



ΕΘΝΙΚΟ ΚΑΙ ΚΑΠΟΔΙΣΤΡΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ

ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ – ΤΜΗΜΑ ΦΥΣΙΚΗΣ

ΤΟΜΕΑΣ ΦΥΣΙΚΗΣ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΦΥΣΙΚΗΣ ΩΚΕΑΝΟΓΡΑΦΙΑΣ ΚΑΙ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ

**Διατμηματικό Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα Σπουδών στην Ωκεανογραφία και τη
Διαχείριση Θαλάσσιου Περιβάλλοντος**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΑΠΟ ΤΗ ΘΑΛΑΣΣΑ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ: ΜΕΛΕΤΗ ΤΩΝ ΧΩΡΟ-
ΧΡΟΝΙΚΩΝ ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΕΩΝ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΩΝ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ
ΜΟΝΤΕΛΩΝ**

Χρυσάγη Ευρυδίκη

Επιβλέπων Καθηγητής: Σοφιανός Σαράντης

Τριμελής Επιτροπή: Σοφιανός Σαράντης

Ιακωβίδης Κωνσταντίνος

Μιχαλοπούλου Χαρά

Αθήνα, Μάιος 2012

Σχολή: Θετικών Επιστημών

Τμήμα: Γεωλογίας και Γεωπεριβάλλοντος

Τίτλος Μεταπτυχιακού: Ωκεανογραφία και Διαχείριση του Θαλάσσιου
Περιβάλλοντος

Τίτλος Εργασίας: Ενέργεια από τη θάλασσα στην περιοχή της Ελλάδας:
**Μελέτη των χωρο-χρονικών διακυμάνσεων με χρήση επιχειρησιακών
αριθμητικών μοντέλων**

Όνοματεπώνυμο Συγγραφέα: Χρυσάγη Ευρυδίκη

Αριθμός Μητρώου: 29011

Όνοματεπώνυμο Επιβλέποντα: Σοφιανός Σαράντης

Όνοματεπώνυμο Μελών Τριμελούς:

Μιχαλοπούλου Χαρά, Επίκουρος Καθηγήτρια

Ιακωβίδης Κωνσταντίνος, Αναπληρωτής Καθηγητής

Αθήνα, 2012

Λέξεις Κλειδιά: θαλάσσια ενέργεια, κυματική ενέργεια, ισχύς θαλασσίων ρευμάτων, wave energy converters, current energy conversion.

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια του Διατμηματικού Μεταπτυχιακού Προγράμματος Σπουδών «Ωκεανογραφία και Διαχείριση του Θαλάσσιου Περιβάλλοντος», του Εθνικού και Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών, στο Εργαστήριο Ωκεανογραφίας του Τμήματος Φυσικής.

Η υλοποίησή της δεν θα ήταν εφικτή χωρίς την πολύτιμη βοήθεια ορισμένων ανθρώπων. Ευχαριστώ θερμά τον Δρ. Σοφιανό Σαράντη, επιβλέποντα καθηγητή, για την ευκαιρία που μου έδωσε να εντρυφήσω σε θέματα Φυσικής Ωκεανογραφίας. Ευχαριστώ την Κα Μαντζιαφού Αννέτα, την Κα Τζάλη Μαργαρίτα και τον Κ. Βερβάτη Βασίλη για την καθοδήγηση, τη βοήθεια και την υποστήριξή τους καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της εργασίας αυτής. Τέλος, να ευχαριστήσω τους κύριους Αξαόπουλο Παναγιώτη και Γκανάσο Θανάση για τις συζητήσεις και τα εύστοχα σχόλιά τους.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Οι ωκεανοί αποτελούν μία θεωρητικά ανεξάντλητη πηγή ενέργειας, με την υψηλότερη ενεργειακή πυκνότητα ανάμεσα στις ΑΠΕ. Η θαλάσσια ενέργεια εμφανίζεται σε διάφορες μορφές και η εμπορική της εκμετάλλευση για την παραγωγή ηλεκτρισμού, εκτιμάται ότι θα μπορούσε να υπερκαλύψει την παγκόσμια ενεργειακή ζήτηση. Προς το παρόν, οι προσπάθειες εκμετάλλευσης επικεντρώνονται κυρίως στην ενέργεια των ρευμάτων, μέσω της δημιουργίας στροβίλων παρόμοιων με τις ανεμογεννήτριες και στην κυματική ενέργεια, μέσω κυματικών μετατροπέων (Wave Energy Converters, WEC), τα χαρακτηριστικά των οποίων διαφοροποιούνται ανάλογα με την περιοχή τοποθέτησης και τη μέθοδο δέσμευσης της ενέργειας, με αποτέλεσμα να υπάρχουν ήδη πάνω από χίλιες διαφορετικές πατέντες παγκοσμίως.

Στην παρούσα εργασία, μελετάται το δυναμικό και η δυνατότητα εκμετάλλευσης της κυματικής ενέργειας και της ισχύος των ρευμάτων στον Ελληνικό χώρο, με χρήση του επιχειρησιακού συστήματος πρόγνωσης κυματισμού, TRITON και του επιχειρησιακού συστήματος πρόγνωσης της θαλάσσιας κυκλοφορίας, ALERMO. Προκειμένου να μελετηθούν εκτενέστερα οι χωρο-χρονικές διακυμάνσεις του θαλάσσιου δυναμικού και να εντοπιστούν κατάλληλες περιοχές πόντισης κυματικών μετατροπέων και στροβίλων, η περιοχή μελέτης χωρίστηκε στις εξής υπολεκάνες: Βόρειο Αιγαίο, Νότιο Αιγαίο, Ανατολικό Αιγαίο και Ιόνιο.

Σε κάθε υπολεκάνη, εξετάστηκαν οι χωρικές κατανομές του σημαντικού ύψους κύματος και της κυματικής ενέργειας για την περίοδο 2004-2010, καθώς και της ταχύτητας και ισχύος των ρευμάτων από το 2007 έως το 2010. Οι χρονικές διακυμάνσεις μελετήθηκαν μέσω της δημιουργίας των αντίστοιχων χρονοσειρών με παράλληλη εφαρμογή της μεθόδου της αρμονικής ανάλυσης. Η διαθεσιμότητα του κυματικού δυναμικού σε ετήσια βάση, που αποτελεί σημαντικό παράγοντα για κάθε περιοχή τοποθέτησης, ελέγχθηκε με κριτήριο τα όρια λειτουργίας των κυματικών μετατροπέων. Θεωρώντας ένα υβριδικό σύστημα παράλληλης εκμετάλλευσης της αιολικής και της κυματικής ενέργειας, μελετήθηκε η υπεράκτια κυματική ενέργεια, αρχικά με βάση την απόσταση από την ακτογραμμή και κατόπιν σύμφωνα με το βάθος εγκατάστασης.

Υψηλά επίπεδα κυματικής ενέργειας και διαθεσιμότητας σε ετήσια βάση εντοπίζονται Νότια και Νοτιοδυτικά της Πελοποννήσου, λόγω των ισχυρών ανέμων και του μεγάλου fetch καθώς και ΝΑ των στενών Κρήτης-Ρόδου, όπου το κυματικό πεδίο ενισχύεται λόγω του μεγάλου fetch και του καναλισμού που υφίστανται οι βόρειοι άνεμοι στο κυκλαδίτικο σύμπλεγμα. Το θαλάσσιο τμήμα γύρω από την Κάσο και την Κάρπαθο καθώς και η περιοχή των Αντικύθρων, θα μπορούσαν να αποτελέσουν πιθανές θέσεις εγκατάστασης ενός κυματικού μετατροπέα ή μιας συστοιχίας μετατροπέων, καθώς χαρακτηρίζονται από το υψηλότερο κυματικό δυναμικό και αποδοτικότητα, σε ετήσια βάση. Όσον αφορά την ισχύ των ρευμάτων, υψηλές τιμές εντοπίζονται στον αντικυκλώνα της Σαμοθράκης, κατά μήκος των Ανατολικών ακτών της Εύβοιας και του συμπλέγματος των Βορείων Κυκλάδων, καθώς και στο Νότιο τμήμα της περιοχής μελέτης όπου εντοπίζονται ισχυροί σχηματισμοί, όπως ο κυκλώνας της Ρόδου κι ο Πέλοπας, ΝΑ του οποίου η ένταση αυξάνεται λόγω της εμφάνισης τμήματος του Βόρειου Αφρικανικού Ρεύματος (NAC).

ABSTRACT

The oceans represent a theoretically inexhaustible source of energy, with the highest energy density among the renewables. Ocean energy appears in different forms and its commercial exploitation, for electricity production, is estimated that it could override the global energy demand. Currently, the efforts are primarily focused on current energy conversion, by using turbines similar to those used for windmills and on the exploitation of wave power, through Wave Energy Converters (WEC), whose characteristics vary depending on the location and the operating principles, so there are already over a thousand conversion techniques patented worldwide.

In this thesis, the power and the potential from marine currents and waves in the Hellenic seas is investigated, using the operational wave forecasting system, TRITON and the operational ocean circulation forecasting system, ALERMO. For better understanding of the spatial and temporal variability of ocean power and identify all suitable locations for installation of the conversion systems, the study area was divided into the following sub-basins: North Aegean, South Aegean, East Aegean and Ionian.

In each sub-basin an assessment is being made on the spatial distribution of significant wave height and wave energy, for the period 2004-2010, as well as for the current velocity and power for 2007-2010. Temporal variations were analyzed by using time series and harmonic analysis. The efficiency of wave power on annual basis, which represents a crucial factor for the deployment site, was investigated in terms of wave energy conversion threshold. Considering a hybrid wind-wave energy conversion system, the offshore energy was initially examined, according to the distance from shore and according to the installation depth.

The areas of the highest mean values of energy and efficiency were found to be south and southwest of Peloponnese, due to strong wave field and to long fetch lengths and at the southeastern part of the straits between Crete Isl. and Rhodes Isl., where the wave field is reinforced by the long fetch and furthermore by the channeling effect of wind, at the Cyclades complex. Most suitable deployment sites either for a single WEC or for a wave array park are Kasos Isl., Karpathos Isl. and Antikythira Isl. as they are characterized, on annual basis, by the highest wave potential. Regarding the current power, high values were found mainly in Samothraki anticyclone, along the eastern coast of Evia and the northeastern part of the Cyclades complex, as well as in the southern part of the study area, where strong circulation patterns are identified such as the Rhodes gyre and the Pelops anticyclone, in the southeastern part of which, the intensity increases, due to the presence of North African Current's section.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	9
2	ΘΑΛΑΣΣΙΑ ΕΝΕΡΓΕΙΑ	14
2.1	Ενέργεια Θαλασσίων Κυμάτων	14
2.1.1	Θαλάσσια Επιφανειακά Κύματα	14
2.1.2	Κυματική Ενέργεια	17
2.1.3	Γεωγραφική κατανομή κυματικής ενέργειας	19
2.1.4	Ιστορική εξέλιξη των τεχνολογιών δέσμησης της κυματικής ενέργειας	22
2.1.5	Κυματικοί Μετατροπείς	24
2.1.5.1	Τεχνολογίες Ακτογραμμής	25
2.1.5.2	Παράκτιες Τεχνολογίες	29
2.1.5.3	Υπεράκτιες Τεχνολογίες	32
2.2	Ενέργεια Θαλασσίων Ρευμάτων	38
2.2.1	Εισαγωγή	38
2.2.2	Ιστορική εξέλιξη των τεχνολογιών εκμετάλλευσης της ενέργειας των ρευμάτων	40
2.2.3	Ισχύς θαλασσίων ρευμάτων	41
2.2.4	Τεχνολογίες μετατροπής της ενέργειας των θαλασσίων ρευμάτων	43
2.3	Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της θαλάσσιας ενέργειας	47
2.4	Άλλες πηγές θαλάσσιας ενέργειας	50
2.4.1	Ενέργεια από το παλιρροιακό εύρος	50
2.4.2	Ενέργεια από τη θερμοκρασιακή διαφορά επιφάνειας-πυθμένα των ωκεανών (OTEC)	51
2.4.3	Ενέργεια από τη διαφορά αλατότητας ύδατος ή ωσμωτική ενέργεια	52
3	ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ – ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ	53
3.1	Γενικά χαρακτηριστικά της περιοχής μελέτης	53
3.1.1	Τοπογραφικά χαρακτηριστικά	53
3.1.2	Θαλάσσιες μάζες και κυκλοφορία	54
3.1.3	Ανεμολογικό πεδίο	57
3.2	Περιγραφή επιχειρησιακών συστημάτων	59
3.2.1	Το μοντέλο ALERMO	59
3.2.2	Το μοντέλο ΤΡΙΤΩΝ	60
3.2.3	Εφαρμογή των επιχειρησιακών συστημάτων στην ευρύτερη περιοχή μελέτης	62
4	ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ – ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	68
4.1	Κυματικό πεδίο και κυματική ενέργεια	68
4.1.1	Χωρική Κατανομή	68
4.1.1.1	Κυματική ισχύς ανά μήκος μετώπου κύματος	79
4.1.2	Χρονική Κατανομή	82

4.2	Κυκλοφορία και ισχύς θαλασσίων ρευμάτων	90
4.2.1	Χωρική Κατανομή	90
4.2.2	Χρονική Κατανομή	98
4.3	Διαθεσιμότητα του κυματικού δυναμικού με βάση τα όρια λειτουργίας των κυματικών μετατροπέων	104
4.4	Υπεράκτια Κυματική Ενέργεια	108
4.4.1	Υπολογισμός της υπεράκτιας ενέργειας με βάση την απόσταση από την ακτογραμμή	110
4.4.2	Υπολογισμός της υπεράκτιας κυματικής ενέργειας σύμφωνα με το βάθος εγκατάστασης	111
5	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	114
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ.....	116
	ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΕΣ ΔΙΕΥΘΥΝΣΕΙΣ.....	122

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Καθώς οι παγκόσμιες απαιτήσεις σε ενέργεια αυξάνονται συνεχώς, με την αύξηση του πληθυσμού και με τις αλλαγές στις συνθήκες διαβίωσης, αυξάνεται και η ανάγκη εφαρμογής της συνθήκης του Κιότο, για μείωση των αερίων του θερμοκηπίου, μέσω της παραγωγής ενέργειας από τεχνολογίες φιλικότερες προς το περιβάλλον όπως οι Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας. Το ενδιαφέρον για τις ήπιες μορφές ενέργειας υπήρχε ήδη από το 1970, ως αποτέλεσμα κυρίως των απανωτών πετρελαϊκών κρίσεων της εποχής, αλλά και της υποβάθμισης του περιβάλλοντος και της ποιότητας ζωής από τη χρήση των κλασικών πηγών ενέργειας.

Με τον όρο Ήπιες ή Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ), εννοούμε μορφές εκμεταλλεύσιμης ενέργειας, που προέρχονται από διάφορες φυσικές διαδικασίες και διαθέτουν δύο βασικά χαρακτηριστικά. Καταρχάς, για την εκμετάλλευσή τους δεν απαιτείται κάποια ανθρώπινη παρέμβαση, όπως εξόρυξη, άντληση ή καύση αλλά απλώς εκμετάλλευση της ήδη υπάρχουσας ροής ενέργειας στη φύση. Δεύτερον, πρόκειται για «καθαρές» μορφές ενέργειας που δεν αποδεδεσμεύουν θερμοκηπικά αέρια ή τοξικά και ραδιενεργά απόβλητα. Υπάρχουν διάφορες μορφές ΑΠΕ όπως :

α) η Αιολική ενέργεια

β) η Ηλιακή ενέργεια

γ) οι Υδατοπτώσεις

δ) η Βιομάζα

ε) η Γεωθερμία

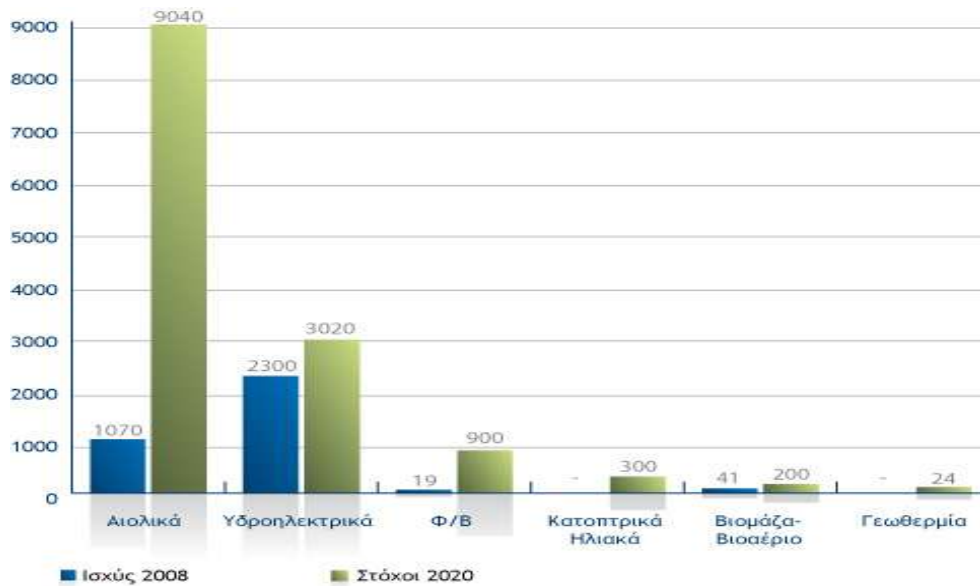
ζ) η Θαλάσσια ενέργεια

Υπολογίζεται ότι το τεχνικά εκμεταλλεύσιμο ενεργειακό δυναμικό από τις ήπιες μορφές ενέργειας, είναι πολλαπλάσιο της παγκόσμιας συνολικής κατανάλωσης ενέργειας. Η υψηλή όμως τιμή αυτών των νέων ενεργειακών εφαρμογών, τα τεχνικά προβλήματα εφαρμογής καθώς και πολιτικές και οικονομικές σκοπιμότητες, που έχουν να κάνουν με τη διατήρηση του παρόντος καθεστώτος στον ενεργειακό τομέα, εμπόδιζαν για πολλά χρόνια, την πλήρη εκμετάλλευση αυτού του δυναμικού.

Τα τελευταία 20 χρόνια όμως το κόστος παραγωγής ενέργειας από ΑΠΕ μειώνεται συνεχώς και ειδικά η αιολική ενέργεια, η υδροηλεκτρική, αλλά και η βιομάζα, μπορούν πλέον να ανταγωνίζονται παραδοσιακές πηγές ενέργειας όπως ο άνθρακας και η πυρηνική ενέργεια. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι στις Η.Π.Α το 6% της ενέργειας προέρχεται από ΑΠΕ ενώ η Ευρωπαϊκή Ένωση ήδη από το 1997 είχε θέσει ως στόχο, με τη «Λευκή βίβλο» για την ανάπτυξη των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, το έτος 2010, το 12% των ενεργειακών αναγκών της να καλύπτεται από ανανεώσιμους ενεργειακούς πόρους.

Το 2008 η Ευρωπαϊκή Επιτροπή αποφάσισε μία σειρά από μέτρα γνωστά ως «Ενεργειακό-Κλιματικό Πακέτο», που υποχρεώνουν τα κράτη μέλη σε μείωση των εκπομπών των αερίων του

θερμοκηπίου κατά 20% και συνεισφορά των ΑΠΕ στην τελική κατανάλωση ενέργειας κατά 20% μέχρι το 2020. Για να επιτευχθεί αυτό το ποσοστό υπάρχει μία αύξηση του ενδιαφέροντος και για τις ανανεώσιμες ενεργειακές τεχνολογίες του υδάτινου στοιχείου, όπως είναι η κυματική ενέργεια τα παλιρροιακά ρεύματα αλλά και για τα υπεράκτια αιολικά.

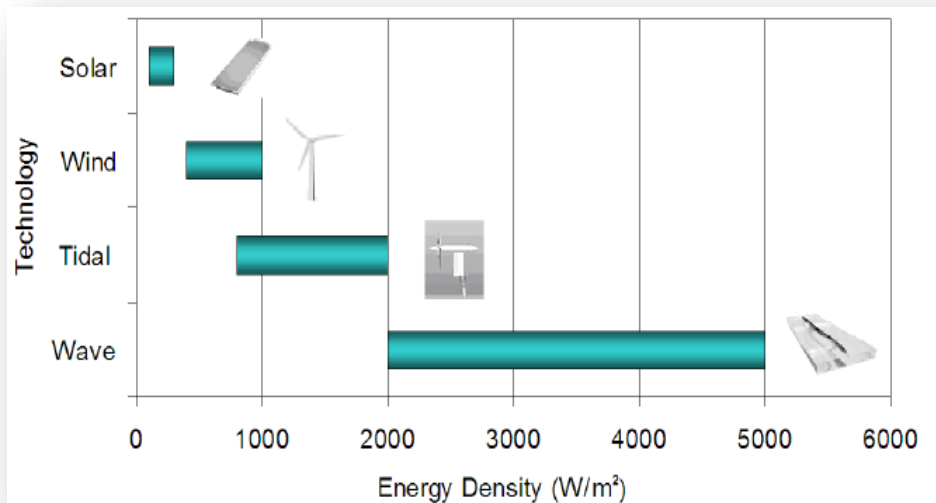


Σχήμα 1-1: Παραγόμενη ισχύς από ΑΠΕ στην Ελλάδα το 2008 σε σχέση με τον Ευρωπαϊκό στόχο του 2020

Οι ωκεανοί καλύπτουν περίπου τα $\frac{3}{4}$ της γήινης επιφάνειας και χαρακτηρίζονται από μεγάλη πυκνότητα ενέργειας, τη μεγαλύτερη συγκριτικά με τις υπόλοιπες ΑΠΕ, με ισχύ που φτάνει τα δεκάδες TW. Η ισχύς αυτή εμφανίζεται στους ωκεανούς με διάφορες μορφές και συνεπώς η θαλάσσια ενέργεια μπορεί να χωριστεί σε:

- Κυματική Ενέργεια
- Ενέργεια θαλασσίων ρευμάτων
- Παλιρροιακή Ενέργεια
- Ενέργεια που οφείλεται σε θερμοκρασιακές διαφορές μεταξύ των ανώτερων και κατώτερων-ψυχρότερων θαλασσίων στρωμάτων (OTEC).
- Ενέργεια που οφείλεται σε βαθμίδες πυκνότητας μεταξύ θαλασσίων στρωμάτων διαφορετικής αλατότητας (Ωσμωτική ενέργεια)

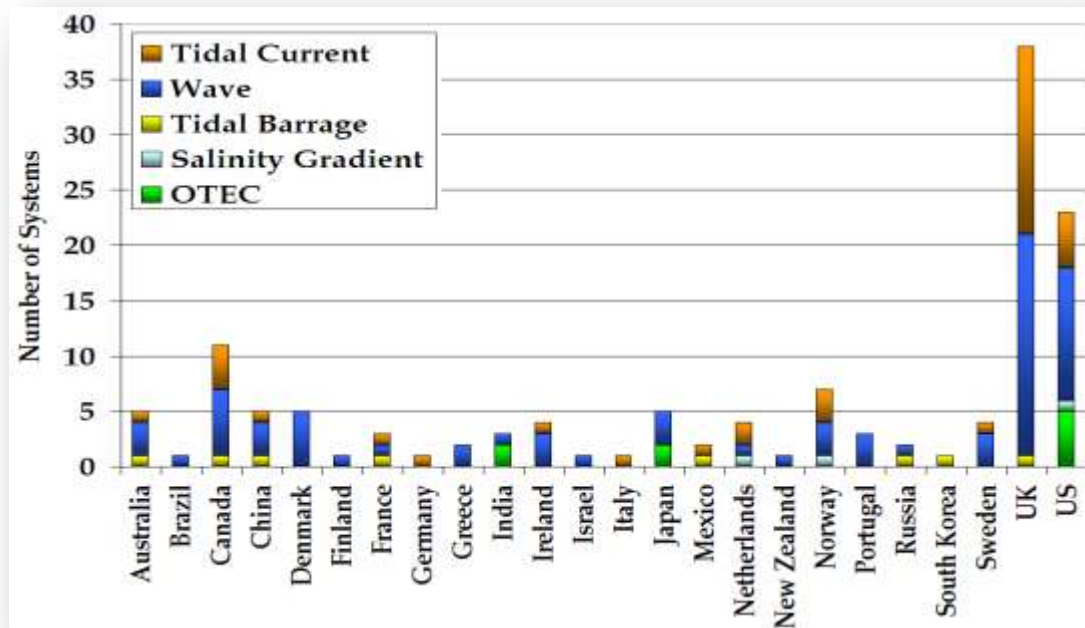
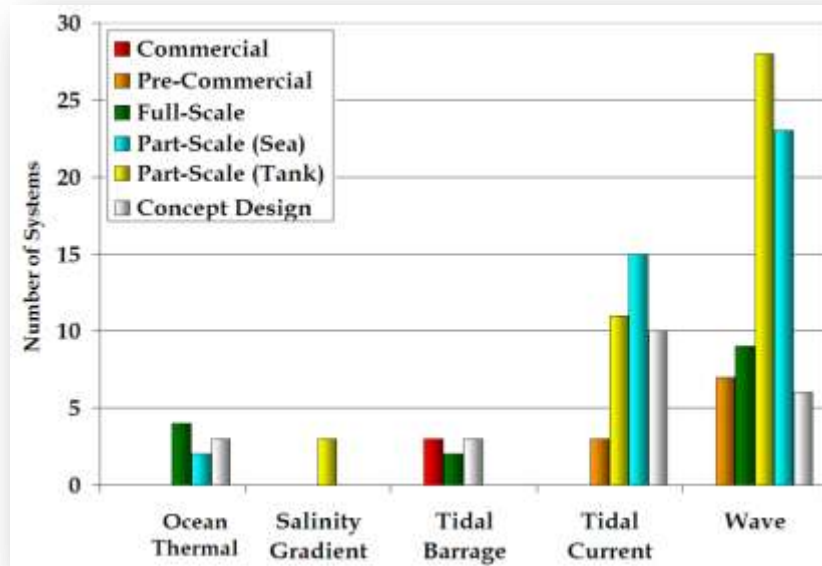
Έχει υπολογιστεί ότι μόλις το 0.02% της διαθέσιμης θαλάσσιας ενέργειας θα ήταν αρκετό για να ικανοποιήσει την σημερινή, παγκόσμια ζήτηση σε ενέργεια [Amundarain, 2010]. Πιο συγκεκριμένα, η σημερινή παγκόσμια ενεργειακή κατανάλωση υπολογίζεται στα 16.000 TWh/χρόνο [IPCC, 2008] και το αντίστοιχο θεωρητικό θαλάσσιο δυναμικό στα 100.000 TWh/χρόνο. Η μεγάλη πυκνότητα ενέργειας που χαρακτηρίζει το υδάτινο στοιχείο, φαίνεται ποιοτικά και στο Σχήμα 1-2, όπου συγκρίνεται και με άλλες μορφές ΑΠΕ.



Σχήμα 1-2: Πυκνότητα ενέργειας (W/m^2) για διάφορες τεχνολογίες ΑΠΕ [International Energy Agency's Ocean Energy Systems Implementing Agreement (IEA-OES), 2009].

