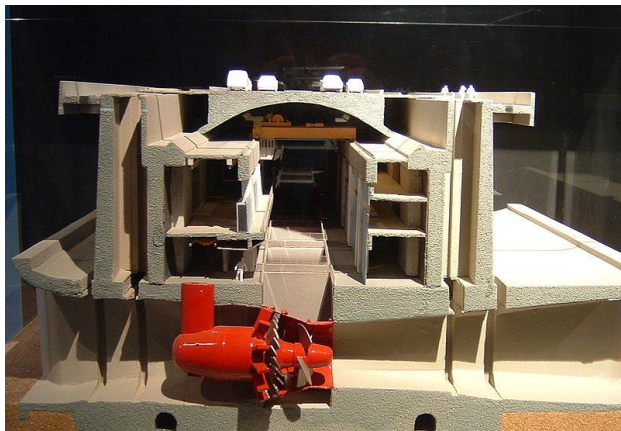


Εισαγωγή στην Ενεργειακή Τεχνολογία

1^ο και 5^ο εξάμηνο Σχολής Πολιτικών Μηχανικών

Θαλάσσια ενέργεια



Νίκος Μαμάσης, Ανδρέας Ευστρατιάδης & Βίκυ Τσουκαλά
Τομέας Υδατικών Πόρων & Περιβάλλοντος, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Ακαδημαϊκό έτος 2018-19

Εισαγωγή

Η θαλάσσια ενέργεια υπάρχει σε διάφορες μορφές στις θάλασσες και τους ωκεανούς. Αποτελεί μια ανανεώσιμη μορφή ενέργειας και μπορεί να αντληθεί με διάφορους τρόπους, οι οποίοι αξιοποιούν τη **ρευστοδυναμική** της περιοχής και τις **φυσικοχημικές ιδιότητες** του νερού (θερμοκρασία, αλατότητα).

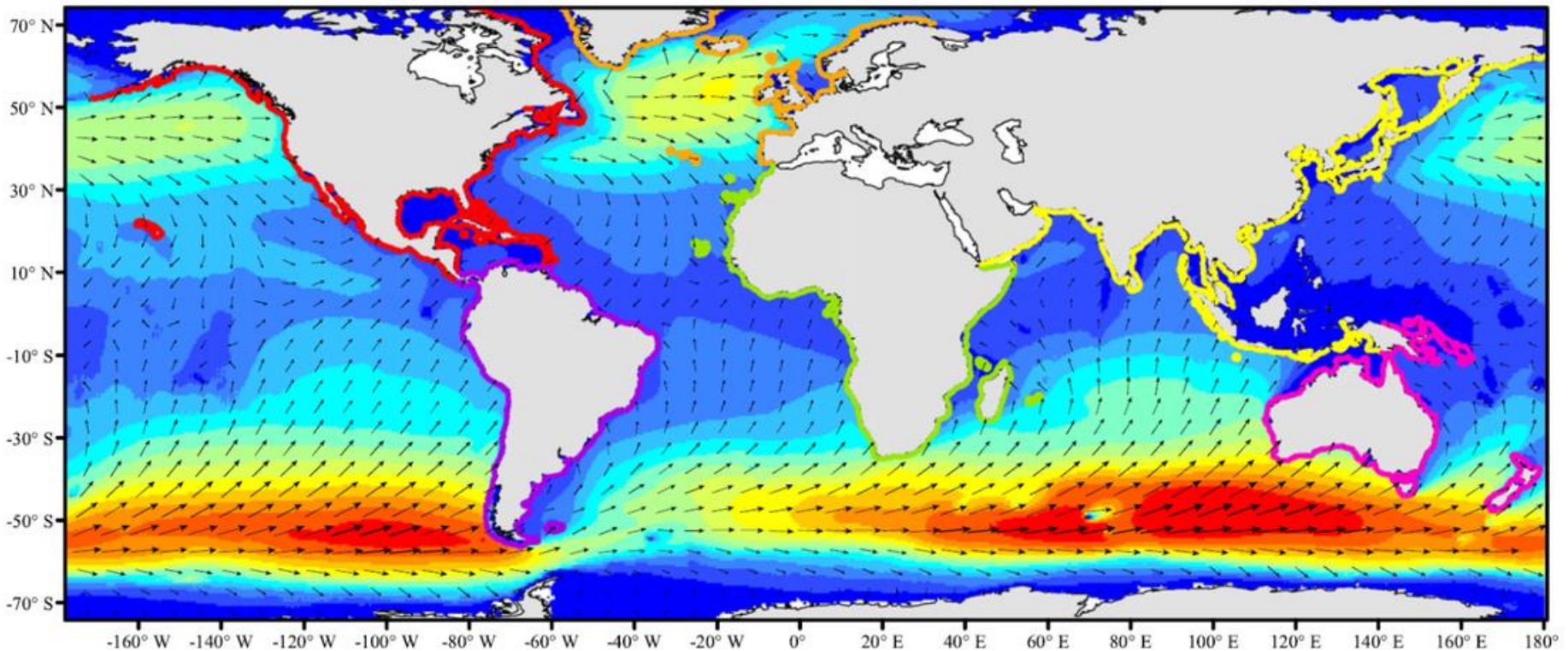
Μορφές θαλάσσιας ενέργειας

- Κυματική
 - Ενέργεια από παλίρροιες
 - Θαλάσσια ρεύματα
 - Θαλασσοθερμική
 - Οσμωτική
- Ρευστοδυναμική**
- Φυσικοχημικές ιδιότητες του νερού**

Κυματική ενέργεια: Φυσικό πλαίσιο

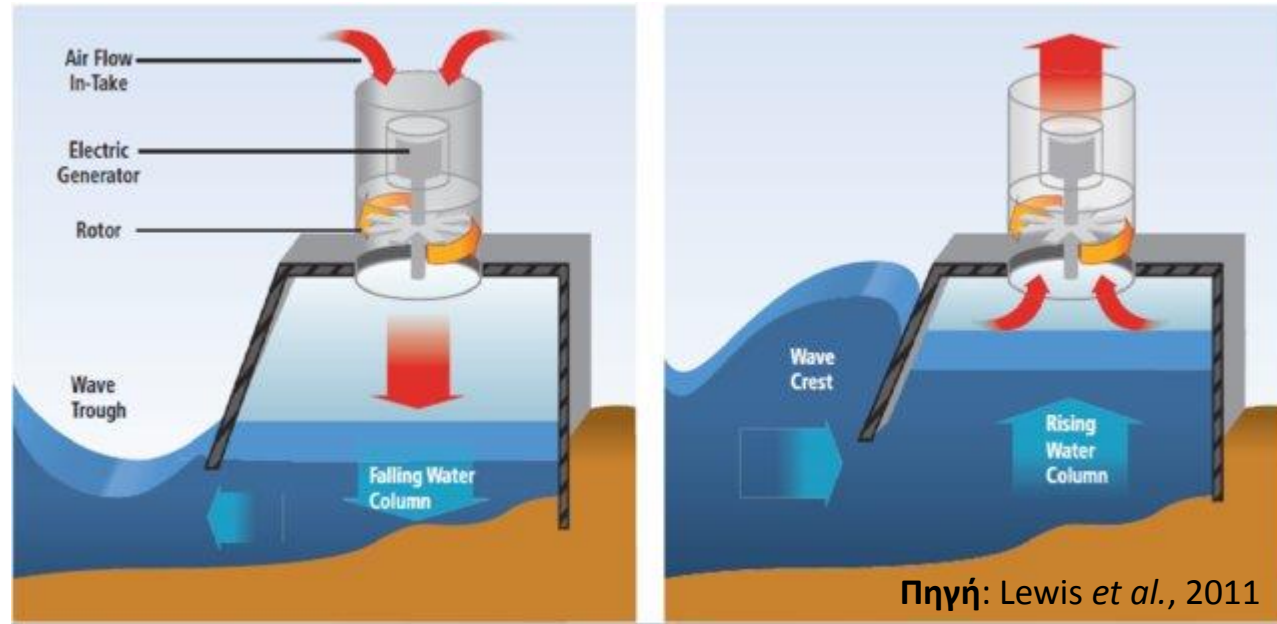
Παράγεται από την κίνηση των κυμάτων που προκαλείται από τους ανέμους. Η ποσότητα της ενέργειας και το μέγεθος του προκύπτοντος κύματος εξαρτάται από: (α) την ταχύτητα του ανέμου, (β) το χρονικό διάστημα για το οποίο φυσάει ο άνεμος, και (γ) την απόσταση κατά την οποία φυσάει ο άνεμος (Fetch).

Μέση ετήσια κυματική ισχύς (kW/m)



Κυματική ενέργεια: Μετατροπείς ταλαντευόμενης στήλης ύδατος (Oscillating Water Column)

Κατά την λειτουργία τους, η στάθμη της στήλης ύδατος τείνει διαρκώς να **εξισωθεί με την στάθμη της θάλασσας** από την άλλη πλευρά του τοίχου πρόσπτωσης. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη συμπίεση και αποσυμπίεση του αέρα που διέρχεται από τους στροβίλους θέτοντάς τους σε κίνηση.



