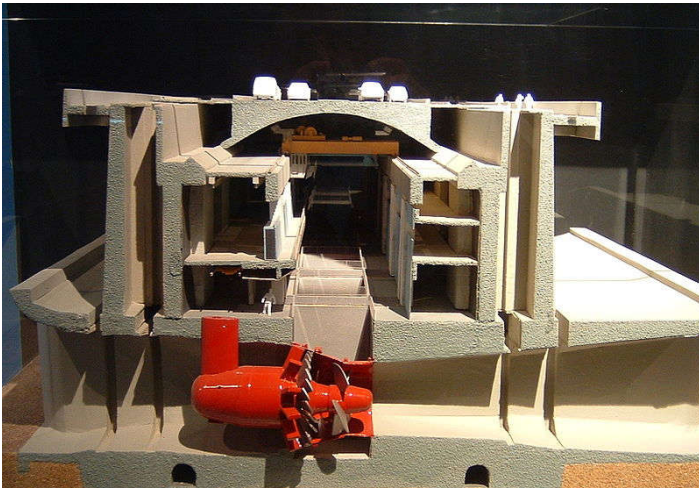


Εισαγωγή στην Ενεργειακή Τεχνολογία

Θαλάσσια Ενέργεια



Νίκος Μαμάσης και Α. Ευστρατιάδης
Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος
Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα 2024

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).

Ρευστοδυναμική

κυματισμός

παλίρροιες

θαλασσιά ρεύματα

Φυσικοχημικές ιδιότητες του νερού

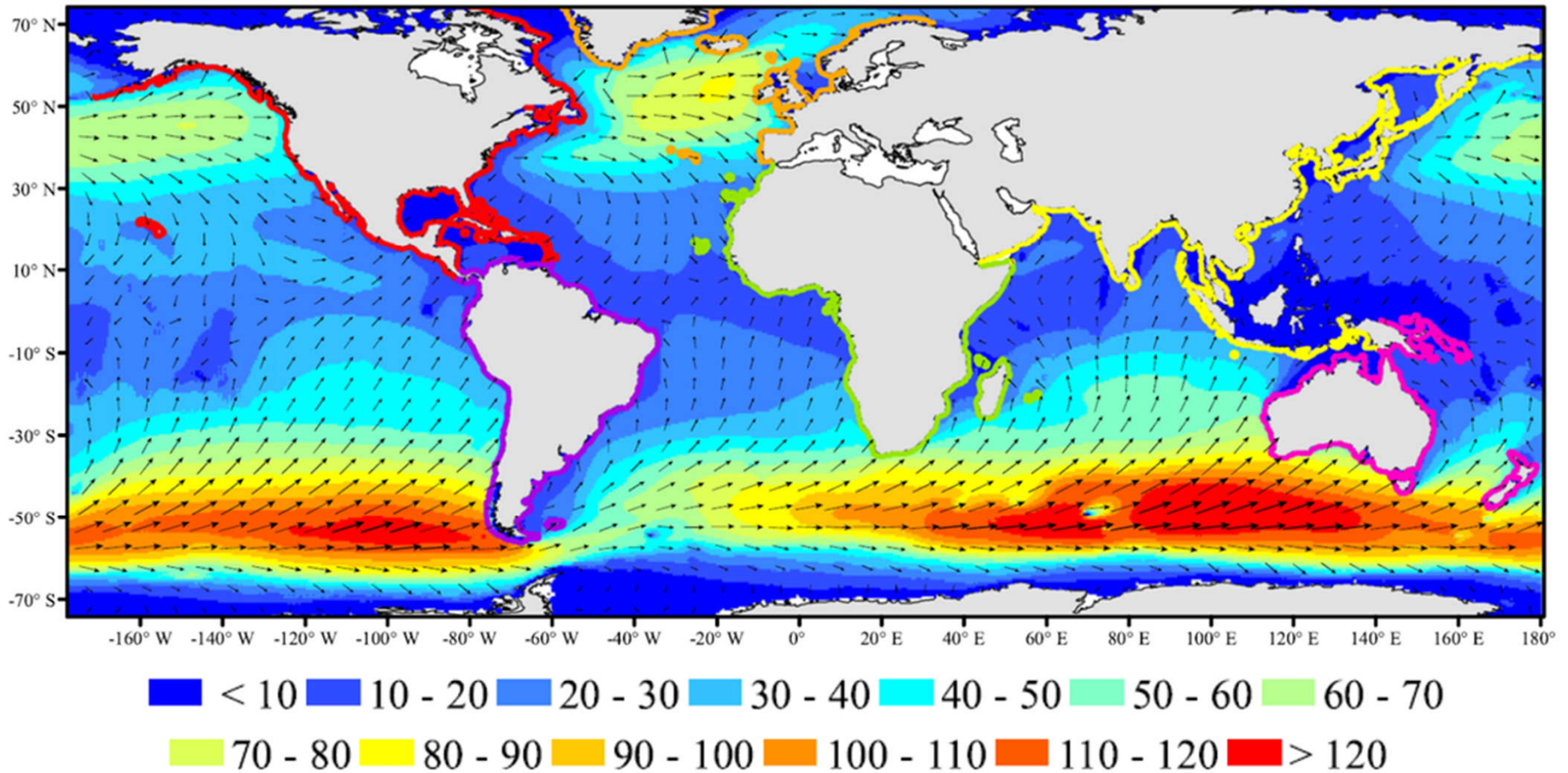
θαλασσοθερμική

οσμωτική

Κυματική ενέργεια

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)

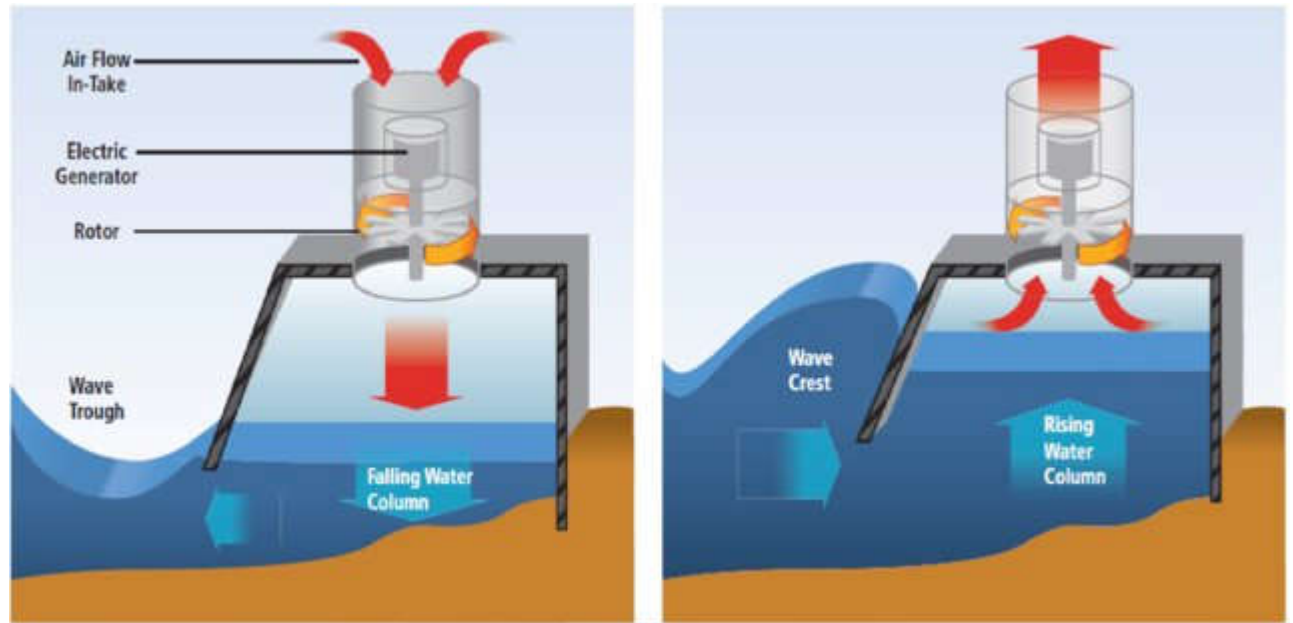


Πηγή: Gunn and Stock-Williams, Quantifying the global wave power resource (2012).