Οι ωκεανοί αποτελούν λοιπόν μία τεράστια και προβλέψιμη πηγή ενέργειας, η εκμετάλλευση της οποίας συνδυάζει, το ιδιαίτερα υψηλό ενεργειακό δυναμικό με την ελάχιστη οπτική όχληση και τις μικρότερες περιβαλλοντικές επιπτώσεις σε σχέση με τις υπόλοιπες ΑΠΕ. Όσον αφορά την ενέργεια των επιφανειακών θαλασσίων κυμάτων, η ιδέα της μετατροπής τους σε χρήσιμη μορφή είναι αρκετά παλιά. Οι εντατικές προσπάθειες για το σκοπό αυτό άρχισαν μετά την πρώτη πετρελαϊκή κρίση του 1973, και οδήγησαν τριάντα περίπου χρόνια αργότερα στην ανάπτυξη των πρώτων εφαρμογών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από τα θαλάσσια κύματα.

Τα τελευταία χρόνια διάφορες τεχνολογίες κυρίως κυματικής και παλιρροιακής ενέργειας έχουν φτάσει σε τέτοιο στάδιο τεχνολογικής εξέλιξης ώστε η αξιοποίηση του ωκεάνιου δυναμικού για παραγωγή «καθαρής» ενέργειας να είναι πλέον εφικτή (Σχήμα 1-3). Οι προσπάθειες επικεντρώνονται κυρίως στην εκμετάλλευση της κυματικής ενέργειας, καθώς σε χώρες με υψηλό κυματικό δυναμικό, όπως η Ιρλανδία, η Αγγλία, η Πορτογαλία, η Ισπανία κ.ά. θα μπορούσε να λύσει το ενεργειακό πρόβλημα. Σε μελέτη που πραγματοποιήθηκε για τις ακτές των Η.Π.Α., υπολογίστηκε ότι η κυματική ενέργεια μπορεί να παράγει 2.100 TWh το χρόνο, ποσό ικανό για να καλύψει το μισό ποσοστό της σημερινής ηλεκτρικής κατανάλωσης [Amundarain, 2010].



Σχήμα 1-3: Τεχνολογική πρόοδος συσκευών εκμετάλλευσης της θαλάσσιας ενέργειας (πάνω) και συμβολή διαφόρων χωρών στην ανάπτυξή τους (κάτω) ως το 2007 [Bhuyan, 2008].

Γενικά, η χρήση των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ), παρουσιάζει σημαντικά περιβαλλοντικά οφέλη σε σχέση με τη χρησιμοποίηση των συμβατικών καυσίμων ή της πυρηνικής ενέργειας για την παραγωγή θερμότητας, ηλεκτρισμού ή μηχανικής ενέργειας. Κατ' αρχάς η χρήση τους συνεπάγεται τη μείωση της χρήσης εξαντλήσιμων φυσικών πόρων όπως είναι το πετρέλαιο, ο άνθρακας και το φυσικό αέριο. Ταυτόχρονα μειώνονται σημαντικά οι εκπομπές του διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) στην ατμόσφαιρα, που είναι το σημαντικότερο αέριο του

θερμοκηπίου. Βέβαια εκτός από τη μείωση των εκπομπών του CO₂ παρατηρείται και μείωση των εκπομπών του διοξειδίου του θείου, οξειδίων του αζώτου, σκόνης, αιθάλης, κλπ.

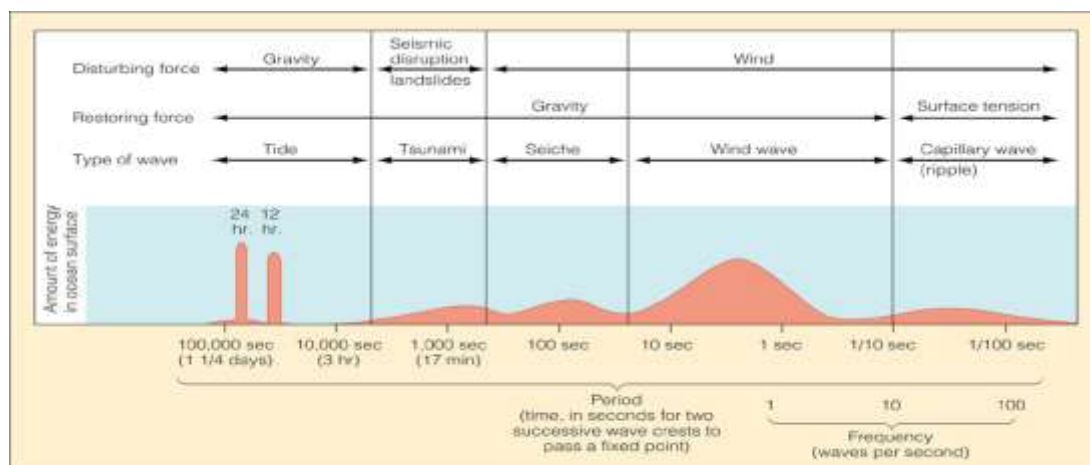
Στην Ευρώπη υπολογίζεται ότι το ένα τρίτο (1/3) των εκπομπών CO₂ στην ατμόσφαιρα προέρχεται από τα εργοστάσια ηλεκτροπαραγωγής. Έτσι όταν μειώνεται κατά 1% η παραγωγή ηλεκτρισμού από συμβατικά καύσιμα και υποκαθίσταται με την παραγωγή της αντίστοιχης ποσότητας από ΑΠΕ, προκύπτει μείωση κατά 0,3% των εκπομπών CO₂ στην ατμόσφαιρα. Σύμφωνα με μια μελέτη της Ε.Ε. του 1996, η χρήση των ΑΠΕ για παραγωγή ενέργειας μειώνει τις εκπομπές CO₂ κατά 1,5 δισ. τόνους ετησίως. Εάν δε όλη η ηλεκτροπαραγωγή που βασίζεται στη χρήση του άνθρακα υποκαθίστατο με την ηλεκτροπαραγωγή που βασίζεται στις ΑΠΕ, τότε θα προέκυπτε μείωση των εκπομπών CO₂ στην ατμόσφαιρα, κατά 6-9 δισ. τόνους ετησίως [Βουρδουμπάς, 2006].

2 ΘΑΛΑΣΣΙΑ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

2.1 Ενέργεια Θαλασσίων Κυμάτων

2.1.1 Θαλάσσια Επιφανειακά Κύματα

Τα κύματα είναι περιοδικές μηχανικές ταλαντώσεις των μορίων του νερού, στην επιφάνεια ή στο βάθος, με τις οποίες έχουμε μεταφορά ενέργειας. Χωρίζονται σε διάφορες κατηγορίες, ανάλογα με την αιτία δημιουργίας τους και με τις δυνάμεις που δρουν προς αποκατάσταση (Σχήμα 2-1). Στην παρούσα μελέτη, θα ασχοληθούμε με τα ανεμογενή κύματα, στα οποία το κύριο αίτιο δημιουργίας είναι ο άνεμος και η δύναμη αποκατάστασης η βαρύτητα. Ως εκ τούτου, συχνά αναφέρονται και ως επιφανειακά βαρυτικά κύματα.

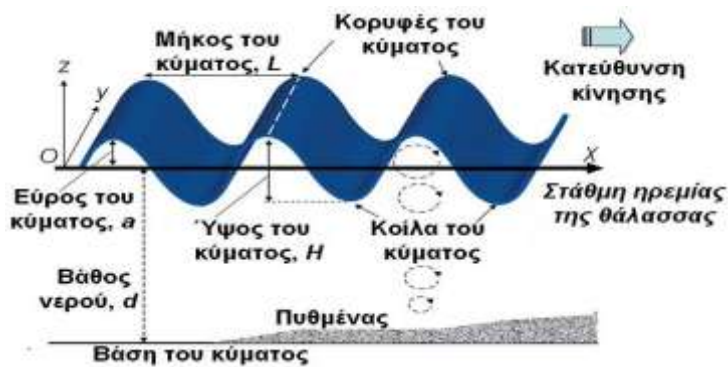


© 2005 Brooks/Cole - Thomson

Σχήμα 2-1: Βασικές κατηγορίες κυμάτων

Προκειμένου να περιγραφεί η κίνηση των θαλασσίων κυμάτων, έχουν αναπτυχθεί αρκετές θεωρίες με διαφορετικό βαθμό πολυπλοκότητας (θεωρία του Airy, του Stokes, των μεμονωμένων κυμάτων κ.α.) [Amundarain, 2010]. Στην παρούσα μελέτη επιλέχθηκε η κυματική θεωρία (Airy wave theory), η οποία δίνει μία γραμμική περιγραφή της διάδοσης ενός κύματος.

Τα βασικά χαρακτηριστικά ενός κύματος (Σχήμα 2-2) είναι το ύψος του, το μήκος κύματος, η περίοδος και η συχνότητα. Ως ύψος κύματος (H) ορίζεται η κάθετη απόσταση από την κορυφή ως την κοιλία ενώ το μήκος κύματος (L) είναι η απόσταση ανάμεσα σε δύο διαδοχικές κορυφές ή κοιλίες. Ο αριθμός των κορυφών που περνούν από ένα σταθερό σημείο ανά δευτερόλεπτο ονομάζεται συχνότητα του κύματος (f) και το αντίστροφο περίοδος (T). Για τις ανάγκες της εργασίας χρησιμοποιήθηκε το σημαντικό ύψος κύματος (H_s) που ορίζεται ως η μέση τιμή του ενός τρίτου των υψηλότερων κυμάτων σε μία περιοχή.



Σχήμα 2-2: Βασικά χαρακτηριστικά μεγέθη θαλασσίων κυμάτων.
(Πηγή: http://users.ntua.gr/ddeli/GSE/2_GSE_SatAlt.html)

Σύμφωνα με τη κυματική θεωρία το μήκος κύματος ορίζεται ως:

$$L = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh(2\pi h/L)$$

Όπου g : η επιτάχυνση της βαρύτητας (m/s^2) και h : το βάθος (m). Η εξίσωση που περιγράφει την ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας (η) είναι συνάρτηση του χρόνου (t) και της οριζόντιας απόστασης και δίνεται από τη σχέση:

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

Η ταχύτητα διάδοσης της κυματικής ενέργειας, ή αλλιώς ομαδική ταχύτητα (C_g), συνδέεται με την ταχύτητα διάδοσης ενός μονοχρωματικού κύματος (C) ως εξής:

$$C_g = nC$$

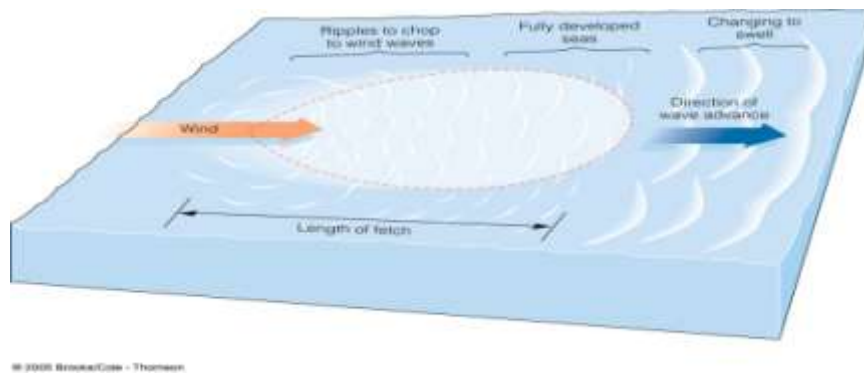
Όπου C : η ταχύτητα διάδοσης κύματος (m/s), ορισμένη ως $C = L/T = \frac{gT}{2\pi} \tanh(2\pi h/L)$ και

$$n: \text{σταθερά, με } n = \frac{1}{2} \left[1 + \frac{4\pi h/L}{\sinh(4\pi h/L)}\right]$$

Η ανισοκατανομή της ηλιακής ενέργειας και η διαφορική θέρμανση της γήινης επιφάνειας δημιουργεί λοιπόν βαθμίδες πιέσεων, που έχουν σαν αποτέλεσμα την δημιουργία ισχυρών ανέμων, οι οποίοι πνέοντας στη συνέχεια πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας, δημιουργούν τα επιφανειακά κύματα. Έχει υπολογιστεί ότι αν σε μία περιοχή η ηλιακή ενέργεια είναι της τάξης των $100W/m^2$ τότε η ενέργεια που θα μετατραπεί σε κυματική θα είναι της τάξης των 1,000 KW ανά μήκος μετώπου κύματος [Thorpe, 1999]. Σημαντικό όμως είναι και το ότι αποτελούν μία σταθερή πηγή ενέργειας με μεγάλη προβλεπτικότητα, αφού πλέον η πρόγνωση του κυματισμού είναι εφικτή, μέσω των διαφόρων κυματικών μοντέλων.

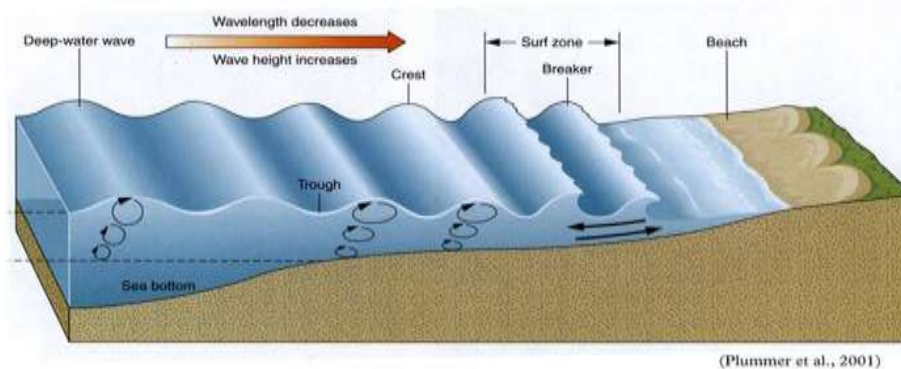
Μετά τη δημιουργία τους και αφού «εξελιχθούν» από τα πρώτα στάδια του ανεμογενούς κυματικού πεδίου (wind sea), τα κύματα μπορούν να διανύσουν μεγάλες αποστάσεις με ελάχιστη απώλεια ενέργειας. Η δημιουργία και το μέγεθος ανάπτυξής τους επηρεάζεται από πολλούς παράγοντες, όπως: η ταχύτητα και ο χρονικό διάστημα που πνέει ο άνεμος, η βαθυμετρία και το

βάθος του πυθμένα, η απόσταση που διανύει ο άνεμος στην ανοιχτή θάλασσα (fetch) και το εύρος της περιοχής που επηρεάζεται από το fetch (Σχήμα 2-3).



Σχήμα 2-3: Δημιουργία και εξέλιξη των θαλάσσιων επιφανειακών κυμάτων [Manases, 2010].

Στη συνέχεια, καθώς τα κύματα ταξιδεύουν προς την ξηρά και το βάθος μειώνεται, παρατηρείται αύξηση του ύψους τους (Σχήμα 2-4) με αποτέλεσμα να αυξάνεται η παράκτια κυματική ενέργεια, φαινόμενο γνωστό ως shoaling. Παράλληλα όμως, η ενέργεια μειώνεται εξαιτίας της τριβής με τον πυθμένα και του σπασίματος των κυμάτων (wave breaking) (για ύψος κύματος >0.78 του βάθους). Επιπλέον, αλλαγές υφίσταται και η κατεύθυνση των κυμάτων λόγω διάθλασης (refraction) φαινόμενο ιδιαίτερα σημαντικό σε μετατροπείς που η σύλληψη της ενέργειας εξαρτάται από τον προσανατολισμό. Σε κάποιες περιοχές σημαντική είναι και η ανάκλαση (reflection) και η περίθλαση (diffraction) των κυμάτων. Όλες αυτές οι παράμετροι εξαρτώνται από την τοπογραφία της περιοχής και μπορούν να οδηγήσουν σε περιοχές «εστιασμού» κυματικής ενέργειας (hot spots) [Thorpe, 1999].

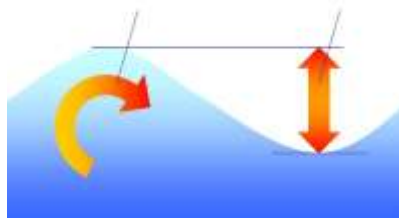


Σχήμα 2-4: Μεταβολή χαρακτηριστικών κύματος κατά την προσέγγισή του στην ακτή.
(Πηγή: <http://ericbeiers.com/archive/sediment/shorelineErosion.html>)

Η απώλεια ενέργειας εξαρτάται από το εύρος της υφαλοκρηπίδας και την τραχύτητα του πυθμένα και είναι δυνατόν μέχρι και να υποδιπλασιαστεί σε σχέση με την υπεράκτια. Η διαφορά αυτή ελαχιστοποιείται σε περιοχές με ομαλό πυθμένα και μεγάλο παράκτιο βάθος όπως για παράδειγμα στα ηφαιστειακά νησιά [Pontes & Falcao, 2001]. Παρόλα αυτά, υπολογίζεται ότι η συνολική παγκόσμια κυματική ισχύς που φτάνει στις ακτές είναι της τάξης του 1 TW (10^{12} W) ενώ η υπεράκτια μπορεί να ξεπερνά και τα 10^{13} W [Falnes, 2007].

2.1.2 Κυματική Ενέργεια

Τα επιφανειακά κύματα περιλαμβάνουν δύο μορφές ενέργειας: κινητική ενέργεια, λόγω της τροχιακής κίνησης των μορίων του νερού, που εκτελούν κυκλική κίνηση, η ακτίνα της οποίας μειώνεται με το βάθος και δυναμική ενέργεια, εξαιτίας της κατακόρυφης μετακίνησης της θαλάσσιας στήλης από τη θέση ισορροπίας (Σχήμα 2-5). Σύμφωνα με την γραμμική κινητική θεωρία οι ενέργειες αυτές συμβάλλουν εξίσου διαμορφώνοντας την τελική διαθέσιμη κυματική ενέργεια [Hughes & Hear, 2010].



Σχήμα 2-5: Συνιστώσες κυματικής ενέργειας [Lemonis, 2004].

Θεωρώντας λοιπόν ένα ιδανικό ημιτονοειδές κύμα με σταθερή μορφή, η πυκνότητα της κυματικής ενέργειας, δηλαδή ο λόγος της στιγμιαίας κυματικής ενέργειας ανά τετραγωνικό μέτρο, δίνεται από τη σχέση:

$$E_{density} = \frac{E}{L} = \frac{1}{8} \rho g H^2 \quad (J/m^2) \quad (1)$$

Όπου ρ είναι η πυκνότητα του νερού (Kg/m^3), g η επιτάχυνση της βαρύτητας (m/s^2), H το ύψος του κύματος (m) και L το μήκος κύματος (m) [Amundarain, 2010]. Η συγκεκριμένη όμως σχέση, δεν μπορεί να εφαρμοστεί σε ρεαλιστικές καταστάσεις, καθώς η χρονοσειρά της ανύψωσης του κύματος περιλαμβάνει την υπέρθεση πολλών κυμάτων με διαφορετικά ύψη και περιόδους. Εισάγοντας λοιπόν την έννοια τη διακύμανσης (σ^2) και θεωρώντας ένα κυματικό φάσμα με χαρακτηριστική μορφή, η διακύμανση συνδέεται με το σημαντικό ύψος κύματος ως: $H_s = 4\sqrt{\sigma^2}$ και με το πλάτος του κύματος ως $\sigma^2 = \frac{1}{2} \alpha^2$. Για ένα ημιτονοειδές κύμα όπου το πλάτος κύματος είναι $\alpha = \frac{H}{2}$ έχουμε ότι $\sigma^2 = \frac{H^2}{8}$ και συνεπώς $H_s = 4\sqrt{\frac{H^2}{8}} = \frac{2H}{\sqrt{2}}$. Αντικαθιστώντας στην σχέση (1) καταλήγουμε, όπως φαίνεται, σε μία σχέση όπου η ενέργεια εκφράζεται πλέον με όρους σημαντικού ύψους κύματος [Hughes & Hear, 2010].

$$E_{density} = \frac{1}{16} \rho g H_s^2 \quad (J/m^2) \quad \text{ή} \quad (Wh/m^2) \quad (2)$$

Αυτή είναι και η σχέση, που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα μελέτη, για τον υπολογισμό της κυματικής ενέργειας στις Ελληνικές θάλασσες, καθώς τα δεδομένα που ελήφθησαν από το μοντέλο ΤΡΙΤΩΝ, περιλαμβάνουν το σημαντικό ύψος κύματος. Η ενέργεια που μεταφέρει ένα κύμα, μπορεί να εκφραστεί και με όρους ισχύος, δηλαδή με το πηλίκο της ενέργειας προς την περίοδο. Η κυματική ισχύς (wave power) ή αλλιώς ροή ενέργειας (wave energy flux) δίνεται από τη σχέση:

$$P_{density} = \frac{E}{T} = \frac{\rho g H^2}{8T} \text{ (W/m}^2\text{)}$$

Συνήθως όμως περιγράφεται με όρους ισχύος ανά μήκος μετώπου κύματος [Amundarain, 2010], που ορίζεται ως:

$$P_{wavefront} = C_g E_{density} \quad (3)$$

Λαμβάνοντας υπ' όψιν ότι στα βραχέα κύματα η ομαδική ταχύτητα είναι $C_g = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{g}{k}}$ όπου k ο κυματαριθμός ($k = \omega^2/g$) καταλήγουμε στο ότι $C_g = \frac{gT}{4\pi}$. Με αντικατάσταση στη σχέση (3) καταλήγουμε τελικά στο ότι στα βαθιά νερά ισχύει: $P = \frac{\rho g^2 H_s^2 T}{64\pi}$ ή πιο απλά στο ότι:

$$P_{wavefront} = 0.577 H_s^2 T_z \text{ (KW/m)}$$

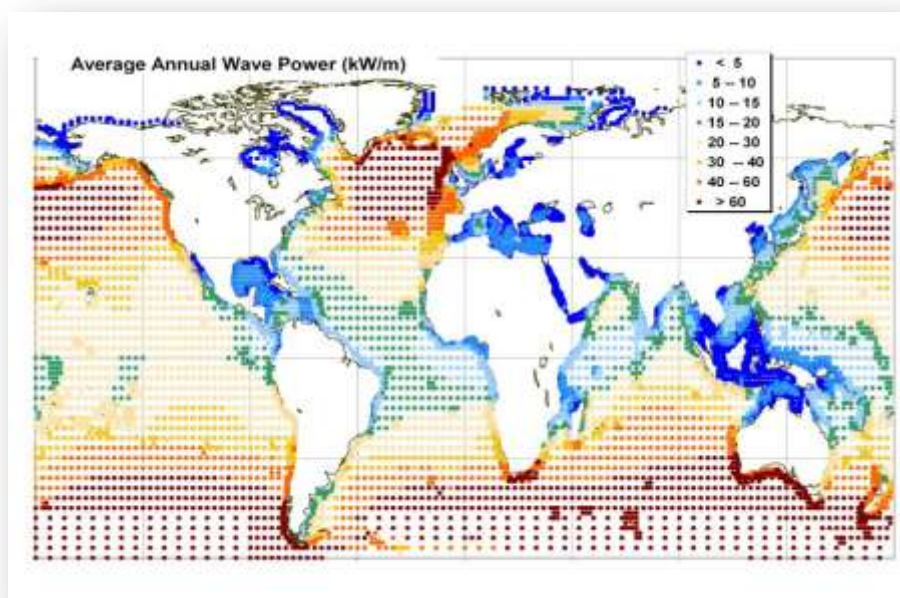
Όπου T_z : η μέση περίοδος κύματος (s) [IEA/OES, 2003].

Ιδιαίτερα σημαντικό για τους κυματικούς μετατροπείς ανοιχτής θάλασσας, είναι και το ότι η ποσότητα της ενέργειας μειώνεται εκθετικά με το βάθος. Συγκεκριμένα, όταν το βάθος ξεπερνά το μισό του μήκους κύματος (βαθιά νερά), η ενέργεια κάτω από τη θαλάσσια επιφάνεια, δίνεται από τη σχέση: $E(d) = E(d=SWL) * e^{-2\pi d/\lambda}$

όπου: d το βάθος, SWL mean sea water level (surface) και λ το μήκος κύματος [Vining, 2007].

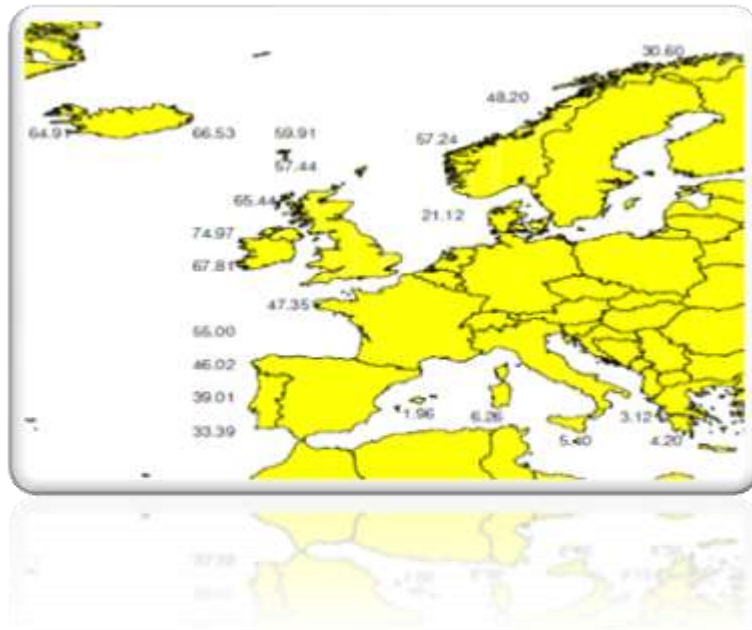
2.1.3 Γεωγραφική κατανομή κυματικής ενέργειας

Η θαλάσσια ενέργεια, όπως άλλωστε και όλες οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, είναι ανομοιόμορφα κατανομημένη στην υφήλιο. Όσον αφορά την κυματική ενέργεια (Σχήμα 2-6), η μεγαλύτερη ισχύς εντοπίζεται στα γεωγραφικά πλάτη 30°-60° και στα δύο ημισφαίρια κυρίως λόγω επικράτησης των Δυτικών ανέμων, με τιμές που ποικίλουν από 30-100 KW/m και μειώνονται προς Βορά και Νότο. Στις τροπικές περιοχές η μέση κυματική ισχύς είναι μικρότερη από 20 KW/m. Σημαντικές πηγές εντοπίζονται λοιπόν κατά μήκος των Ευρωπαϊκών Δυτικών ακτών, στις ακτές του Καναδά και των ΗΠΑ, στις Νότιες ακτές της Αυστραλίας και στη Νότια Αμερική εξαιτίας των επικρατούντων ανέμων και του μεγάλου fetch. Η παγκόσμια δυνητική συνεισφορά της κυματικής ενέργειας στην αγορά ηλεκτρισμού, υπολογίζεται περίπου στα 2000 TWh/year, δηλαδή 10% της παγκόσμιας ηλεκτρικής κατανάλωσης [Lemonis, 2004].



Σχήμα 2-6: Παγκόσμια κατανομή κυματικής ισχύος σε KW/m [Barstow et al., 2009].