Limpet (WaveGen)

Νήσος Islay (Δυτικά της Σκωτίας)

Έναρξη λειτουργίας: 2000

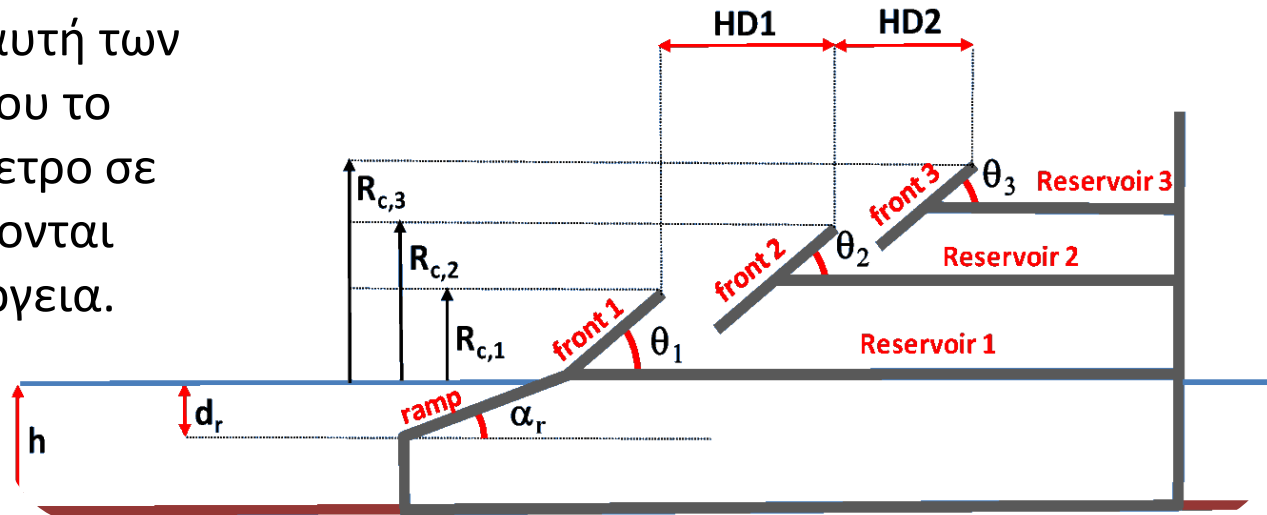
Εγκατεστημένη ισχύς: **500 kW**



Κυματική ενέργεια: Υπερπηδητοί μετατροπείς

Η λειτουργία τους θυμίζει αυτή των υδροηλεκτρικών έργων, όπου το νερό πέφτει από ένα υψόμετρο σε στροβίλους που περιστρέφονται παράγοντας ηλεκτρική ενέργεια.

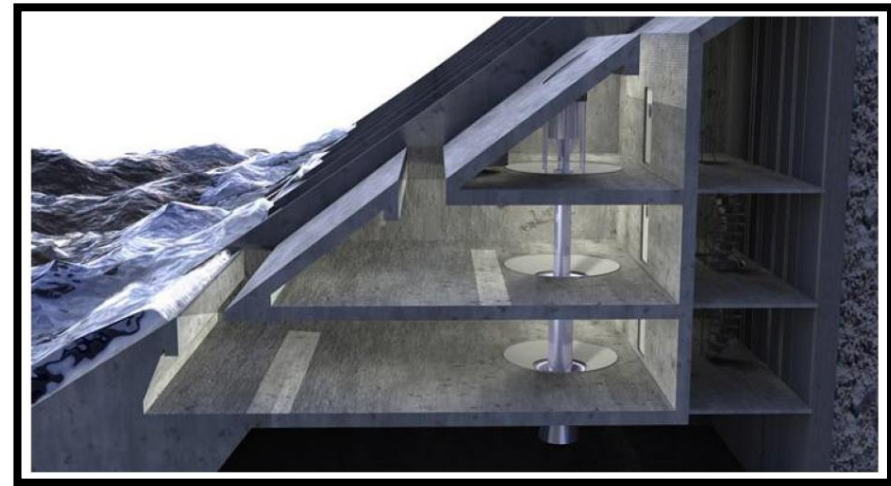
Οι εγκαταστάσεις μπορεί να αποτελούνται από μία ή παραπάνω δεξαμενές.



Πηγή: Vicinanza *et al.*, 2011



SSG (WAVEenergy), Νήσος Kvistøy, Νορβηγία

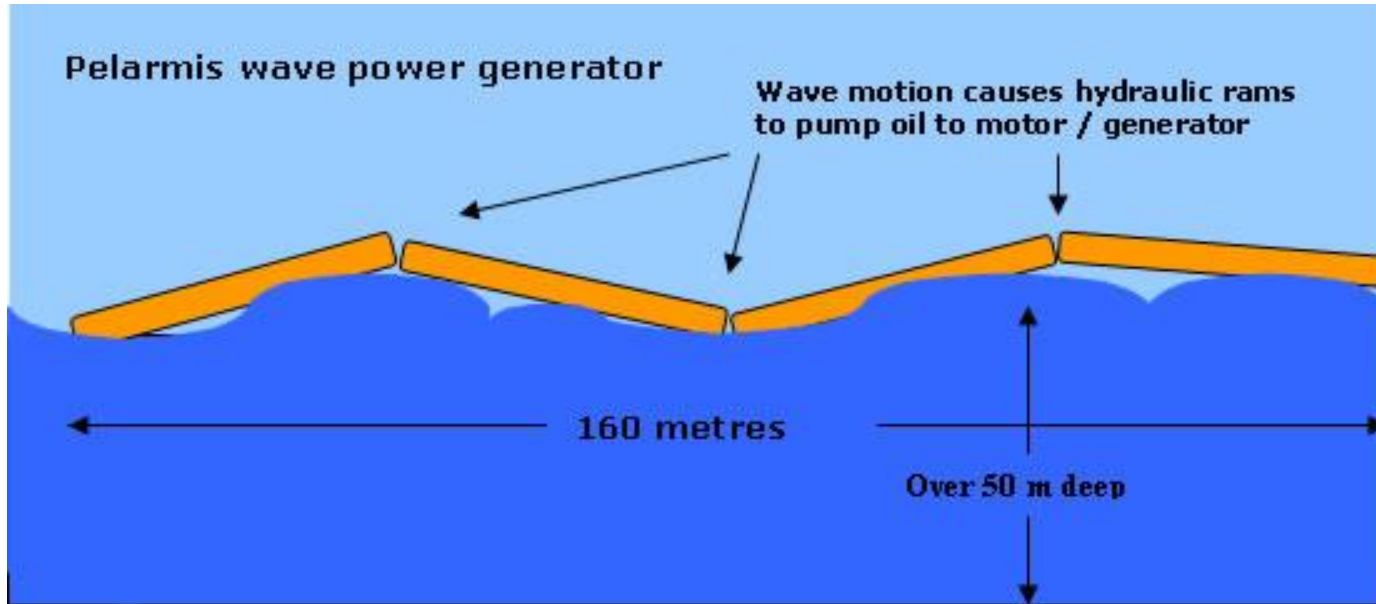


Έναρξη λειτουργίας: 2008

Εγκατεστημένη ισχύς: **150 kW**

Κυματική ενέργεια: Πλωτοί μετατροπείς

Κατασκευές που έχουν την δυνατότητα να μένουν στην επιφάνεια και, ανάλογα με τις κυματικές διαταράξεις, να κινούνται τόσο κατακόρυφα όσο και οριζόντια.



Pelamis P2 (PelamisWave Power)
Νήσος Orkney, Βόρεια της Σκωτίας)
Εναρξη λειτουργίας: 2010
Εγκατεστημένη ισχύς: **750 kW**

Κυματική ενέργεια: Μετατροπείς κρούσης

Εύκαμπτες ή αρθρωτές κατασκευές, τοποθετημένες κάθετα στην κυρίαρχη διεύθυνση του κύματος. Το πτερύγιο της κατασκευής κινείται παλινδρομικά υπό την επίδραση των κυματισμών, ενεργοποιώντας τα έμβολα τα οποία ωθούν θαλασσινό νερό (ή κάποιο άλλο ρευστό) στον υδροηλεκτρικό σταθμό μετατροπής ενέργειας στην ακτή (ή στα ενσωματωμένα συστήματα απορρόφησης ισχύος).



Oyster 800 (Aquamarine)

Νήσος Orkney (βόρεια της Σκωτίας)

Έναρξη λειτουργίας: 2011

Εγκατεστημένη ισχύς: **800 kW**



Robusto (Langlee Wave Power)