Κυματική ενέργεια

Μετατροπείς ταλαντευόμενης στήλης ύδατος

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



Πηγή: Oscillating Water Column device (Lewis et al., 2011).

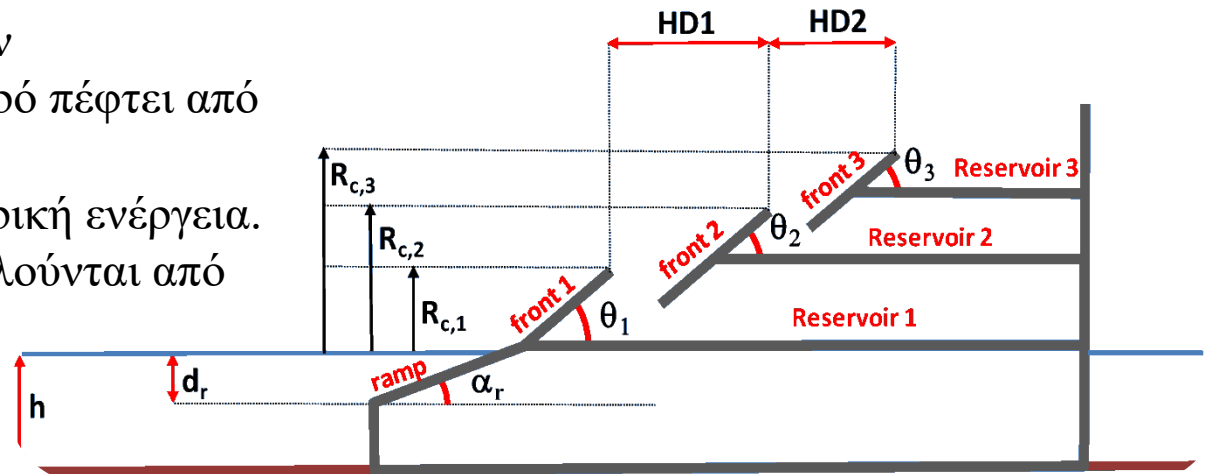
Limpet (WaveGen)
Νήσος Islay (Δυτικά της Σκωτίας)
Έναρξη λειτουργίας: 2000
Εγκατεστημένη ισχύς: 500 kW



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 D. et al., 2019

SSG (WAVEenergy)

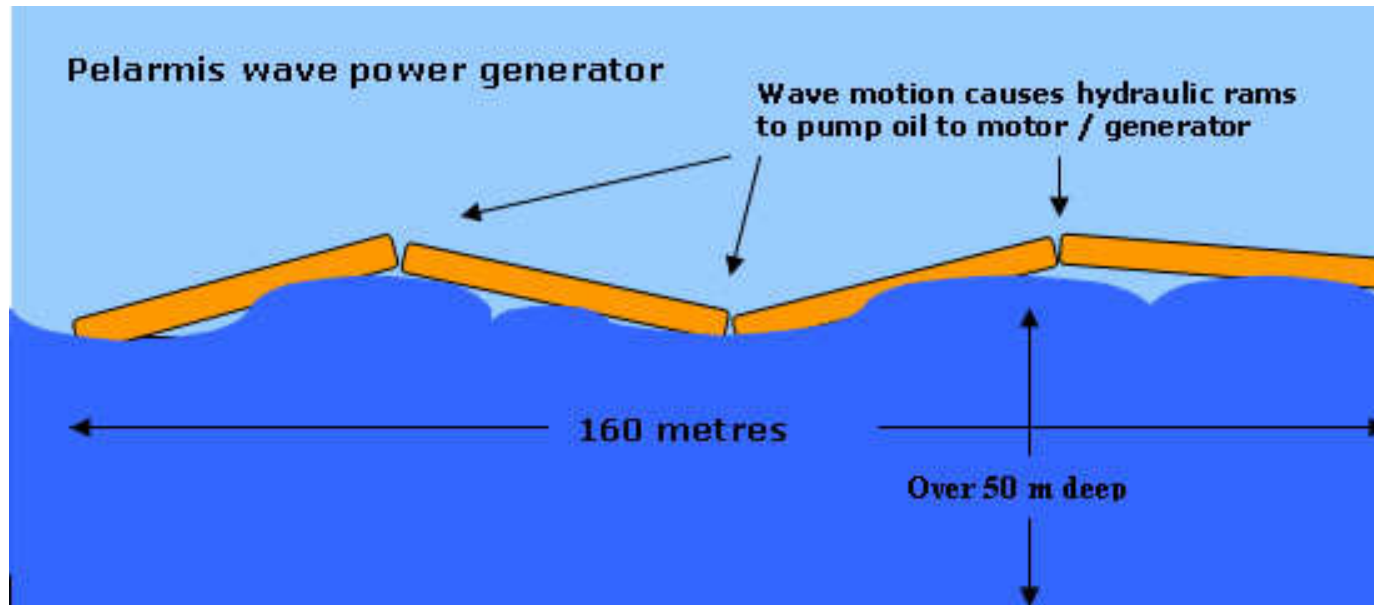
Νήσος Kvistøy, Νορβηγία

Έναρξη λειτουργίας: 2008 Εγκατεστημένη ισχύς: **150 kW**

Κυματική ενέργεια

Πλωτοί μετατροπείς

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

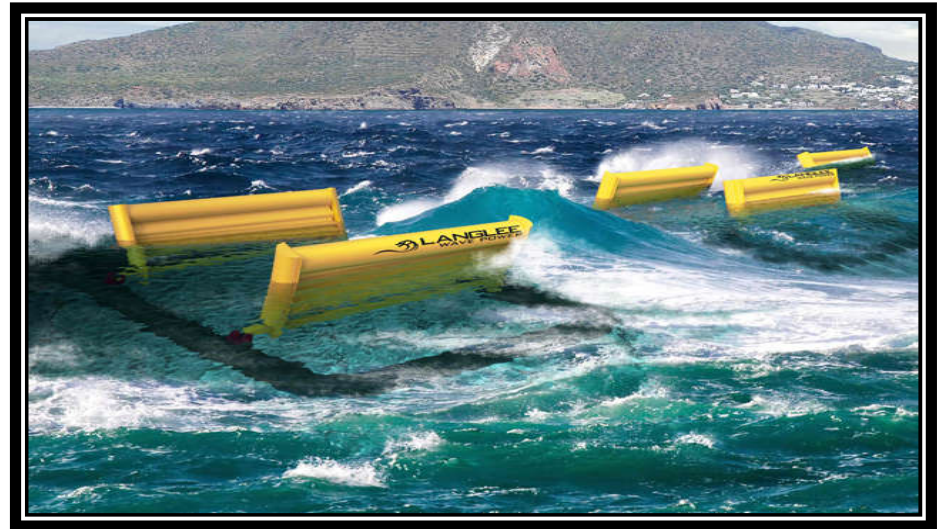


Pelamis P2 (Pelamis Wave Power)
Νήσος Orkney, Βόρεια της Σκωτίας)
Εναρξη λειτουργίας: 2010
Εγκατεστημένη ισχύς: **750 kW**