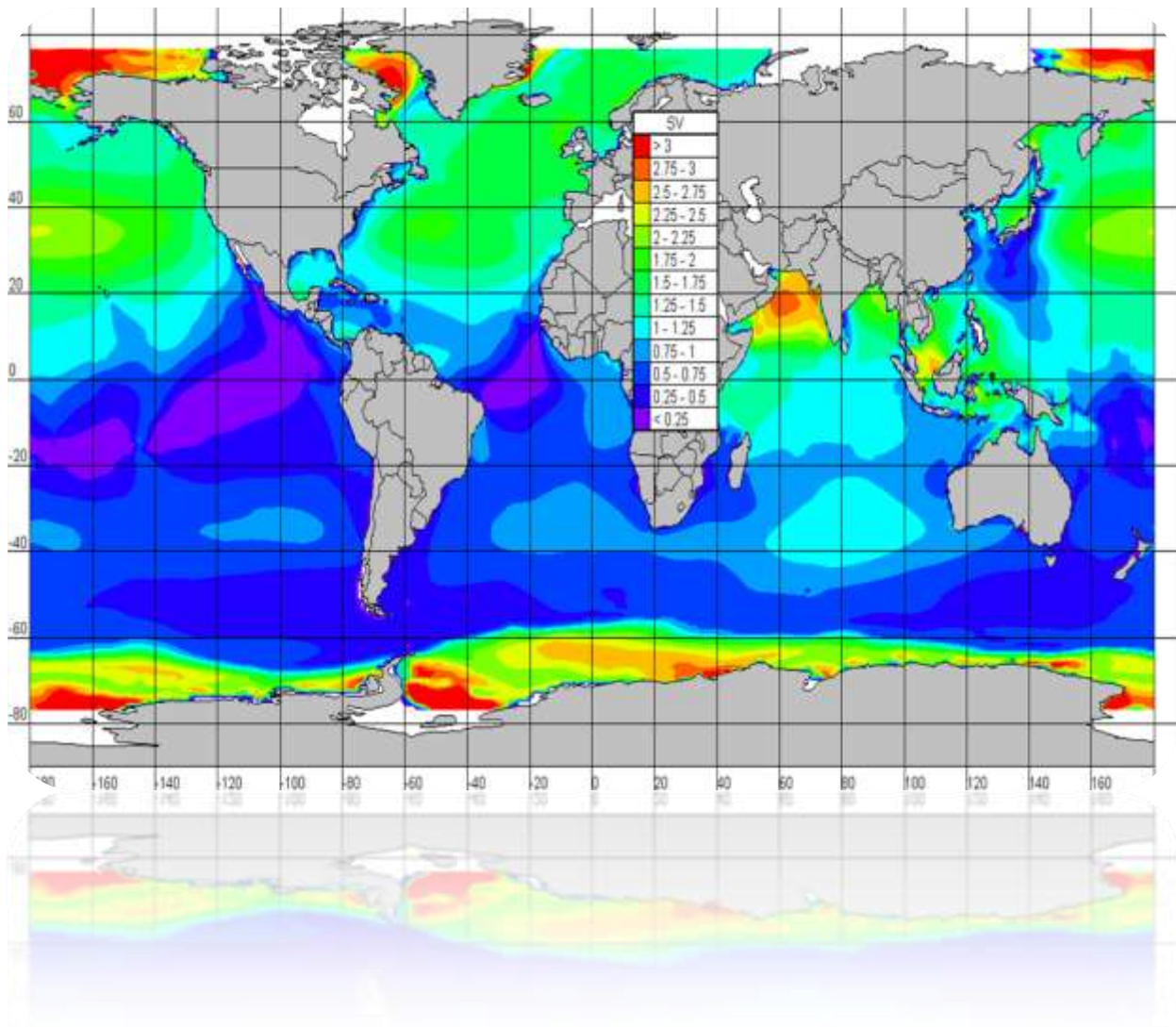
Όσον αφορά την Ευρώπη, το μεγαλύτερο κυματικό ενεργειακό δυναμικό εντοπίζεται στις Βορειοδυτικές ακτές που συνορεύουν με τον Ατλαντικό ωκεανό ως αποτέλεσμα του μεγάλου fetch. Εξίσου υψηλό δυναμικό εμφανίζεται μόνο στις νοτιότερες ακτές της Νότιας Αμερικής και στο Νότιο τμήμα της Αυστραλίας. Σύμφωνα με πρόσφατες μελέτες, το υπεράκτιο κυματικό δυναμικό για τις χώρες της Ε.Ε., συμπεριλαμβανόμενης της Νορβηγίας, εκτιμάται σε 320 GW, από τα οποία περίπου 30 GW αφορούν την Μεσόγειο Θάλασσα. Σε ετήσια βάση, ο μέσος όρος κυματικής ισχύος ανά μέτρο μετώπου κύματος κυμαίνεται στον Ανατολικό Ατλαντικό σε 25-70 kW/m και στην Βόρεια Θάλασσα 10-25 kW/m. Το τεχνικά εκμεταλλεύσιμο κυματικό δυναμικό για τα κράτη μέλη της Ε.Ε. υπολογίζεται συνολικά σε 150-230 TWh/έτος [CRES, 2006].



Σχήμα 2-7: WERATLAS: Κατανομή κυματικής ισχύος στην Ευρώπη σε kW/m. Οι τιμές που αναγράφονται προέρχονται από το UK Met Office's European Wind-Wave Model για την περίοδο 1987-1994 [Murray, 2004].

Όσον αφορά τις Ελληνικές θάλασσες, το υψηλό αιολικό δυναμικό πάνω από το Αιγαίο Πέλαγος, επάγει σχετικά έντονη κυματική δραστηριότητα στην περιοχή, με μέσες ετήσιες τιμές κυματικής ισχύος ανά μέτρο μετώπου κύματος της τάξης των 4-11 kW/m. Επιπλέον εντοπίζονται θαλάσσιες περιοχές «εστιασμού» κυματικής ενέργειας, λόγω φαινομένων ανάκλασης και περίθλασης. Το τεχνικά εκμεταλλεύσιμο κυματικό δυναμικό της Ελλάδας, θεωρείται το υψηλότερο της Μεσογείου, της τάξης των 5-9 TWh σε ετήσια βάση. Το δυναμικό αυτό θα μπορούσε να συνεισφέρει σημαντικά στην ηλεκτροδότηση πολλών νησιών [Λεμονής, 2010].

Η μεταβλητότητα της κυματικής ενέργειας σε ημερήσια, εβδομαδιαία, μηνιαία και εποχιακή βάση είναι ένας πολύ σημαντικός παράγοντας, καθώς μπορεί να επηρεάσει τη βιωσιμότητα των κυματικών μετατροπέων. Περιοχές με μικρότερο αλλά σταθερό ενεργειακό δυναμικό, μπορεί να αποδειχτούν καταλληλότερες ειδικά για τεχνολογίες που λειτουργούν με συγκεκριμένο εύρος μήκους κύματος και περιόδου. Σε μελέτη που πραγματοποιήθηκε από τον Cornett (2008), για τον προσδιορισμό του παγκοσμίου ενεργειακού δυναμικού, με χρήση του μοντέλου NOAA WAVEWATCH-III (NWW3), βρέθηκε ότι στα μεγάλα γεωγραφικά πλάτη και στα δύο ημισφαίρια, η κυματική ενέργεια παρουσιάζει έντονη εποχιακή διακύμανση (Σχήμα 2-8). Αντίθετα, στις περιοχές γύρω από τον Ισημερινό η μέση ετήσια ενέργεια παραμένει σε πιο σταθερό επίπεδο παρά τους κυκλώνες και τις τροπικές καταιγίδες που εμφανίζονται. Εξαιρέση αποτελεί η θάλασσα της Αραβίας που επηρεάζεται εποχιακά από τους Μουσσώνες.



Σχήμα 2-8: Δείκτης εποχιακής μεταβλητότητας (Seasonal Variability Index, SV) παγκόσμιας κυματικής ισχύος με χρήση του μοντέλου NWW3 [Cornett, 2008].

2.1.4 Ιστορική εξέλιξη των τεχνολογιών δέσμευσης της κυματικής ενέργειας

Η ιδέα μετατροπής της ενέργειας των επιφανειακών κυμάτων σε χρήσιμη μορφή δεν είναι καινούργια. Οι πρώτες προσπάθειες καταγράφονται ήδη από το 1799 ενώ το 1855 οι Leishman&Scobie δημιούργησαν διάφορους κυματικούς μετατροπείς. Όλες οι προσπάθειες επισκιάστηκαν τελικά από την εκμετάλλευση των πετρελαϊκών κοιτασμάτων κι έμειναν στο περιθώριο μετά τον Πρώτο Παγκόσμιο Πόλεμο [Clement et al., 2002]. Στο τέλος του 1940 ξανάρχισαν οι προσπάθειες δημιουργίας κυματικών μετατροπέων κυρίως από τον Ιάπωνα Yoshio Masuda. Κατά την πετρελαϊκή κρίση του 1973, πολλά Πανεπιστήμια και ερευνητικά κέντρα ξεκίνησαν να ασχολούνται και πάλι με την ιδέα εκμετάλλευσης της κυματικής ενέργειας ενώ οι κυβερνήσεις πολλών κρατών άρχισαν να επιδοτούν αντίστοιχες έρευνες με αποτέλεσμα, μόλις το 1973, να υπάρχουν ήδη 340 πατέντες [Falnes, 2007].

Την ίδια εποχή ξεχώρισαν για το ερευνητικό τους έργο, ο Michael E.McCormick ως νέος ερευνητής στις ΗΠΑ καθώς και οι Ευρωπαίοι Stephen Salter και Kjell Budal, από Πανεπιστήμια της Σκωτίας και της Νορβηγίας αντίστοιχα. Ο Salter σχεδίασε την πρώτη μοντέρνα κυματική γεννήτρια, γνωστή ως Salter Duck, αλλά το ερευνητικό του έργο τερματίστηκε το 1982 πριν προλάβει να εφαρμοστεί. Οι επιδοτήσεις σταμάτησαν στις αρχές του 1980, ως αποτέλεσμα της μείωσης της τιμής του πετρελαίου, αλλά κάποιες πρότυπες συσκευές πρόλαβαν να δοκιμαστούν στο θαλάσσιο περιβάλλον [Falnes, 2007].

Τα τελευταία χρόνια οι προσπάθειες έχουν ενταθεί, κυρίως λόγω της δέσμευσης για εφαρμογή του πρωτοκόλλου του Κιότο, που αφορά τη μείωση των αερίων του θερμοκηπίου. Το 1994, με το τέταρτο Πρόγραμμα-Πλαίσιο, η Ευρωπαϊκή Επιτροπή άρχισε να στηρίζει τις έρευνες στον τομέα, με τη διοργάνωση διεθνών συνεδρίων πάνω στην κυματική ενέργεια, που βοήθησαν στον συντονισμό και στη συνεργασία Πανεπιστημίων, ερευνητικών κέντρων και βιομηχανιών. Με την οικονομική υποστήριξη της Ευρωπαϊκής Επιτροπής, ξεκίνησε το 2004, η «Συντονισμένη Δράση για τη Θαλάσσια Ενέργεια» (Coordinated Action on Ocean Energy) με 41 συμμετέχοντες που μοιράζονταν το ίδιο ενδιαφέρον για συνεργασία και προώθηση της ωκεάνιας ενέργειας. Η διάρκεια του προγράμματος ήταν 3 χρόνια και αφορούσε κυρίως την έρευνα πάνω στη μετατροπή της κυματικής και παλιρροιακής ενέργειας [CRESES, 2006].

Σήμερα, η κυματική ενέργεια βρίσκεται πολύ κοντά στην ευρεία εμπορική εκμετάλλευση καθώς διάφοροι μετατροπείς έχουν αποδείξει την αντοχή τους στο απρόβλεπτο θαλάσσιο περιβάλλον και αρκετές εμπορικές συσκευές κατασκευάζονται συνεχώς σε Ευρώπη, Αυστραλία, Ισραήλ και αλλού. Επιπλέον, μεγάλη έρευνα γίνεται πάνω στην επιλογή των κατάλληλων τοποθεσιών αγκυροβόλησης ώστε να επιτευχθεί μία ακριβής αξιολόγηση της διαθέσιμης κυματικής ενέργειας. Στον Πίνακα 2-1 φαίνονται κάποιες από τις υποψήφιες περιοχές που έχουν μελετηθεί εκτενώς καθώς και η αντίστοιχη εκτιμώμενη κυματική ισχύς [Defne et al., 2009].

Πίνακας 2-1: Ετήσια κυματική ισχύς σε διάφορες χώρες (Defne et al., 2009).

Τοποθεσία	Εκτιμώμενη Κυματική Ισχύς (KW/m)
Βέλγιο	10
Καναδάς	33
Δανία	7 – 24
Ελλάδα	2 - 4
Ινδία	10 – 32
Ιρλανδία	57 – 77
Ιταλία	5 – 10
Ιαπωνία	6 – 7
Νορβηγία	20 – 40
Πορτογαλία	30 - 40
Αγγλία	45 – 75
Γαλλία (Ατλαντικός)	40
Γαλλία (Μεσόγειος)	4 – 5
ΗΠΑ Καλιφόρνια	10 – 32
ΗΠΑ Χαβάη	15
ΗΠΑ Maine	14
ΗΠΑ Βόρεια Καρολίνα	5 – 15
ΗΠΑ Μασαχουσέτη	5
ΗΠΑ Όρεγκον	21

2.1.5 Κυματικοί Μετατροπείς

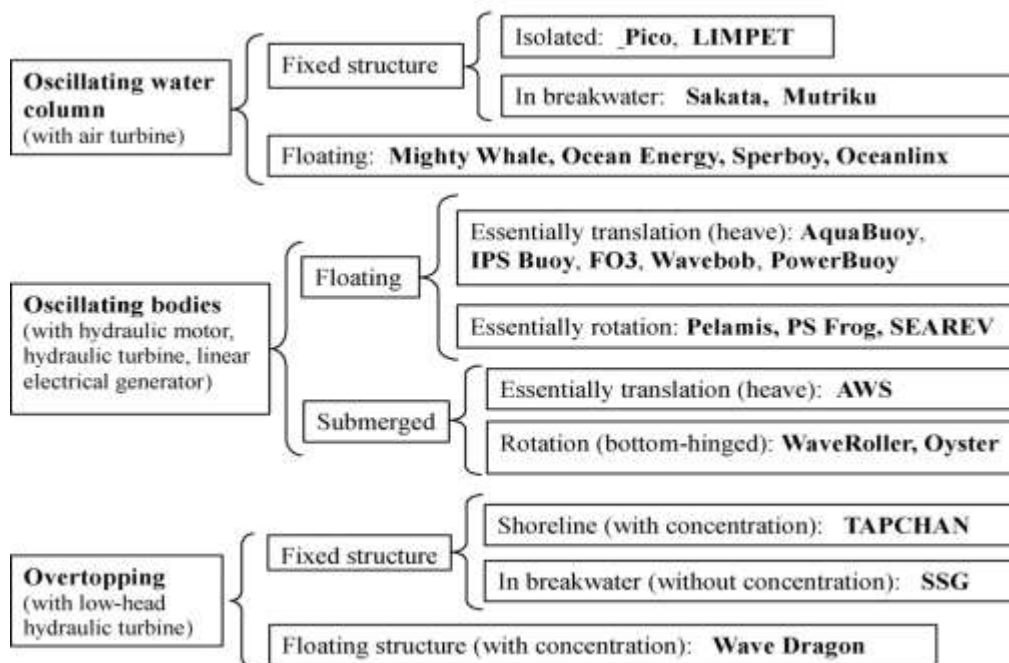
Σε αντίθεση με τις υπόλοιπες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, οι τεχνολογίες μετατροπής της κυματικής ενέργειας είναι πολυάριθμες. Αν και υπάρχουν περισσότερες από 1000 πατέντες παγκοσμίως, που έχουν κατοχυρωθεί με δίπλωμα ευρεσιτεχνίας, οι κυματικοί μετατροπείς μπορούν να χωριστούν σε κατηγορίες, ανάλογα με τη μέθοδο δέσμευσης της ενέργειας, με το μέγεθος της συσκευής, με τον προσανατολισμό τους σε σχέση με τη κατεύθυνση διάδοσης του κύματος κτλ. [Pontes & Falcao, 2001]. Στην παρούσα μελέτη επιλέχθηκε ο διαχωρισμός τους αρχικά, με βάση την τοποθεσία του συστήματος σε σχέση με την ακτογραμμή και κατόπιν με βάση τον τρόπο λειτουργίας. Έτσι, διακρίνουμε τις εξής περιπτώσεις:

- **Επάκτιες συσκευές (*shoreline devices*)**, στις οποίες περιλαμβάνονται τεχνολογίες:
 - Παλλόμενης Υδάτινης Στήλης (Oscillating Water Column, OWC)
 - Υπέρβασης/ Υπερύψωσης ή Υπερχείλισης (Overtopping devices)
 - Κατακόρυφης Ταλάντωσης (Heaving devices)

- **Παράκτιες συσκευές (*nearshore devices*)**, στις οποίες περιλαμβάνονται τεχνολογίες:
 - Παλλόμενης Υδάτινης Στήλης (Oscillating Water Column, OWC)
 - Κατακόρυφης Ταλάντωσης (Heaving devices)
 - Αρθρώσεων (Pitching devices)
 - Οριζόντιας Παλινδρόμησης (Surging devices)

- **Υπεράκτιες συσκευές (*offshore devices*)**, στις οποίες περιλαμβάνονται τεχνολογίες:
 - Παλλόμενης Υδάτινης Στήλης (Oscillating Water Column, OWC)
 - Κατακόρυφης Ταλάντωσης (Heaving devices)
 - Αρθρώσεων (Pitching devices)
 - Οριζόντιας Παλινδρόμησης (Surging devices)
 - Υπέρβασης/ Υπερύψωσης ή Υπερχείλισης (Overtopping devices)

Στο Σχήμα 2-9 παρουσιάζονται κάποιοι από τους κυριότερους κυματικούς μετατροπείς σύμφωνα με τον Falcao (2010). Η επιλογή των συσκευών, βασίστηκε στο στάδιο εξέλιξης και στην προσπάθεια που δαπανήθηκε για τη δημιουργία τους, ενώ η ταξινόμησή τους έγινε με βάση την αρχή λειτουργίας. Κάποιοι από αυτούς περιγράφονται συνοπτικά στα κεφάλαια που ακολουθούν.



Σχήμα 2-9: Ταξινόμηση κυματικών μετατροπέων [Falcao, 2010].

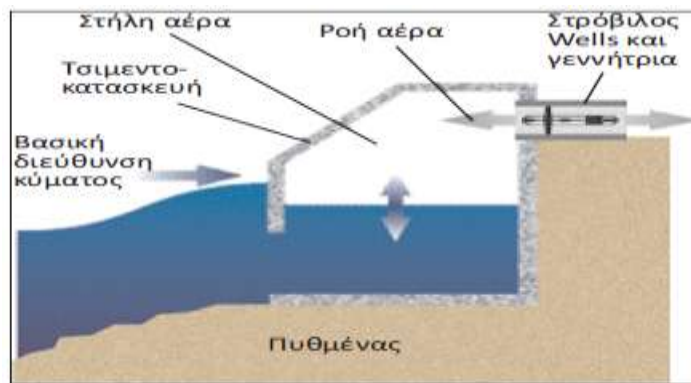
Στη συνέχεια, παρουσιάζονται συνοπτικά τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των διαφόρων τεχνολογιών εκμετάλλευσης της κυματικής ενέργειας, σε σχέση με την απόσταση τους από την ακτή. Καθώς το είδος του μετατροπέα και ο τρόπος σύλληψης της ενέργειας διαφέρει ανάλογα με τη ζώνη τοποθέτησης, παρατίθενται επιπλέον και κάποιες ενδεικτικές τεχνολογίες για κάθε ζώνη.

2.1.5.1 Τεχνολογίες Ακτογραμμής

Οι επάκτιες συσκευές ή αλλιώς συσκευές ακτογραμμής (*shoreline devices*), έχουν το πλεονέκτημα της εύκολης εγκατάστασης και συντήρησης και του μικρότερου κόστους, καθώς δεν απαιτούνται μεγάλα υποθαλάσσια ηλεκτρικά καλώδια. Η μείωση που υφίσταται η ενέργεια λόγω τριβής, μπορεί να αντισταθμιστεί επιλέγοντας περιοχές τοποθέτησης όπου εμφανίζεται συγκέντρωση ενέργειας λόγω διάθλασης και περίθλασης των κυμάτων (*hot spots*). Για την εγκατάσταση ενός τέτοιου μετατροπέα, πρέπει να ληφθούν υπ' όψιν διάφοροι παράγοντες όπως η γεωμορφολογία της περιοχής, το εύρος της παλίρροιας, η οπτική όχληση, η ευαισθησία της ακτογραμμής και του οικοσυστήματος κ.ά. [Thorpe, 1999]. Οι κυριότερες τεχνολογίες είναι η Παλλόμενη Υδάτινη Στήλη, τα συστήματα Υπέμβασης/Υπερχείλησης και Κατακόρυφης Ταλάντωσης.

Καλύτερη τεχνολογία θεωρείται η Παλλόμενη Υδάτινη Στήλη (*Oscillating Water Column, OWC*). Η λειτουργία της βασίζεται σε μία μερικώς βυθισμένη ρηχή κατασκευή, ανοιχτή στο ύψος της θαλάσσιας επιφάνειας (Εικόνα 2-1). Καθώς το κύμα εισέρχεται στο θάλαμο, η θαλάσσια στήλη συνεχώς ανυψώνεται και κατεβαίνει, συμπιέζοντας κι αποσυμπιέζοντας τον υπερκείμενο αέρα. Ο αέρας έχοντας τη δυνατότητα να εισέρχεται και να εξέρχεται από την κορυφή του θαλάμου θέτει σε κίνηση μία τουρμπίνα η οποία είναι συνήθως τύπου Wells ή ώθησης. Η

τουρμπίνα είναι με τη σειρά της συζευγμένη με μία γεννήτρια κι έτσι η κινητική ενέργεια μετατρέπεται σε ηλεκτρική [Amundarain et al., 2010].



Εικόνα 2-1: Λειτουργία Παλλόμενης Υδάτινης Στήλης (ΠΥΔ) (Πηγή: <http://www.waveplam.eu>)

Κάποιες από τις κυριότερες εγκαταστάσεις που βασίζονται σ' αυτήν την τεχνολογία είναι:

- ❖ *The European Pilot OWC Plant*: Εγκατεστημένο στη νήσο Pico στις Αζόρες από το 1999, λειτούργησε τελικά το 2004 λόγω τεχνικών προβλημάτων. Αποτελεί το πρώτο έργο στην περιοχή που χρηματοδοτήθηκε από την Ευρωπαϊκή Επιτροπή, με ονομαστική παραγόμενη ισχύ 400 kW [CREC, 2006].
- ❖ *Nereida (Mutriku Breakwater) MOWC*: Είναι τοποθετημένη στις Βόρειες ακτές της Ισπανίας, σε αστική περιοχή, σε αντίθεση με τις υπόλοιπες τεχνολογίες ακτογραμμής. Στη συγκεκριμένη τεχνολογία επιχειρείται ενσωμάτωση τουρμπίνων τύπου Wells στην ΠΥΣ. Το πρόγραμμα συγχρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή Ένωση και στην υλοποίηση του συμμετέχει και η Ελλάδα (ΚΑΠΕ).
- ❖ *Wave Energy Conversion Activator (WECA)*: Η ιδέα ανήκει στην Ελληνική εταιρεία DAEDALUS Informatics Ltd. Πρόκειται για έναν μετατροπέα κατάλληλο για ενσωμάτωση σε κυματοθραύστες ή άλλες κατασκευές (Εικόνα 2-2). Μπορεί να τοποθετηθεί πάνω στην ακτογραμμή αλλά και παράκτια ή στην ανοιχτή θάλασσα. Είναι σχεδιασμένος ώστε να απορροφά το μεγαλύτερο μέρος της ενέργειας των προσπιπτόντων κυμάτων, να τη μετατρέπει σε συμπιεσμένο αέρα και εν συνεχεία σε ηλεκτρική ενέργεια. Ήδη έχει σχεδιαστεί ένα πειραματικό μοντέλο πλήρους κλίμακας (7m ύψος και 6m πλάτος) με έξοδο ισχύος που αναμένεται να φτάνει τα 20kW.



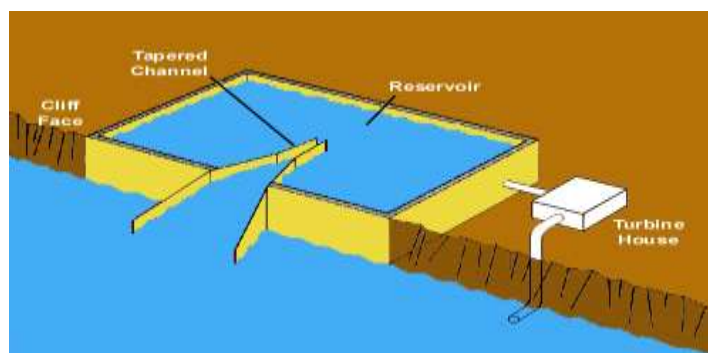
Εικόνα 2-2: WECA (Πηγή: www.daedalus.gr)

- ❖ *Limpet OWC*: Πρόκειται για την πρώτη εμπορική παράκτια εγκατάσταση που βασίζεται στην τεχνολογία Παλλόμενης στήλης (*Εικόνα 2-3*). Εγκαταστάθηκε στη νήσο Islay, στη Δυτική ακτή της Σκωτίας και λειτούργησε από το 1991-1999. Πιο πρόσφατα, το 2000, κατασκευάστηκε η νέα συσκευή *Limpet* που διαθέτει δύο τουρμπίνες (τύπου Wells) οι οποίες κινούν δύο γεννήτριες ονομαστικής ισχύος 250 kW η κάθε μία. Η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται χρησιμοποιείται και για την κίνηση του μοναδικού λεωφορείου στον κόσμο που χρησιμοποιεί την κυματική ενέργεια ως καύσιμο. Το συνολικό κόστος ανέρχεται στα 2.4 εκατομμύρια ευρώ [Lihui Guo, 2010].



Εικόνα 2-3: Limpet, Islay Σκωτία.

Στις κυματικές τεχνολογίες ακτογραμμής συγκαταλέγονται το Pendulor, που βρίσκεται αρκετά χρόνια σε δοκιμαστικό στάδιο στην Ιαπωνία και το TAPCHAN, ένα πρότυπο του οποίου, κατασκευάστηκε στις Νορβηγικές ακτές, το 1985 και λειτούργησε επιτυχώς για πολλά χρόνια. Το σύστημα TAPCHAN (TAPered CHANnel) οδηγεί το κύμα σε μία δεξαμενή μέσω βαθμιαίων καναλιών (*Εικόνα 2-4*). Καθώς το νερό εισέρχεται στη δεξαμενή, τα κανάλια συμβάλλουν στην αύξηση του ύψους των κυμάτων και στη συνέχεια κινούν έναν άξονα τοποθετημένο παράλληλα σ' αυτά. Η κίνηση του άξονα, μετατρέπει την κινητική ενέργεια σε ηλεκτρική, η οποία με τη σειρά της, διοχετεύεται σε ηλεκτρικό δίκτυο ή αποθηκεύεται σε μπαταρίες [Falcao, 2010]. Τα συστήματα αυτά χαρακτηρίζονται από χαμηλό κόστος συντήρησης και μεγάλη αξιοπιστία αλλά απαιτούν περιοχές με σταθερό κυματισμό, ύψος κύματος μικρότερο από 1 μέτρο, καλό κυματικό δυναμικό, και βαθιά νερά.