Βορειοδυτικά της Τενερίφης

Εγκατεστημένη ισχύς: **132 kW**

Κυματική ενέργεια: Οικονομικά μεγέθη

Συντελεστής δυναμικότητας μετατροπών κυματικής ενέργειας: **25 ως 40%**

Ενδεικτικά οικονομικά στοιχεία μετατροπών

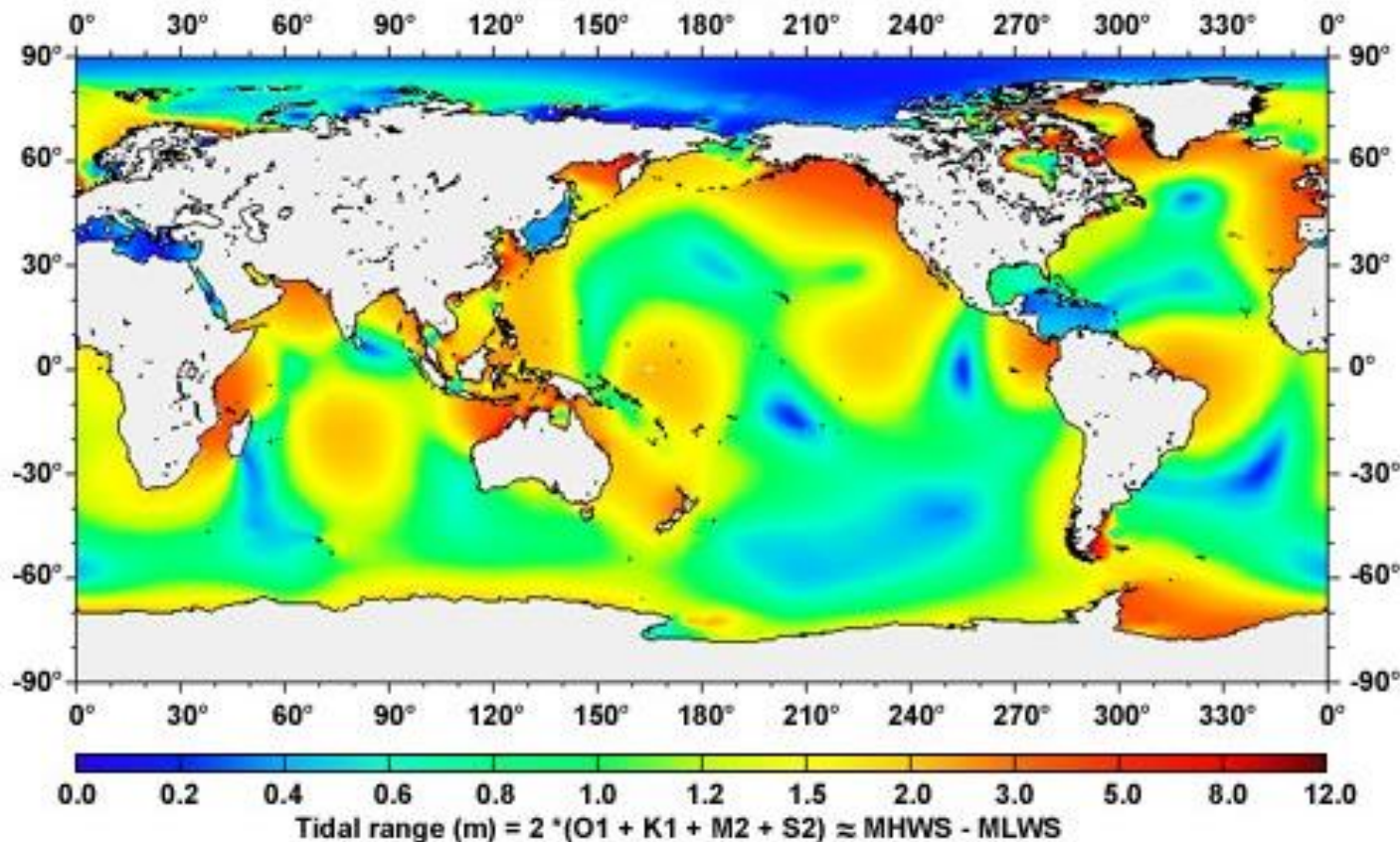
| Μετατροπέας | Εγκατεστημένη ισχύς (kW) | Κόστος εγκατάστασης (€) | Κόστος παραγωγής (€/kWh) |
|---------------------------|--------------------------|-------------------------|--------------------------|
| OE Buoy (στήλη ύδατος) | 1250 | 5 000 000 | 0.18 |
| Pelamis P2 (πλωτήρας) | 750 | 3 220 000 | 0.19 |
| SSG (υπερπηδητή συσκευή) | 150 | 630 000 | 0.19 |
| Robusto (συσκευή κρούσης) | 132 | 528 000 | 0.18 |

Πηγή: Αγόρης, Θ., *Τεχνολογίες αξιοποίησης της κυματικής ενέργειας για ηλεκτροπαραγωγή*, Διπλωματική εργασία, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ, 2018

Ενέργεια από παλίρροιες: Φυσικό πλαίσιο

Εκμεταλλεύεται την άνοδο και την πτώση της στάθμης της θάλασσας, που οφείλεται στην αλληλεπίδραση των πεδίων βαρύτητας Ήλιου, Γης και Σελήνης.

**Παγκόσμιο
εύρος
παλίρροιας**



Courtesy of James Chittleborough, National Tidal Centre, BoM
Copyright Commonwealth of Australia, reproduced by permission

Περιοχές με μέγιστο εύρος παλίρροιας

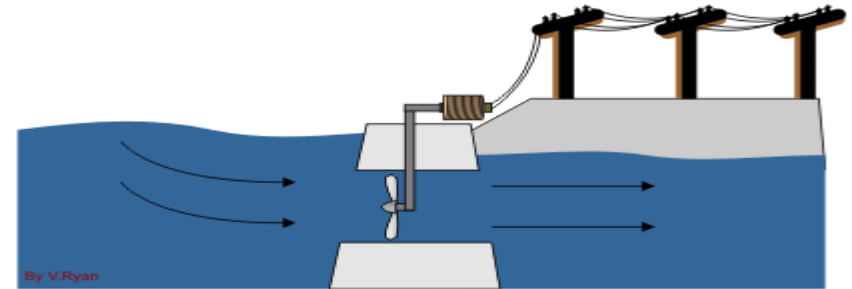
| Χώρα | Τοποθεσία | Εύρος (m) |
|---------|------------------|-----------|
| Καναδάς | Bay of Fundy | 16.2 |
| Αγγλία | Severn Estuary | 14.5 |
| Γαλλία | Port of Ganville | 14.7 |

| | | |
|-----------|---------------------|------|
| Γαλλία | La Rance | 13.5 |
| Αργεντινή | Puerto Rio Gallegos | 13.3 |
| Ρωσία | Bay of Mezen | 10.0 |
| Ρωσία | Penzhinskaya Guba | 13.4 |

Παλιρροιακά φράγματα (Tidal barrage – lagoons)

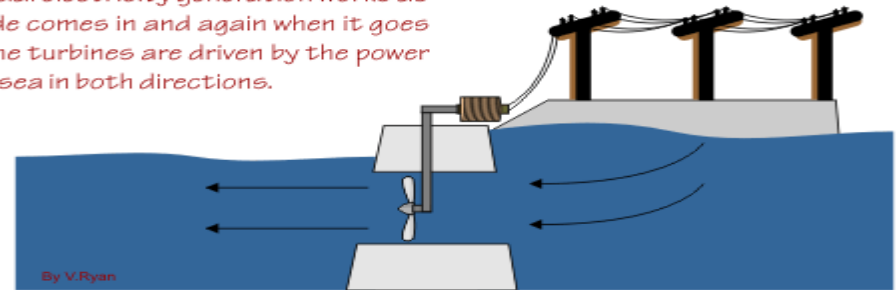
Κατασκευάζεται φράγμα κατά μήκος ενός κόλπου ή εκβολής ποταμού

1. Είσοδος νερού πίσω από το φράγμα κατά την πλημμυρίδα
2. Ελευθέρωση του νερού και παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μέσω των στροβίλων κατά την άμπωτη



TIDE COMING IN

This tidal electricity generation works as the tide comes in and again when it goes out. The turbines are driven by the power of the sea in both directions.

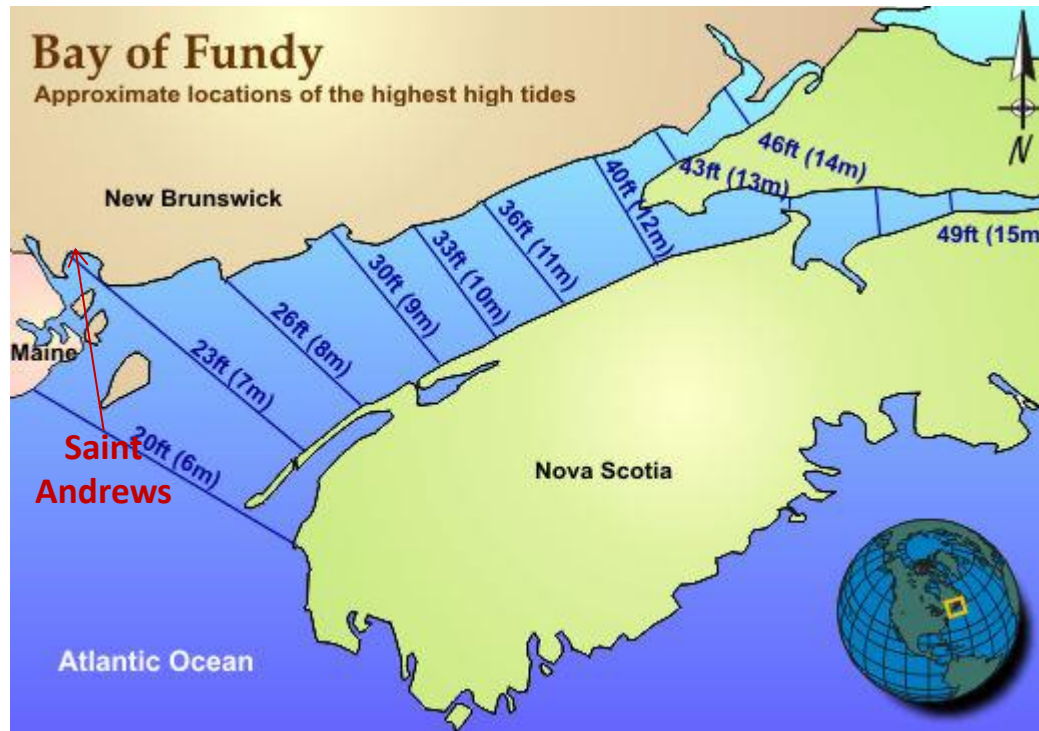


TIDE GOING OUT

Εγκατεστημένες μονάδες

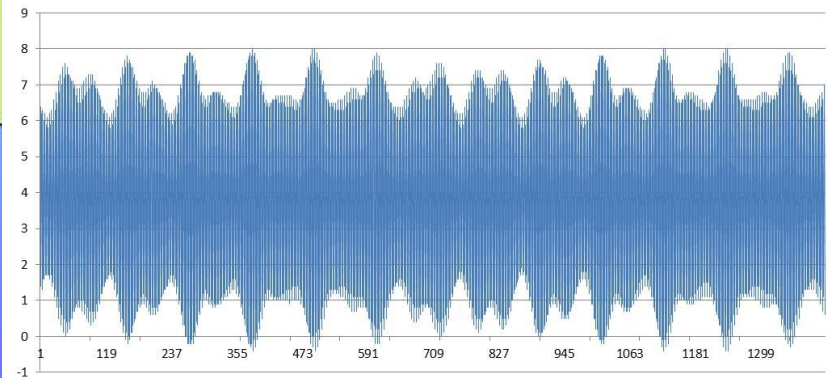
| Χώρα | Τοποθεσία | Εγκατεστημένη ισχύς (MW) | Έκταση λεκάνης (km ²) | Μέση παλίρροια (m) |
|---------|------------------|--------------------------|-----------------------------------|--------------------|
| Κορέα | Sihwa (2011) | 254 | | |
| Γαλλία | La Rance (1966) | 240 | 22 | 8.55 |
| Καναδάς | Annapolis (1984) | 20 | 15 | 6.4 |
| Κίνα | Jiangxia | 3,9 | 1.4 | 5.08 |
| Ρωσία | Kislaya (1968) | 1.7 | 1.1 | 2.3 |