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

Κόστος

Ο συντελεστής δυναμικότητας των μετατροπέων κυμαίνεται από **25-40 %**

Ενδεικτικά οικονομικά στοιχεία μετατροπέων

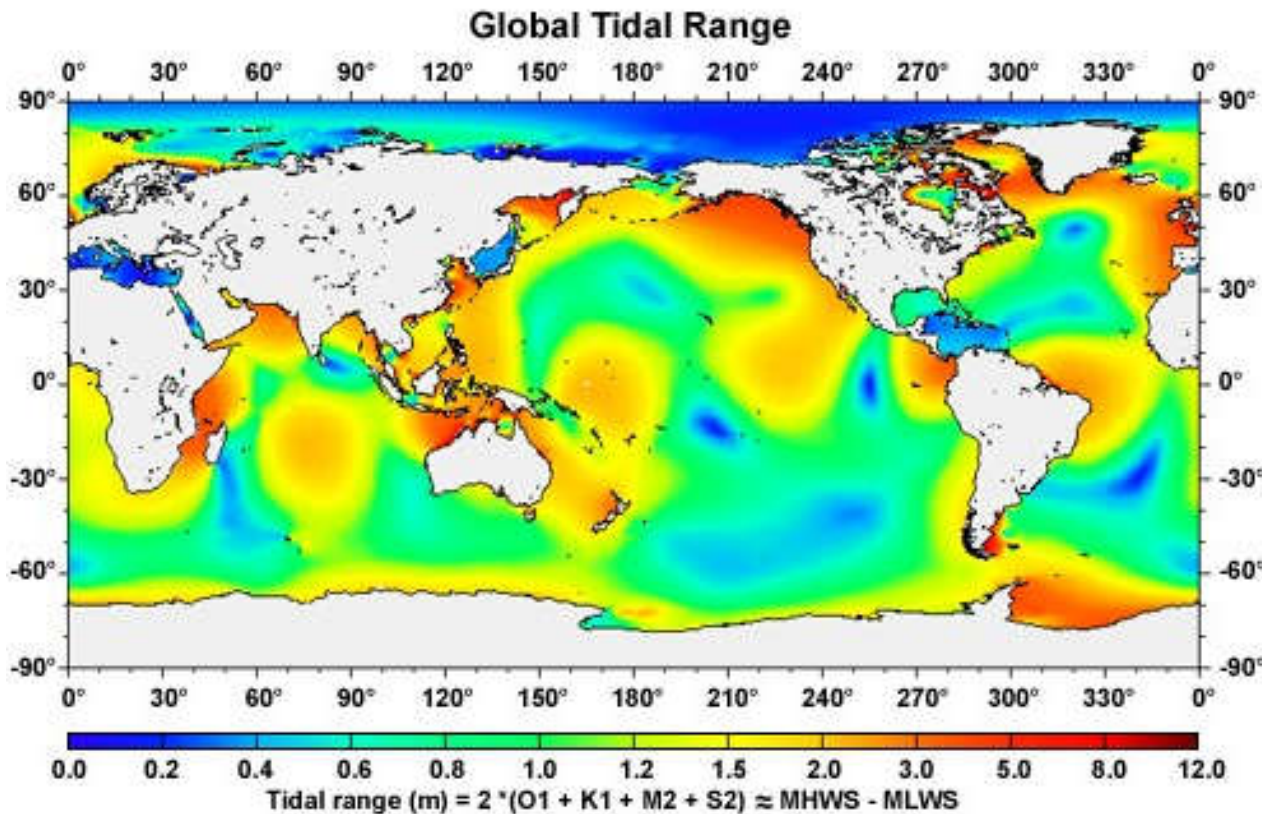
Μετατροπέας	Εγκατεστημένη ισχύς (kW)	Κόστος εγκατάστασης (€)	Κόστος παραγωγής (€/kWh)
OE Buoy (Στήλη ύδατος)	1250	5.000.000	0,18
Relamis P2 (Πλωτήρας)	750	3.220.000	0,19
SSG (Υπερπηδητή συσκευή)	150	630.000	0,19
Robusto (Συσκευή κρούσης)	132	528.000	0,18

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

Ενέργεια από παλίρροιες

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

Εύρος παλίρροιας (m)

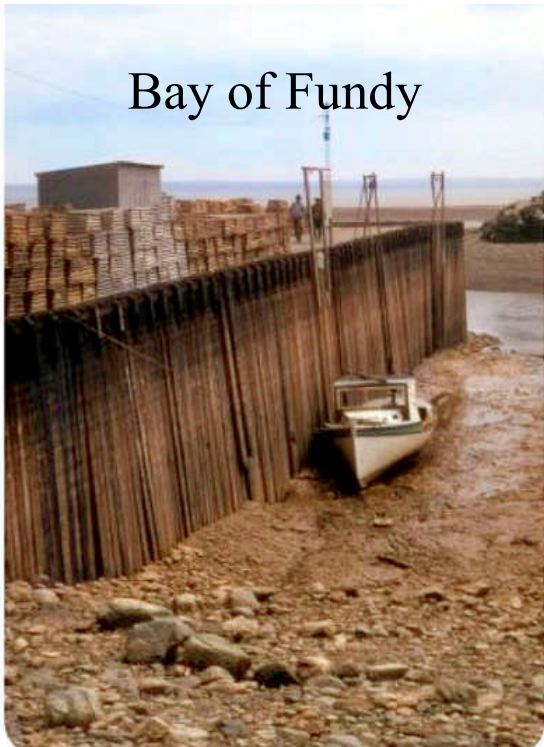


Courtesy of James Chittleborough, National Tidal Centre, BoM
Copyright Commonwealth of Australia, reproduced by permission

Έντονα φαινόμενα

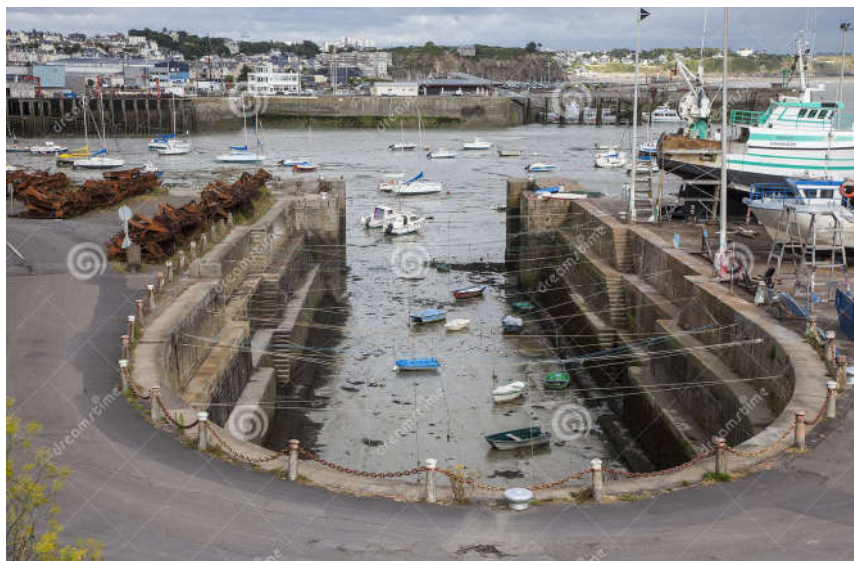
Χώρα	Τοποθεσία	Εύρος (m)
Καναδάς	Bay of Fundy	16,2
Αγγλία	Severn Estuary	14,5
Γαλλία	Port of Ganville	14,7
Γαλλία	La Rance	13,5
Ρωσία	Penzhinskaya Guba	13,4
Αργεντινή	Puerto Rio Gallegos	13,3
Ρωσία	Bay of Mezen	10

Bay of Fundy



Ενέργεια από παλίρροιες Έντονα φαινόμενα

Port of Granville, Normandy



Berwickshire, Scotland

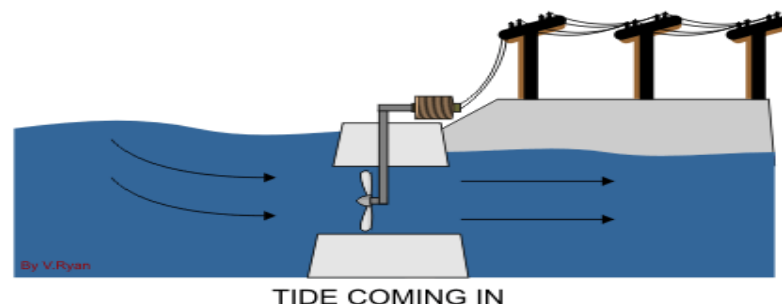


Ενέργεια από παλίρροιες

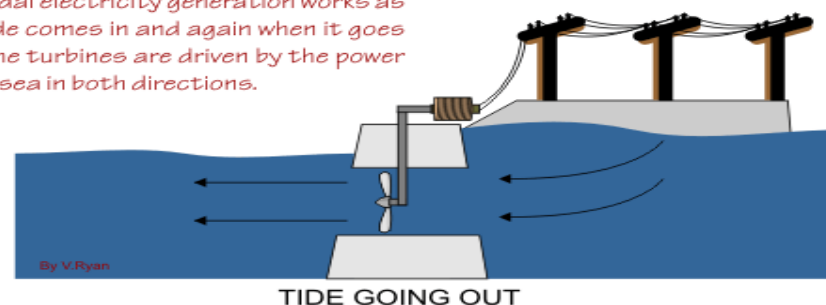
Παλιρροιακά Φράγματα (Tidal barrage – lagoons)

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



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.