Εικόνα 2-4: Σύστημα TAPCHAN.

(Πηγή: <http://www.eepe.murdoch.edu.au/resources/info/Tech/wave/index.html>)

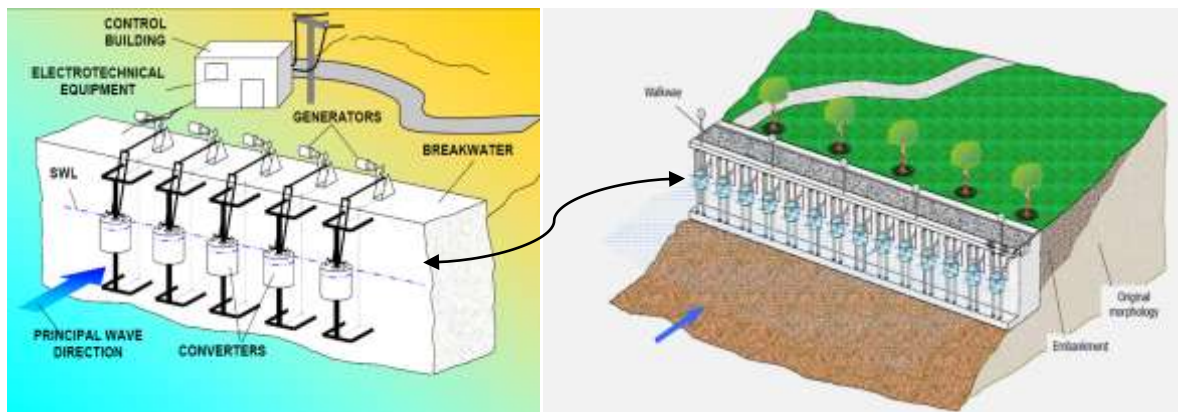
Μία διαφορετική προσέγγιση αποτελεί το σύστημα SSG (SeaSlot-Cone Generator) που προτάθηκε από Νορβηγική εταιρεία και βασίζεται στην υπέρβαση των θαλασσίων κυμάτων χρησιμοποιώντας ένα σύνολο τριών δεξαμενών, τοποθετημένες η μία πάνω στην άλλη (Εικόνα 2-5). Το νερό που θα παγιδεύεται στις δεξαμενές θα διέρχεται μέσα από έναν πολύ-τμηματικό στρόβιλο για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ενώ οι πολλαπλές δεξαμενές θα συντελούν στην υψηλότερη απόδοση σε σχέση με τις κατασκευές μίας μόνο δεξαμενής. Το SSG θα μπορεί να τοποθετηθεί είτε υπεράκτια, ως πλωτή ή σταθερή εγκατάσταση, είτε στην ακτογραμμή, ενσωματωμένο σε κυματοθραύστη. Το 2008 χρηματοδοτήθηκε και σχεδιάστηκε μία πρότυπη συσκευή SSG για να εγκατασταθεί στη νήσο Kvitsoy. Η κατασκευή όμως σταμάτησε, καθώς υπήρξαν αντιδράσεις για πιθανές περιβαλλοντικές επιπτώσεις και προς το παρόν, μελετάται η επιλογή διαφορετικής τοποθεσίας εγκατάστασης [Frigaard et al., 2008].



Εικόνα 2-5: Απεικόνιση πλωτής και σταθερής εγκατάστασης μετατροπέα SSG.

Μία επάκτια συσκευή είναι και το LabBuoy [Final Technical Report LabBuoy, 2004]. Πρόκειται για ένα κυματικό μετατροπέα ελληνικής προέλευσης που βρίσκεται σε δοκιμαστικό στάδιο. Είναι πλωτού τύπου και τα συστήματα μετάδοσης και μετατροπής βρίσκονται εγκατεστημένα σε κυματοθραύστη ή αποβάθρα. Ήδη έχει κατασκευαστεί κι εγκατασταθεί στη δεξαμενή κυμάτων του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου Αθηνών, ένα μοντέλο κλίμακας 1:15, που αποτελείται από μία σειρά με 5 μετατροπείς. Το κόστος της παραγόμενης ενέργειας εκτιμάται ότι θα είναι περίπου 0.07-0.09 €/kWh αλλά αναμένεται να μειωθεί με την περαιτέρω ανάπτυξη της τεχνολογίας.

Όσον αφορά τον περιβάλλοντα χώρο, η ακουστική και οπτική όχληση μπορεί να ελαχιστοποιηθεί χρησιμοποιώντας κατάλληλη μόνωση στους μετατροπείς και διαμορφώνοντας κατάλληλα το περιβάλλον τοποθέτησης (Εικόνα 2-6). Οι επιδράσεις όμως στο θαλάσσιο οικοσύστημα δεν έχουν εξακριβωθεί ακόμη και συνεπώς χρειάζεται μια εκτενέστερη μελέτη. Η συγκεκριμένη τεχνολογία μπορεί επιπλέον να συμβάλει στη μείωση της διάβρωσης της ακτογραμμής, καθώς πρόκειται για μία κατά βάση, κυματοθραυστική εγκατάσταση.



Εικόνα 2-6: Αναπαράσταση συσκευής LabBuoy και πιθανός τρόπος εγκατάστασης [Final Technical Report LabBuoy, 2004].

Μία διαφορετική εγκατάσταση ακτογραμμής είναι και το SDE (Oscillating Wave Surge device). Πρόκειται για μία πιλοτική διάταξη 40 kW (Εικόνα 2-7), που βρίσκεται στο Ισραήλ και χρησιμοποιεί την κίνηση των κυμάτων, για να παράγει υδραυλική πίεση που κατόπιν μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια. Για την παραγωγή ενέργειας αξιοποιείται η ταχύτητα του κύματος, το ύψος, και το βάθος [http://thefraserdomain.typepad.com/energy/ocean_power/]. Χαρακτηριστικά του είναι το χαμηλό κόστος κατασκευής και λειτουργίας, οι ανταγωνιστικές τιμές σε σχέση με άλλες μεθόδους παραγωγής ενέργειας και η απουσία περιβαλλοντικών επιπτώσεων.



Εικόνα 2-7: Εγκατεστημένο μοντέλο SDE στο Ισραήλ. Το περύγιο εκτελεί ανοδική-καθοδική κίνηση για την παραγωγή ενέργειας.

2.1.5.2 Παράκτιες Τεχνολογίες

Οι παράκτιοι μετατροπείς τοποθετούνται σε μικρά βάθη, συνήθως 10-20 m και σε αποστάσεις μεγαλύτερες από 0.5-2.0 km από την ακτή. Όντας πιο κοντά στην ακτή συγκριτικά με τους υπεράκτιους, μειώνεται το κόστος των καλωδίων που απαιτούνται για τη μεταφορά ρεύματος, καθώς και το κόστος επισκευών και συντήρησης. Επιπλέον, εξαιτίας του σπασίματος των κυμάτων, οι συσκευές δέχονται ένα φιλτραρισμένο ουσιαστικά κύμα μειώνοντας τον κίνδυνο της καταστροφής τους από ακραία καιρικά φαινόμενα. Αν και φαινομενικά το μειονέκτημα τους είναι ότι δέχονται μικρότερη μέση ετήσια κυματική ισχύ, τελικά έχει αποδειχτεί (τουλάχιστον για τους

μετατροπείς παλινδρόμησης) ότι η μείωση του εκμεταλλεύσιμου δυναμικού είναι μόλις 5-10% σε σχέση με τις τεχνολογίες ανοιχτής θάλασσας. Στο Islay της Σκωτίας για παράδειγμα, η μέση ετήσια κυματική ισχύς μειώνεται από 38kW/m στην ισοβαθή των 50m σε 22kW/m στα 10m βάθος. Έτσι, ένα κύμα με σημαντικό ύψος κύματος μικρότερο από 4m, θα υποστεί μόλις 10% μείωση στην ενέργεια στην ισοβαθή των 10m [Folley et al., 2007].

Και στους παράκτιους μετατροπείς, η πιο συνηθισμένη τεχνολογία είναι η Παλλόμενη Υδάτινη Στήλη, με κυριότερους αντιπροσώπους το OSPREY και το Oceanlinx. Το OSPREY (Ocean Swell Powered Renewable Energy) κατασκευάστηκε από την εταιρεία Wavegen για εγκατάσταση στον πυθμένα, σε μικρά βάθη (<20 m). Το πρώτο πειραματικό μοντέλο (OSPREY I) ήταν κατασκευασμένο από χάλυβα, διέθετε μία ανεμογεννήτρια και ο χρόνος ζωής του υπολογιζόταν στα 25 χρόνια. Τελικά αντιμετώπισε πρόβλημα κατά την εγκατάστασή του στη Σκωτία κι έτσι δημιουργήθηκε το OSPREY II από σκυρόδεμα, που διαθέτει μία προαιρετική πλέον ανεμογεννήτρια, καθώς και διαφορετικό σχεδιασμό δεξαμενών. Το προσδόκιμο ζωής είναι μεγαλύτερο από 60 χρόνια, η τοποθέτηση θα γίνει σε περίπου 15 m βάθος και 1 km απόσταση από την ακτή και υπολογίζεται να παράγει 2MW [Thorpe, 1999].

Το Oceanlinx (Energetech), είναι μία πρότυπη μονάδα που βασίζεται στην Παλλόμενη Υδάτινη Στήλη κι είχε τοποθετηθεί στο Port Kembla της Αυστραλίας (Εικόνα 2-8). Χαρακτηριστικό του είναι το κωνοειδές σχήμα του θαλάμου και ο καινοτόμος στρόβιλος (Denniss-Auld) που διαθέτει. Καθώς το νερό εισέρχεται στον θάλαμο, που βρίσκεται βυθισμένος, συμπιέζει κι αποσυμπιέζει συνεχώς τον αέρα μέσα στον θάλαμο. Το κωνοειδές σχήμα του θαλάμου συμβάλλει στην επιτάχυνση της ροής του αέρα ο οποίος διέρχεται με μέγιστη ταχύτητα μέσα από τον στρόβιλο. Ο στρόβιλος, μετατρέπει την ενέργεια της ροής του αέρα σε μηχανική και κατόπιν σε ηλεκτρική, μέσω μιας γεννήτριας. Η παραγόμενη ενέργεια μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για αφαλάτωση και παραγωγή πόσιμου νερού. Μία μόνο συσκευή Oceanlinx αναμένεται ότι θα είναι σε θέση να τροφοδοτήσει με ηλεκτρισμό 1.500 οικίες καθημερινά ή με νερό 9.000 οικίες, θεωρώντας ότι η ημερήσια κατανάλωση της κάθε μίας είναι 20kWh ρεύματος και 350 λίτρα νερό [<http://www.oceanlinx.com>].

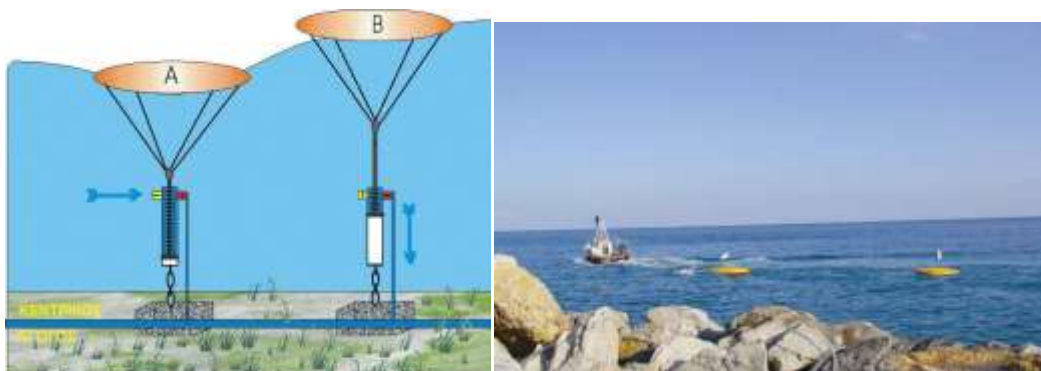


Εικόνα 2-8: Εγκατεστημένη μονάδα Oceanlinx στο Port Kembla της Αυστραλίας.

Συνηθισμένη τεχνολογία για παράκτια εγκατάσταση, αποτελούν και οι σημειακοί απορροφητές (point absorbers), το μέγεθος των οποίων, είναι πάντα μικρό συγκρινόμενο με το μήκος κύματος. Οι πλωτές συσκευές, εκμεταλλεύονται την ανύψωση και πτώση της ελεύθερης επιφάνειας του νερού, για να κινήσουν γεννήτριες μέσα από διάφορους μηχανισμούς. Αποτελούνται από έναν

επιφανειακό πλωτήρα, η καθ' ύψος ταλάντωση του οποίου, μπορεί να εκμεταλλευτεί με διάφορους τρόπους. Θεωρητικά, όταν μία συσκευή έχει μικρό μέγεθος, σε σχέση με το μήκος κύματος, η ισχύς που μπορεί να απορροφήσει, δεν σχετίζεται με το μέγεθός της αλλά με το μήκος κύματος. Συνεπώς ένας σημειακός απορροφητής έχει την δυνατότητα να απορροφά μεγάλα ποσά ενέργειας καταλαμβάνοντας ελάχιστη επιφάνεια. Επιπλέον, η ισχύς που θα απορροφηθεί εξαρτάται και από τον τρόπο ταλάντωσης, σύμφωνα με τη σχέση: $P_{max} = (\epsilon\lambda/2\pi) * P_i$ όπου P_i είναι η ισχύς ανά μέτωπο κύματος, λ το μήκος κύματος, ενώ η σταθερά ϵ είναι 1 για τις συσκευές κατακόρυφης ταλάντωσης (heaving devices) και 2 για τις τεχνολογίες οριζόντιας παλινδρόμησης (Surging devices) που θα αναφερθούν παρακάτω [Henry et al, 2010].

Η ελληνική εταιρεία Wave Energy S.A. έχει αναπτύξει έναν τέτοιο κυματικό μετατροπέα ο οποίος μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε για την παραγωγή ηλεκτρισμού, είτε για αφαλάτωση θαλασσινού νερού, εκμεταλλευόμενος την επιτόπου παραγόμενη ενέργεια. Η κατασκευή ξεκίνησε το 2002 και ο πρώτος πλωτήρας ποντίστηκε στο Λαύριο, σε βάθος περίπου 10-20m (Εικόνα 2-9). Παρ' όλα αυτά η συσκευή έχει την δυνατότητα τοποθέτησης και σε μεγαλύτερα βάθη με μικρές απώλειες [CRES, 2006]. Ο κάθε πλωτήρας θα μπορεί να παράγει 2-3 kW ισχύος για μέτριο κυματικό δυναμικό (10kW/m).



Εικόνα 2-9: Λειτουργία ενός σημειακού απορροφητή (αριστερά), πόντιση πλωτήρα στο Λαύριο (δεξιά).

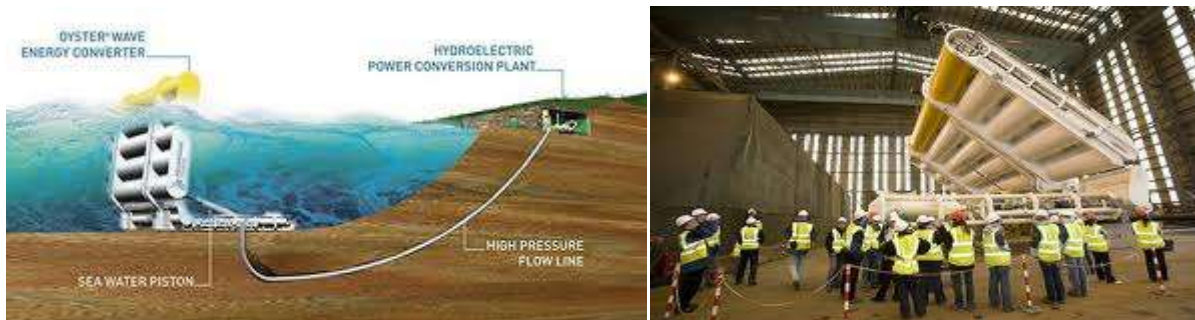
Όπως προαναφέρθηκε, καθώς το κύμα πλησιάζει προς την ακτή και το βάθος μειώνεται, παρατηρείται μείωση της ακτίνας της κυκλικής τροχιάς που διαγράφουν τα μόρια του νερού. Η τροχιά αυτή γίνεται όλο και πιο ελλειπτική καταλήγοντας τελικά στον πυθμένα η κίνηση να είναι οριζόντια (surge phenomenon). Αυτή την κινητική ενέργεια εκμεταλλεύονται οι παράκτιες τεχνολογίες οριζόντιας κυματικής παλινδρόμησης (Wave Surging devices) όπως οι WaveRoller και Oyster.

Το WaveRoller (Oscillating Wave Surge Converter), αποτελείται από ένα ειδικά σχεδιασμένο πτερύγιο τοποθετημένο στον πυθμένα, που ακολουθεί την κίνηση του νερού (Εικόνα 2-10). Είναι μία τμηματική τεχνολογία, με την έννοια ότι αποτελείται από συνδεδεμένες υποενότητες. Κάθε μία από αυτές αποτελείται από 3-5 πτερύγια τα οποία εγκαθίστανται σ' ένα κοινό σύστημα παραγωγής. Το μέγεθος λοιπόν της εγκατάστασης μπορεί να προσαρμοστεί στις ανάγκες της εκάστοτε περιοχής. Επιπλέον, όλη η εγκατάσταση βρίσκεται πλήρως βυθισμένη σε βάθος 7-15m και συνεπώς δεν υπάρχει ούτε οπτική όχληση, ούτε κίνδυνος για τα μικρά αλιευτικά σκάφη. Μία πρότυπη συσκευή πλάτους 4,5m και ύψους 3,5m εγκαταστάθηκε και δοκιμάστηκε το 2008 στο Peniche, της Πορτογαλίας και στο EMEC, στο Orkney της Σκωτίας [<http://www.aw-energy.com/concept.html>].



Εικόνα 2-10: Εγκατεστημένη συσκευή WaveRoller στο EMEC.

Η συσκευή Oyster 1 της σκοτσέζικης εταιρείας Aquamarine Power, τοποθετείται στον πυθμένα σε μικρά βάθη (10-15m) και κάθε μονάδα μπορεί να παράγει 300-600 kW όταν το μέσο κυματικό κλίμα είναι πάνω από 15 kW/m. Αποτελείται από ένα περύγιο ταλάντωσης που αποσπά την κυματική ενέργεια και τη διαβιβάζει ως υδραυλική ισχύ στην ακτή, σε μία υδροηλεκτρική μονάδα μετατροπής (Εικόνα 2-11). Καθώς βρίσκεται βυθισμένο, η παραγωγή ενέργειας είναι συνεχής κι ανεξάρτητη από τις καιρικές συνθήκες. Βασικά χαρακτηριστικά του είναι οι μικρές διαστάσεις (18x12x2m) και η εύκολη - οικονομική τοποθέτηση και συντήρηση. Ένα πρότυπο μοντέλο με διάρκεια ζωής δύο χρόνια, παρέμεινε εγκατεστημένο και σε λειτουργία από το 2009 έως το 2011 στο European Marine Energy Center (EMEC) στο Orkney της Σκωτίας. Επόμενο βήμα είναι ο σχεδιασμός του Oyster 2 και η εγκατάσταση τριών συσκευών στο EMEC [Cameron et al., 2010].



Εικόνα 2-11: Αναπαράσταση εγκατάστασης Oyster και κατασκευή πρότυπης μονάδας.
(Πηγή: <http://www.aquamarinepower.com/>)

2.1.5.3 Υπεράκτιες Τεχνολογίες

Οι υπεράκτιοι μετατροπείς κυματικής ενέργειας, τοποθετούνται σε περιοχές όπου το βάθος ξεπερνά τα 40m και συνεπώς, δέχονται την μεγαλύτερη κυματική ισχύ. Συνήθως αποτελούνται από ένα παλλόμενο αρθρωτό σώμα, το οποίο μετατρέπει την κυματική ενέργεια σε χρήσιμη μηχανική. Έχει παρατηρηθεί ότι η κυματική ενέργεια μειώνεται ταχέως με το βάθος και συνεπώς οι περισσότεροι μετατροπείς στην ανοιχτή θάλασσα τοποθετούνται είτε πάνω, είτε κοντά στην επιφάνεια, προκειμένου να επιτυγχάνεται μεγαλύτερη ενεργειακή απορρόφηση [Thorpe, 1999]. Συγκεκριμένα, περίπου το 80% της ενέργειας των θαλασσίων κυμάτων περιορίζεται στο στρώμα από την επιφάνεια μέχρι κι ένα βάθος που ισούται με το 1/4 του μήκους κύματος. Έτσι για ένα τυπικό μήκος κύματος 100 μέτρων, το στρώμα αυτό έχει 25 περίπου μέτρα βάθος.

Τα βασικότερα πλεονεκτήματα των τεχνολογιών ανοιχτής θάλασσας, είναι το υψηλότερο κυματικό δυναμικό, η ελάχιστη οπτική όχληση και η αποφυγή εγκατάστασης σε ευαίσθητους παράκτιους οικότοπους. Υπάρχουν όμως και αρκετά μειονεκτήματα, όπως το μεγαλύτερο κόστος κατασκευής, συντήρησης, καλωδίωσης και φυσικά ο υψηλός κίνδυνος καταστροφής κατά τη διάρκεια ακραίων καιρικών φαινομένων.

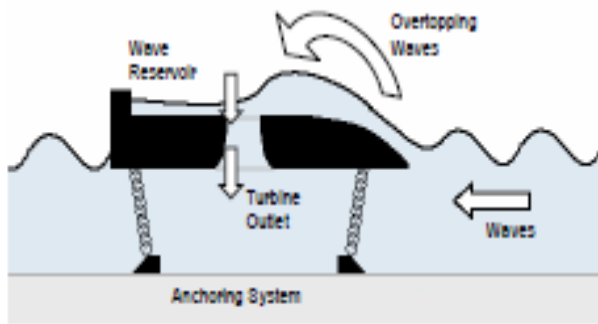
Το Japan Marine Science and Technology Center ανέπτυξε ένα είδος πλωτού κυματικού μετατροπέα, το λεγόμενο Mighty Whale (*Εικόνα 2-12*), που βασίζεται στην Ταλαντευόμενη Στήλη Ύδατος. Το πρωτότυπο βρίσκεται στο Gokasho Bay της Ιαπωνίας κι έχει διαστάσεις 30m πλάτος, 50m μήκος και 12m ύψος. Η συσκευή προσδένεται στον πυθμένα κατά τη διεύθυνση των επικρατούντων κυμάτων κι έχει κατασκευαστεί ώστε να αντέχει σε ακραίες ανεμολογικές συνθήκες και σε κύματα ύψους μέχρι και 8 m. Διαθέτει συνολική ονομαστική ισχύ περίπου 110kW και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αφαλάτωση θαλασσινού νερού [Falcao, 2010].



Εικόνα 2-12: Σχηματική αναπαράσταση του μετατροπέα Mighty Whale και κατέλκυση στο Gokasho Bay το 1998.

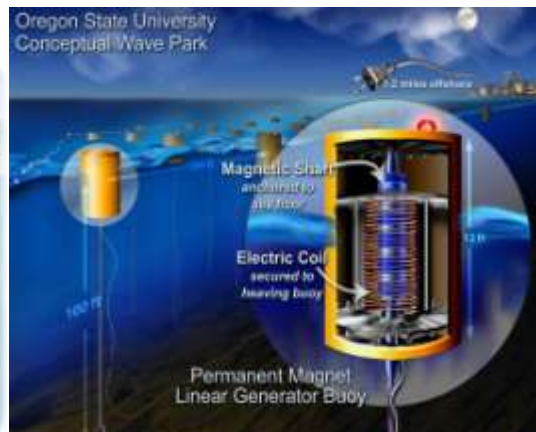
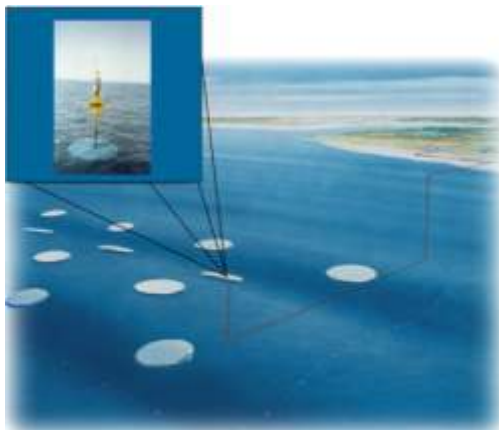
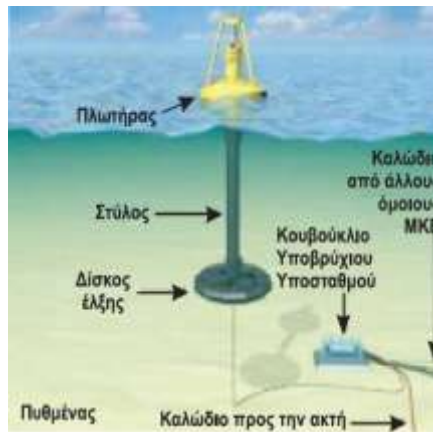
[http://www.thermalfuidscentral.org/encyclopedia/index.php/Power Generation from Waves](http://www.thermalfuidscentral.org/encyclopedia/index.php/Power_Generation_from_Waves)
<http://www.eepe.murdoch.edu.au/resources/info/Tech/wave/index.html>

Στο Nissum Brending της Δανίας, έχει εγκατασταθεί ένας εντελώς διαφορετικός μετατροπέας γνωστός ως Wave Dragon (*Εικόνα 2-13*). Πρόκειται για μία πρότυπη τεχνολογία που βασίζεται στη μέθοδο Υπερχείλισης (Overtopping type). Το Wave Dragon είναι μία πλωτή συσκευή ανοιχτής θάλασσας, αγκυρωμένη στον πυθμένα, που συγκεντρώνει το νερό σε μία δεξαμενή, υπερυψωμένη σε σχέση με το επίπεδο της θάλασσας. Ένα είδος ημικυκλικού κυματικού συλλέκτη χρησιμοποιείται προκειμένου να οδηγείται ο κυματισμός προς τη δεξαμενή. Το νερό αποδεσμεύεται στη συνέχεια σε χαμηλής πίεσης τουρμπίνες που εκμεταλλεύονται την ενέργεια που απέκτησε. Τοποθετείται σε βάθη μεγαλύτερα από 25 m και διαθέτει ειδικό σύστημα πρόσδεσης προκειμένου να παραμένει όσο το δυνατόν ακίνητο. Η αναλογία των τμημάτων του Wave Dragon που βρίσκονται πάνω και κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας, μπορεί να προσαρμοστεί από ένα σύστημα αέρα υπό πίεση, σε ειδικά διαμορφωμένες δεξαμενές στο κάτω μέρος της πλατφόρμας. Έτσι, το ύψος της συσκευής μπορεί να ρυθμιστεί ανάλογα με τις κυματικές συνθήκες, στην αποδοτικότερη θέση [Kofoed, 2006].



