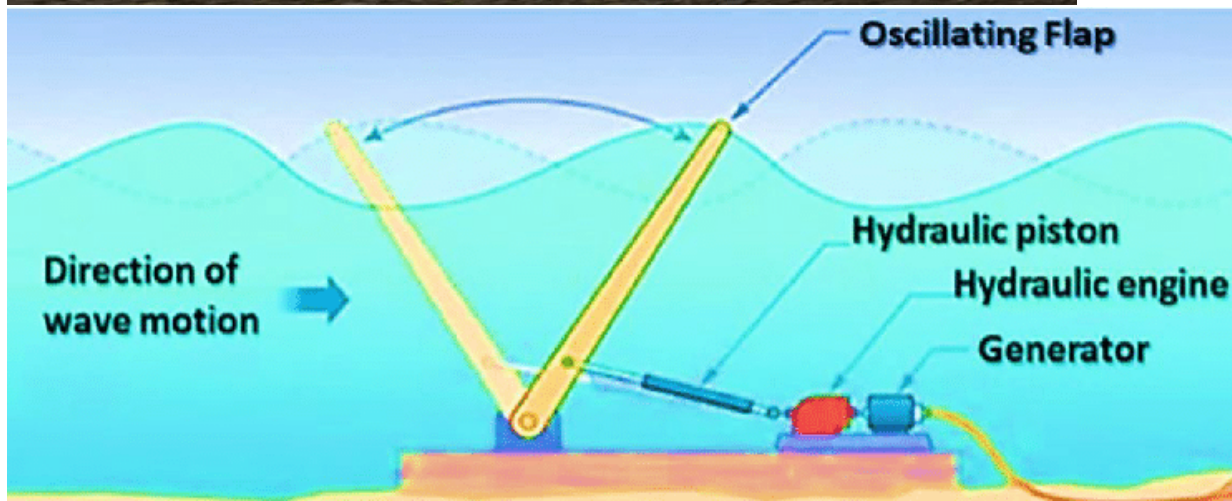
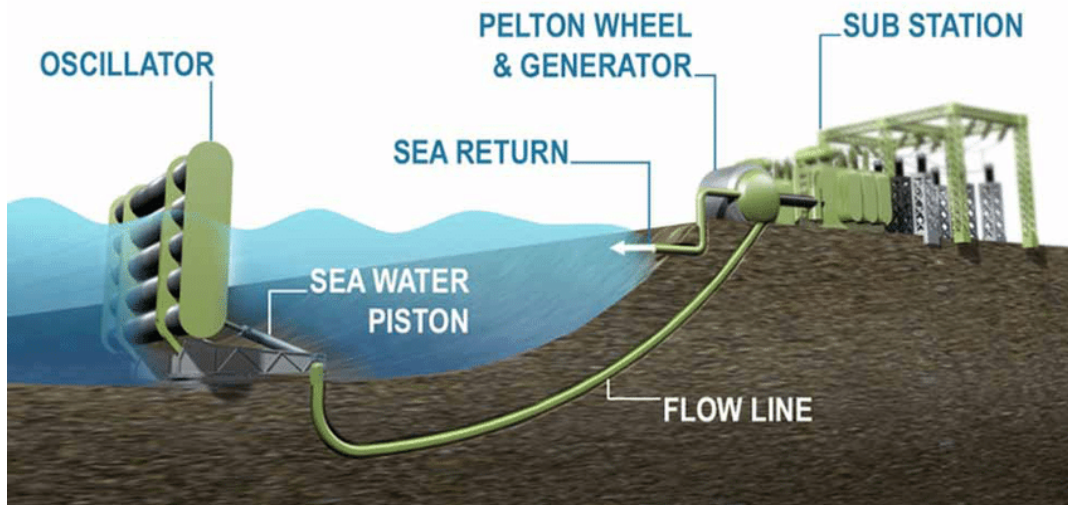
Overtopping Devices



Overtopping Devices

- ▶ Τα κύματα υπερχειλίζουν σε υπερυψωμένη δεξαμενή.
- ▶ Υδατόπτωση → στρόβιλος χαμηλής πτώσης (τις περισσότερες φορές Kaplan).
- ▶ Σταθερότερα από τους point absorbers.