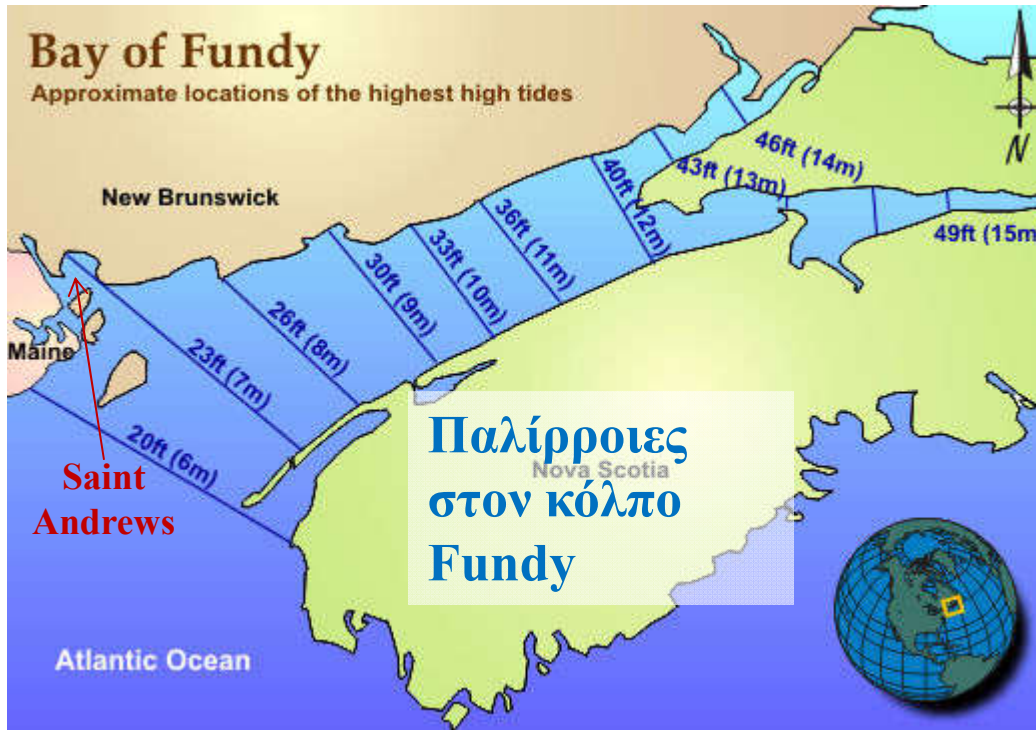


Εγκατεστημένες μονάδες

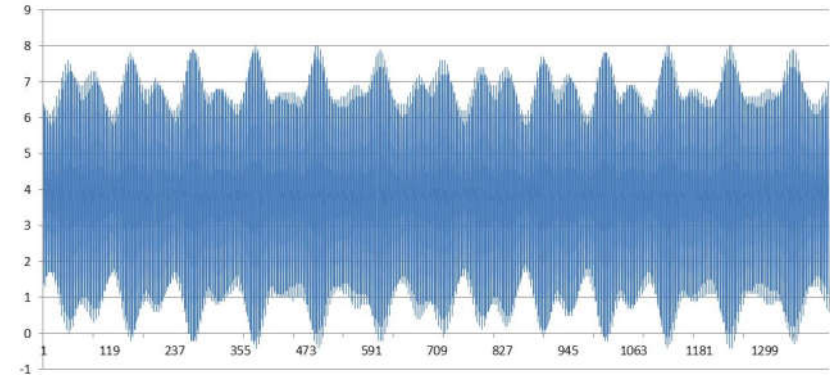
Χώρα	Τοποθεσία	Εγκατεστημέν ισχύς (MW)	Έκταση λεκάνης (km ²)	Μέση παλίρροια (m)
Κορέα	Sihwa (2011)	254		
Γαλλία	La Rance (1966)	240	22	8,55
Καναδάς	Annapolis (1984)	20	15	6,4
Κίνα	Jiangxia	3,9	1,4	5,08
Ρωσία	Kislaya (1968)	1.7	1,1	2,3

Ενέργεια από παλίρροιες

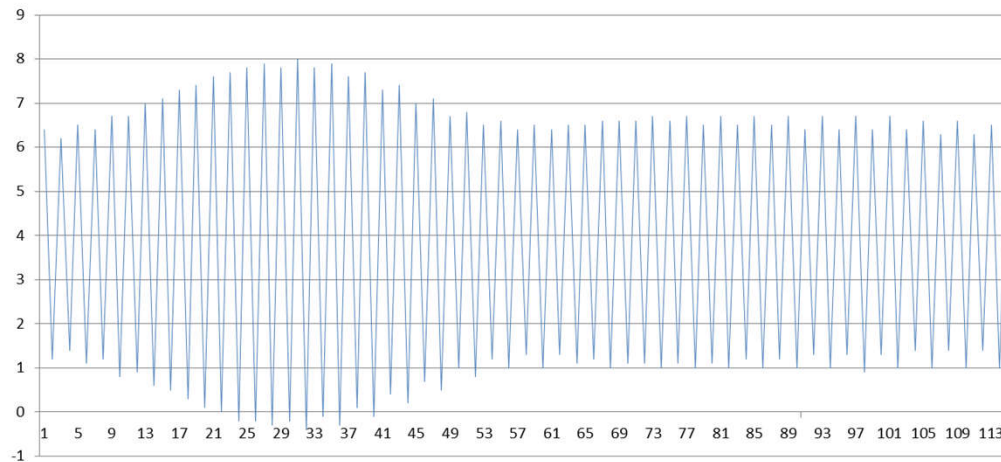
Παλιρροιακός σταθμός Annapolis



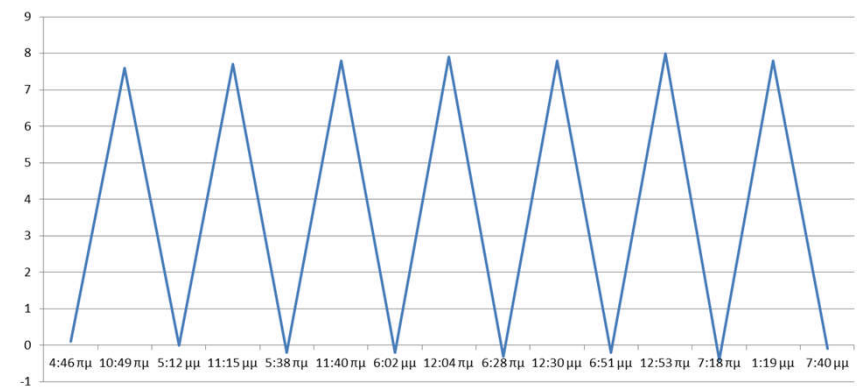
Saint Andrews (2016)