Παλιρροιακός σταθμός Annapolis

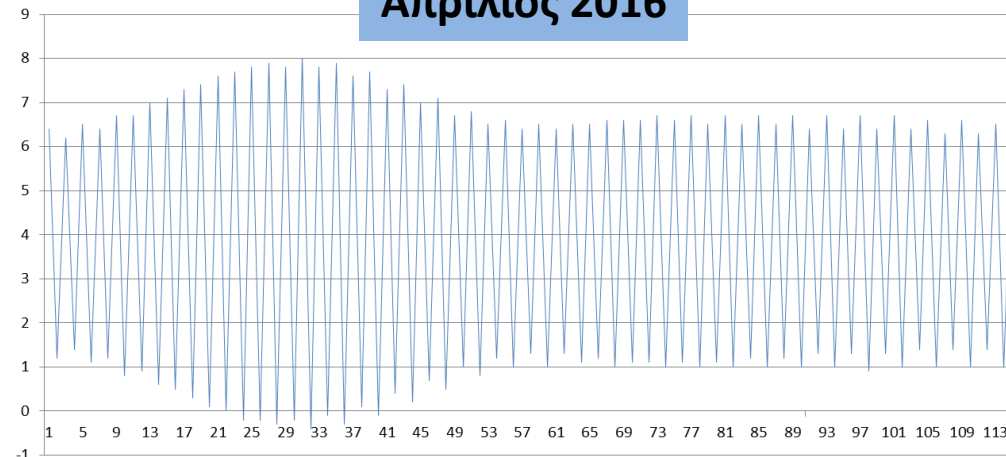


Παλίρροιες στον κόλπο Fundy

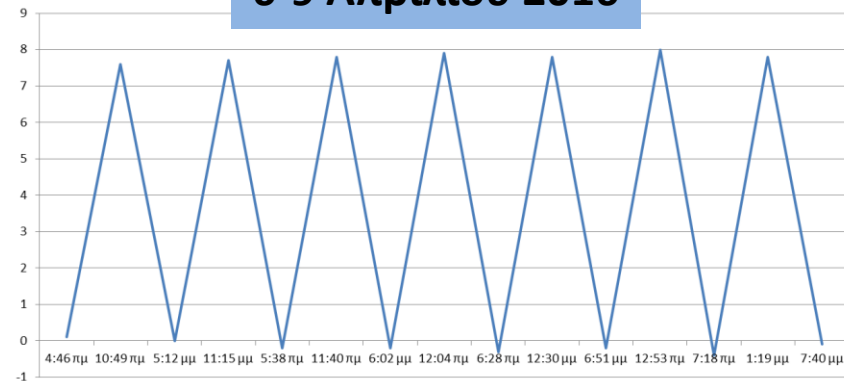
Saint Andrews (2016)



Απρίλιος 2016



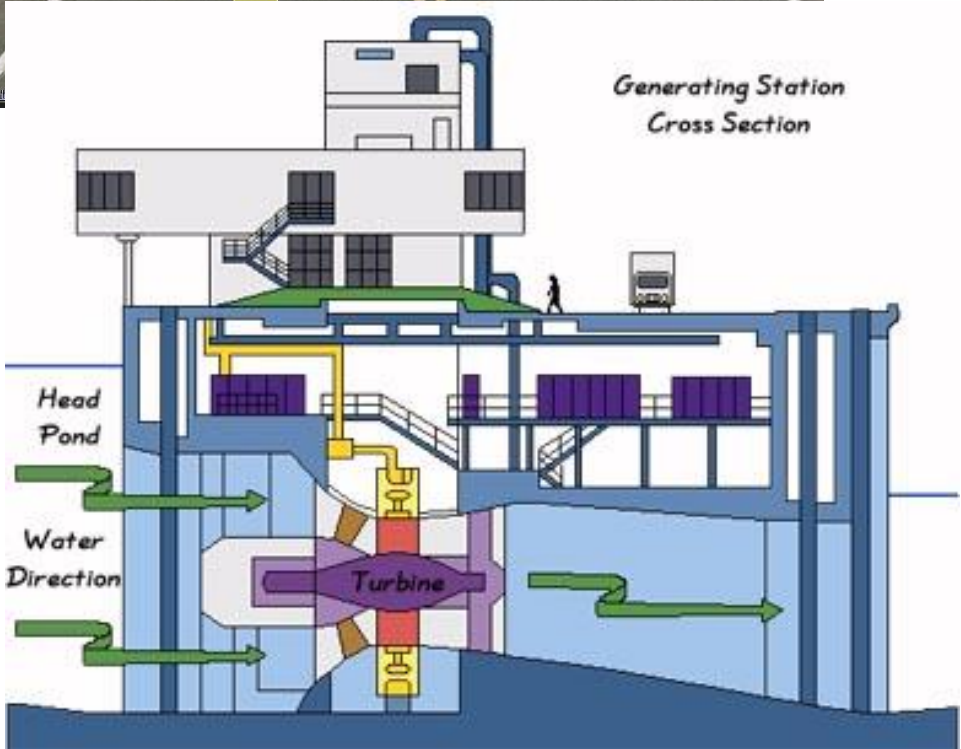
6-9 Απριλίου 2016



Παλιρροιακός σταθμός Annapolis



Παλιρροιακός σταθμός Annapolis



Παλιρροιακός σταθμός Annapolis

Χαρακτηριστικά μεγέθη

Θέση: Νέα Σκοτία, Καναδάς

Ιδιοκτητης: Nova Scotia Power

Έναρξη λειτουργίας: 1983

Περιγραφή: Φράγμα, όπου λειτουργούν θυροφράγματα και σταθμός παραγωγής ενέργειας, πάνω από το οποίο διέρχεται αυτοκινητόδρομος