Oscillating wave surge converters (Υποθαλάσσιοι ταλαντωτές)



Υποθαλάσσιοι ταλαντωτές

- ▶ Αιωρούμενα "πτερύγια" που ταλαντώνονται με τη δυναμική κύματος.
- ▶ Μετατροπή ενέργειας μέσω υδραυλικών συστημάτων.

Μοντελοποίηση κυματικής ενέργειας

- ▶ Προσομοίωση με γραμμική θεωρία Airy.
- ▶ Χρήση **spectrum**:
 - ▶ Pierson-Moskowitz
 - ▶ JONSWAP
- ▶ Παράμετροι: H_s , T_p .

Απόδοση συσκευών WEC

Ορίζουμε:

$$\eta = \frac{P_{captured}}{P_{wave}}$$

Συνήθως:

- ▶ 20-40% για commercial prototypes
- ▶ έως 60% θεωρητικό όριο

Υπολογισμός ισχύος WEC

Για point absorber με capture width C_w :

$$P_{WEC} = C_w \cdot P_{wave}$$

όπου C_w (m) συνήθως 2-10 m ανάλογα το μέγεθος.

C_w (capture width) = Αποτελεσματικό πλάτος σύλληψης ενέργειας του μετατροπέα

Μηχανολογικές προκλήσεις

- ▶ Διάβρωση
- ▶ Fouling (ανεπιθύμητη προσκόλληση οργανικού και ανόργανου υλικού στις επιφάνειες συσκευών που βρίσκονται στο θαλασσινό νερό)
- ▶ Εξαιρετικά φορτία καταιγίδων
- ▶ Εξοπλισμός αγκυροβόλησης
- ▶ Αξιοπιστία PTO (Power Take-Off) συστήματος

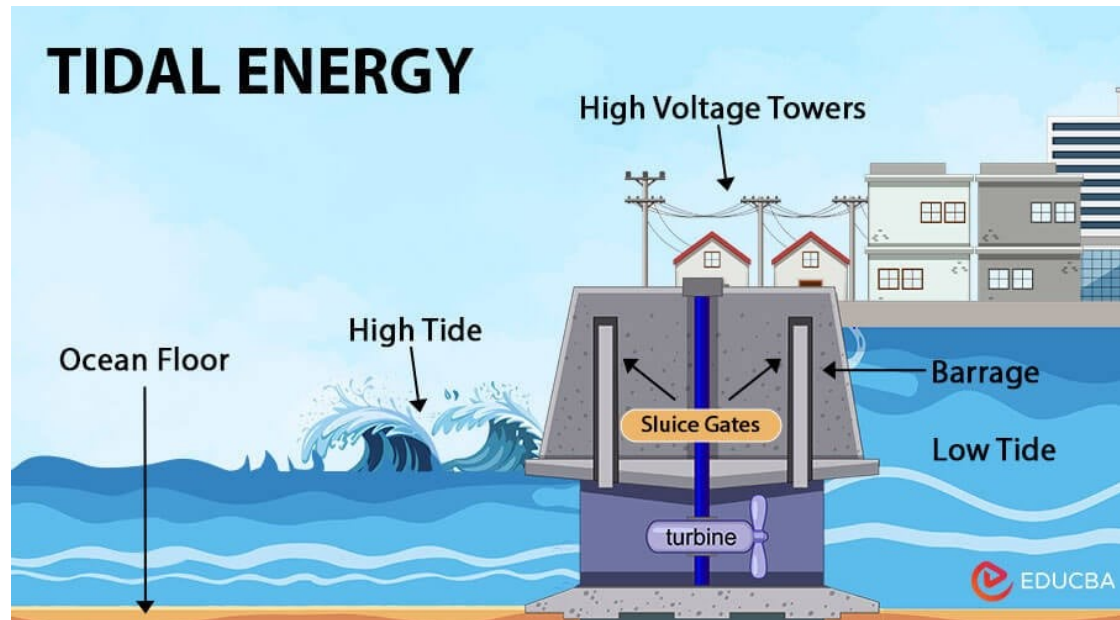
PTO (Power Take-Off) Συστήματα

- ▶ Γεννήτριες linear
- ▶ Υδραυλικές αντλίες υψηλής πίεσης
- ▶ Στροβιλογεννήτριες
- ▶ Συστήματα συμπίεσης αέρα (OWC)