Απρίλιος 2016



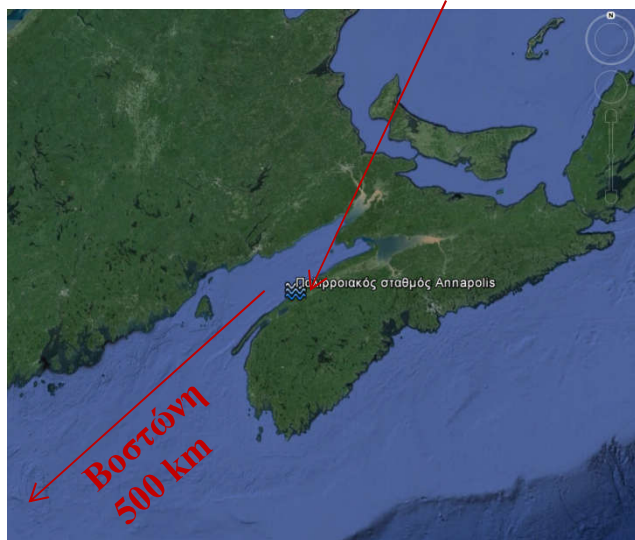
6-9 Απριλίου 2016



Ενέργεια από παλίρροιας

Παλιρροιακός σταθμός Annapolis

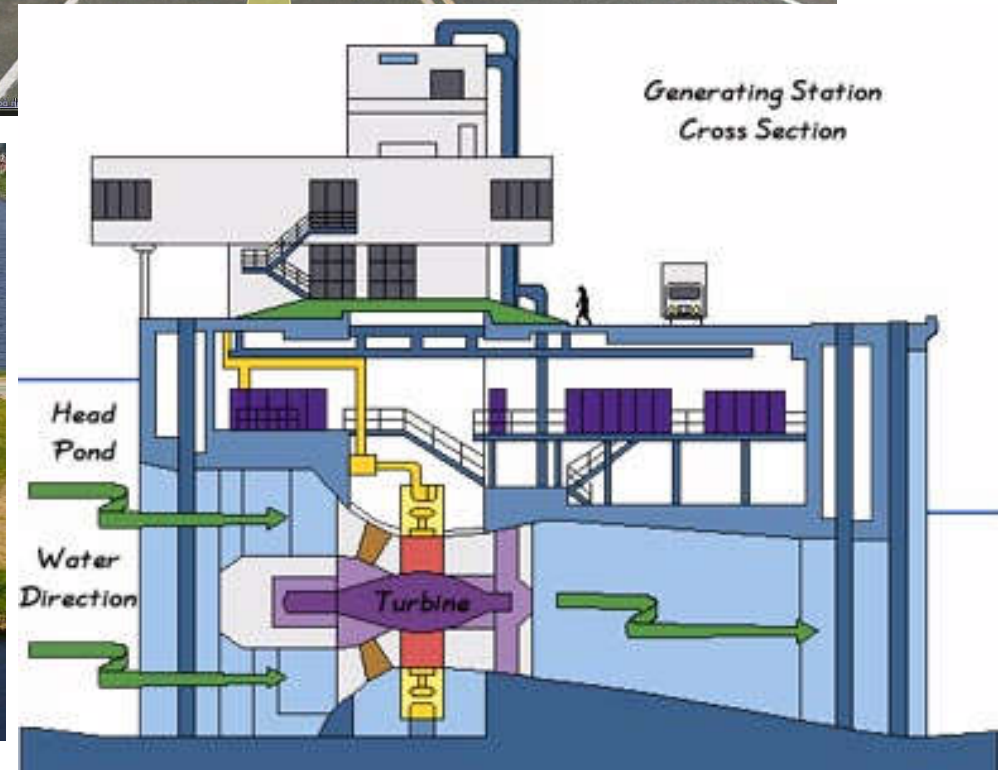
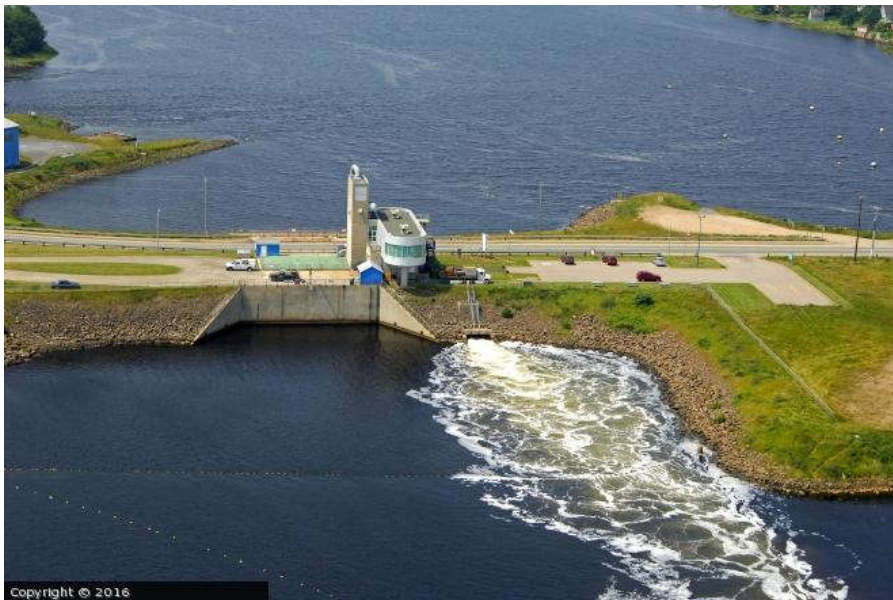
Annapolis



Ενέργεια από παλίρροιες



Παλιρροιακός σταθμός Annapolis



Ενέργεια από παλίρροιας

Χαρακτηριστικά έργου

Θέση: Νέα Σκοτία, Καναδάς

Ιδιοκτήτης: Nova Scotia Power

Έναρξη λειτουργίας: 1983

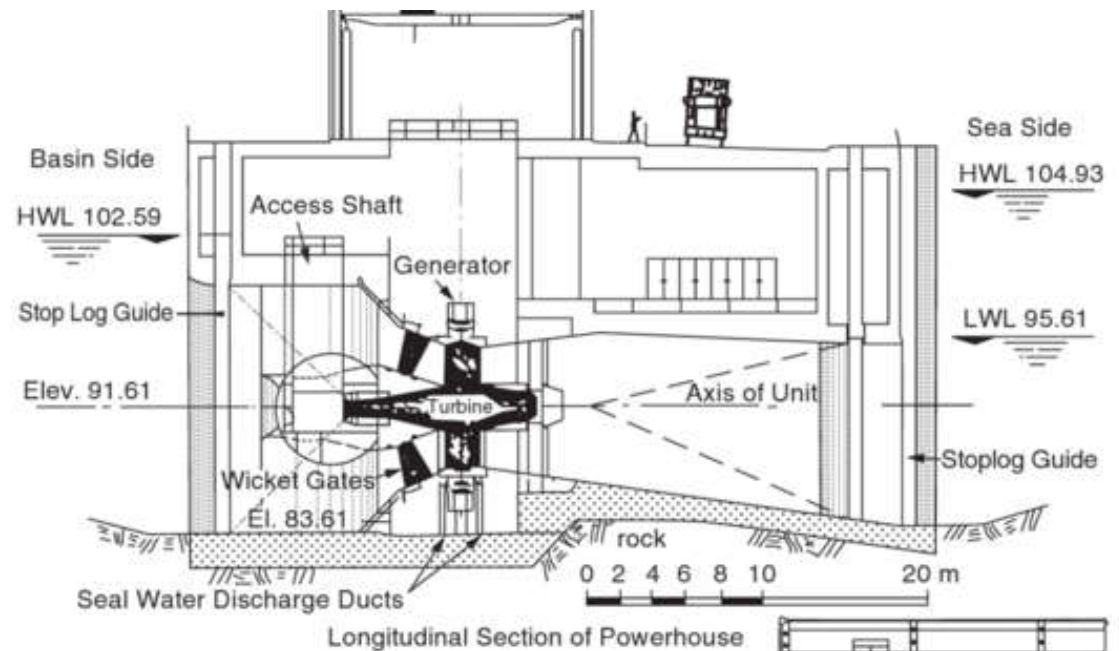
Φράγμα στο οποίο λειτουργούν θυροφράγματα και σταθμός παραγωγής ενέργειας ενώ περνάει και αυτοκινητόδρομος.

Στρόβιλος: 20 MW Straflow

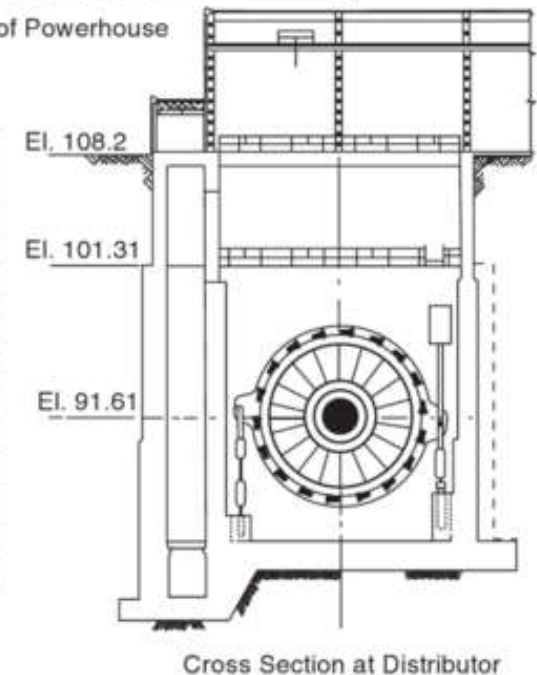
Εκμεταλλεύεται πτώση 6 m και παροχή 400 m³/s