Εικόνα 2-13: Αναπαράσταση λειτουργίας και εγκατεστημένη μονάδα Wave Dragon στο Nissum Brending της Δανίας (Vining J., 2007).

Ιδανικοί για υπεράκτια εγκατάσταση θεωρούνται κι οι πλωτοί σημειακοί απορροφητές, κάποιιοι από τους οποίους, φαίνονται στον Πίνακα 2-2. Οι σημειακοί απορροφητές ανοιχτής θάλασσας, είναι παρόμοιοι με τους παράκτιους, αλλά καθώς τα βάθη εγκατάστασης ξεπερνάνε τα 70 m, είναι εφοδιασμένοι με συστήματα διακοπής της παραγωγής ενέργειας σε ακραίες συνθήκες. Κι εδώ εκμεταλλεύεται η καθ' ύψος διέγερση από τον κυματισμό για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Προκειμένου να μεγιστοποιηθεί η απόδοση είναι δυνατό να τοποθετηθούν και πολλές μονάδες μαζί, δημιουργώντας μία κυματική «φάρμα» (Εικόνα 2-14).

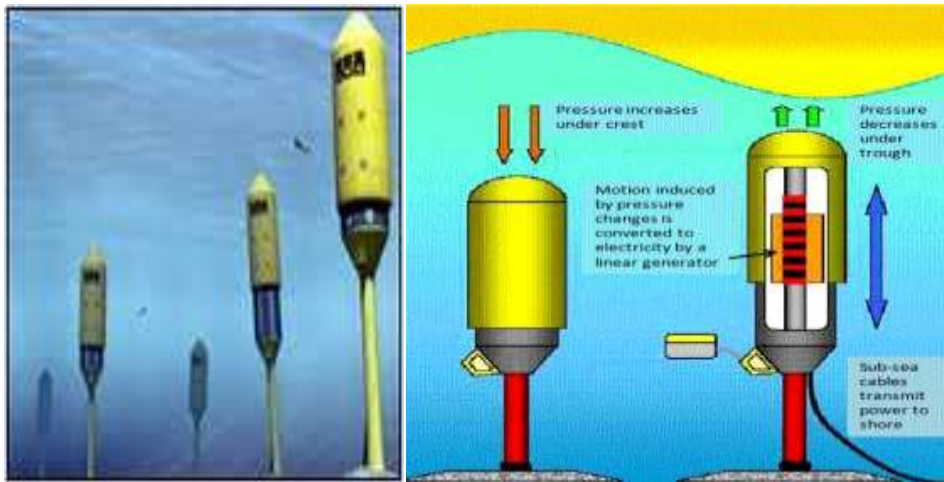


Εικόνα 2-14: Χαρακτηριστικό σύστημα για λειτουργία στην υπεράκτια ζώνη και απεικόνιση κυματικής «φάρμας».

Πίνακας 2-2: Ενδεικτικές τεχνολογίες υπεράκτιων σημειακών απορροφητών.

Όνομασία	Χαρακτηριστικά	Απεικόνιση
PowerBuoy	Εγκαταστάσεις 40kW υπάρχουν στη Χαβάη, στο New Jersey και στις βόρειες ακτές της Ισπανίας ενώ υπολογίζεται να ξεκινήσει κι η κατασκευή θαλάσσιου πάρκου στη Σκωτία που θα αποτελείται από 9 buoys [Falcao, 2010].	
Wavebob	Είναι κατάλληλα σχεδιασμένο για υπεράκτια λειτουργία, σε βάθη μεγαλύτερα από 70m. Ο πλωτήρας έχει διάρκεια ζωής 20 χρόνια και μικρό κόστος λειτουργίας και συντήρησης. Κάθε κατασκευή αυτού του τύπου είναι εφοδιασμένη με τρεις υδραυλικές γεννήτριες ισχύος 500 kW [CRES, 2006].	
AquaBuoy	Είναι σχεδιασμένο από τη Finavera Renewables. Κάθε κατασκευή αποτελείται από έναν σωλήνα 25m που πλέει κατακόρυφα στη θάλασσα κι είναι αγκυροβολημένος στον πυθμένα. Μία τέτοια πρότυπη μονάδα 1 MW υπάρχει ήδη εγκατεστημένη στο Makah Bay της Ουάσινγκτον [Manases, 2010].	

Υπάρχουν επιπλέον και μετατροπείς, που εκμεταλλεύονται τη διαφορά στην υδροστατική πίεση, που οφείλεται στην ανύψωση και πτώση της ελεύθερης επιφάνειας (Submerged Pressure Differential). Τέτοια συσκευή αποτελεί και η Archimedes Wave Swing (AWS) που θυμίζει υποθαλάσσιο buoy, καθώς αποτελείται από ένα πλωτό τμήμα που βρίσκεται βυθισμένο τουλάχιστον 6 m κάτω από την επιφάνεια. Το τμήμα αυτό, εκτελεί κατακόρυφη ταλάντωση (point absorber), ακολουθώντας την κίνηση του νερού ενώ ένα σταθερό τμήμα το κρατά προσδεμένο στη θέση του (Εικόνα 2-15). Συγκεκριμένα, όταν το AWS βρεθεί κάτω από μία κορυφή κύματος, εκτελεί καθοδική κίνηση συμπιέζοντας τον αέρα στο εσωτερικό της συσκευής. Αντίθετα, σε μία κοιλιά που η πίεση μειώνεται, ο αέρας αποσυμπιέζεται και η συσκευή κινείται προς τα πάνω. Προκειμένου να εξασφαλιστεί η μέγιστη απόδοση της συσκευής, η περιοχή τοποθέτησης πρέπει να έχει βάθος 40-100m και να χαρακτηρίζεται από έντονο swell. Μία πρότυπη συσκευή εγκαταστάθηκε το 2004, στις Βόρειες ακτές της Πορτογαλίας, σε απόσταση 5 km από την ακτή [Valerio, 2007].



Εικόνα 2-15: Μετατροπέας AWS και τρόπος λειτουργίας.

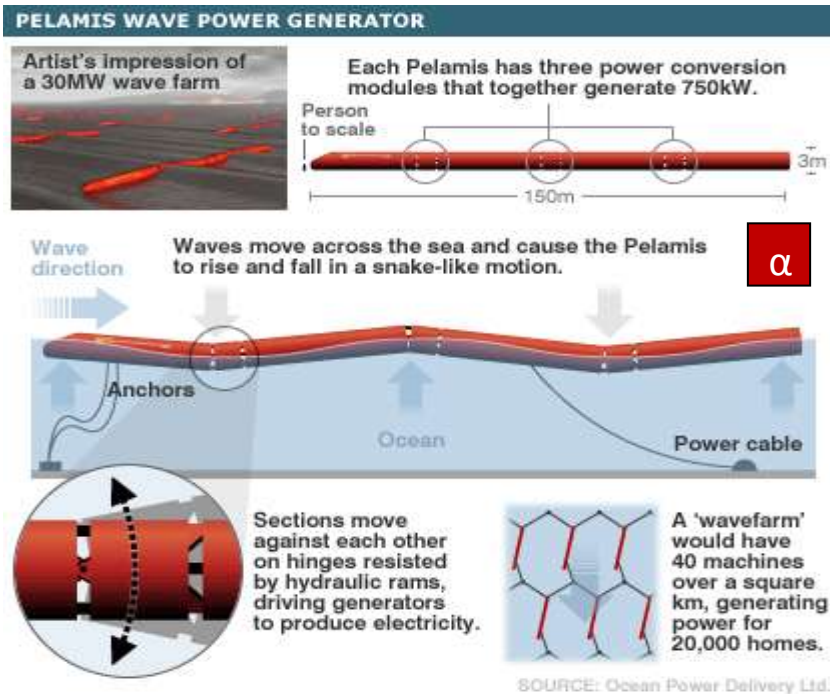
Μία διαφορετική κυματική συσκευή που δεν ανήκει σε κάποια κατηγορία, είναι το Anaconda (Εικόνα 2-16). Πρόκειται για μία επιφανειακή πλωτή κατασκευή που θα εκμεταλλεύεται την ανύψωση και πτώση της θαλάσσιας επιφάνειας και δύναται να παράγει 1MW ισχύ. Το Anaconda θα τοποθετείται σε μεγάλα βάθη (40-100m), θα έχει μήκος 200m και 7m διάμετρο και θα χρησιμοποιεί κυρίως την ενέργεια από τα swell. Μία «κυματική φάρμα» από πολλές τέτοιες συσκευές αναμένεται να εγκατασταθεί στις Βρετανικές ακτές [Pawar, 2010].



Εικόνα 2-16: Αναπαράσταση συσκευής Anaconda και ενδεχόμενης θαλάσσιας «φάρμας».

Ο Pelamis (Εικόνα 2-17) είναι ο πρώτος κυματικός μετατροπέας ανοιχτής θάλασσας που έφτασε σε εμπορικό στάδιο και λειτούργησε συνδεδεμένος σε δίκτυο. Αποτελεί χαρακτηριστικό παράδειγμα τεχνολογίας αρθρώσεων κι πρωτοεγκαταστάθηκε το 2004 προς δοκιμή στο European Marine Energy Center (EMEC) στη Σκωτία. Η ονομασία προέρχεται από ένα είδος θαλάσσιου φιδιού το Pelamis Platurus. Πρόκειται για έναν επιφανειακό πλωτό μετατροπέα που αποτελείται από τέσσερα ενωμένα κυλινδρικά τμήματα μεγάλων διαστάσεων (Εικόνα 2-17α). Η ένωση γίνεται με εύκαμπτους συνδέσμους οι οποίοι εξαναγκάζονται σε κίνηση μέσω του κυματισμού. Μέσω πιστονιών, η κίνηση αυτή αυξάνει την πίεση λαδιού το οποίο περνώντας από υδραυλικούς κινητήρες, κινεί ηλεκτρικές γεννήτριες. Η κατασκευή είναι προσανατολισμένη ώστε να ακολουθεί τον κυματισμό (attenuator type) και συγκρατείται στη θέση της με ειδικό σύστημα αγκύρωσης. Η συσκευή ενδείκνυται για τοποθέτηση σε βάθη 50-70 m και 5-10 km από την ακτή. Το συνολικό της μήκος είναι 150m, η διάμετρος των κυλινδρικών τμημάτων 3,5m και ζυγίζει περίπου 700 τόνους [Thorpe, 1999; Gotthardsson, 2011].

Το 2008 εγκαταστάθηκαν 5 km ανοιχτά της Agucadoura, στη Βόρεια Πορτογαλία, τρεις συσκευές Pelamis, σε βάθος 50m, συνολικής ισχύος 750 KW. Η όλη εγκατάσταση κόστισε 9 εκατομμύρια ευρώ και καλύπτει τις ανάγκες σε ηλεκτρισμό 1.500 κατοικιών. Σε δεύτερη φάση φιλοδοξείτε να δημιουργηθεί ένα θαλάσσιο πάρκο με 31 μετατροπείς που θα παράγει περίπου 22.5 MW, ποσό ικανό για καλύψει τις ανάγκες 15.000 κατοικιών [Lihui Guo, 2010].



Εικόνα 2-17: α) Περιγραφή λειτουργίας Pelamis β) Κυματική φάρμα στην Agucadoura γ) Έτοιμο τμήμα μονάδας Pelamis, μεταφέρεται από το εργοστάσιο στην προκυμαία με ειδικό όχημα SPMT (Self-Propelled Modular Transporter), (Πηγή: www.pelamiswave.com).

2.2 Ενέργεια Θαλασσιών Ρευμάτων

2.2.1 Εισαγωγή

Η επιφάνεια των ωκεανών βρίσκεται σε μία διαρκή κίνηση λόγω της τριβής που ασκεί ο άνεμος, παρασύροντας της θαλάσσιες μάζες, της ηλιακής ακτινοβολίας, της εξάτμισης και των κατακρημνίσεων που μεταβάλλουν τοπικά την πυκνότητα του νερού, δημιουργώντας γεωστροφικά ρεύματα και ρεύματα λόγω βαρύτητας, αλλά και της παλίρροιας που επηρεάζει σημαντικά την τοπική κυκλοφορία. Εκτός από την επιφανειακή κυκλοφορία, χαρακτηριστική είναι και η βαθιά θερμόαλος κυκλοφορία (με μικρές ταχύτητες), που προκύπτει ως αποτέλεσμα των βαθμίδων θερμοκρασίας και των διαφορών στην αλατότητα μεταξύ των διαφορετικών θαλασσιών μαζών.

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο μελετάται η ενεργειακή πυκνότητα των θαλάσσιων ανεμογενών ρευμάτων καθώς και των παλιρροιακών, αφού σε διάφορες περιοχές τις Ευρώπης είναι ιδιαίτερα ισχυρά. Πρόσφατες μελέτες που πραγματοποιήθηκαν από τις Tecnomare SpA και IT Power Ltd σε 106 επιλεγμένες ευρωπαϊκές περιοχές, δείχνουν ότι η ενέργεια από τα θαλάσσια ρεύματα θα μπορούσε να καλύψει ένα σημαντικό ποσοστό των σημερινών αναγκών, καθώς η ισχύς υπολογίστηκε στα 12,000MW. Στις περιοχές αυτές συγκαταλέγεται και η Ελλάδα και συγκεκριμένα τα στενά ανάμεσα σε κάποια νησιά του Αιγαίου. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι στα στενά του Ευρίπου η ταχύτητα του ρεύματος μπορεί να ξεπεράσει τα 3.5m/s. Η δυναμική ενέργεια των παλιρροιών και οι τεχνολογίες δέσμευσής της, δεν αναλύονται εκτενώς στην παρούσα εργασία, καθώς το εύρος της παλίρροιας στον ελληνικό χώρο θεωρείται αμελητέο και συνεπώς μη εκμεταλλεύσιμο.

Στο σημείο αυτό αξίζει να αναφερθεί ότι ως παλίρροια ορίζεται η περιοδική ανύψωση και πτώση της θαλάσσιας επιφάνειας, ως αποτέλεσμα της βαρυτικής έλξης του Ήλιου και της Σελήνης. Το εύρος της εξαρτάται από τη σχετική θέση των τριών συστημάτων αλλά και από μη αστρονομικούς παράγοντες όπως είναι η τοπική βαθυμετρία, η ακτογραμμή και άλλα τοπικά υδρογραφικά και μετεωρολογικά χαρακτηριστικά, τα οποία εκτός από το εύρος, επηρεάζουν και το χρονικό διάστημα εμφάνισης της παλίρροιας [Γιουρούκου, 2011]. Έτσι σε κάποιες περιοχές, κυρίως σε κόλπους και εκβολές ποταμών, το παλιρροιακό εύρος μπορεί να φτάσει τα 17m.

Ο όρος παλίρροια αναφέρεται λοιπόν μόνο σε μία σχετικά μικρής περιόδου, αστρονομικής προέλευσης κάθετη μεταβολή, στο ύψος της θαλάσσιας επιφάνειας. Ο όρος παλιρροιακά ρεύματα σχετίζεται με τη συνοδευόμενη με την παλίρροια, περιοδική οριζόντια κίνηση των ωκεάνιων ρευμάτων, τόσο κοντά στην ακτή όσο και υπεράκτια, διαχωρίζοντάς τα έτσι από τη συνεχή ροή των ωκεάνιων ρευμάτων. Σε περιοχές όπου επικρατεί το φαινόμενο του καναλισμού, οι ταχύτητες των παλιρροιακών ρευμάτων μπορεί να ξεπεράσουν τα 3m/s. Το γεγονός αυτό, σε συνδυασμό με τη μεγάλη προβλεψιμότητα, τα καθιστά ιδανικότερα προς εκμετάλλευση, σε σχέση με τα ανεμογενή ρεύματα που χαρακτηρίζονται από μικρότερες ταχύτητες. Επιπλέον, οι μέγιστες ταχύτητες στα παλιρροιακά ρεύματα εμφανίζονται κοντά στη στεριά με αποτέλεσμα να μειώνεται το κόστος λειτουργίας και συντήρησης των διαφόρων μετατροπέων [Lemonis, 2004].

Δεδομένου ότι τα παλιρροιακά ρεύματα είναι κατά τόπους πιο ισχυρά από τα ανεμογενή, οι περισσότερες μελέτες και οι διάφορες τεχνολογίες δέσμευσης επικεντρώνονται σ' αυτά. Αξίζει να

αναφερθεί ότι νότια από το Orkney, στο Pentland Firth η ταχύτητα του παλιρροιακού ρεύματος μπορεί να ξεπεράσει τα 7m/s. Αν και μία τέτοια περιοχή φαίνεται κατάλληλη για εκμετάλλευση πρέπει να ληφθεί υπ' όψιν το γεγονός ότι είναι εκτεθειμένη στον Βόρειο Ατλαντικό και υπάρχει κίνδυνος καταστροφής των συσκευών από τα swell [Bryden & Couch, 2006].



Εικόνα 2-18: Περιοχές με τις μεγαλύτερες παλίρροιες παγκοσμίως και με τα μέγιστα παλιρροιακά ρεύματα σε ευρωπαϊκό επίπεδο.

2.2.2 Ιστορική εξέλιξη των τεχνολογιών εκμετάλλευσης της ενέργειας των ρευμάτων

Η τεχνολογική πρόοδος στον τομέα της ενέργειας των παλιρροιακών ρευμάτων ανάγεται στις αρχές της δεκαετίας του 1990. Όπως και κατά το πρώτο στάδιο ανάπτυξης των τεχνολογιών αιολικής και κυματικής ενέργειας, έχουν προταθεί, και εξακολουθούν να προτείνονται, διάφορες διαμορφώσεις για την εκμετάλλευση των παλιρροιακών ρευμάτων. Οι περισσότερες βασίζονται σε περιστρεφόμενους ρότορες, είτε οριζοντίου είτε κατακόρυφου άξονα. Προς το παρόν δεν διατίθεται στο εμπόριο καμία συσκευή που να εκμεταλλεύεται την ενέργεια των παλιρροιακών ρευμάτων. Έχουν όμως δοκιμαστεί και δοκιμάζονται διάφορες διατάξεις σε μικρή κλίμακα, ενώ κάποιες μηχανές δοκιμάστηκαν ως πρωτότυπα και σε μεγάλη κλίμακα.

Τα ερευνητικά προγράμματα που διεξάγονται από τη βιομηχανία, τις κυβερνήσεις και τα πανεπιστήμια στο Ηνωμένο Βασίλειο, τη Νορβηγία, την Ιρλανδία, την Ιταλία, τη Σουηδία, τον Καναδά και τις ΗΠΑ κατά την τελευταία δεκαετία έχουν θέσει τα θεμέλια για την αναδυόμενη βιομηχανία παλιρροιακής ενέργειας. Αναμένεται όμως ότι θα περάσουν αρκετά χρόνια πριν καταστεί δυνατή η ευρεία εμπορική εκμετάλλευση. Τρεις από τις πλέον σημαντικές επιδείξεις της τεχνολογίας υλοποιήθηκαν μόλις πριν από λίγα χρόνια, δύο από τις οποίες συνεχίζουν ακόμη. Καμιά από τις επιδεικτικές μονάδες δεν αποτελεί πρωτότυπο σταδίου προπαρασκευής για παραγωγή και όλες οι ερευνητικές ομάδες σχεδιάζουν την κατασκευή και δοκιμή μεγαλύτερων συστημάτων πριν προβούν στην παραγωγή τους. Χαρακτηριστικό είναι ότι τα δημοσιευμένα στοιχεία για την απόδοση των συστημάτων παλιρροιακών ρευμάτων, είτε σε κλίμακα μοντέλου είτε πρωτοτύπου, είναι πολύ περιορισμένα. Συνεπώς, το μεγαλύτερο μέρος των διατιθέμενων πληροφοριών προέρχεται από εταιρικά έντυπα και το διαδίκτυο.

Το ενδιαφέρον πάντως για την αξιοποίηση της ενέργειας του υδάτινου στοιχείου γενικότερα οδήγησε το 2004 στη δημιουργία του Ευρωπαϊκού Κέντρου Θαλάσσιας Ενέργειας (EMEC). Το 2007 ολοκληρώθηκε ο εξοπλισμός του κέντρου και ορίστηκε ως περιοχή για τις παλιρροιακές δοκιμές το νοτιοδυτικό άκρο της νήσου Eday στη Σκωτία. Από τότε αποτελεί κομβικό σημείο δοκιμών για πολλές εταιρείες και ερευνητικά κέντρα που ασχολούνται με την αξιοποίηση της κυματικής ενέργειας και της ενέργειας των ρευμάτων [Norris & Droniou, 2007].



Εικόνα 2-19: EMEC περιοχές δοκιμών

2.2.3 Ισχύς θαλασσιών ρευμάτων

Η κινητική ενέργεια που περικλείει ένα κινούμενο ρευστό είναι συνάρτηση του κύβου της ταχύτητάς του αλλά και της πυκνότητας. Συγκεκριμένα, η ισχύς των θαλασσιών ρευμάτων δίνεται από τη σχέση:

$$P = \frac{1}{2} \rho AV^3 \text{ (W)}$$

Όπου ρ είναι η πυκνότητα του νερού (Kg/m^3), A η περιοχή διατομής του ρότορα (m^2) και V η ταχύτητα του ρεύματος (m/s). Αυτή είναι και η σχέση που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία για τον προσδιορισμό της ενέργειας των θαλασσιών ρευμάτων στον ελληνικό χώρο. Τα δεδομένα της ταχύτητας ελήφθησαν από το μοντέλο ALERMO που θα αναλυθεί σε επόμενο κεφάλαιο. Η πυκνότητα και το εμβαδόν διατομής του ρότορα θεωρήθηκαν σταθερά, με τυπικές τιμές $\rho=1024 \text{ kg/m}^3$ και $A=1 \text{ m}^2$.

Παρ' όλα αυτά οι διάφορες τεχνολογίες εκμετάλλευσης μπορούν να δεσμεύσουν μόνο ένα μέρος αυτής της ισχύος. Στους υποθαλάσσιους στρόβιλους ισχύουν οι ίδιες αρχές με τις ανεμογεννήτριες και συνεπώς η μέγιστη ενέργεια που μπορεί να δεσμευτεί ισούται τελικά με το 59% της διαθέσιμης εξαιτίας διαφόρων απωλειών (Betz law, μηχανικές απώλειες στις τουρμπίνες) και συνεπώς, η παραπάνω σχέση διαμορφώνεται ως εξής:

$$\text{Effective power density } P = \frac{1}{2} C_p \rho AV^3 \text{ (W)}$$

όπου C_p : ο συντελεστής ισχύος (power coefficient) με τιμές 0.35-0.5 [Bahaj & Myers, 2004]. Το γεγονός ότι η ισχύς, άρα και η ενέργεια των ρευμάτων, εξαρτάται από τον κύβο της ταχύτητας και την πυκνότητα, είναι ιδιαίτερα σημαντικό, καθώς σε περιοχές όπου η ταχύτητα ξεπερνά τα 2m/s, η εκμεταλλεύσιμη ενέργεια είναι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη μέγιστη αιολική ή ηλιακή ενέργεια. Αξίζει να σημειωθεί ότι σε μία ανεμογεννήτρια η μέγιστη ισχύς αποδίδεται για ταχύτητες ανέμου περίπου 13m/s.

Πίνακας 2-3: Σύγκριση της πυκνότητας της ενέργειας των θαλασσιών ρευμάτων με την αιολική και ηλιακή σύμφωνα με τον Fraenkel (2002).

	Energy resource						
	Marine currents					Wind	Solar
Velocity (m/s)	1	1.5	2	2.5	3	13	Peak at noon
Velocity (knots)	1.9	2.9	3.9	4.9	5.8	25.3	
Power density (kW/m^2)	0.52	1.74	4.12	8.05	13.91	1.37	~1.0

Θεωρώντας ότι το θαλασσινό νερό είναι περίπου 835 φορές πυκνότερο από τον αέρα, η ενέργεια που περιέχεται σε μία θαλάσσια μάζα που κινείται με ταχύτητα μόλις 12mph (miles per hour) αντιστοιχεί σ' αυτήν που θα είχε μία μάζα αέρα αν κινούταν με 110mph. Αξίζει να αναφερθεί ότι με σωστή επιλογή της τοποθεσίας εγκατάστασης, ένας υποθαλάσσιος στρόβιλος μπορεί να αποδώσει 4 φορές περισσότερο από μία ανεμογεννήτρια και περίπου 30 φορές περισσότερο από μία φωτοβολταϊκή εγκατάσταση τοποθετημένη στη Σαχάρα [Fraenkel, 2002]. Συνεπώς τα

ωκεάνια ρεύματα αποτελούν μία ιδιαίτερα σημαντική πηγή ενέργειας με μεγάλη πυκνότητα. Η συνολική παγκόσμια ισχύς των ρευμάτων υπολογίζεται ότι είναι περίπου 5,000 GW με πυκνότητα ενέργειας μεγαλύτερη από 15kW/m^2 [Technology White Paper on Ocean Current Energy Potential on the U.S. Outer Continental Shelf, 2006].



Εικόνα 2-20: Σχηματική σύγκριση της ισχύος των ρευμάτων με την αιολική και την ηλιακή, σε σχέση με την επιφάνεια που καταλαμβάνει η κάθε τεχνολογία [Fraenkel, 2004].

Ενδεικτικά αναφέρεται ότι το ρεύμα του Κόλπου έχει 21,000 φορές μεγαλύτερη ενέργεια από τους καταρράκτες του Νιαγάρα. Υπολογίζεται ότι αν ήταν δυνατόν να δεσμευτεί έστω και το 1% της διαθέσιμης ενέργειας από το Gulf Stream, θα έφτανε για να καλύψει το 35% της ηλεκτρικής κατανάλωσης της Φλόριντα. Παρόλα αυτά, η εκμετάλλευση της ενέργειας των ρευμάτων βρίσκεται ακόμη σε εμβρυικό στάδιο και ελάχιστες πρότυπες συσκευές έχουν δοκιμαστεί στο θαλάσσιο περιβάλλον [Technology White Paper on Ocean Current Energy Potential on the U.S. Outer Continental Shelf, 2006].

Μελέτες έχουν πραγματοποιηθεί και για την εκμετάλλευση του Κούρο-Σιβο ανατολικά της Ταϊλάνδης καθώς οι μέσες ταχύτητες του ρεύματος είναι 1m/s. Συγκεκριμένα, μελετάται η κατασκευή ενός υποθαλάσσιου πάρκου με ισχύ 30GW. Η διάταξη που έχει προταθεί αποτελείται από τρεις πλωτές πλατφόρμες αγκυροβολημένες στον πυθμένα σε βάθη μεγαλύτερα από 500m με 20-30 τουρμπίνες η κάθε μία. Το σύστημα θα βρίσκεται 30m κάτω από την επιφάνεια ώστε να μην επηρεάζεται από τα κύματα και τους τυφώνες και κάθε πλατφόρμα θα καλύπτει μία επιφάνεια 100m x 500m. Φυσικά ο κίνδυνος καταστροφής μίας τέτοιας διάταξης δεν αφορά μόνο το μεγάλο βάθος εγκατάστασης αλλά και το γεγονός ότι η Ταιβάν βρίσκεται σε μία ιδιαίτερα σεισμογενή ζώνη [Falin Chen, 2010].