Μελέτη περίπτωσης Ελλάδα

- ▶ Περιοχές με υψηλό δυναμικό: Καρπάθιο, Κεντρικό Αιγαίο, δυτικό Ιόνιο.
- ▶ $P = 10\text{-}20 \text{ kW/m}$ σε χειμερινούς μήνες.
- ▶ Ενσωμάτωση σε υφιστάμενα λιμάνια με OWC.

Παλιρροϊκή ενέργεια



- ▶ Η παλιρροϊκή ενέργεια προκύπτει από τη βαρυτική αλληλεπίδραση Γης-Σελήνης.
- ▶ Δύο τύποι τεχνολογιών:
 1. Tidal barrages (φράγματα)
 2. Tidal stream turbines (υποθαλάσσιες τουρμπίνες)

Tidal Stream Turbines

- ▶ Αρχή λειτουργίας όπως οι ανεμογεννήτριες.
- ▶ Ροές 2-4 m/s → υψηλή ενέργεια.
- ▶ Παραδείγματα: MeyGen (Σκωτία).

Ισχύς:

$$P = \frac{1}{2} \rho A v^3 C_p$$

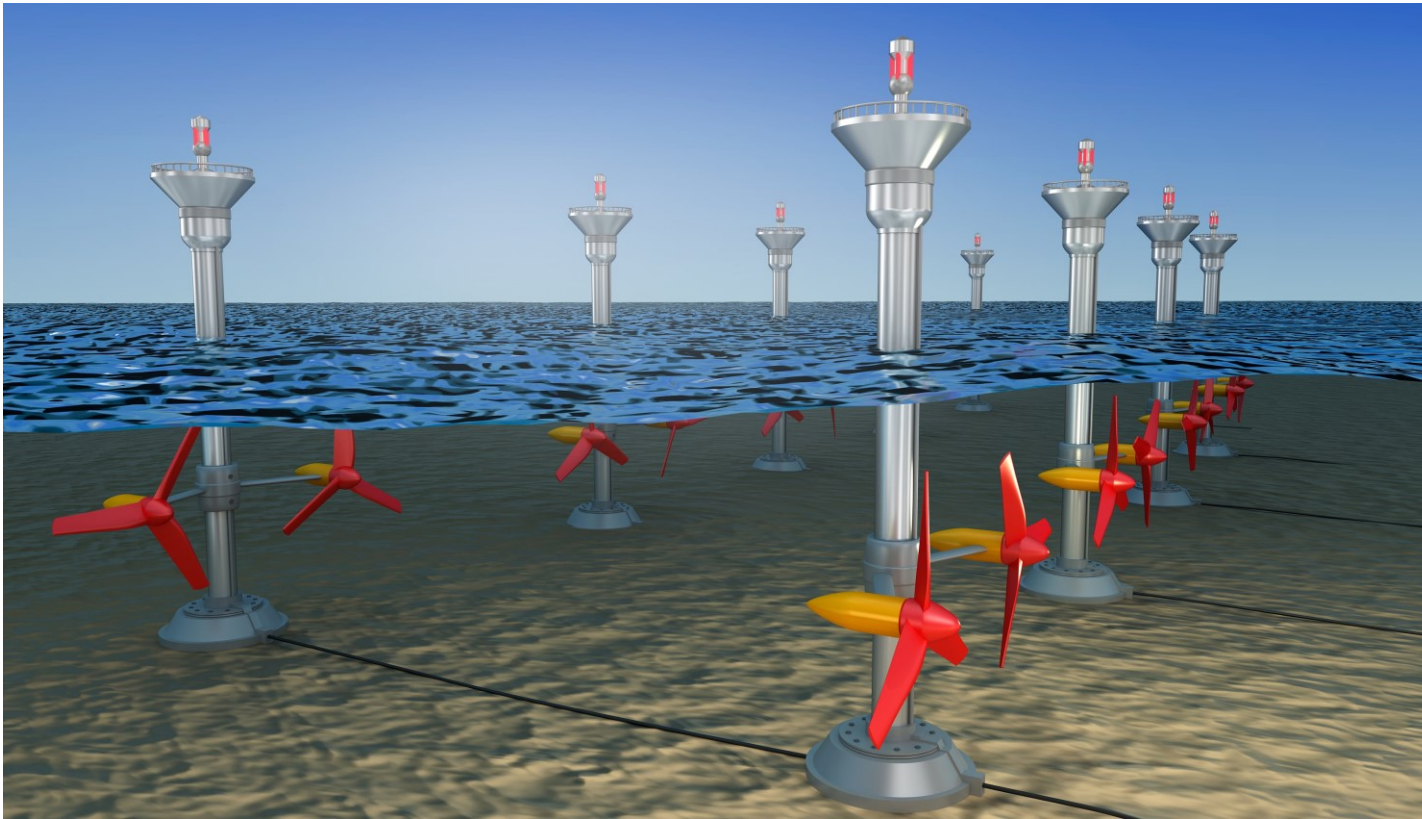
όπως η αιολική, αλλά ρ νερού = 1025 kg/m³.