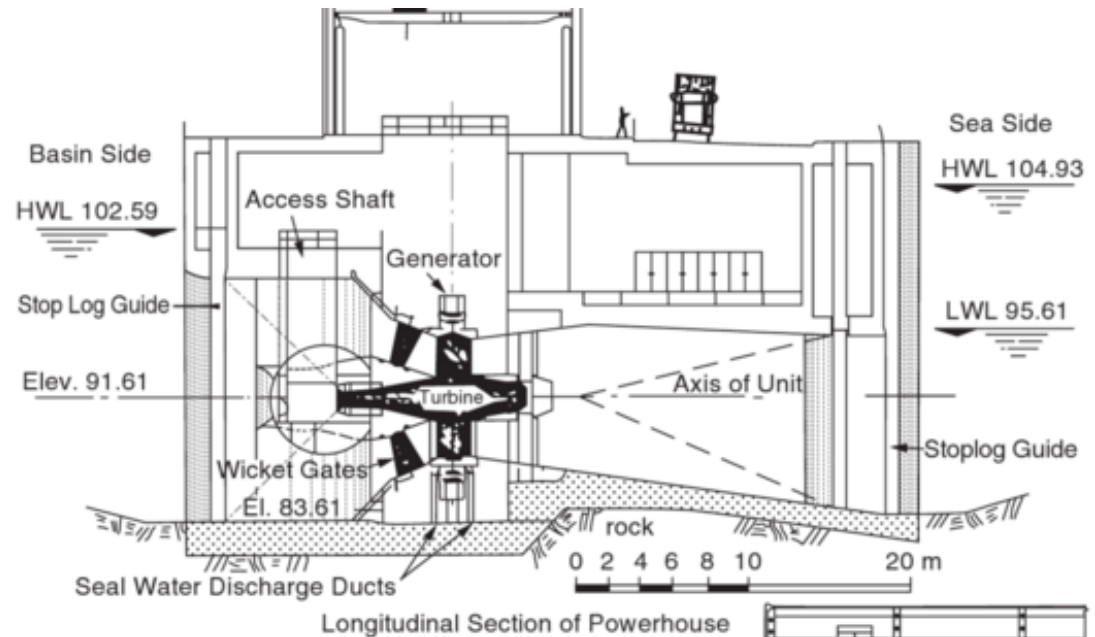
Στρόβιλος: Straflow

Εγκατεστημένη ισχύς: 20 MW

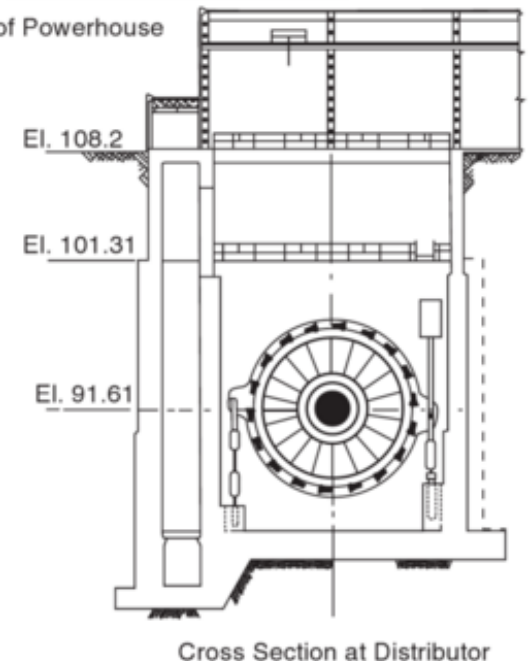
Ύψος πτώσης: 6 m

Παροχή λειτουργίας: 400 m³/s

Ετήσια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας: 30 GWh

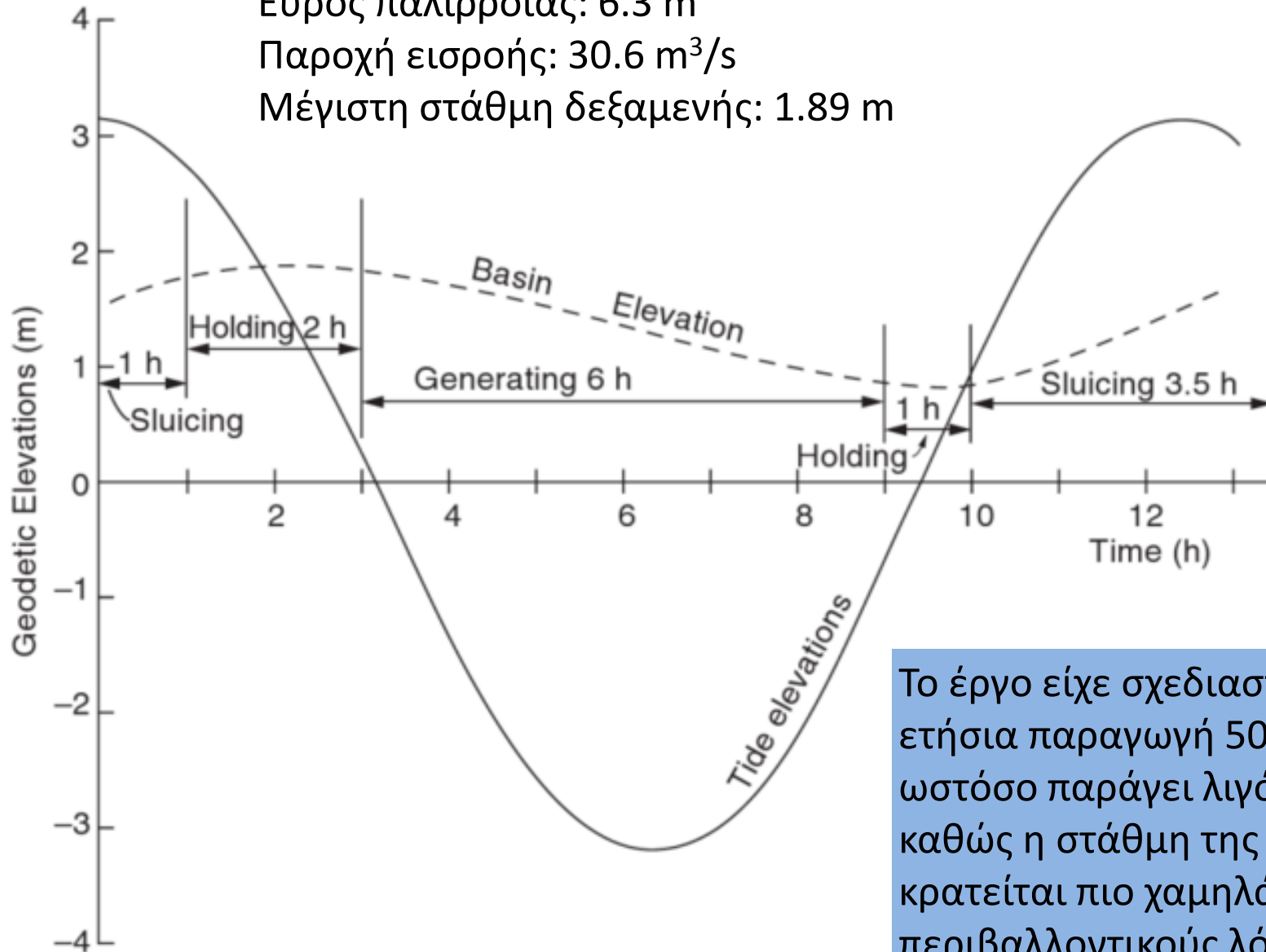


| MAIN PARAMETERS OF ANNAPOLIS TURBINE | |
|--------------------------------------|-------------------------|
| Throat diameter | 7.6 m |
| Speed | 50 rpm |
| Runaway speed | 98 rpm |
| Fixed propeller blades | 4 |
| Wicket gates | 18 |
| Rated head | 5.5 m |
| Maximum output at rated head | 19.6 MW |
| Maximum flow at rated head | 407.5 m ³ /s |
| Maximum output at 6-m head | 19.6 MW |
| Maximum flow at 6-m head | 383.6 m ³ /s |
| Rim seals | Hydrostatic |
| Sealing water requirement | 0.33 liters/m.s |



Παλιρροιακός σταθμός Annapolis: πρόγραμμα λειτουργίας

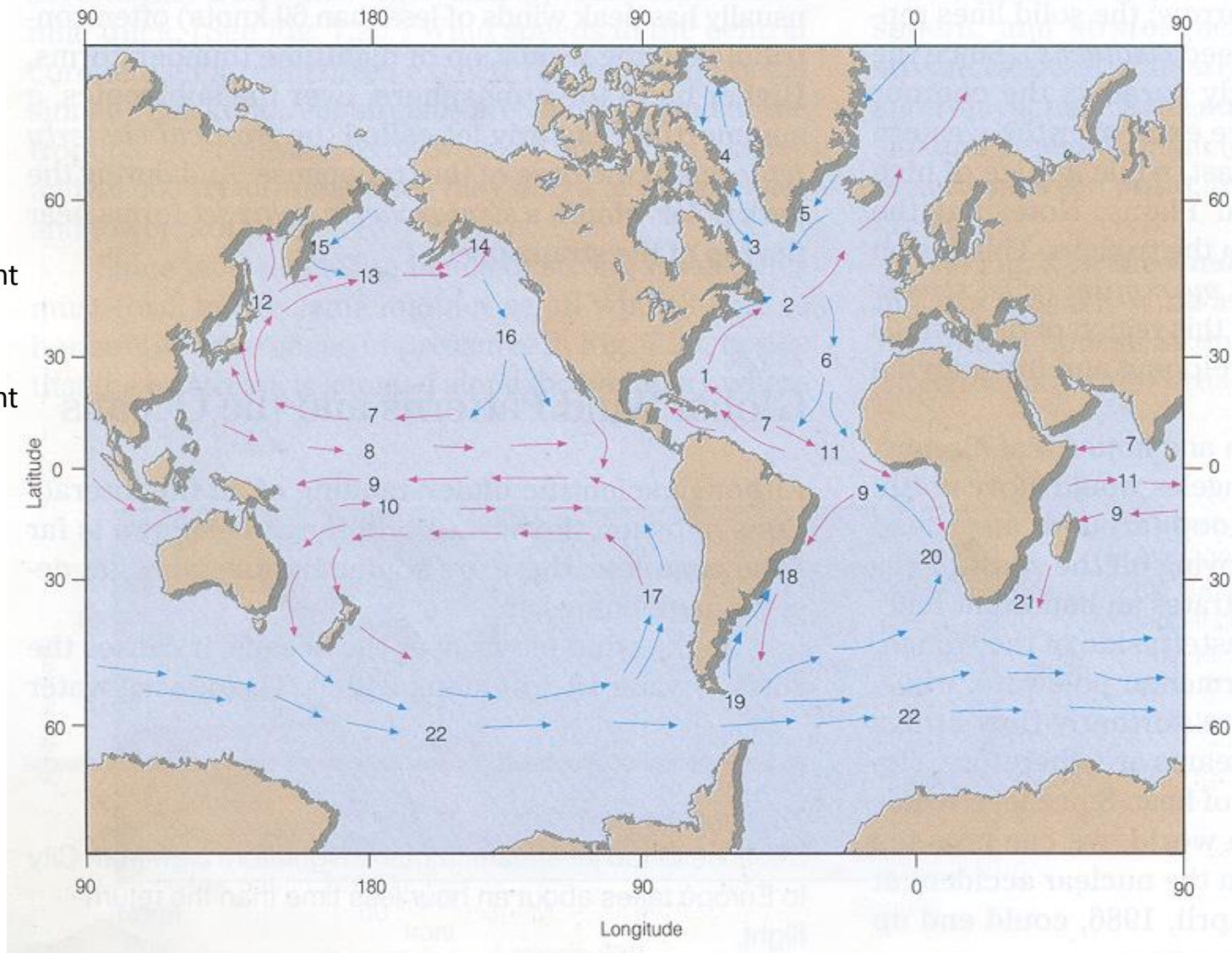
Εύρος παλίρροιας: 6.3 m
Παροχή εισροής: 30.6 m³/s
Μέγιστη στάθμη δεξαμενής: 1.89 m