Εικόνα 2-21: Σχηματική αναπαράσταση του εν δυνάμει υποθαλάσσιου πάρκου στο Κούρο-Σιβο [Falin Chen, 2010].

2.2.4 Τεχνολογίες μετατροπής της ενέργειας των θαλασσίων ρευμάτων

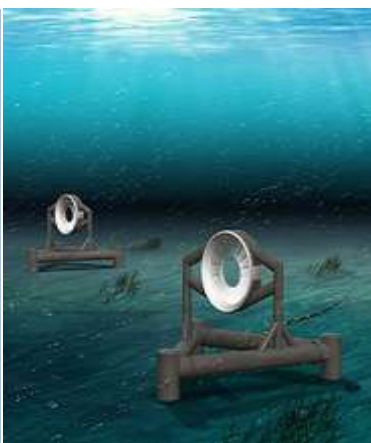


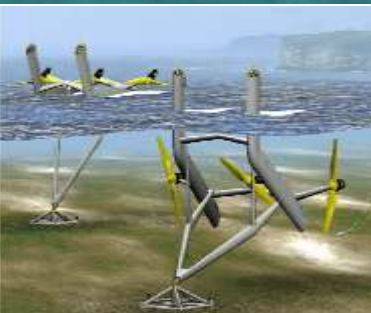
Οι διατάξεις μετατροπής της ενέργειας των ρευμάτων αποτελούν πρόσφατη προσθήκη στην βιομηχανία των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας του υδάτινου στοιχείου. Οι περισσότερες συσκευές δέσμευσης της ενέργειας των ρευμάτων είναι παρόμοιες με τις ανεμογεννήτριες αν και υπάρχουν και διατάξεις παλινδρόμησης και τύπου Venturi [Bryden & Couch, 2006]. Περιλαμβάνουν συνήθως υποθαλάσσιους περιστρεφόμενους ρότορες, γεννήτριες για τον μετασχηματισμό της ενέργειας σε ηλεκτρική και καλώδια ή άλλα μέσα μεταφοράς της ενέργειας στην ακτή. Οι τουρμπίνες μπορεί να έχουν είτε κατακόρυφους είτε οριζόντιους άξονες περιστροφής. Μπορεί να είναι αγκυροβολημένες σταθερά στον πυθμένα ή να ακολουθούν την κίνηση των ρευμάτων δεμένες από ένα σταθερό σημείο όπως ένας χαρταετός. Σε περιοχές με ισχυρά ρεύματα θα μπορούσαν να εγκατασταθούν αρκετές μονάδες μετατροπών δημιουργώντας μία υποθαλάσσια εγκατάσταση παραγωγής ενέργειας παρόμοια με τα σημερινά αιολικά πάρκα. Όπως φαίνεται και στις εικόνες που ακολουθούν, οι δύο τύποι στρόβιλων που χρησιμοποιούνται ευρέως είναι οι στρόβιλοι οριζόντιου άξονα (Axial-flow, propeller), που κάνουν χρήση έλικας και οι στρόβιλοι κάθετου άξονα (Cross-flow, Darrieus).





Εικόνα 2-22: Στρόβιλος οριζόντιου άξονα (αριστερά) και κάθετου άξονα (δεξιά).
(Πηγή: <http://www.strath.ac.uk/>)

Αν και υπάρχουν πολυάριθμοι στρόβιλοι που εκμεταλλεύονται την ενέργεια των θαλασσίων ρευμάτων αλλά και των ποταμών, η πληροφόρηση για τον τρόπο λειτουργίας τους και για την εξέλιξή τους, προέρχεται ως επί το πλείστον από τις ίδιες τις εταιρείες και οι επιστημονικές αναφορές είναι ελάχιστες. Συνεπώς, επιλέχθηκε η παρουσίαση κάποιων ενδεικτικών τεχνολογιών, να γίνει με τη μορφή πίνακα, στον οποίο περιλαμβάνεται και μία σύντομη περιγραφή για την κάθε συσκευή.

Πίνακας 2-4: Ενδεικτικές Τεχνολογίες Εκμετάλλευσης της Ενέργειας των Ρευμάτων

ΟΝΟΜΑ ΣΥΣΚΕΥΗΣ	ΕΤΑΙΡΕΙΑ-ΟΡΓΑΝΙΣΜΟΣ	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ	ΕΙΚΟΝΑ
Open-Center Turbine	Open Hydro	Είναι σχεδιασμένη για λειτουργία στον πυθμένα με μηδαμινή οπτική και ακουστική όχληση ή κίνδυνο για τη ναυσιπλοΐα. Τέσσερις πρότυποι στρόβιλοι υπάρχουν ήδη εγκατεστημένοι στη Φλόριντα. Ο πιο πρόσφατος έχει ισχύ 15.5 kW και διάμετρο 3m. Υπολογίζεται ότι μία φάρμα παραγωγής 10 GW στο Gulf Stream θα μπορούσε να καλύψει το 25% των αναγκών της Φλόριντα. Ήδη κατασκευάζεται ένας πρότυπος στρόβιλος διαμέτρου 16m για τοποθέτηση στη Βρετάνη της Γαλλίας.	
Open-Center Turbine	Open Hydro	Μία πρότυπη μονάδα εγκαταστάθηκε το 2006 στο EMEC (European Marine Energy Center). Το 2003 είχε εγκατασταθεί μία πειραματική συσκευή στο Kvalsundet στη Νορβηγία. Όπως φαίνεται και στην εικόνα ο στρόβιλος μπορεί και εξέρχεται από το νερό, διευκολύνοντας και μειώνοντας το κόστος των διαφόρων εργασιών. Τίθεται σε λειτουργία για ταχύτητες ρεύματος μεγαλύτερες από 0.7m/s.	
TidGen Power System	Ocean Renewable Power Company (ORPC)	Είναι η πρώτη εταιρεία που κατάφερε να εκμεταλλευτεί τα παλιρροιακά ρεύματα στον Κόλπο Fundy στο Maine. Αναμένεται η κατασκευή μίας νέας μονάδας 3MW στο Maine, τριών μονάδων στην Αλάσκα και στη Nova Scotia (Καναδάς). Απαιτεί ελάχιστη ταχύτητα ρεύματος 0.5m/s	
Triton	Tidal Stream	Βρίσκεται σε δοκιμαστικό στάδιο. Ένα πρότυπο μοντέλο μεγέθους 3m έχει ήδη δοκιμαστεί στο IFREMER στη Γαλλία. Κάθε μονάδα αναμένεται να παράγει 10MW. Έχει τη δυνατότητα να εξέρχεται στην επιφάνεια για εργασίες συντήρησης και επισκευή.	

Seaflow	Marine Current Turbines Ltd	<p>Πρόκειται για τον πρώτο μετατροπέα παγκοσμίως που τοποθετήθηκε υπεράκτια και συγκεκριμένα 1,1 km από την ακτή δίνοντας ισχύ 300 kW. Ο ρότορας είχε διάμετρο 11m και μπορούσε να εξέρχεται από το νερό για εργασίες συντήρησης. Εγκαταστάθηκε στο Devon το 2003 και αποσύρθηκε το 2009.</p>	
Seagen	Marine Current Turbines Ltd	<p>Αποτελεί το πρώτο εμπορικό πρότυπο μοντέλο που εγκαταστάθηκε στο Strangford Lough στη Βόρεια Ιρλανδία. Απαιτεί βάθος εγκατάστασης μικρότερο από 30m και ταχύτητα ρεύματος μεγαλύτερη από 1.7m/s. Χρησιμοποιεί δύο δίδυμους ρότορες διαμέτρου 16m παράγοντας 1.2MW ισχύ για ταχύτητες ρεύματος 2.4m/s. Σε κάθε παλίρροια παράγει 10MWh, όσο δηλαδή και μία ανεμογεννήτρια 2.4MW, αποδεικνύοντας ότι η παραγωγή ηλεκτρισμού από τα θαλάσσια ρεύματα είναι όχι μόνο πιο προβλέψιμη αλλά και πιο αποδοτική. Πρόσφατες περιβαλλοντικές μελέτες δείχνουν ότι το οικοσύστημα έχει επανέλθει πλήρως από την τοποθέτησή του το 2008 κι ότι δεν υπάρχει καμία επίπτωση στα θαλάσσια θηλαστικά.</p>	
HS300 HS1000	Hammerfest STRØM	<p>Μία πρότυπη μονάδα 300 kW εγκαταστάθηκε επιτυχώς σε βάθος 50m στο Kvalsund της Νορβηγίας. Ο στρόβιλος διαμέτρου 20m τοποθετήθηκε σε περιοχή με ταχύτητα ρεύματος 1.5m/s. Είναι ο πρώτος παλιρροιακός στρόβιλος που συνδέεται σε δίκτυο και σ' αυτόν βασίζεται και ο νέος στρόβιλος 1MW που βρίσκεται εγκατεστημένος στο EMEC και φιλοδοξείτε να τροφοδοτεί με ηλεκτρισμό 500 κατοικίες.</p>	

Rotech Tidal Turbine (RTT)	Lunar Energy	<p>Είναι μία διάταξη τύπου Venturi που δύναται να τοποθετηθεί σε βάθη μεγαλύτερα από 40 m. Μετά τις επιτυχημένες δοκιμές στο EMEC, στο Orkney, ετοιμάζεται η δημιουργία ενός πάρκου από 300 τουρμπίνες ισχύος 1MW η κάθε μία, στις ακτές της Νότιας Κορέας. Το κόστος υπολογίζεται να ξεπεράσει τα £500 εκατομμύρια και η κατασκευή αναμένεται να ολοκληρωθεί το 2015. Κάθε μονάδα θα διαθέτει μία τουρμπίνα με διάμετρο 11.5m και βάρος 2500 τόνους ενώ η ελάχιστη ταχύτητα ρεύματος ορίζεται στο 1m/s.</p>	
Stingray	Engineering Business Ltd	<p>Πρόκειται για μία παλινδρομική διάταξη όπου σε αντίθεση με τις υπόλοιπες τεχνολογίες, η δέσμευση της ενέργειας δεν γίνεται με περιστροφή πτερυγίων αλλά μέσω ταλάντωσης. Μία πρότυπη μονάδα εγκαταστάθηκε το 2002 στο Yell Sound στο Shetland (Βρετανία) με μέση ισχύ 100 kW και μέγιστη 250 kW.</p>	
Kobold Turbine	Enermar& Ponte di Archimede nello Stretto di Messina S.p.A.	<p>Πρόκειται για μία τουρμπίνα με ύψος 5m, διάμετρο 6m και τρία πτερύγια. Τοποθετήθηκε το 2002 στα στενά της Μεσσήνης (Ιταλία) κάτω από μία πλωτή πλατφόρμα σε βάθος 20m και 150m από την ακτή. Η απόδοσή της είναι 20kW για ταχύτητα ρεύματος 1.8m/s ενώ στην περιοχή υπολογίζεται ότι η μέση ταχύτητα ξεπερνά τα 2m/s.</p>	
Deep Green	Ministro	<p>Πρόκειται για ένα είδος υποθαλάσσιου χαρταετού που σε αντίθεση με άλλες τεχνολογίες, είναι κατάλληλος για μικρές ταχύτητες ρευμάτων και βαθιά νερά. Βρίσκεται βυθισμένος 20m κάτω από την επιφάνεια και η παραγόμενη ισχύς είναι της τάξης των 500 kW.</p>	
Sea Snail	Robert Gordon University & AREG	<p>Μία πρότυπη μονάδα βάρους 30 τόνων και ισχύος 150 kW έχει εγκατασταθεί στο Eynhallow Sound στο Orkney.</p>	

2.3 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της θαλάσσιας ενέργειας

Η θαλάσσια ενέργεια συγκεντρώνει τα περισσότερα πλεονεκτήματα που χαρακτηρίζουν τις ΑΠΕ: μεγάλη πυκνότητα ενέργειας και προβλεψιμότητα, χαμηλοί δείκτες ρύπανσης σε επίπεδο κύκλου ζωής, αποκέντρωση της παραγωγής ενέργειας, απεξάρτηση από εισαγωγές ορυκτών καυσίμων, προοπτικές οικονομικής ανάπτυξης σε απομακρυσμένες ή/και υποβαθμισμένες περιοχές, τόνωση της βιομηχανικής παραγωγής, δημιουργία θέσεων εργασίας κ.ά.

Αξιοσημείωτο είναι ότι η εγκατάσταση των διάφορων σταθμών παραγωγής δεν απαιτεί δέσμευση γης. Στις παράκτιες εγκαταστάσεις κυματικής ενέργειας, η οπτική όχληση καθώς και οι παρεμβάσεις στο περιβάλλον, ενδεχομένως να αποτελούν ανασταλτικό παράγοντα, αν και εν γένει, περιοχές με έντονη κυματική δραστηριότητα δεν ενδείκνυνται για άλλου είδους αξιοποίηση, όπως π.χ. ιχθυοκαλλιέργειες ή τουριστική εκμετάλλευση.

Η παραγόμενη κυματική ενέργεια μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί και για άλλους σκοπούς, πέραν από την ηλεκτροδότηση διαφόρων περιοχών. Έτσι, θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για αφαλάτωση και παραγωγή πόσιμου νερού, για ψυκτικές εγκαταστάσεις ή ακόμα και για τη δημιουργία κατάλληλων συνθηκών για ιχθυοκαλλιέργειες. Αυτές οι εφαρμογές θα μπορούσαν να αποδειχτούν ζωτικής σημασίας για αρκετές παραθαλάσσιες και νησιωτικές περιοχές. [Falnes & Lovseth, 1991]. Επίσης ανάλογα με την τεχνολογία, κάποιοι κυματικοί μετατροπείς θα μπορούσαν να λειτουργήσουν ως κυματοθραυστικές εγκαταστάσεις αυξάνοντας την τουριστική περίοδο ή αποτρέποντας την διάβρωση των ακτών. Κάποιες διατάξεις θα μπορούσαν να συνδυαστούν και με τεχνολογίες που εκμεταλλεύονται την αιολική ενέργεια (multi-purpose systems) αυξάνοντας έτσι την παραγόμενη ισχύ (Εικόνα 2-23) [Bhuyan, 2008].



Εικόνα 2-23: Multi-purpose systems: Wind-Current and Wind-Wave conversion (Robinson M.C., 2006).

Σύμφωνα με πρωταρχικές μελέτες, οι θαλάσσιες εγκαταστάσεις θα μπορούσαν να αποτελέσουν πόλο έλξης διαφόρων οργανισμών, εξαιτίας της βιοαπόθεσης που συντελείται και να λειτουργήσουν ως τεχνητοί ύφαλοι (artificial reefs) και FAD (fish attracting devices),

συμβάλλοντας στην ανάκαμψη των οικοσυστημάτων και στη διατήρηση της βιοποικιλότητας [Henfridsson et al., 2007]. Κάτι τέτοιο εξαρτάται από το βάθος τοποθέτησης, την απόσταση από την ακτή και τη διαφάνεια του νερού. Σε περίπτωση που τα ψάρια χρησιμοποιήσουν τις συσκευές ως καταφύγιο, πιθανό επακόλουθο θα είναι και η συγκέντρωση θαλάσσιων θηλαστικών και πτηνών [Thorpe, 1999].

Παρόλα αυτά, οι μελέτες που αφορούν την απόκριση του οικοσυστήματος είναι ακόμη ελλιπείς και απαιτείται περαιτέρω έρευνα. Στις διατάξεις που εκμεταλλεύονται την ενέργεια των ρευμάτων για παράδειγμα, έχει διαπιστωθεί ότι οι έλικες κινούνται με μικρή ταχύτητα επιτρέποντας την ελεύθερη και ασφαλή κίνηση των ψαριών. Η προστασία των θαλάσσιων θηλαστικών θα μπορούσε να επιτευχθεί χρησιμοποιώντας φράκτες και σόναρ που θα απέτρεπαν την προσέγγισή τους.

Βασικό μειονέκτημα είναι οι απαιτήσεις και οι περιορισμοί που τίθενται όσον αφορά τις περιοχές τοποθέτησης. Για τους κυματικούς μετατροπείς, το κυματικό κλίμα είναι ιδιαίτερα σημαντικό. Παρόλα αυτά προτιμότερες θεωρούνται οι θέσεις που έχουν ένα σχετικά υψηλό αλλά σταθερό κυματισμό, παρά όσες έχουν μεγαλύτερα ύψη κύματος αλλά είναι εκτεθειμένες σε ακραίες συνθήκες. Οι περιοχές εγκατάστασης των διατάξεων που εκμεταλλεύονται τα θαλάσσια ρεύματα, είναι ακόμη πιο περιορισμένες. Σύμφωνα με τον A.S. Bahaj (2004) η ελάχιστη ταχύτητα ρεύματος προσδιορίζεται στο 1.1 m/s καθότι για μικρότερες ταχύτητες, η ενέργεια που περικλείεται δεν είναι εμπορικά αξιοποιήσιμη. Οι όρμοι, τα λιμάνια, οι περιοχές με ρηγά νερά και μεγάλο παλιρροιακό εύρος, καθώς και αυτές όπου η ροή επιταχύνεται μέσω του καναλισμού, θεωρούνται οι ιδανικότερες. Όσον αφορά το βάθος εγκατάστασης, οι σημερινοί μετατροπείς πρώτης γενιάς της ενέργειας των ρευμάτων, περιορίζονται σε βάθη 10-50 m ενώ οι δεύτερης γενιάς, που αναμένεται να κατασκευαστούν τα επόμενα χρόνια, θα έχουν βάθος λειτουργίας μεγαλύτερο από 50 m [Tidal & Current Energy Resources in Ireland].

Η οικονομική εκμετάλλευση της θαλάσσιας ενέργειας εξαρτάται και από γεωφυσικούς παράγοντες, όπως η απόσταση από την ακτή (12ν.μ για τους στροβίλους) και το δίκτυο, η κλίση, το ίζημα και το βάθος του πυθμένα. Οφείλει λοιπόν να εξεταστεί τόσο η μορφολογία όσο και η δομή του πυθμένα με χρήση multi-beam sonar, ειδικά υπεράκτια, που θα συμβάλλει και στην αποκάλυψη πιθανών ναυαγίων ή αρχαιολογικών ευρημάτων [Henfridsson et al., 2007]. Οι περιοχές τοποθέτησης μπορούν να περιοριστούν κι από παράγοντες όπως:

- Η τοπική κοινωνία και η αλιευτική δραστηριότητα
- Τα δρομολόγια πλοίων
- Η οπτική κι ακουστική όχληση
- Οι βενθικοί οργανισμοί και η γενικότερη επίδραση στο οικοσύστημα
- Η υποθαλάσσια αρχαιολογία
- Τα υποθαλάσσια καλώδια
- Οι περιοχές στρατιωτικού ενδιαφέροντος
- Οι περιοχές κυματικής σκίασης
- Οι θαλάσσιες προστατευόμενες περιοχές

Πίνακας 2-5: Πιθανές περιβαλλοντικές επιπτώσεις από την εκμετάλλευση της κυματικής ενέργειας σύμφωνα με τον Thorpe (Clement et al., 2002).

Environmental Effects	Shoreline	Nearshore	Offshore
Land use/sterilization	W		
Construction/maintenance sites	W		
Recreation	W	W	
Coastal erosion	W	W-M	W-M
Sedimentary flow patterns		W	W
Navigation hazard		W	W
Fish & marine biota	W	W	W
Acoustic noise	W		
Working fluid losses		W	W
Endangered species	W	W	
Device/mooring damage		W-M	W-M

W: Weak effect; M: Medium effect

Τα κυριότερα όμως μειονεκτήματα των διαφόρων τεχνολογιών αφορούν την αξιοπιστία τους και το κατασκευαστικό και λειτουργικό κόστος. Η υψηλή ενεργειακή πυκνότητα των κυμάτων συνεπάγεται μεγάλες καταπονήσεις στην περίπτωση ακραίων καιρικών φαινομένων, οι οποίες μπορούν να υπερβούν το 100-πλάσιο των μέσων καταπονήσεων. Τούτο απαιτεί υψηλό βαθμό μηχανικής αντοχής των κατασκευών, με αποτέλεσμα την περαιτέρω αύξηση του κατασκευαστικού κόστους. Σημαντικός ανασταλτικός παράγοντας είναι και η διάβρωση κι η βιοσυσσώρευση κυρίως στις υποθαλάσσιες εγκαταστάσεις. Λαμβάνοντας υπ' όψιν κι ότι η τοποθέτηση γίνεται σε δυσπρόσιτες περιοχές, το κόστος συντήρησης και επισκευής αυξάνεται αρκετά.

Τα τελευταία 20 χρόνια, το προβλεπόμενο κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από κυματικούς μετατροπείς, έχει μειωθεί αισθητά, φτάνοντας τα 8-10c€/kWh. Λαμβάνοντας όμως υπ' όψιν ότι στην Ευρωπαϊκή Ένωση η τιμή της κιλοβατώρας είναι 4c€, το κόστος από την κυματική ενέργεια παραμένει υψηλό. Παρ' όλα αυτά, η πρόοδος της τεχνολογίας και η συνεχής βελτίωση των συσκευών αναμένεται να μειώσει περαιτέρω το κόστος [CRES, 2006]. Το υψηλό κόστος κατασκευής και λειτουργίας μπορεί να αντισταθμισθεί μόνον με την αξιοποίηση του θαλάσσιου δυναμικού στον μέγιστο δυνατό βαθμό, δηλαδή την επίτευξη υψηλών δεικτών απόδοσης. Στον Πίνακα 2-6 γίνεται μία συνοπτική παρουσίαση των χαρακτηριστικών των κυριότερων μορφών ΑΠΕ. Είναι προφανές ότι αν και το κόστος της θαλάσσιας ενέργειας είναι υψηλότερο, το ενεργειακό της περιεχόμενο δεν μπορεί να αγνοηθεί.

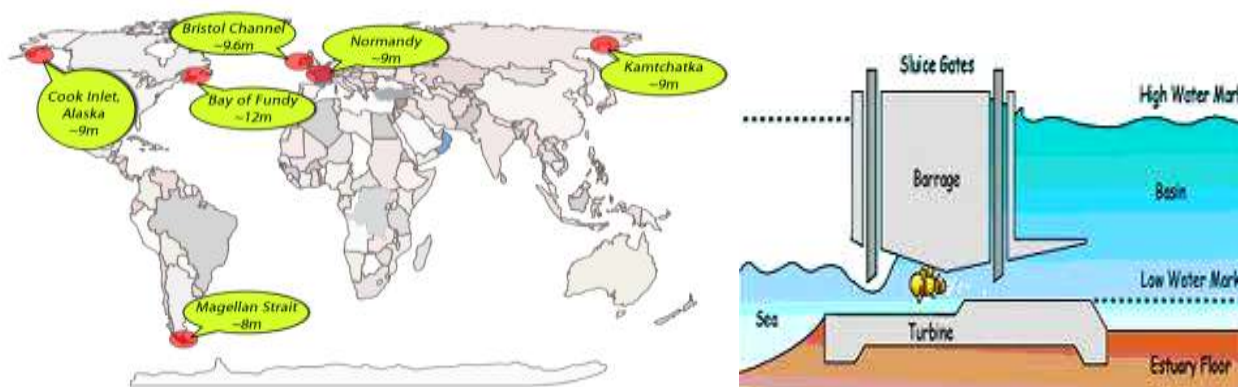
Πίνακας 2-6: Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (Alatsathianos & Fafali, 2009)

	Solar	Wind	Wave	Tidal/ Current
Development Status	Early Commercial	Mature Commercial	Early Commercial	Early Commercial
Source	Sun	Uneven solar heating	Sun-wind	Gravity of moon & sun
Annual Average Power Density	0.175 -0,2 kW/m ² (fixed tilt at latitude Winnipeg - Calgary - Edmonton)	0.6 - 1kW/m ² (Rocky Mountains, offshore BC)	30 - 45 kW/m (Pacific Coast) 10 - 25 kW/m (Atlantic Coast)	4-9kW/m ² (Minas Basin) 0.5 - 2 kW/ m ² (other sites)
Intermittency	Day-night; clouds, haze, and humidity	Atmospheric fronts and storms (local winds only)	Sea (local winds) and swell (from distant storms)	Diurnal cycles
Predictability	Minutes	Hours	Days	Centunes
Energy Cost ¹	9c/kWh (Photovoltaic)	4c/kWh (Wind turbine 6-9 m/s wind spd.)	~ 10c/kWh	~10c/kWh

2.4 Άλλες πηγές θαλάσσιας ενέργειας

2.4.1 Ενέργεια από το παλιρροιακό εύρος

Η συνολική παγκόσμια ισχύς από το παλιρροιακό εύρος εκτιμάται στα 3000GW εκ των οποίων τα 1000GW εντοπίζονται σε μικρά βάθη. Παρόλα αυτά, οι περιοχές εντοπισμού μεγάλων παλιρροιών είναι πολύ συγκεκριμένες και ολιγάριθμες (Εικόνα 2-24). Η εκμετάλλευση της δυναμικής ενέργειας της παλίρροιας στηρίζεται στην κατασκευή ενός φράγματος στην είσοδο ενός κόλπου ή θαλάσσιου διαύλου, δημιουργώντας έτσι μία φυσική δεξαμενή. Κατά την άνοδο της παλίρροιας το νερό εισέρχεται στη δεξαμενή μέσα από υδατοφράκτες, οι οποίοι κλείνουν όταν η παλίρροια φτάσει στο ζενίθ και ξανανοιγούν όταν ελαχιστοποιηθεί το παλιρροιακό εύρος. Αυτή η κίνηση του νερού γίνεται διαμέσου υδροστροβίλων και με τη χρήση κατάλληλων γεννητριών η παλιρροιακή ενέργεια μετατρέπεται σε χρήσιμη ηλεκτρική [Lemonis, 2004].



Εικόνα 2-24: Χάρτης με τα μεγαλύτερα παλιρροιακά εύρη παγκοσμίως (αριστερά), τρόπος λειτουργίας παλιρροιακού φράγματος (δεξιά).