Tidal Barrages

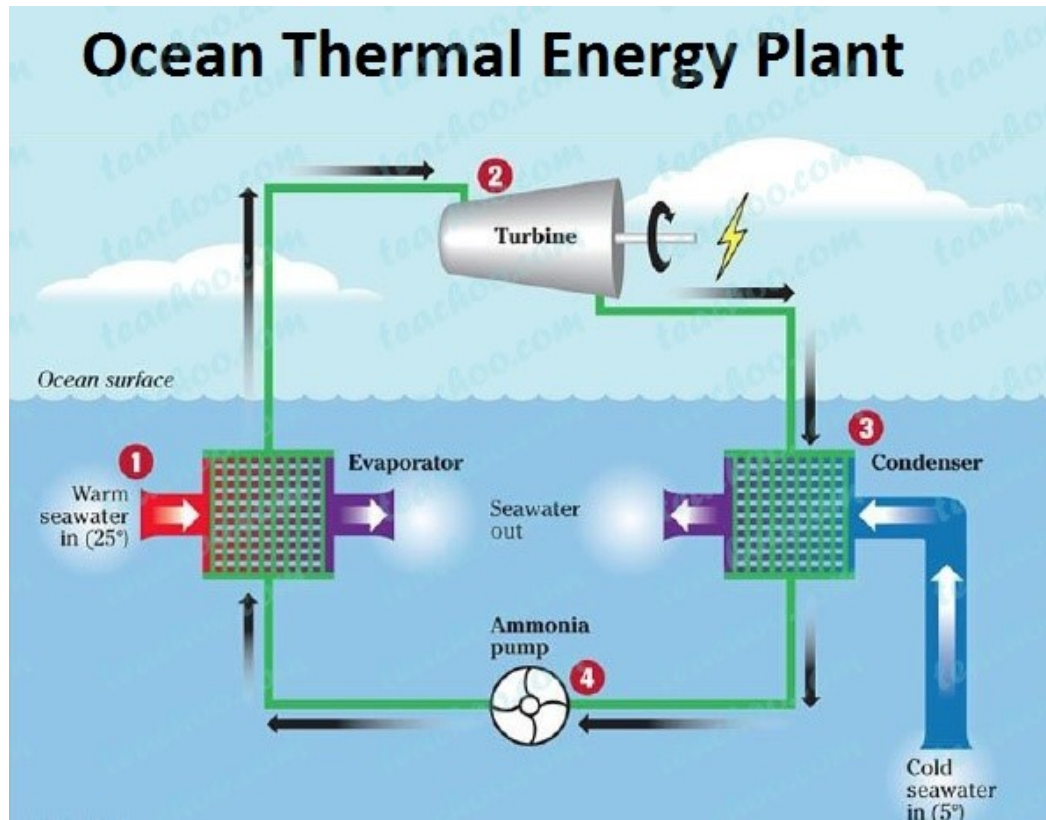


- ▶ Φράγματα τύπου "Dam".
- ▶ Εκμετάλλευση υψομετρικής διαφοράς παλίρροιας (2-10 m).
- ▶ Μεγάλες περιβαλλοντικές επιπτώσεις.

Tidal stream turbines (υποθαλάσσιες τουρμπίνες)