Το έργο είχε σχεδιαστεί για ετήσια παραγωγή 50 GWh, ωστόσο παράγει λιγότερο, καθώς η στάθμη της λεκάνης κρατείται πιο χαμηλά για περιβαλλοντικούς λόγους

Θαλάσσια ρεύματα

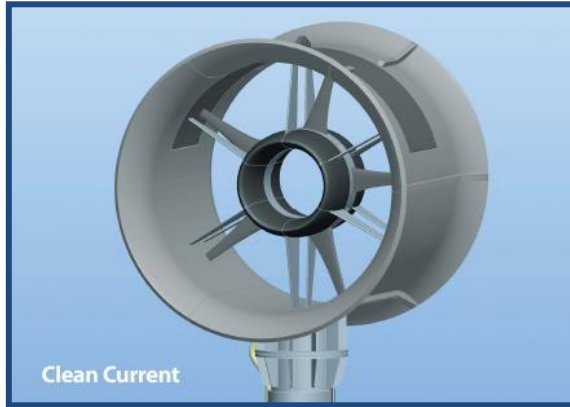
1. Gulf Stream
2. North Atlantic Drift
3. Labrador Current
4. West Greenland Drift
5. East Greenland Drift
6. Canary Current
7. North Equatorial Current
8. North Equatorial Countercurrent
9. South Equatorial Current
10. South Equatorial Countercurrent
11. Equatorial Countercurrent
12. Kuroshio Current
13. North Pacific Drift
14. Alaska Current
15. Oyashio Current
16. California Current
17. Peru Current
18. Brazil Current
19. Falkland Current
20. Benguela Current
21. Agulhas Current
22. West Wind Drift



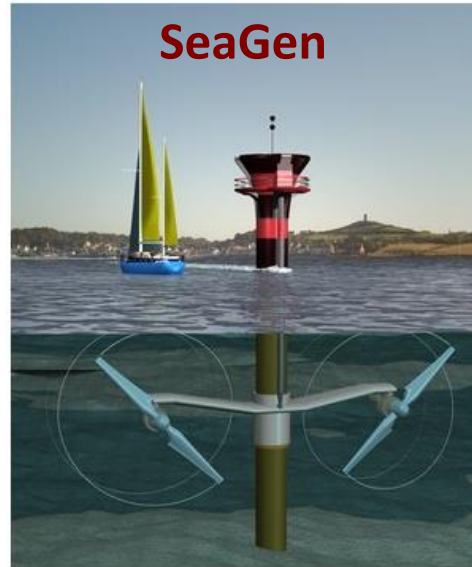
Πηγή: Ahrens, C. D., *Essentials of Meteorology, An Invitation to the Atmosphere*, 1993

Στρόβιλοι για παλίρροιας και ρεύματα

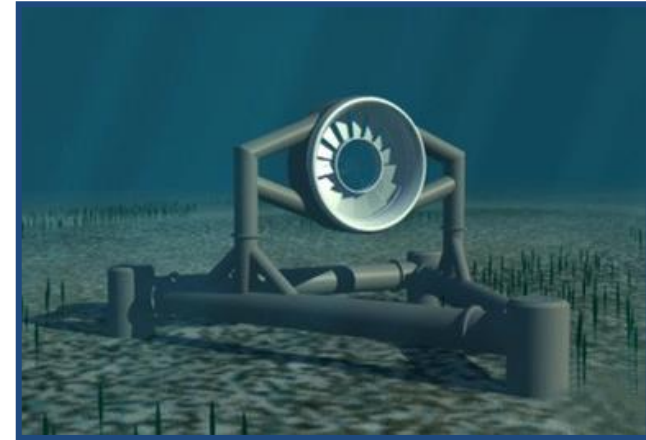
Clean Current



SeaGen



Open Hydro



Το ενεργειακό δυναμικό για την περίπτωση ενός συστήματος οριζόντιου άξονα μπορεί να υπολογιστεί με την ίδια θεωρία που χρησιμοποιείται και για τις ανεμογεννήτριες. Ο τύπος της ισχύος έχει τη μορφή:

$$P = 0.5 n \rho V^3 A$$

όπου:

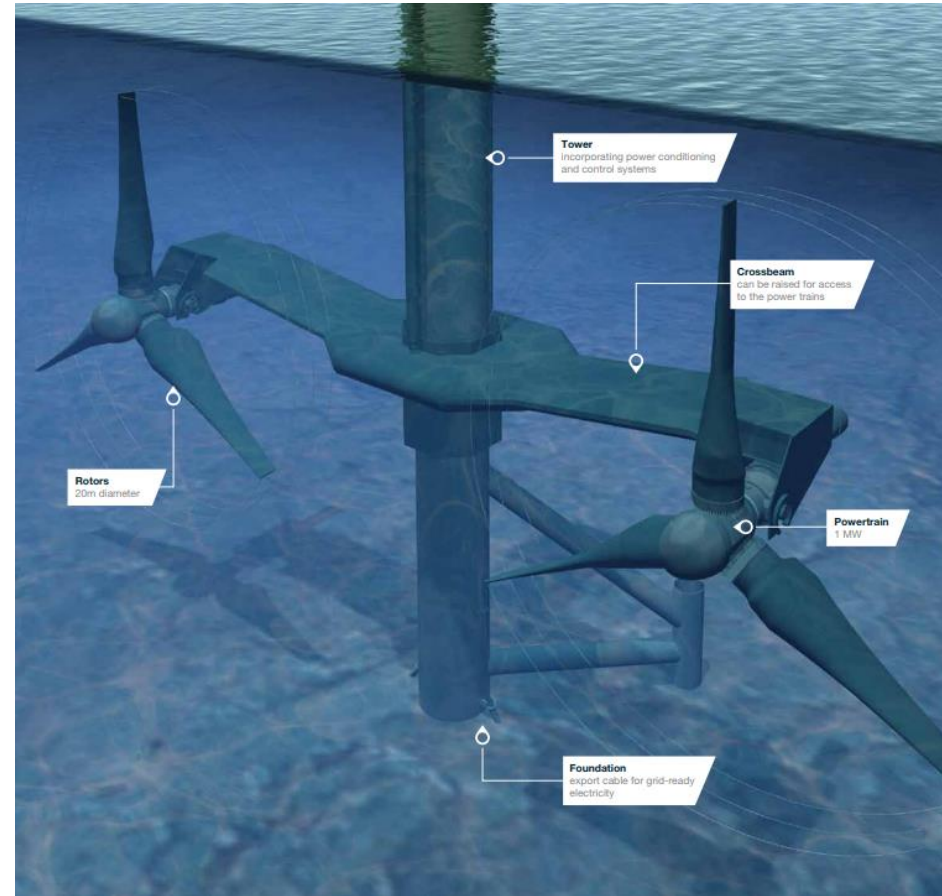
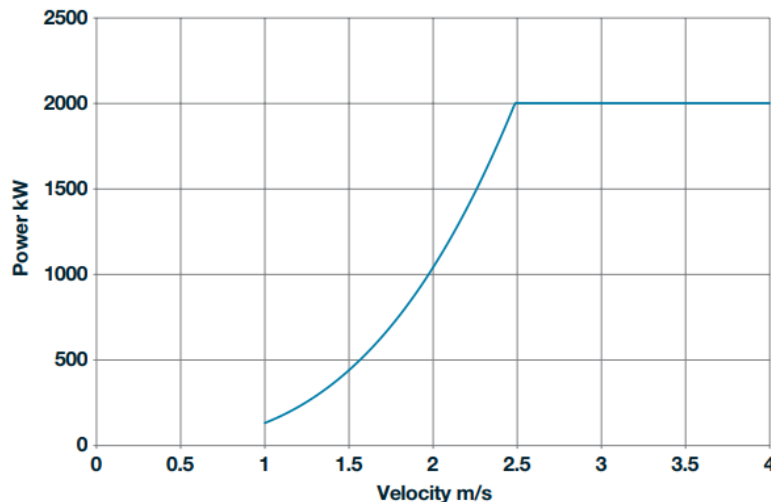
- P : η παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς (W)
- n : ο συνολικός βαθμός απόδοσης
- ρ : η πυκνότητα του νερού (1025 kg/m^3)
- V : η ταχύτητα κίνησης του νερού (m/s)
- A : η επιφάνεια (m^2)

Δεδομένου ότι η πυκνότητα του νερού είναι περίπου **835 φορές** μεγαλύτερη από αυτήν του ανέμου, η θεωρητική ισχύς που αντιστοιχεί σε ένα θαλάσσιο ρεύμα με ταχύτητα **2 m/s** ισοδυναμεί με αυτήν που αντιστοιχεί σε ταχύτητα ανέμου **19 m/s**