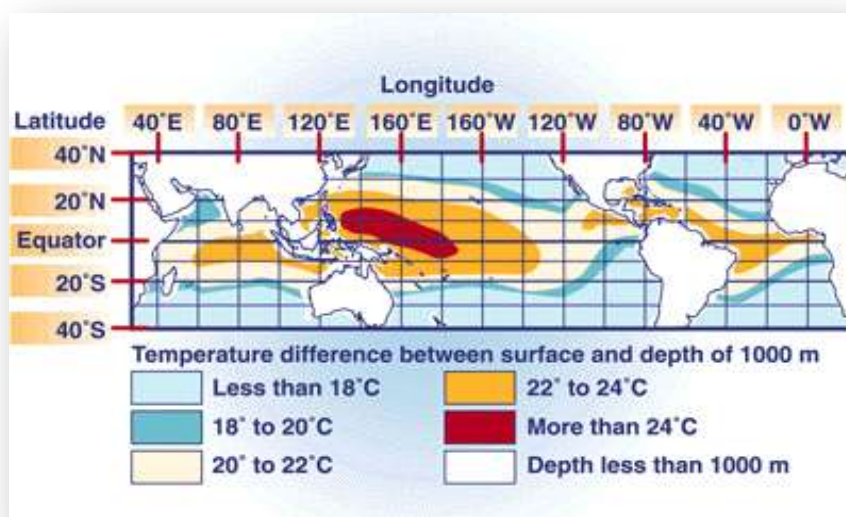
Ο μεγαλύτερος παλιρροιακός σταθμός παγκοσμίως κατασκευάστηκε τη δεκαετία του 1960 στην πόλη La Rance της Γαλλίας κι έκτοτε λειτουργεί επιτυχώς με ισχύ 240MW. Παρόμοιοι σταθμοί λειτουργούν στην περιοχή Annapolis Royal της Nova Scotia στον Καναδά, στη Ρωσία, στη θάλασσα Barents και στον κόλπο Fuhdy της Σκωτίας. Η κατασκευή τέτοιου είδους φραγμάτων συνεπάγεται όμως μεγάλο κόστος και αρκετές περιβαλλοντικές επιπτώσεις και ήδη έχουν αρχίσει να μελετούνται πιθανοί τρόποι εκμετάλλευσης της δυναμικής ενέργειας της παλίρροιας στην ανοιχτή θάλασσα [Lemonis, 2004]. Η κατασκευή δεξαμενών στις εκβολές ποταμών αυξάνει το ίζημα και τη θολερότητα των νερών και διαταράσσει τη φυσιολογική λειτουργία του οικοσυστήματος. Προβλήματα ενδεχομένως να εμφανιστούν και στον τουρισμό ή στη ναυσιπλοΐα αφού το βάθος της περιοχής μπορεί να μειωθεί με την συνεχή εναπόθεση ιζήματος.



Εικόνα 2-25: Παλιρροιακό φράγμα στη La Rance, Γαλλία.

2.4.2 Ενέργεια από τη θερμοκρασιακή διαφορά επιφάνειας-πυθμένα των ωκεανών (OTEC)

Η εκμετάλλευση της θερμοκρασιακής διαφοράς επιφάνειας-πυθμένα των ωκεανών (Ocean Thermal Energy Conversion, OTEC), με χρήση θερμικής μηχανής (στηριζόμενης σε θερμοδυναμικό κύκλο), είναι αντικείμενο έρευνας εδώ και περίπου έναν αιώνα κι εκτιμάται πως είναι κι η πιο πλούσια μορφή ενέργειας. Η OTEC λειτουργεί καλύτερα όταν η διαφορά των δύο στρωμάτων είναι περίπου 20° C. Τέτοιες συνθήκες επικρατούν μόνο στις Ισημερινές περιοχές μεταξύ του Τροπικού του Καρκίνου και του Τροπικού του Αιγόκερω. Προκειμένου να αντληθεί το νερό των ωκεανών και να έρθει στην επιφάνεια, απαιτείται μία ιδιαίτερα ακριβή διάταξη, με έναν μεγάλης διαμέτρου σωλήνα ο οποίος πρέπει να είναι βυθισμένος τουλάχιστον ένα μίλι κάτω από την επιφάνεια [IPCC, 2008].



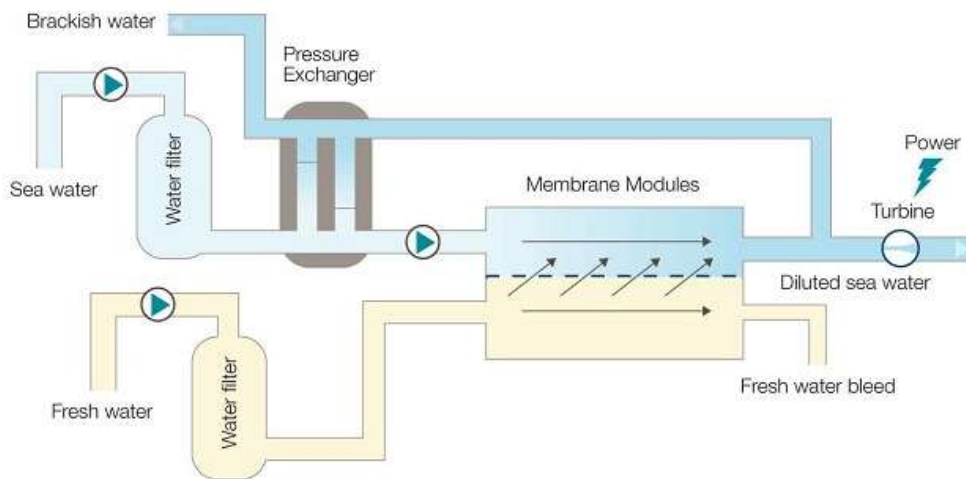
Εικόνα 2-26: Περιοχές όπου δύναται να εγκατασταθεί ένα σύστημα OTEC
(Πηγή: http://en.wikipedia.org/wiki/Ocean_thermal_energy_conversion)

Η μέθοδος OTEC κάνει χρήση της αποθηκευμένης ηλιακής ενέργειας στους ωκεανούς, επομένως έχει το πλεονέκτημα της συνεχούς λειτουργίας μέρα και νύχτα χωρίς να υπόκεινται σε διακυμάνσεις της παρεχόμενης ενέργειας. Μερικά ακόμη πλεονεκτήματα της μεθόδου είναι η χρήση του πλούσιου σε θρεπτικά στοιχεία, ψυχρού νερού του πυθμένα σε ιχθυοκαλλιέργειες ή την χρήση του ως μέσο κλιματισμού. Διακρίνονται τρεις κύριες μέθοδοι παραγωγής ενέργειας: η μέθοδος ανοιχτού κύκλου, η μέθοδος κλειστού κύκλου και η υβριδική. Και οι δύο στηρίζονται στον θερμοδυναμικό κύκλο του Rankine. Μία εναλλακτική λύση της παραπάνω μεθόδου είναι η θέρμανση θαλάσσιου ύδατος με χρήση κατάλληλης εγκατάστασης ηλιακών στοιχείων, που θα χρησιμεύει ως «δεξαμενή υψηλής ενθαλπίας» κι η χρήση νερού χαμηλής θερμοκρασίας από τον πυθμένα της θάλασσας ως «δεξαμενή χαμηλής ενθαλπίας». Η μέθοδος αυτή (shoreline OTEC), δύναται να εφαρμοστεί σε παράκτιες περιοχές της Ευρώπης με υψηλή ηλιοφάνεια και χαμηλή θερμοκρασία θάλασσας [Ζερβός, 2011].

2.4.3 Ενέργεια από τη διαφορά αλατότητας ύδατος ή ωσμωτική ενέργεια

Η ενέργεια που απαιτεί μία ποσότητα θαλασσινού νερού για να ατμοποιηθεί πλήρως, είναι μεγαλύτερη από την ενέργεια που απαιτεί η ίδια ποσότητα γλυκού νερού. Χαρακτηριστικό μέγεθος σε κάθε διάλυμα αποτελεί η λανθάνουσα θερμότητα. Κατά την ανάμιξη των υδάτων των ποταμών μέσα στη θάλασσα εκλύεται λανθάνουσα θερμότητα σε μεγάλες ποσότητες κι αυτό οφείλεται στο φαινόμενο της ώσμωσης (salinity gradient/osmotic energy). Η ώσμωση λαμβάνει χώρα προκειμένου να εξισωθούν οι περιεκτικότητες των δύο υδατικών διαλυμάτων. Η εκλυόμενη ενέργεια στις εκβολές ενός ποταμού είναι τεράστια κι εκτιμάται στα 2.65 MW/m^3 ανά δευτερόλεπτο διάλυσης γλυκού νερού στη θάλασσα. Η παραπάνω συγκέντρωση ενέργειας ισοδυναμεί με υδατόπτωση ύψους 270 m σε κάθε εκβολή ποταμού.

Οι προτεινόμενοι τρόποι εκμετάλλευσης είναι καθαρά πειραματικοί. Υπάρχουν τρεις βασικές μέθοδοι που στηρίζονται αντίστοιχα στην ωσμωτική πίεση, στην ηλεκτροχημεία και στη διαφορική εξάτμιση. Επί του παρόντος, δεν υπάρχει κάποια τεχνολογία εκμετάλλευσης αυτής της μορφής ενέργειας. Πρόσφατα μόνο, το 2007, δημιουργήθηκε το πρώτο πιλοτικό έργο στη Νορβηγία με ισχύ 2-4 KW. Το διαθέσιμο δυναμικό εκτιμάται σε 23.000 TWh και το τεχνικά εκμεταλλεύσιμο σε 1600 TWh από τις οποίες περίπου 200 TWh στην Ευρώπη [Ζερβός, 2011].



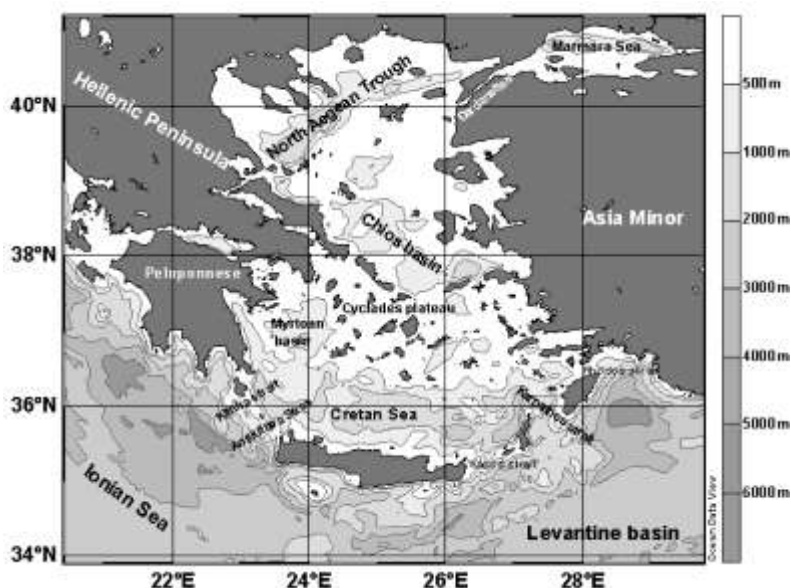
Εικόνα 2-27: Σχηματική αναπαράσταση του τρόπου εκμετάλλευσης της ενέργειας που παράγεται μέσω της ώσμωσης.

3 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ – ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

3.1 Γενικά χαρακτηριστικά της περιοχής μελέτης

3.1.1 Τοπογραφικά χαρακτηριστικά

Το Αιγαίο αποτελεί το Νοτιοανατολικότερο άκρο της Μεσογείου, καλύπτοντας μία περιοχή με έκταση $1.8 \times 10^{11} \text{ m}^2$ που περιέχει περίπου $7.4 \times 10^{13} \text{ m}^3$ κυβικά νερού. Χαρακτηρίζεται από πολυάριθμα νησιά και πολύπλοκη βαθυμετρία με τέσσερις περιοχές μεγάλων βαθών: την τάφρο του Βορείου Αιγαίου με μέγιστο βάθος 1500m, τη λεκάνη του Όρους Άθως με 1000m μέγιστο βάθος, τη λεκάνη της Χίου με βάθος έως 1100m και τη θαλάσσια περιοχή Βορειοανατολικά της Κρήτης με βάθη πάνω από 2000m. Τα μικρότερα βάθη (<200m) εντοπίζονται στην περιοχή της Σαμοθράκης, στον Θερμαϊκό και στο πλατό των Κυκλάδων [Poulos et al., 1997].



Σχήμα 3-1: Βαθυμετρία Αιγαίου [Aegean sea workshop, 2002]
(http://www.oc.phys.uoa.gr/workshop/Aegean_Draft_Report_f.htm).

Βορειοανατολικά συνδέεται με τη θάλασσα του Μαρμαρά μέσω του στενού των Δαρδανελλίων και συνεπώς και με τη Μαύρη Θάλασσα μέσω του Βοσπόρου. Η επικοινωνία με τη Μεσόγειο γίνεται νοτιοανατολικά μέσω των στενών Κρήτης-Καρπάθου-Ρόδου-Τουρκίας και νοτιοδυτικά διαμέσου των νησιών Κρήτη-Κύθηρα και της Πελοποννήσου. Το νοτιοανατολικό του όριο επικοινωνεί με τη θάλασσα της Λεβαντίνης και περιλαμβάνει την περιοχή ανάμεσα σε Κρήτη-Κάσο με μέσο βάθος 700m, την περιοχή Κάρπαθος-Ρόδος με βάθη 550m και την περιοχή μεταξύ Ρόδου-Τουρκίας με βάθος 350m. Δυτικά συνδέεται με το Ιόνιο Πέλαγος μέσω των στενών Κρήτης-Αντικυθήρων (700m βάθος), Αντικυθήρων-Κυθήρων (60m βάθος) και Κυθήρων-Πελοποννήσου (180m βάθος). Στο Ιόνιο, δυτικά της Πύλου, βρίσκεται και το βαθύτερο σημείο της Μεσογείου, με βάθη που ξεπερνάνε τα 5000m [Poulos et al., 1997].

3.1.2 Θαλάσσιες μάζες και κυκλοφορία

Στο κεφάλαιο αυτό παρατίθενται κάποια γενικά χαρακτηριστικά της κυκλοφορίας και των θαλασσιών μαζών, τόσο για την ευρύτερη περιοχή της Ανατολικής Μεσογείου, όσο και για τα Ελληνικά πελάγη που αποτελούν την περιοχή μελέτης. Μία αναλυτικότερη περιγραφή της κυκλοφορίας και των διαφόρων συστημάτων που την καθορίζουν γίνεται στο κεφάλαιο 4 όπου η περιοχή μελέτης έχει χωριστεί πλέον σε επιμέρους τμήματα, καθένα από τα οποία εξετάζεται ξεχωριστά.

Η Μεσόγειος θάλασσα αποτελεί μία ημίκλειστη λεκάνη συμπίκνωσης καθώς η εξάτμιση υπερτερεί της βροχόπτωσης και της απορροής των ποταμών. Δυτικά συνδέεται με τον Ατλαντικό Ωκεανό μέσω του πορθμού του Γιβραλτάρ, ανατολικά με την Ερυθρά θάλασσα μέσω της διώρυγας του Σουέζ, όπου σημειώνεται ελάχιστη ανταλλαγή και Βορειοανατολικά με τη Μαύρη Θάλασσα μέσω του συστήματος Δαρδανέλλια-Θάλασσα του Μαρμαρά-Βόσπορος. Θεωρώντας ως όριο το Στενό της Σικελίας, η Μεσόγειος χωρίζεται σε δύο λεκάνες, την Ανατολική (EMED) και τη Δυτική (WMED). Η Δυτική λεκάνη χαρακτηρίζεται από την εισροή γλυκού επιφανειακού νερού από τον Ατλαντικό (Atlantic Water - AW) μέσω των Στενών του Γιβραλτάρ. Η Ανατολική λεκάνη της Μεσογείου αποτελείται από τις θαλάσσιες περιοχές της Αδριατικής, του Ιονίου, του Αιγαίου και της Λεβαντίνης. Τα στενά του Οτράντο αποτελούν το όριο μεταξύ Αδριατικής και Ιονίου ενώ τα στενά του Κρητικού τόξου χωρίζουν το Αιγαίο Πέλαγος από το Ιόνιο και τη θάλασσα της Λεβαντίνης [Zavatarelli, Mellor, 1994].

Υδρογραφικές μετρήσεις καταδεικνύουν την ύπαρξη τριών κυρίαρχων μαζών στην περιοχή. Η πρώτη είναι τα Τροποποιημένα Ατλαντικά Νερά (Modified Atlantic Water - MAW) τα οποία μετά την είσοδό τους από το Γιβραλτάρ, κινούνται ανατολικά για να εξισορροπήσουν το έλλειμμα νερού εξαιτίας της εξάτμισης. Κατά την κίνησή τους, η αλατότητα του επιφανειακού στρώματος αυξάνεται από 37.25 psu, στα Στενά της Σικελίας, σε 38.50 psu ή και περισσότερο, στην περιοχή της Λεβαντίνης, ως αποτέλεσμα της εξάτμισης και της ανάμιξης με τα κατώτερα στρώματα. Τα MAW αναγνωρίζονται από το υποεπιφανειακό ελάχιστο αλατότητας, που αποτελεί χαρακτηριστικό της Ατλαντικής τους προέλευσης.

Τα ενδιάμεσα στρώματα της λεκάνης (200-500m) καταλαμβάνονται από τα Λεβαντινά Ενδιάμεσα Νερά (Levantine Intermediate Water - LIW), τα οποία αν και σχηματίζονται στην περιοχή της Λεβαντίνης, επηρεάζουν τελικά ολόκληρη τη Μεσόγειο πριν εξέλθουν από τα Στενά του Γιβραλτάρ σε μεγάλο βάθος. Η μάζα αυτή σχηματίζεται το χειμώνα στην περιοχή του Κυκλώνα της Ρόδου κατά κύριο λόγο, αν και έχουν προταθεί κι άλλες τοποθεσίες στην ευρύτερη περιοχή. Συγκεκριμένα, η ψύξη των κρύων και αλμυρών νερών σε συνδυασμό με τον κατάλληλο στροβιλισμό του ανέμου, αυξάνει την επιφανειακή πυκνότητα των νερών με αποτέλεσμα η θαλάσσια μάζα να βυθίζεται σε μεγάλα βάθη [Lascaratos et al., 1999]. Τα LIW χαρακτηρίζονται από υψηλές τιμές αλατότητας και το βάθος τους αυξάνει καθώς κινούνται Δυτικά, από 200-400 m στη EMED σε 300-700 m στη WMED [Zavatarelli & Mellor, 1994].

Τα βαθύτερα στρώματα του Ιονίου και της Λεβαντίνης, καταλαμβάνονται από τα Βαθιά Νερά της Ανατολικής Μεσογείου (East Mediterranean Deep Water - EMDW) που σχηματίζονται στην Αδριατική (Adriatic Deep Water, ADW) και στο Αιγαίο κατά τη διάρκεια ψυχρών συνθηκών.

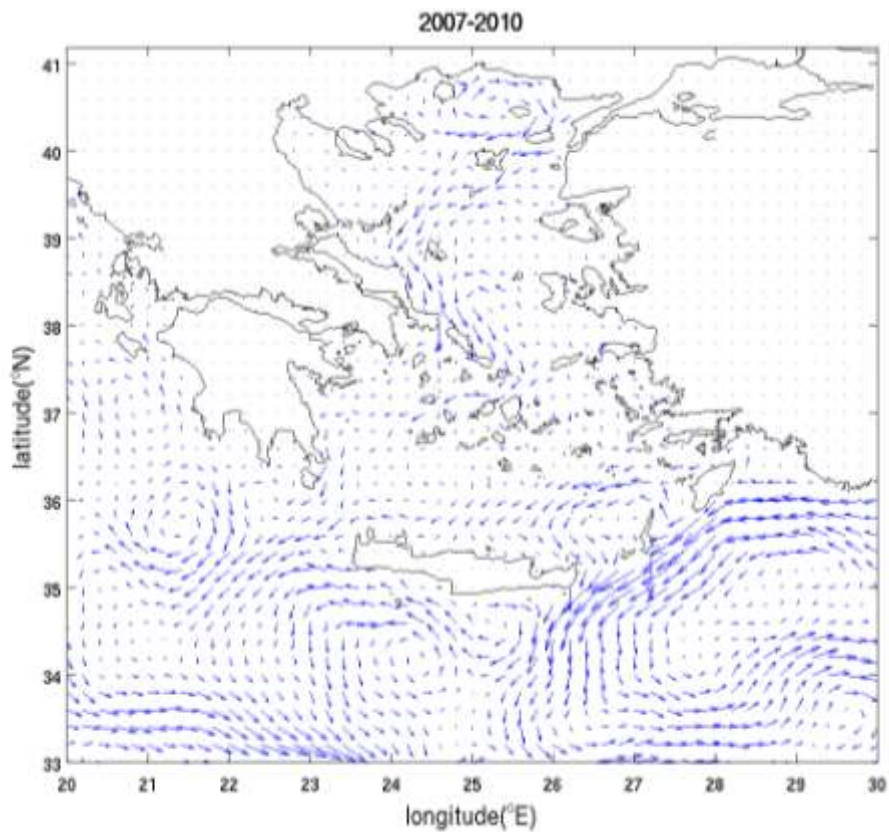
Εντοπίζονται σε βάθη μεγαλύτερα από 800m με χαρακτηριστικές τιμές αλατότητας (38.7 psu) και θερμοκρασίας (13.6 °C) [Alhammoud et al., 2005].

Η κυκλοφορία στην Ανατολική Μεσόγειο χαρακτηρίζεται γενικά από τρεις κλίμακες [Roem group, 1992]: την κλίμακα λεκάνης, στην οποία περιλαμβάνονται τα βασικά θερμοαλατικά κύτταρα και η γενική κυκλοφορία, την κλίμακα υπολεκάνης στην οποία συγκαταλέγονται οι μόνιμες ή ημιμόνιμες κυκλωνικές και αντικυκλωνικές δομές, που συνδέονται μεταξύ τους με έντονα ρεύματα και μαιάνδρους και τη μέση κλίμακα η οποία σχετίζεται με πιο μικρά φαινόμενα σε μέγεθος, όπως τα κυκλωνικά και αντικυκλωνικά eddies, τα οποία διαθέτουν ένα μόνιμο κι ενεργητικό πεδίο στροβιλισμού και μεταφέρουν χαρακτηριστικά από μία περιοχή σε μία άλλη.

Η Ανατολική Μεσόγειος χαρακτηρίζεται γενικά από μία πολύπλοκη θερμοαλατική κυκλοφορία λόγω της ιδιόμορφης τοπογραφίας και της έντονης ατμοσφαιρικής δράσης. Το MAW κατά την ανατολική του κίνηση, συναντά το Λιβυκό-Αιγυπτιακό ρεύμα (Libyo-Egyptian Current-LEC) που κινείται κατά μήκος των Αφρικανικών ακτών. Στην περιοχή αυτή εντοπίζονται αντικυκλωνικά eddies λόγω βαροκλιτικής αστάθειας μέσης κλίμακας. Καθώς τα MAW συνεχίζουν να κινούνται ανατολικά προς την κεντρική Λεβαντίνη, σχηματίζουν το Mid-Mediterranean Jet (MMJ) το οποίο εν συνεχεία διακλαδίζεται. Το ένα μέρος του κινείται δεξιόστροφα και τροφοδοτεί σχηματισμούς όπως ο Mersa-Matruh και ο Shikmona για τον οποίο, πρόσφατες μελέτες δείχνουν ότι αποτελείται από πολλαπλά eddies άλλοτε κυκλωνικά και άλλοτε αντικυκλωνικά [Fusko, 2003]. Το άλλο μέρος του, κινείται αριστερόστροφα δυτικά της Κύπρου σχηματίζοντας τον κυκλώνα της Ρόδου και το West Cyprus gyre πριν συναντηθεί με το Asia Minor Current (AMC).

Το AMC επηρεάζει στη συνέχεια και τη λεκάνη του Αιγαίου καθώς μεταφέρει το LIW και το LSW (Levantine Surface Waters) μέσω του στενού Κρήτη-Κάρπαθος-Ρόδος-Τουρκία (Σχήμα 3-2). Τα εισερχόμενα Λεβαντινά νερά κινούνται στη συνέχεια βόρεια κατά μήκος των ακτών της Μικράς Ασίας και συναντούν τα νερά της Μαύρης Θάλασσας (Black Sea Waters, BSW). Τα BSW αφού υποστούν ανάμιξη με τα αλμυρότερα νερά της λεκάνης, συνεχίζουν τη γενική κυκλωνική κυκλοφορία και εξέρχονται από το Αιγαίο μέσω των στενών του ανατολικού Κρητικού τόξου.

Από μελέτη που πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια drifters προέκυψε ότι σε μεγάλη κλίμακα η κυκλοφορία στο Αιγαίο είναι κυκλωνική με πολλαπλές δίνες κλίμακας υπολεκάνης και μία ισχυρή νοτιοδυτική ροή κατά μήκος των δυτικών ακτών η οποία φτάνοντας στις ανατολικές ακτές της Εύβοιας δημιουργεί το ρεύμα της Εύβοιας (Evoia jet) [Olson, 2007]. Η πολύπλοκη κυκλοφορία στο Αιγαίο Πέλαγος φαίνεται να οφείλεται στην περίπλοκη τοπογραφία, στην ισχυρή εποχικότητα της ατμοσφαιρικής δράσης και στην παρουσία των πολλών και διαφορετικών θαλασσιών μαζών [Sofianos, 2005]. Χαρακτηριστικό της περιοχής αποτελεί και το γεγονός ότι την καλοκαιρινή περίοδο, οι ισχυροί Βόρειοι άνεμοι που πνέουν πάνω από το Αιγαίο, γνωστοί ως Ετησίες, δημιουργούν μία ζώνη ανάβλυσης στα παράλια της Μικράς Ασίας και μία ζώνη καταβύθισης στη δυτική πλευρά της λεκάνης.



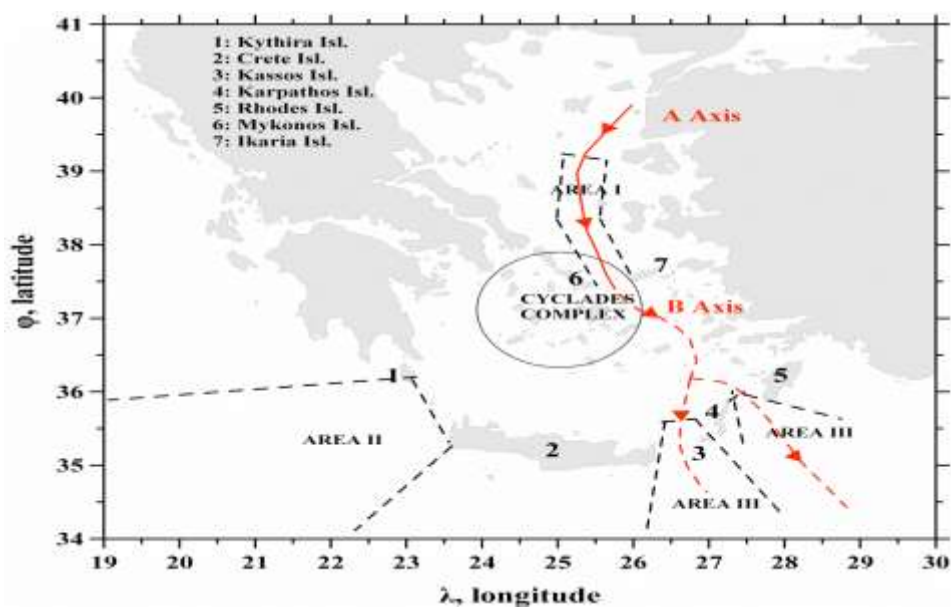
Σχήμα 3-2:Επιφανειακή κυκλοφορία στην περιοχή μελέτης

Όσον αφορά το Ιόνιο Πέλαγος, από μελέτες που πραγματοποιήθηκαν από τους Fusko et al. (2003) βρέθηκε ότι η κυκλοφορία στο δυτικό του τμήμα είναι και πάλι κυκλωνική, όπως πριν το 1990. Οι πιο σημαντικοί σχηματισμοί στην περιοχή είναι ο κυκλώνας της δυτικής Κρήτης και ο Πέλοπας. Η Western Cretan gyre είναι μία μόνιμη κυκλωνική δύνη που βρίσκεται νοτιοδυτικά της Κρήτης ενώ ο Πέλοπας (Pelops) είναι ένας αντικυκλωνικός βαθύς σχηματισμός (>2000 m) που δημιουργείται από τη δράση του ανέμου. Εντοπίζεται Νότια της Πελοποννήσου την περίοδο φθινόπωρο-χειμώνας με τάση δυτικής μετατόπισης την περίοδο άνοιξη-καλοκαίρι [Hamad, 2006].