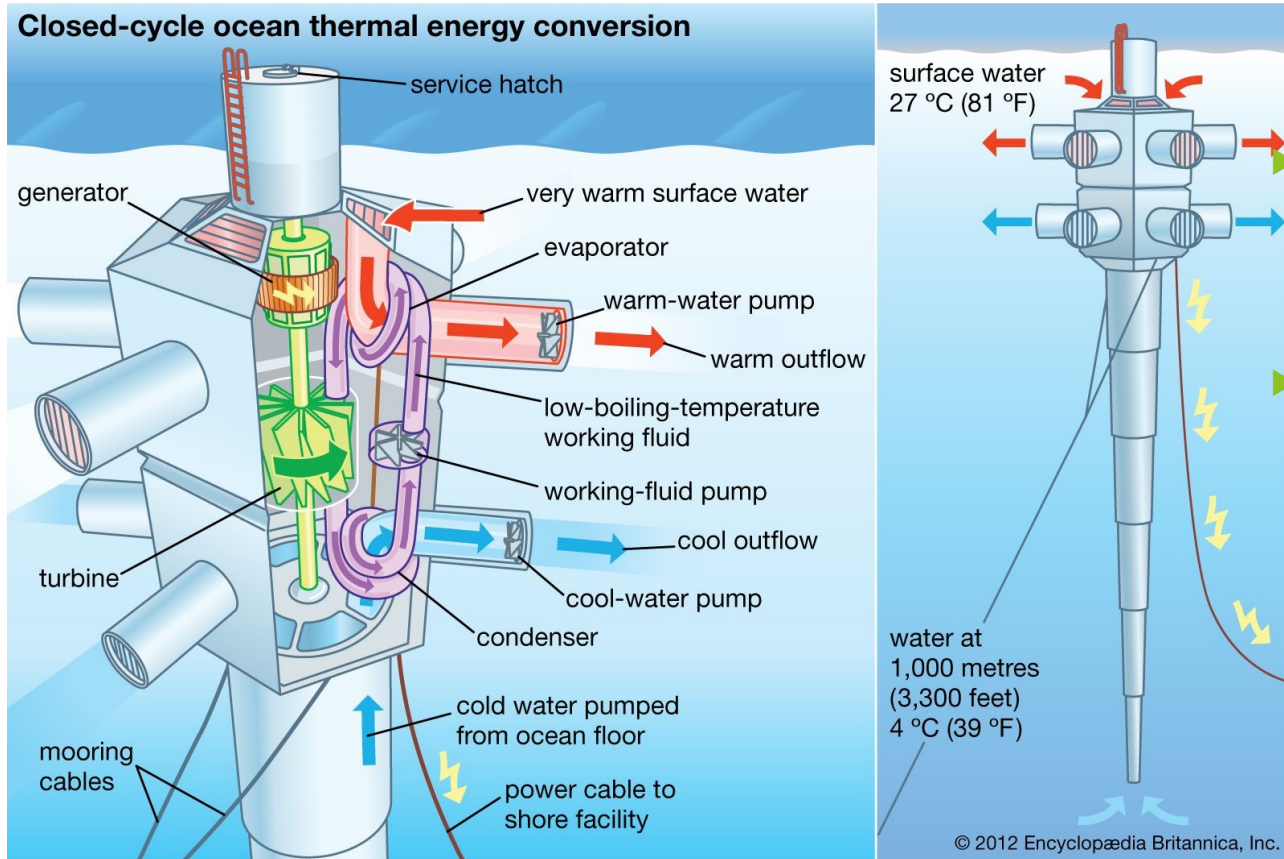


Ωκεάνια θερμική ενέργεια / Ocean Thermal Energy Convert(OTEC)



- Εκμετάλλευση διαφοράς θερμοκρασίας:
ζεστό επιφανειακό νερό ~25-30°C
ψυχρό βαθύ νερό ~5°C