Παράγει περίπου 30 GWh/y

Παλιρροιακός σταθμός Annapolis



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



Ενέργεια από παλίρροιες

Παλιρροιακός σταθμός Annapolis

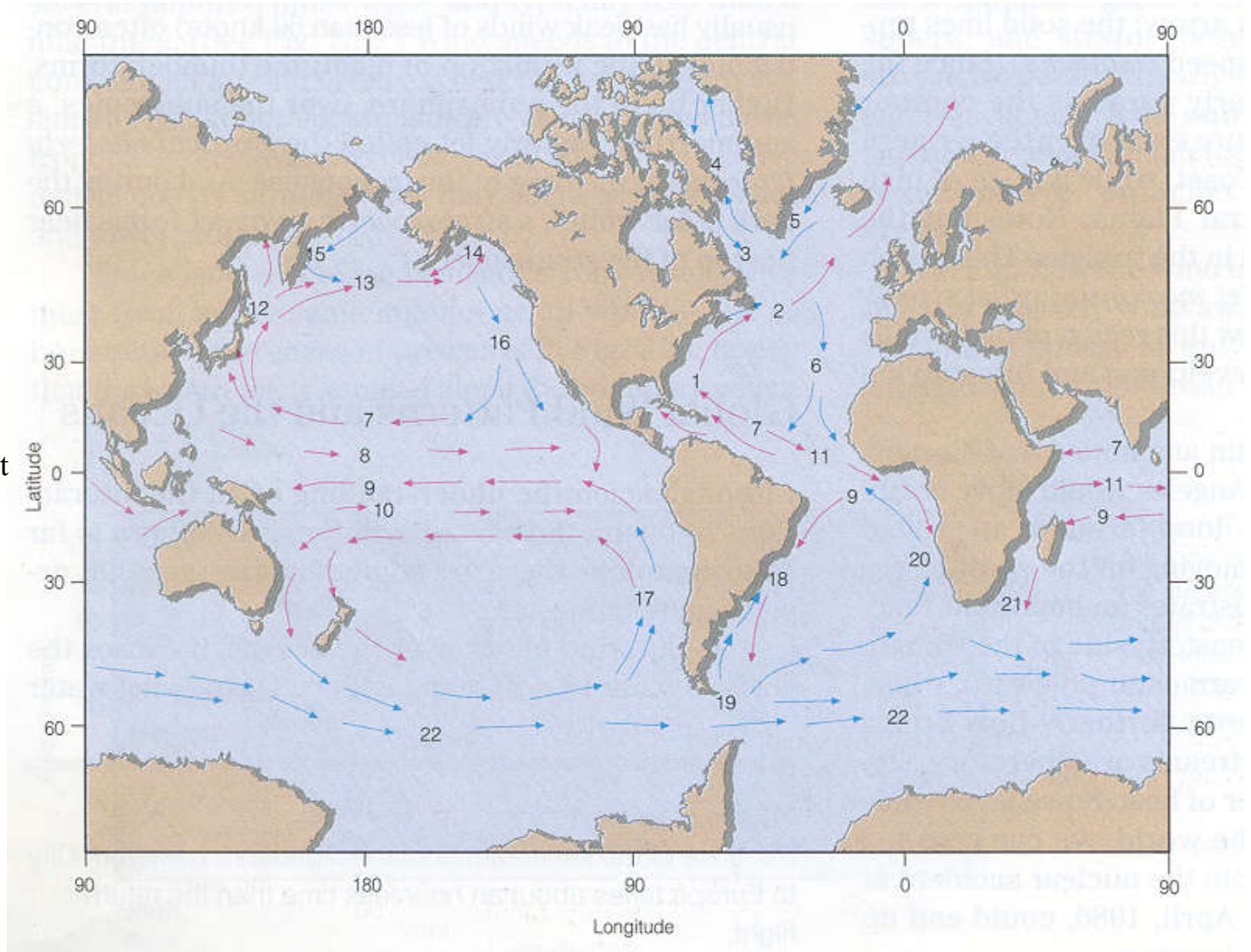
Πρόγραμμα λειτουργίας



Το έργο είχε σχεδιαστεί για την παραγωγή 50 GWh/y αλλά παράγει λιγότερο δεδομένου ότι 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., 1993, *Essentials of Meteorology, An Invitation to the Atmosphere*

Στρόβιλοι για παλίρροιας και ρεύματα

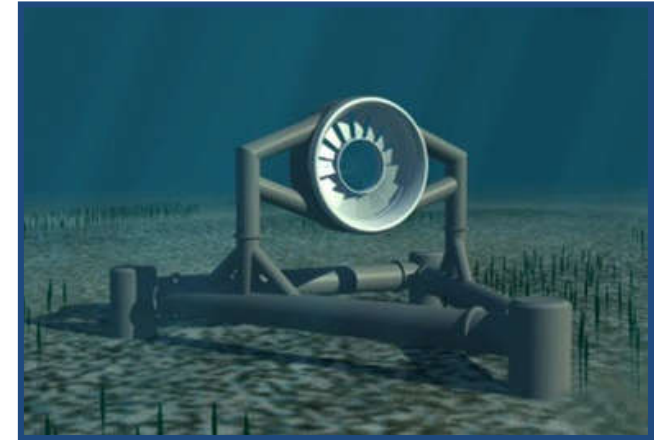
Clean Current



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:

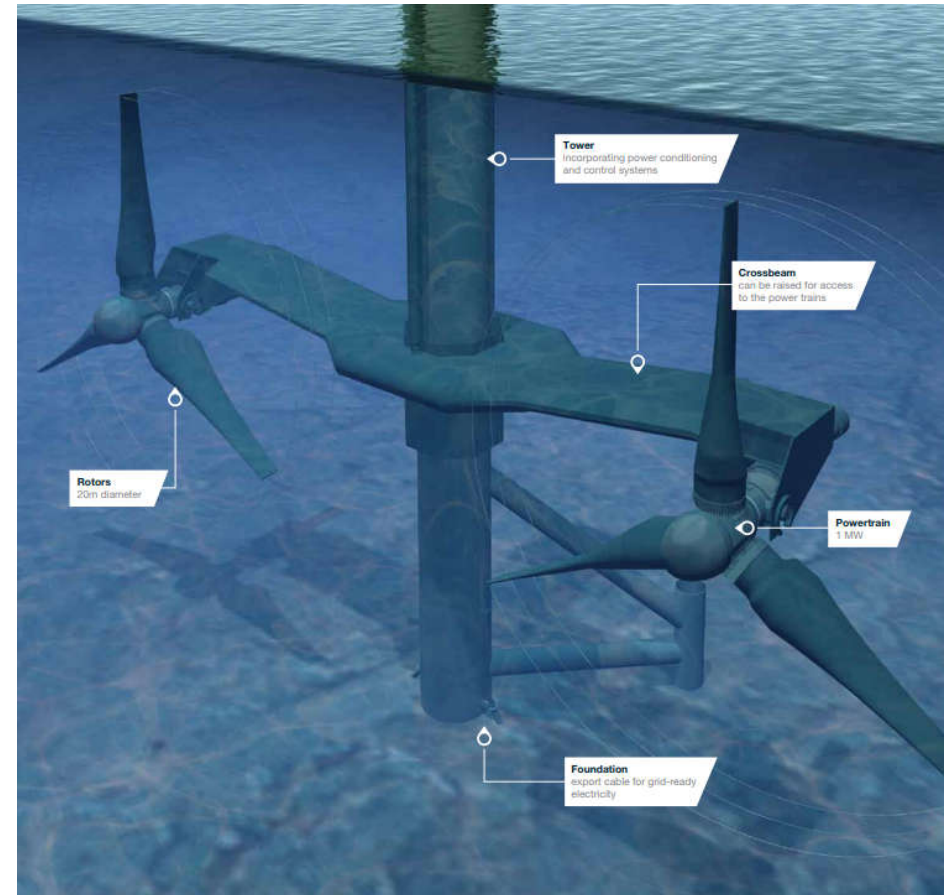
- P: η παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς (W)
- n: ο συνολικός βαθμός απόδοσης
- ρ: η πυκνότητα του νερού (1025 kg/m³)
- V: η ταχύτητα κίνησης του νερού (m/s)
- A: η επιφάνεια (m²)

Δεδομένου ότι η πυκνότητα του νερού είναι περίπου 835 φορές μεγαλύτερη από αυτήν του ανέμου