Στρόβιλοι για παλίρροιας και ρεύματα



Power Curve for SeaGen -S 2MW



Ισχύς στροβίλου: **1 MW**

Διάμετρος: **20 m**

Στην ταχύτητα των **2.5 m/s** η απόδοση εκτιμάται στο **41%**

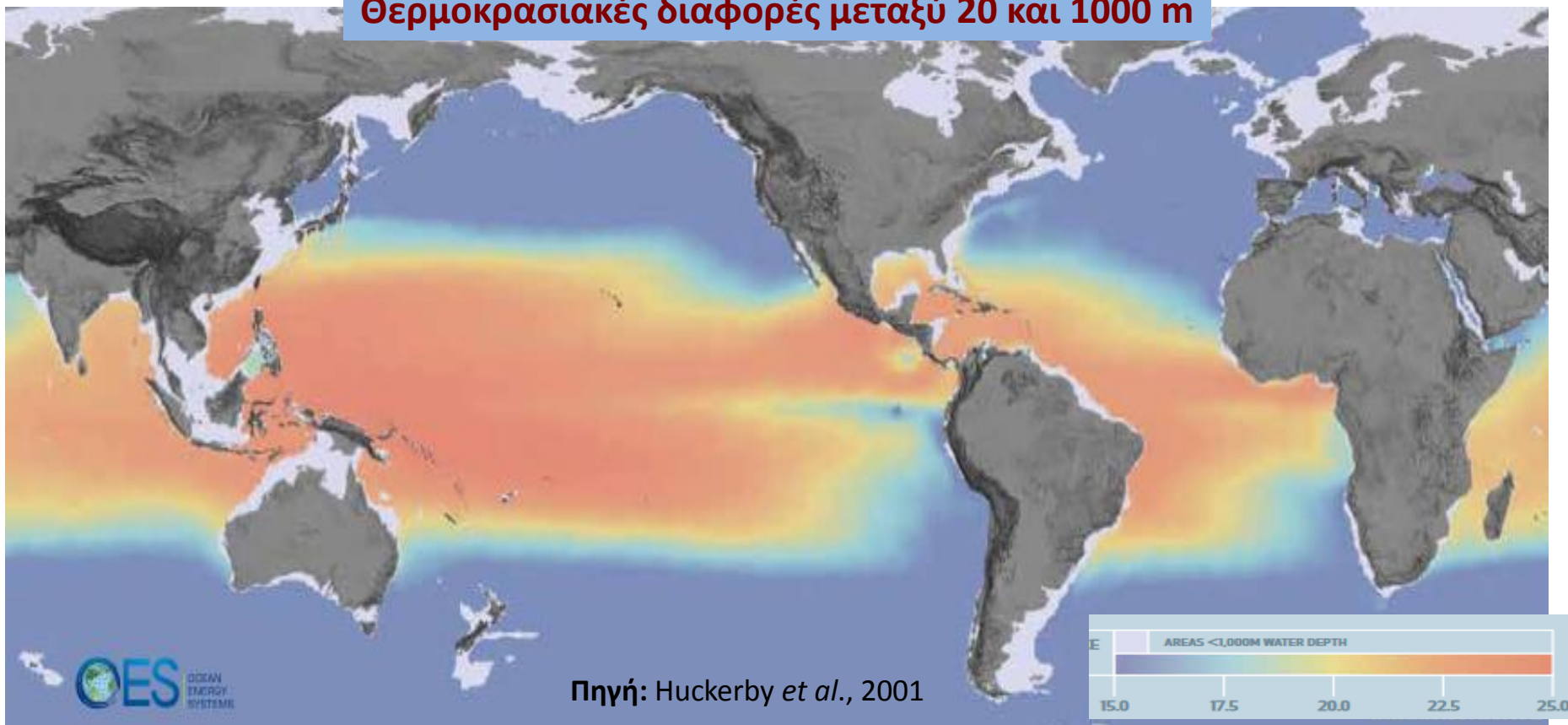
Θαλασσοθερμική ενέργεια: Φυσικό πλαίσιο

Γενική αρχή: μετατροπή της θερμικής ενέργειας των ωκεανών σε ηλεκτρική (Ocean Thermal Energy Conversion, OTEC).

Συνίσταται στην εκμετάλλευση της ενέργειας που είναι αποθηκευμένη στα νερά του ωκεανού με την μορφή της διαφοράς θερμοκρασίας (θερμική κλίση-θερμοκλινές)

Για να είναι εκμεταλλεύσιμη θα πρέπει η διαφορά θερμοκρασίας να είναι περίπου 20°C, σε βάθος περίπου 1000 m.

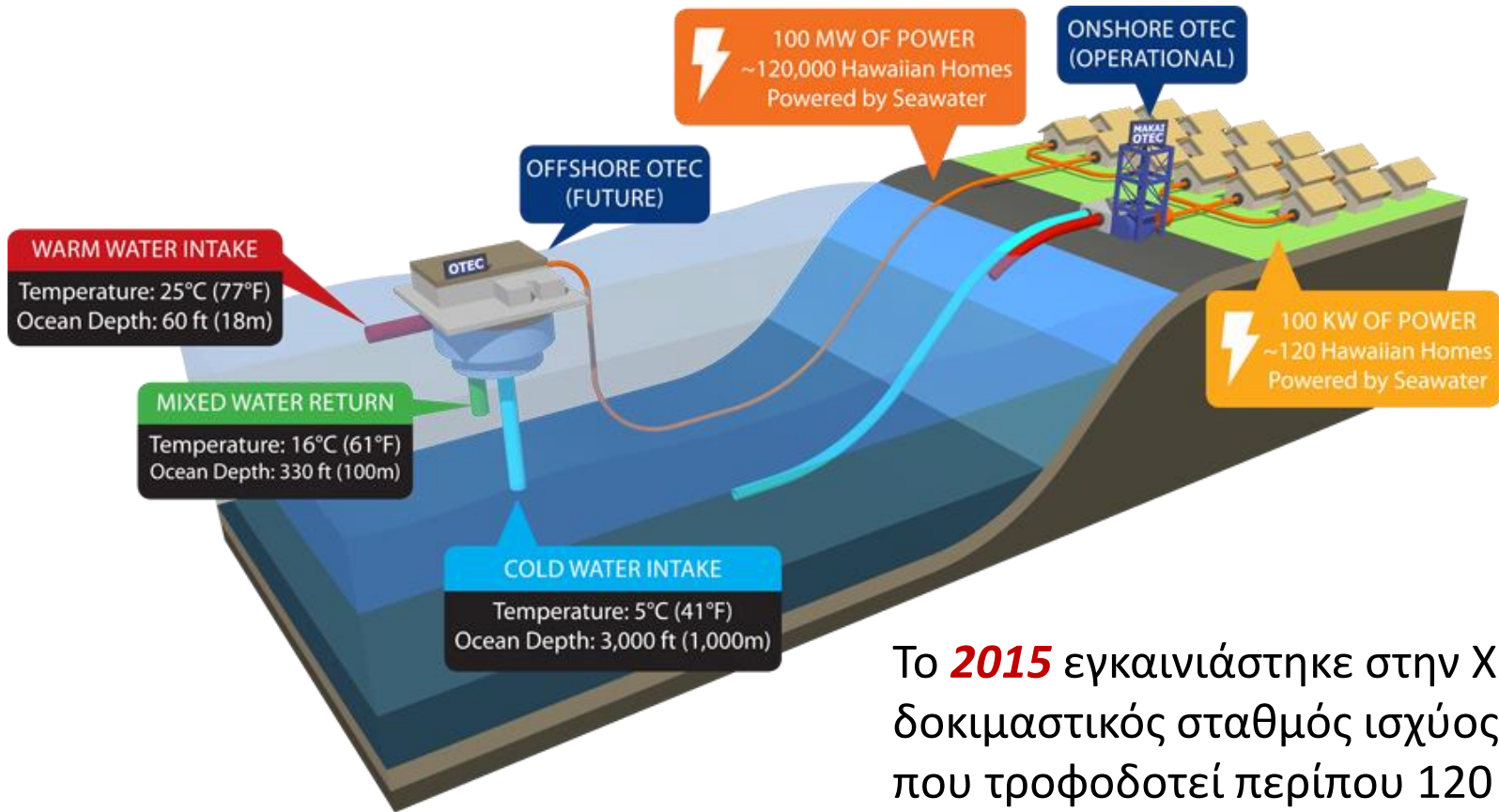
Θερμοκρασιακές διαφορές μεταξύ 20 και 1000 m



Πηγή: Huckerby *et al.*, 2001

Θαλασσοθερμική ενέργεια: Τεχνολογία

Το πρωτότυπο «Mini-OTEC» κατασκευάστηκε το **1979** και εγκαταστάθηκε στην Χαβάη των ΗΠΑ. Πρόκειται για μία πλωτή συσκευή, κλειστού κύκλου με αμμωνία. Η ονομαστική ισχύς ήταν **53 kW**, αλλά τα προβλήματα άντλησης επέτρεπαν την απόδοση μόνο **18 kW**.



Το **2015** εγκαινιάστηκε στην Χαβάη ένας δοκιμαστικός σταθμός ισχύος **100 kW**, που τροφοδοτεί περίπου 120 νοικοκυριά. Εξετάζεται μελλοντικά η κατασκευή, ενός πλωτού σταθμού, ισχύος **100 MW**.

Θαλασσοθερμική ενέργεια: Συστήματα εκμετάλλευσης

Η εκμετάλλευση γίνεται με ειδικές συστοιχίες αγωγών που αντλούν **από τον βυθό το κρύο νερό και από την επιφάνεια το ζεστό** σε ειδικές κατασκευές, στις οποίες, είτε με την βοήθεια ενός ακόμα υγρού είτε όχι, λαμβάνουν χώρα οι απαραίτητες διεργασίες για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Ανοιχτού κύκλου

- Το ζεστό νερό της επιφάνειας μεταφέρεται σε έναν θάλαμο κενού αέρος και εξατμίζεται, ενώ το αλάτι κατακάθεται στον πάτο του θαλάμου.

- Ο ατμός διέρχεται μέσω στροβίλων, για την **παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας**, και στη συνέχεια συμπυκνώνεται με την χρήση του κρύου νερού από τον βυθό της θάλασσας.

- Από τη διεργασία παράγεται **αφαλατωμένο νερό**.