- Rankine κύκλος με αμμωνία ή R-134a.

Απόδοση ΟΤΕC

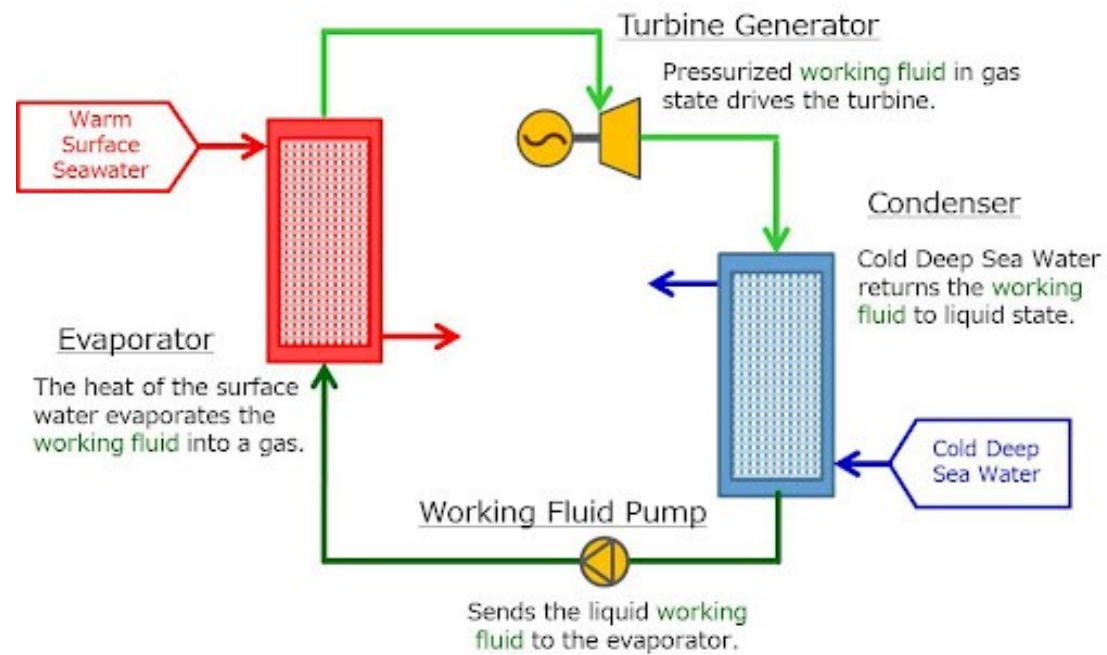


Χαμηλή απόδοση λόγω χαμηλής ΔT :

$$\eta_{OTEC} = 1 - \frac{T_{cold}}{T_{hot}} \approx 5\%$$

Μεγάλες παροχές → Βιομηχανοποίηση δύσκολη.