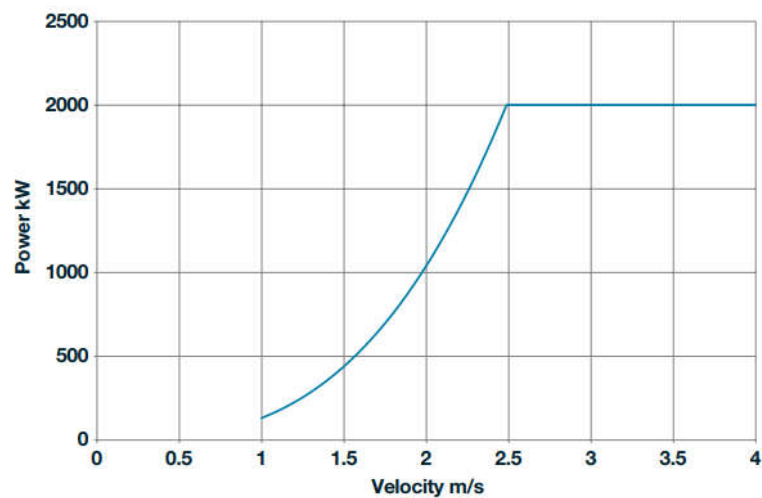
η θεωρητική ισχύς που αντιστοιχεί σε ένα θαλάσσιο ρεύμα με ταχύτητα 2 m/s ισοδυναμεί με αυτήν που αντιστοιχεί σε ταχύτητα ανέμου 19 m/s.

Στρόβιλοι για παλίρροιες και ρεύματα

SEaGEN 2 MW



Power Curve for SeaGen -S 2MW



Ισχύς στροβίλου: **1 MW**

Διάμετρος: **20 m**

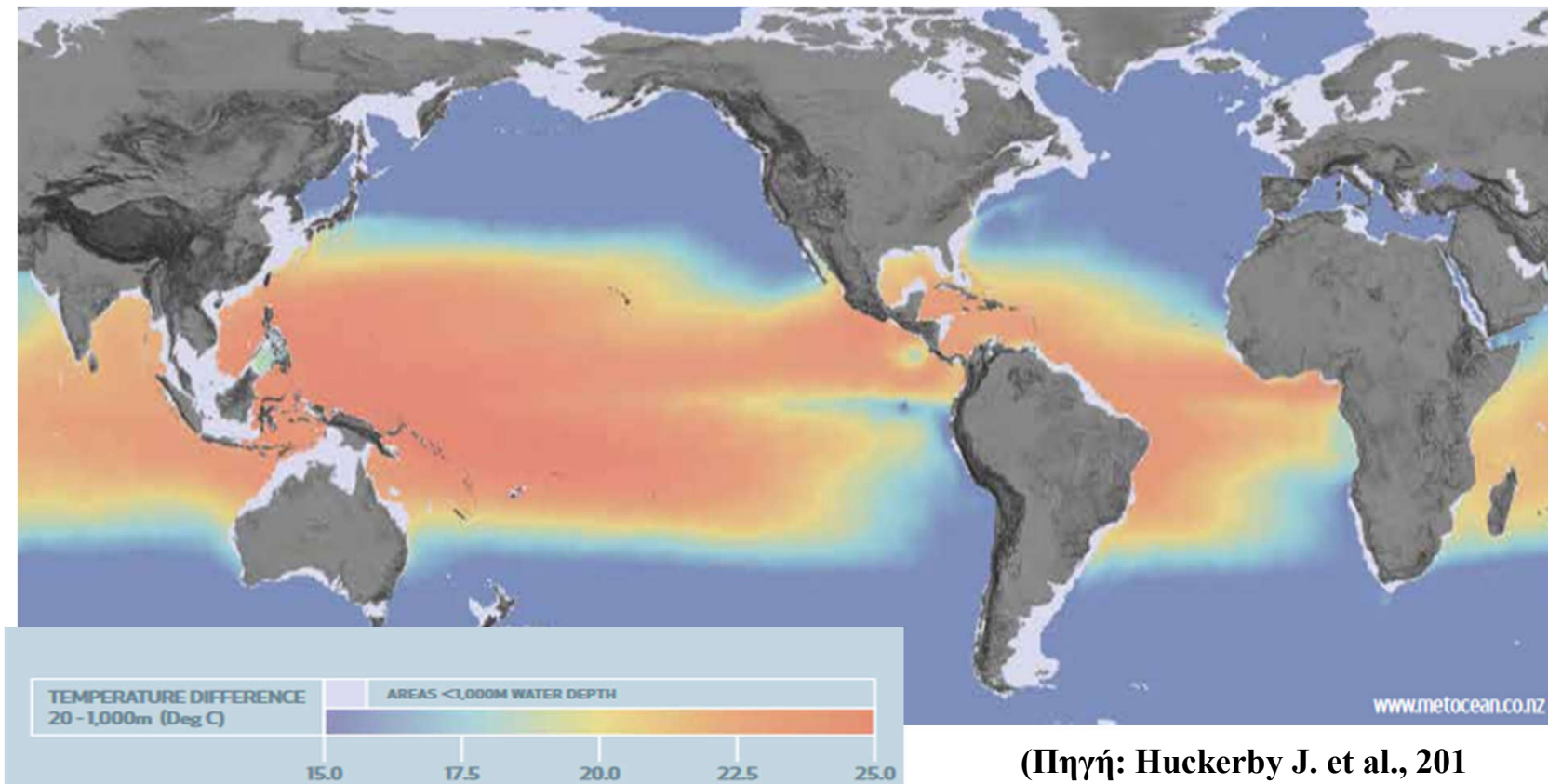
Στην ταχύτητα των **2.5 m/s** η απόδοση εκτιμάται στο **41%**

Θαλασσοθερμική ενέργεια

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

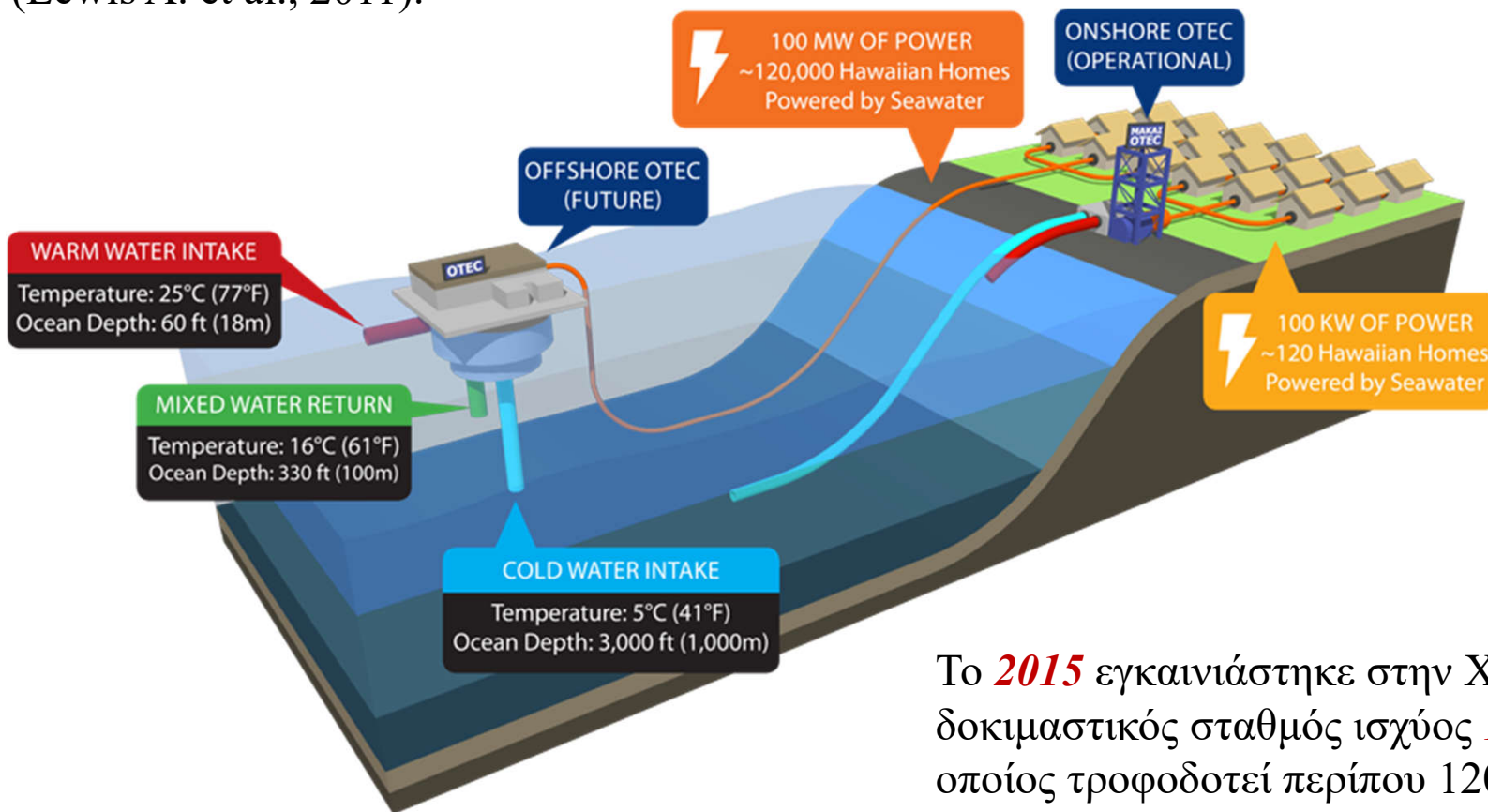
Θερμοκρασιακές διαφορές μεταξύ 20 και 1000 m