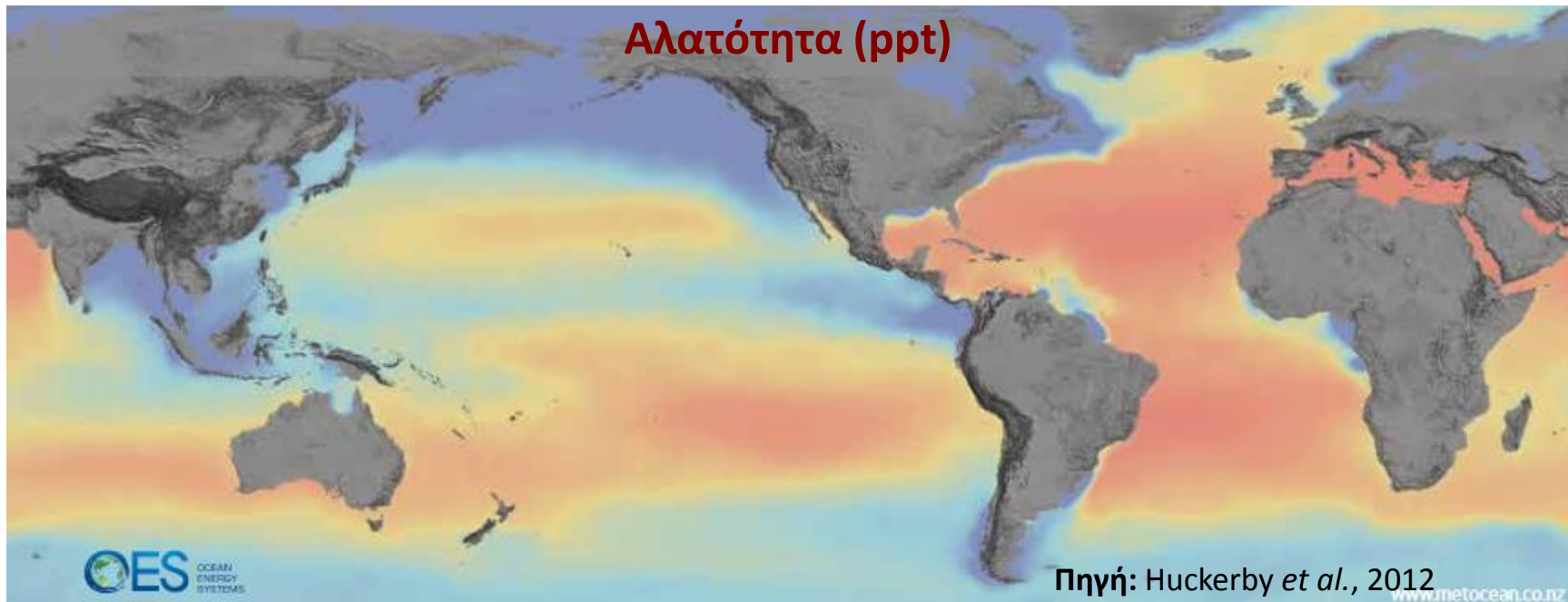
Κλειστού κύκλου

- Το ζεστό νερό της επιφάνειας μεταφέρεται σε θαλάμους, όπου αυξάνεται η θερμοκρασία του, ενώ εκεί ένα άλλο υγρό (αμμωνία, προπάνιο, χλωροφθοράνθρακες) με χαμηλό σημείο βρασμού εξατμίζεται.

- Από τη διεργασία παράγεται **υγρή αμμωνία**, η οποία θα ξαναχρησιμοποιηθεί στον επόμενο κύκλο παραγωγής ενέργειας.

Ωσμωτική ενέργεια: Φυσικό πλαίσιο

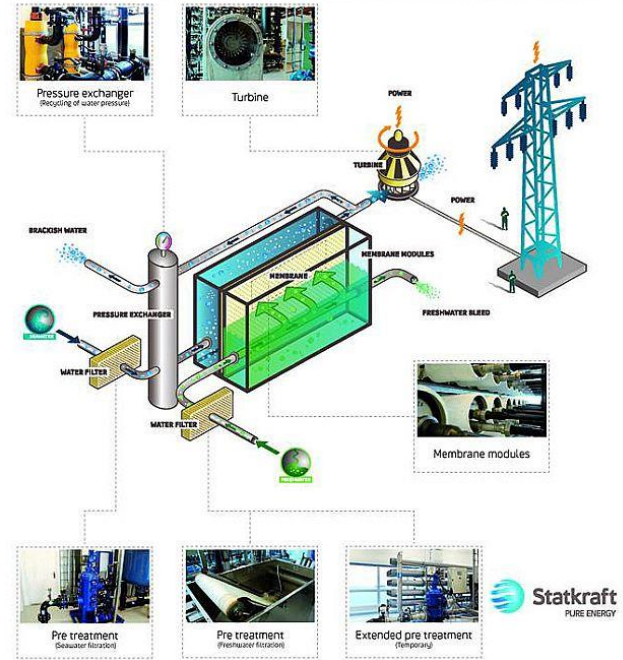
- Ωσμωση ονομάζεται η φυσική διαδικασία κατά την οποία μόρια διαλύτη διέρχονται μέσω ημιπερατής μεμβράνης, από το διάλυμα μικρότερης συγκέντρωσης (αραιότερο) στο διάλυμα μεγαλύτερης συγκέντρωσης (πυκνότερο), έως ότου οι συγκεντρώσεις των διαλυμάτων και στις δύο πλευρές να εξισωθούν.
- Αποτέλεσμα της διεργασίας αυτής είναι η συσσωρευμένη πίεση από την μονόπλευρη ροή του νερού, η οποία αξιοποιείται για την παραγωγή ενέργειας.
- Στην εκμετάλλευση της ωσμωτικής ενέργειας, **το αραιότερο διάλυμα είναι το γλυκό νερό των ποταμών και των λιμνών και το πυκνότερο το αλμυρό νερό της θάλασσας.** Με την τοποθέτηση μια ημιπερατής μεμβράνης διαχωρισμού των δύο υγρών σε ειδικές κατασκευές και κατάλληλους μετατροπείς παράγεται ενέργεια σε αξιοποιήσιμες μορφές



Ωσμωτική ενέργεια: Τεχνολογία

- Η αλμυρότητα των νερών των ποταμών και των λιμνών φτάνει μέχρι την τιμή των **0.5 ppt**, οπότε σε εκβολές μεγάλων ποταμών σε περιοχές με μεγάλη αλατότητα (Κονγκό, Αμαζόνιος), καθώς και σε περιοχές με μεγάλες συγκεντρώσεις αλατιού (π.χ. Μεσόγειος), υπάρχουν δυνατότητες εκμετάλλευσης της ωσμωτικής ενέργειας.
- Η πρώτη απόπειρα εκμετάλλευσης έγινε τη δεκαετία του 1970 στο Ισραήλ, στις εκβολές του ποταμού Ιορδάνη στην Νεκρά Θάλασσα.
- Το πρώτο πιλοτικό εργοστάσιο, ισχύος **4 kW**, λειτούργησε το 2009 στη Νορβηγία και κόστισε **7 M\$**. Στη θέση του έργου η πρόσβαση σε θαλασσινό νερό θεωρούνταν επαρκής και ποσότητες γλυκού νερού αντλούνταν από κοντινή λίμνη. Μετά από 4 έτη, θεωρήθηκε ότι η τεχνολογία δεν μπορεί να αναπτυχθεί επαρκώς ώστε να καταστεί ανταγωνιστική, και το εργοστάσιο διέκοψε την λειτουργία του.
- Σήμερα το σημαντικότερο έργο αξιοποίησης της είναι η μονάδα παραγωγής στο Afsluitdijk της Ολλανδίας που λειτούργησε το 2014. Αντλεί νερό από θάλασσα και λίμνη.
- Γενικά, η ωσμωτική ενέργεια **δεν θεωρείται εμπορικά αξιοποιήσιμη**.

OSMOTIC POWER PROTOTYPE



Θαλάσσια ενέργεια: Επιδράσεις στο περιβάλλον

- Η κατασκευή γίνεται στην ξηρά, και στη συνέχεια εγκαθίσταται στη θάλασσα. Κατά την εγκατάσταση προκαλούνται: αιώρηση ιζημάτων, αύξηση κίνησης πλοίων, θόρυβος.
- Κατά την λειτουργία προκαλούνται: μεταβολές των ρευμάτων και των ιζημάτων, συνεχείς επισκέψεις για την παρακολούθηση εξοπλισμού.
- Επίδραση στον πυθμένα εξαιτίας των συσκευών και των καλωδίων και καταστροφή τοπικών βενθικών κοινοτήτων.
- Μείωση των ταχυτήτων ρεύματος και κατά συνέπεια εναπόθεση βαρύτερων ιζημάτων.
- Η διάβρωση και εναπόθεση ιζήματος προκαλεί διαταραχή του οικοσυστήματος.
- Αύξηση των οικοσυστημάτων οστρακοειδών. Για την αποτροπή της προσκόλλησης στις συσκευές χρησιμοποιούνται χημικά.
- Η λειτουργία επιδρά στα ψάρια: θάνατο από τη σύγκρουση (δεν τοποθετούνται στα μεταναστευτικά μονοπάτια), βλάβη στην ακοή, ρήξη οργάνων, αλλαγή στη συγκέντρωση πληθυσμού, τα ηλεκτρομαγνητικά πεδία απωθούν ή ελκύουν είδη που κινούνται βασισμένα στο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο της γης.
- Στα θαλάσσια θηλαστικά υπάρχει μικρή επιρροή: σύγκρουση (μονοπάτια μετανάστευσης), και έμμεσα από την κατανομή των θηραμάτων τους.
- Σύγκρουση πουλιών στις επιφανειακές συσκευές.
- Ο χρόνος ζωής εκτιμάται σε 20 χρόνια και στη συνέχεια παραμένουν στον βυθό η βάση της κατασκευής και τα καλώδια.