OTEC κύκλος



- ▶ Εξάτμιση αμμωνίας με ζεστό νερό
- ▶ Στροβιλογεννήτρια
- ▶ Συμπύκνωση σε βαθύ νερό
- ▶ Αντλία υγρού working fluid

Συγκριτική αξιολόγηση τεχνολογιών

Τεχνολογία	Απόδοση	Ωριμότητα	Κόστος	Πλεονεκτήματα
Κυματική	20–40%	χαμηλή	υψηλό	υψηλή ενεργειακή πυκνότητα
Παλιρροϊκή	30–45%	μεσαία	μεσαίο	προβλέψιμη παραγωγή
OTEC	~5%	χαμηλή	υψηλό	συνεχής παραγωγή

Περιβαλλοντικές επιπτώσεις

- ▶ Ελάχιστη οπτική όχληση (WEC).
- ▶ Πιθανή σύγκρουση με ναυσιπλοΐα.
- ▶ Επίδραση σε θαλάσσια ζωή (turbines).
- ▶ Χωροθέτηση σε MPA (Marine Protected Areas).

Οικονομική αξιολόγηση

- ▶ Κόστος ανά τεχνολογία:
- ▶ WEC: 3000-7000 €/kW
- ▶ Tidal turbines: 4000-8000 €/kW
- ▶ OTEC: >10,000 €/kW

Χρόνος ζωής: 20-25 έτη.

Άσκηση

Δίνεται:

Wave Energy Convert (Point Absorber)

$H = 2 \text{ m}$, $T = 7 \text{ s}$

Capture width point absorber: $C_w = 5 \text{ m}$

Να υπολογιστούν:

- ▶ Η ισχύς κυματισμού ανά μέτρο μετώπου
- ▶ Η ισχύς που αποδίδει το WEC

Λύση:

$$P_{wave} = 0.5H^2T = 0.5 \cdot 4 \cdot 7 = 14 \text{ kW/m}$$

$$P_{WEC} = C_w \cdot P_{wave} = 5 \cdot 14 = 70 \text{ kW}$$

Συμπεράσματα

- ▶ Η κυματική ενέργεια είναι τεχνολογία υψηλού δυναμικού.
- ▶ Η Μηχανολογία παίζει κρίσιμο ρόλο (PTO, υλικά, πρόσδεση).
- ▶ Παρότι είναι σε pre-commercial στάδιο, οι εφαρμογές αυξάνονται.

Βιβλιογραφία

- ▶ European Commission, “*Ocean Energy: Technology Brief*,” JRC Science for Policy Reports, 2020.
- ▶ Falnes, J., “*Ocean Waves and Oscillating Systems: Linear Interactions Including Wave-Energy Extraction*,” Cambridge University Press, 2002.
- ▶ Drew, B., Plummer, A. R., Sahinkaya, M. N., “*A review of wave energy converter technology*,” Journal of Power and Energy, 2009.
- ▶ Falcão, A. F. de O., “*Wave energy utilization: A review of the technologies*,” Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2010.
- ▶ IRENA, “*Ocean Energy: Technologies, Performance and Costs*,” International Renewable Energy Agency, 2014.
- ▶ Boyle, G., “*Renewable Energy: Power for a Sustainable Future*,” Oxford University Press, 2012.
- ▶ Bernhoff, H. et al., “*The influence of wave climate on point absorber performance*,” Applied Ocean Research, 2011.
- ▶ Thorpe, T. W., “*A Review of Wave Energy Technologies*,” UK Department of Trade & Industry, 1999.
- ▶ Salter, S., “*Wave Power*,” Nature, 1974.
- ▶ Borthwick, A. G. L., “*Marine Renewable Energy Seascape*,” Engineering, 2016.
- ▶ Lewis, A. et al., “*Ocean Energy*,” in IPCC Renewable Energy Sources, Cambridge University Press, 2011.
- ▶ Khan, M. J., Bhuyan, G., “*Tidal energy resource characterization*,” IEEE Transactions on Energy Conversion, 2009.
- ▶ MeyGen Project Reports, *Atlantis Resources Ltd.*, 2017.
- ▶ Vega, L. A., “*Ocean Thermal Energy Conversion (OTEC): A Review*,” Marine Technology Society Journal, 2010.
- ▶ OES (Ocean Energy Systems), “*Annual Report*,” IEA Technology Collaboration Programme, 2022.