Θαλασσοθερμική ενέργεια

Μετατροπή της θερμικής ενέργειας των ωκεανών σε ηλεκτρική *Ocean Thermal Energy Conversion (OTEC)*

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** (Lewis A. et al., 2011).



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

Θαλασσοθερμική ενέργεια

Συστήματα εκμετάλλευσης

Η εκμετάλλευση γίνεται με ειδικές συστοιχίες αγωγών 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 προκύπτει 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.

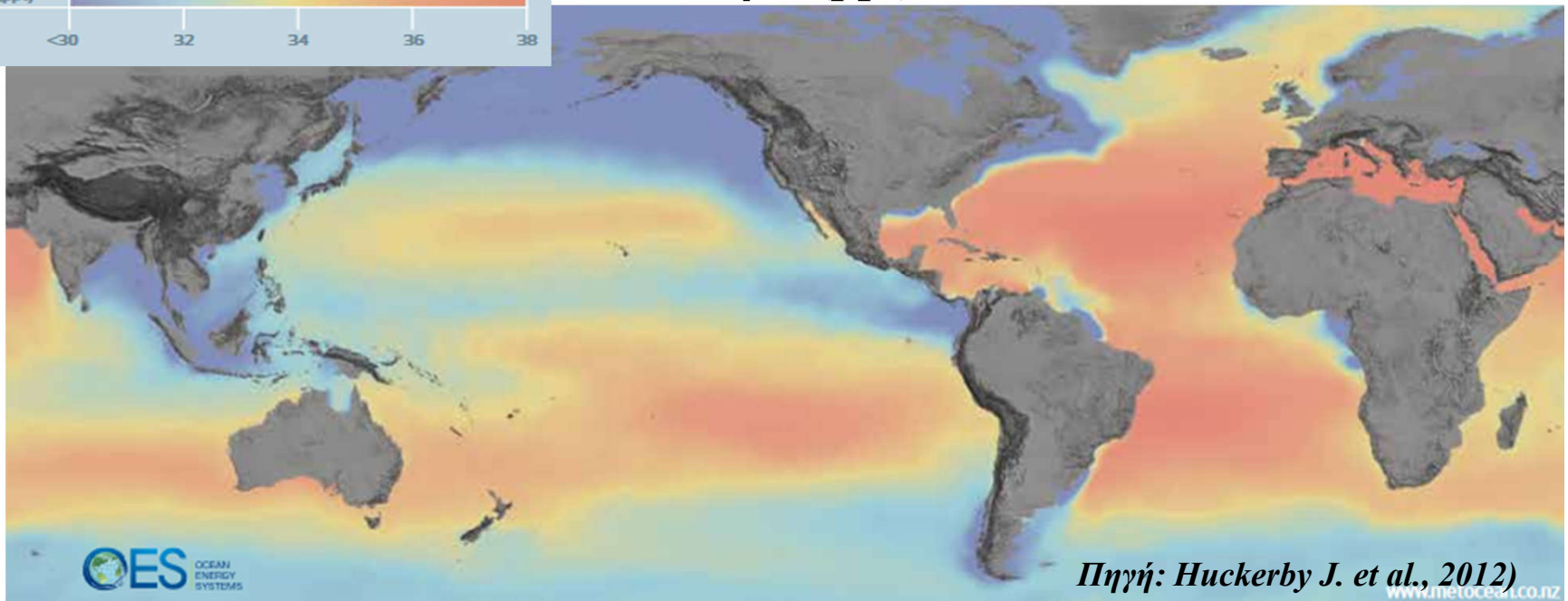
- Από τη διεργασία προκύπτει υγρή αμμωνία η οποία θα ξαναχρησιμοποιηθεί στον επόμενο κύκλο παραγωγής ενέργειας.

Ωσμωτική ενέργεια

- 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 επαρκεί για την παραγωγή ποσών 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



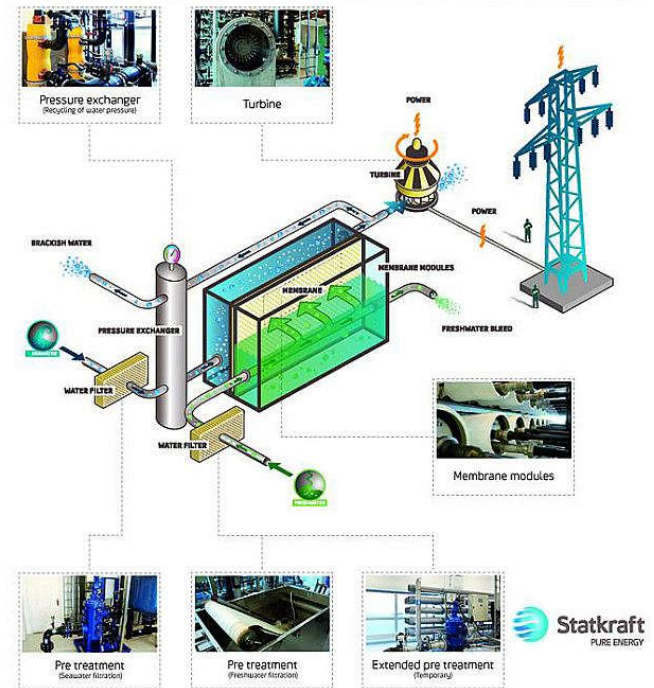
Αλατότητα (ppt)



Ωσμωτική ενέργεια

- Η αλμυρότητα των νερών των ποταμών και των λιμνών φτάνει μέχρι την τιμή των **0.5 ppt** με αποτέλεσμα εκβολές μεγάλων ποταμών σε περιοχές με μεγάλη αλατότητα (Κονγκό, Αμαζόνιος) να υπάρχουν δυνατότητες εκμετάλλευσης. Ακόμη περιοχές με μεγάλες συγκεντρώσεις αλατιού (όπως η Μεσόγειος θάλασσα), πληρούν της προϋποθέσεις εμφάνισης ώσμωσης.
- Η πρώτη απόπειρα εκμετάλλευσης έγινε τη δεκαετία του 1970 στο Ισραήλ και ειδικότερα στις εκβολές του ποταμού Ιορδάνη στην Νεκρά Θάλασσα.
- Το πρώτο, πιλοτικό, ηλεκτροπαραγωγό εργοστάσιο, ισχύος **4 kW**, λειτούργησε το 2009 στη Νορβηγία και κόστισε **7 MS**. Στη θέση του έργου η πρόσβαση σε θαλασσινό νερό θεωρούνταν επαρκής και ποσότητες γλυκού νερού αντλούνταν από μία παραπλήσια λίμνη. Μετά από 4 έτη λειτουργίας θεωρήθηκε ότι η τεχνολογία δεν μπορεί να αναπτυχθεί επαρκώς ώστε να καταστεί ανταγωνιστική και 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



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 μένει στο βυθό η βάση της κατασκευής και τα καλώδια.