3.1.3 Ανεμολογικό πεδίο

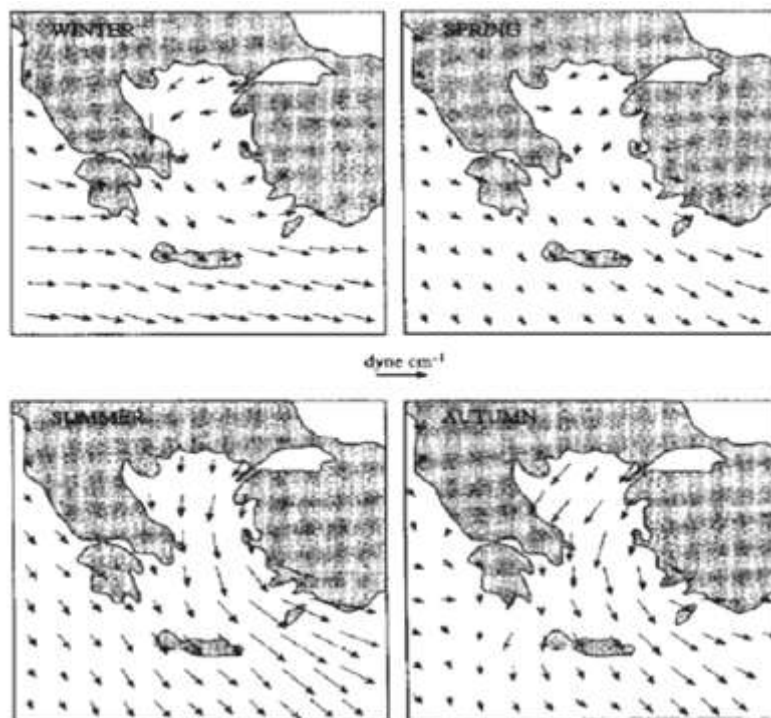
Η Ελλάδα κατέχει ένα από τα υψηλότερα αιολικά δυναμικά της Ευρώπης, με μέσες τοπικές ταχύτητες ανέμου που μπορούν να ξεπεράσουν τα 8-11m/s, ιδιαίτερα στο Αιγαίο Πέλαγος και στις παράκτιες περιοχές. Κυριαρχείται από Βόρειους-Βορειοανατολικούς ανέμους σε ποσοστό 58-78%. Η ένταση του ανέμου αυξάνει από Βορρά προς Νότο με τοπικά μέγιστα πάνω από το Νότιο Αιγαίο και ελάχιστα στις ακτές της Κρήτης. Πιο συγκεκριμένα, οι μέσες ετήσιες ταχύτητες του ανέμου κυμαίνονται από 1-5.5m/s με μεγαλύτερες τιμές στη θάλασσα παρά στην ηπειρωτική χώρα. Οι μεγαλύτερες εντάσεις εμφανίζονται στο κεντρικό Αιγαίο ενώ στο Ιόνιο το ανεμολογικό πεδίο διαφοροποιείται και παρουσιάζεται μειωμένο στις βόρειες περιοχές (1-2m/s) με αύξηση στις νότιες ακτές της Πελοποννήσου (3.5-4m/s) [Chronopoulou et al.]. Το Αιγαίο κυριαρχείται λοιπόν από βόρειους ανέμους με εξαίρεση την άνοιξη όπου εμφανίζονται νοτιοδυτικοί. Αυτή η διαφοροποίηση οφείλεται στην συχνότητα εμφάνιση των βορείων ανέμων, οι οποίοι παρουσιάζουν δύο μέγιστα κατά τη διάρκεια του έτους, ένα από τον Δεκέμβριο έως τον Φεβρουάριο κι ένα από τον Ιούλιο έως τον Αύγουστο.

Στην ευρύτερη περιοχή του Αιγαίου, η διεύθυνση του ανέμου ορίζεται από ένα τόξο που ξεκινά βόρεια από το στενό των Δαρδανελίων και εκτείνεται προς το νότο μέχρι και τα στενά μεταξύ Κρήτης και Ρόδου (Σχήμα 3-3). Σε μέση ετήσια βάση, οι πιο έντονες ανεμολογικές και κυματικές συνθήκες, επικρατούν σε τρεις περιοχές: νότια και νοτιοανατολικά του συμπλέγματος των Κυκλάδων κυρίως στο στενό μεταξύ Μυκόνου και Ικαρίας (Area I), στο νοτιότερο τμήμα του στενού μεταξύ Κυθήρων και Κρήτης (Area II) και στα στενά μεταξύ Κρήτης-Κάσου και Ρόδου-Καρπάθου (Area III). Η ενέργεια του ανέμου και του κύματος που δημιουργείται στο άκρο των στενών των Δαρδανελίων και διαδίδεται στο Βόρειο Αιγαίο, διασκορπίζεται στο σύμπλεγμα των Κυκλάδων, καθιστώντας το, σε μέση ετήσια βάση, περιοχή με ηπιότερες κυματικές συνθήκες. Οι Βορειοανατολικές Κυκλάδες, ενώ αποτελούν εμπόδιο στη διάδοση των κυματισμών και τη ροή του ανέμου από το βορειότερο τμήμα του Αιγαίου, ταυτόχρονα, μέσω του καναλισμού, καθοδηγούν και ενισχύουν τα κυματικά πεδία νοτιοανατολικά [Soukissian, 2008].



Σχήμα 3-3: Κύρια κατεύθυνση ανέμου και κύματος στις ελληνικές θάλασσες [Soukissian, 2008]

Όσον αφορά τώρα τις εποχιακές διακυμάνσεις, κατά τη διάρκεια του χειμώνα, ψυχρές και ξηρές ηπειρωτικές αέριες μάζες που προέρχονται από τον αντικυκλώνα της Σιβηρίας ή την γενικότερη αντικυκλωνική δράση στην Κεντρική Ευρώπη, διαδίδονται μέσα από τις κοιλάδες των ποταμών Αξιού, Στρυμόνα και Έβρου σε όλο το Αιγαίο. Κατά τους θερινούς μήνες επικρατούν ξηροί και βόρειοι άνεμοι γνωστοί ως Ετησίες (Μελτέμια). Οι Ετησίες κατατάσσονται με όρους μέσης ημερήσιας ταχύτητας σε ασθενείς ($\leq 3.3\text{m/s}$), μέσες ($3.4-7.9\text{m/s}$) και ισχυρές ($\geq 8\text{m/s}$) [Poulos et al., 1997]. Οι κύριοι παράγοντες δημιουργίας τους είναι το υψηλό βαρομετρικό σύστημα των Αζόρων που το καλοκαίρι κινείται βόρεια εκτεινόμενο έως την νοτιοανατολική Ευρώπη και τα Βαλκάνια, το Ασιατικό βαθύ βαρομετρικό χαμηλό που εκτείνεται δυτικά ενίοτε μέχρι και την Κύπρο, το υψηλό βαρομετρικό της δυτικής Ρωσίας και τα πεδία υψηλών πιέσεων της βορειοδυτικής Ευρώπης που συχνά φτάνουν ως το Αιγαίο. Οι μέγιστες τιμές του ανέμου ξεκινάνε από το Βόρειο Αιγαίο, συνεχίζουν ανατολικά της Λήμνου και της Σκύρου διαμέσου των Κυκλάδων και νότια της Καρπάθου και κατόπιν κινούνται προς την κεντρική περιοχή της ανατολικής Λεβαντίνης [Christopoulos, 1997].



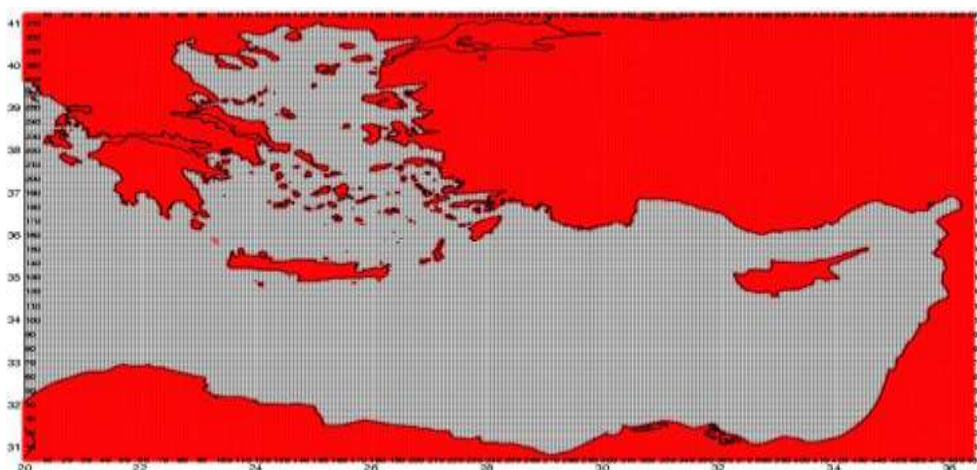
Σχήμα 3-4: Ανεμολογικό καθεστώς στην περιοχή του Αιγαίου για τις τέσσερις εποχές [Poulos et al., 1997].

3.2 Περιγραφή επιχειρησιακών συστημάτων

3.2.1 Το μοντέλο ALERMO

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα κυκλοφορίας από το μοντέλο ALERMO (Aegean and Levantine Eddy Resolving MOdel) το οποίο αποτελεί μία υψηλής ανάλυσης εφαρμογή του μοντέλου POM (Princeton Ocean Model). Το POM είναι ένα τρισδιάστατο ωκεανογραφικό μοντέλο βασικών εξισώσεων. Οι εξισώσεις που αποτελούν τη βάση του, περιγράφουν τις μεταβολές στην ταχύτητα, την ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας, την αλατότητα και τη δυνητική θερμοκρασία. Βασίζεται σ' ένα κατακόρυφο σύστημα συντεταγμένων στην υδάτινη στήλη (σ-σύστημα συντεταγμένων) οι οποίες ακολουθούν την τοπογραφία του βυθού προκειμένου να επιτυγχάνεται ακριβέστερη προσομοίωση σε περιοχές με μεγάλες διακυμάνσεις βάθους [Blumberg & Mellor, 1987].

Το μοντέλο ALERMO αναπτύχθηκε στα πλαίσια του Mediterranean Forecasting System Pilot Project – MFSPP για τη μελέτη της Ανατολικής Μεσογείου. Καλύπτει την περιοχή $20^{\circ}\text{E} - 36.4^{\circ}\text{E}$, $30.7^{\circ}\text{N} - 41.2^{\circ}\text{N}$ κι έχει μόνο ένα ανοιχτό όριο στις 20°E όπως φαίνεται και στο σχήμα. Οι οριακές συνθήκες που χρησιμοποιεί σ' αυτό το σημείο λαμβάνονται από το Μεσογειακό OGCM. Το δυτικό αυτό όριο επιλέχθηκε καθώς η φαινομενολογία της περιοχής και προηγούμενες μελέτες με μοντέλα έδειξαν ότι αποτελεί κομβικό σημείο για τη γενική και θερμοαλατική κυκλοφορία της περιοχής [Korres & Lascaratos, 2003]. Το ALERMO έχει διακριτοποίηση $1/30^{\circ} \times 1/30^{\circ}$ (493x316 σημεία) με 25 κατακόρυφα στρώματα σε σίγμα συντεταγμένες. Η τελευταία έκδοση του μοντέλου έχει αναβαθμιστεί σε οριζόντια ανάλυση $1/50^{\circ} \times 1/50^{\circ}$ στα πλαίσια των προγραμμάτων ECOOP και MyOcean. Για τον υπολογισμό της βαθυμετρίας του μοντέλου χρησιμοποιήθηκε η ψηφιακή βάση δεδομένων (U.S. Navy Digital Bathymetric Data Base 5) ($1/12^{\circ} \times 1/12^{\circ}$).



Σχήμα 3-5: Περιοχή ολοκλήρωσης του ALERMO

Το ALERMO έχει χρησιμοποιηθεί για κλιματολογικές εφαρμογές καθώς και για πρόβλεψη της θαλάσσιας κυκλοφορίας. Η βασικότερη εφαρμογή του είναι η πρόγνωση της κυκλοφορίας, όπου με δεδομένα από το σύστημα πρόγνωσης καιρού SKIRON $1/10^{\circ}$, το οποίο βασίζεται στο μοντέλο Eta/NCEP και οριακές συνθήκες από το επιχειρησιακό MFSTEP Mediterranean OGCM μοντέλο $1/16^{\circ} \times 1/16^{\circ}$, το προγνωστικό σύστημα παρέχει καθημερινή 5ημερη πρόγνωση.

3.2.2 Το μοντέλο TPITΩΝ

Στην παρούσα εργασία, εκτός από το ALERMO, χρησιμοποιήθηκαν και κυματικά δεδομένα από το επιχειρησιακό σύστημα πρόγνωσης κυματισμού TPITΩΝ, που αναπτύχθηκε από την ομάδα της Φυσικής Ωκεανογραφίας και Αριθμητικών Μοντέλων του Πανεπιστημίου Αθηνών. Το TPITΩΝ χρησιμοποιεί τα μοντέλα WAM, SWAN και WAVEWATCH (σε συγκεκριμένες περιοχές) παρέχοντας πρόγνωση 66 ωρών για το ύψος και την κατεύθυνση του κύματος.

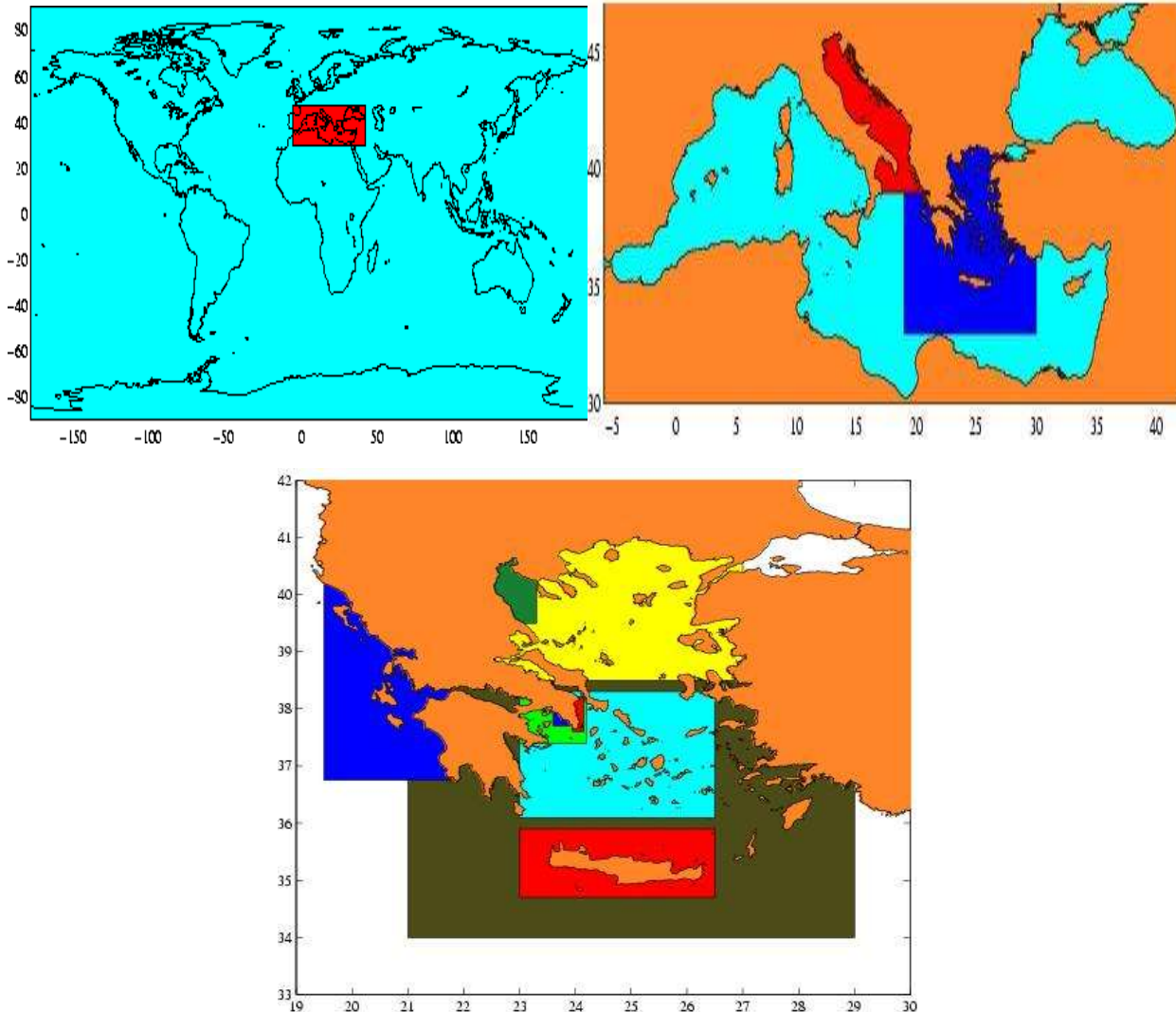
Το WAM (CYCLE 4) είναι ένα μοντέλο τρίτης γενιάς που αναπτύχθηκε στο ινστιτούτο Max-Planck και πλέον έχει εγκατασταθεί σε πάνω από 40 ινστιτούτα παγκοσμίως. Χρησιμοποιείται για ερευνητικούς και επιχειρησιακούς σκοπούς, καθώς και για την ερμηνεία και προσομοίωση δορυφορικών κυματικών παρατηρήσεων. Μπορεί να εφαρμοστεί τόσο σε τοπικό όσο και σε παγκόσμιο επίπεδο με προκαθορισμένα τοπογραφικά δεδομένα. Χαρακτηριστικό του είναι η δυνατότητα δημιουργίας επικαλυπτόμενων πλεγμάτων με διαφορετική διακριτοποίηση με αποτέλεσμα να μειώνεται ο υπολογιστικός φόρτος και να επιτυγχάνεται η ταχύτερη απόδοση των αποτελεσμάτων. Τα τελευταία χρόνια το Ευρωπαϊκό Κέντρο Πρόγνωσης Καιρού Μέσης Κλίμακας (ECMWF) βελτιστοποίησε το μοντέλο ούτως ώστε να μπορεί να εφαρμοστεί και στην παράκτια ζώνη [Galanis et al., 2010].

Το WAM είναι ένα φασματικό κυματικό μοντέλο, που υπολογίζει την εξέλιξη του δυσδιάστατου φάσματος της κυματικής ενέργειας με μία σαφή αναλυτική μέθοδο, χωρίς καμία a priori υπόθεση για τη μορφή του. Επιλύει την εξίσωση μεταφοράς για βαθύ και ρηχό νερό, συμπεριλαμβάνοντας διάθλαση λόγω βάθους και παρουσίας ρευμάτων (σταθερού βάθους και πεδίου ρευμάτων μόνο). Χρησιμοποιείται και για την προσομοίωση φαινομένων στην παράκτια ζώνη αλλά και σε λίμνες και εκβολές ποταμών. Το μοντέλο εξάγει πολλές φασματικές κυματικές παραμέτρους όπως το σημαντικό ύψος κύματος (η μέση τιμή του υψηλότερου τρίτου του κυματικού φάσματος σε μία περιοχή), τη μέση κυματική κατεύθυνση και συχνότητα, το ύψος και τη μέση κατεύθυνση της αποθάλασσης (swell), τα πεδία τάσης του ανέμου διορθωμένα κατά τον παράγοντα της επαγόμενης κυματικής τάσης (wave-induced wind stress), το συντελεστή σύρσης (drag coefficient) και το δυσδιάστατο φάσμα κυματισμού σε επιλεγμένα σημεία και χρονικές στιγμές [Σουκισιάν & Προσπαθόπουλος, 2003].

Οι Σουκισιάν & Προσπαθόπουλος (2003), εφαρμόζοντας το WAM στο Αιγαίο Πέλαγος κατέληξαν στο ότι το μοντέλο υποεκτιμά τις ταχύτητες του ανέμου που είναι μεγαλύτερες από 10 m/s ενώ οι αποκλίσεις μεγαλώνουν καθώς η ταχύτητα του ανέμου αυξάνεται. Η συμπεριφορά αυτή του μοντέλου στη Μεσόγειο έχει παρατηρηθεί και από άλλους ερευνητές [Barstow et al., 2000].

Το SWAN (Simulating Waves Nearshore) είναι ένα μοντέλο τρίτης γενιάς που χρησιμοποιείται κυρίως για τη προσομοίωση των φαινομένων στην παράκτια ζώνη, σε λίμνες και εκβολές ποταμών. Λαμβάνει υπόψη του τη διάδοση, την αλληλεπίδραση κύματος-κύματος και τη διάχυση από τρεις παράγοντες (whitecapping, bottom friction and depth-induced breaking) [Booij et al., 1999]. Το μοντέλο WAVEWATCH αναπτύχθηκε στο NOAA/NCEP και βασίστηκε στο WAM, διαφέρει όμως από αυτό σε πολλούς τομείς, όπως στις κύριες εξισώσεις, στην δομή των αριθμητικών μεθόδων και στις φυσικές παραμετροποιήσεις.

Το επιχειρησιακό σύστημα ΤΡΙΤΩΝ λοιπόν, αποτελείται από 14 αλληλεπικαλυπτόμενα μοντέλα που καλύπτουν 1) τον παγκόσμιο Ωκεανό 2) τη Μεσόγειο και τη Μαύρη Θάλασσα 3) την Ανατολική Μεσόγειο 4) την Αδριατική 5) το Βόρειο Αιγαίο 6) το Κεντρικό Αιγαίο 7) το Νότιο Αιγαίο 8) το Ιόνιο 9) το Κρητικό Πέλαγος 10) το Σαρωνικό κόλπο 11) τις ακτές του Σαρωνικού 12) την Ανατολική Αττική 13) τον Θερμαϊκό 14) το Αιγαίο και Ιόνιο Πέλαγος.



Σχήμα 3-6: Περιοχές εφαρμογής του συστήματος ΤΡΙΤΩΝ.

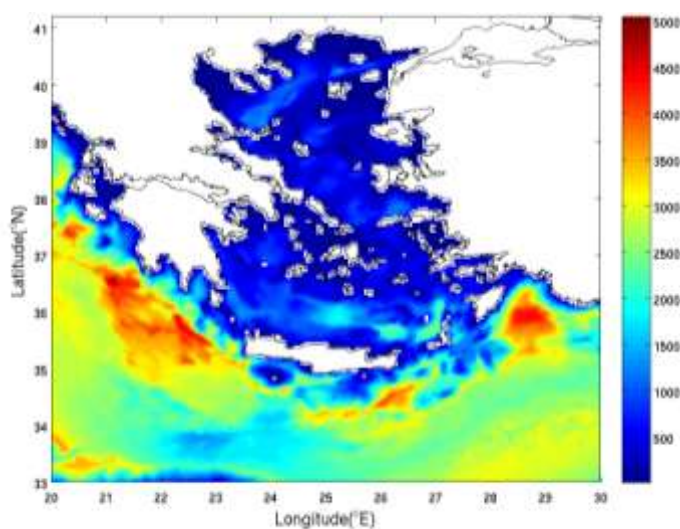
Για περιοχές πολύ υψηλής ανάλυσης χρησιμοποιείται το SWAN και αμφότερα τα αποτελέσματα συγκρίνονται με αυτά από το WAVEWATCH το οποίο επίσης λειτουργεί επιχειρησιακά. Τα ανεμολογικά δεδομένα λαμβάνονται από το σύστημα ΣΚΙΡΩΝ το οποίο αρχικά αναπτύχθηκε για την Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία (ΕΜΥ) από το Πανεπιστήμιο Αθηνών και πλέον λειτουργεί επιχειρησιακά σε άλλες 17 περιοχές παγκοσμίως.

3.2.3 Εφαρμογή των επιχειρησιακών συστημάτων στην ευρύτερη περιοχή μελέτης

Στόχος της παρούσας εργασίας, είναι η μελέτη του δυναμικού και της δυνατότητας εκμετάλλευσης της θαλάσσιας ενέργειας, στα Ελληνικά Πελάγη, με χρήση δεδομένων από αριθμητικά μοντέλα. Συγκεκριμένα, μελετάται η κυματική ενέργεια και η ενέργεια των θαλασσιών επιφανειακών ρευμάτων. Η παλιρροιακή ενέργεια δεν κρίθηκε σκόπιμο να μελετηθεί καθώς, στον ευρύτερο Ελληνικό χώρο, το εύρος των παλιρροιών θεωρείται αμελητέο για τέτοιου είδους οικονομική εκμετάλλευση.

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό της θαλάσσιας ενέργειας καθώς και τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την επεξεργασία των δεδομένων, για την ευρύτερη περιοχή μελέτης. Επιπλέον αναφέρονται συνοπτικά κάποια γενικότερα συμπεράσματα τόσο για την κυματική ενέργεια όσο και για την κυκλοφορία και την ισχύ των ρευμάτων. Μία πιο αναλυτική μελέτη γίνεται στο κεφάλαιο 4 όπου η περιοχή μελέτης έχει χωριστεί σε υπολεκάνες, κάθε μία από τις οποίες εξετάζεται ξεχωριστά.

Πιο συγκεκριμένα, τα δεδομένα κυκλοφορίας που χρησιμοποιήθηκαν, προέρχονται από το επιχειρησιακό σύστημα ALERMO το οποίο όπως προαναφέρθηκε καλύπτει την περιοχή 20°E – 36.4°E & 30.7°N – 41.2°N με οριζόντια ανάλυση $1/30^{\circ}\times 1/30^{\circ}$ (493x316 σημεία). Τα κυματικά δεδομένα προέρχονται από το προγνωστικό μοντέλο της περιοχής του Αιγαίου του συστήματος TRITON το οποίο καλύπτει την περιοχή 19°E – 30°E & 33°N – 43°N με διακριτοποίηση $1/10^{\circ}\times 1/10^{\circ}$ (111x101 σημεία). Καθώς όμως τα δύο μοντέλα καλύπτουν διαφορετική περιοχή και έχουν και διαφορετική οριζόντια ανάλυση, για την περιοχή μελέτης επιλέχθηκαν τελικά τα κοινά σημεία του πλέγματος των δύο περιοχών. Η υπό μελέτη περιοχή έχει λοιπόν συντεταγμένες 20°E – 30°E & 33°N – 41.2°N και διακριτοποίηση $1/10^{\circ}\times 1/10^{\circ}$ (101 x 83 σημεία). Η βαθυμετρία που χρησιμοποιήθηκε προέρχεται από το ALERMO και προσαρμόστηκε κι αυτή στην υπό μελέτη περιοχή (Σχήμα 3-7).



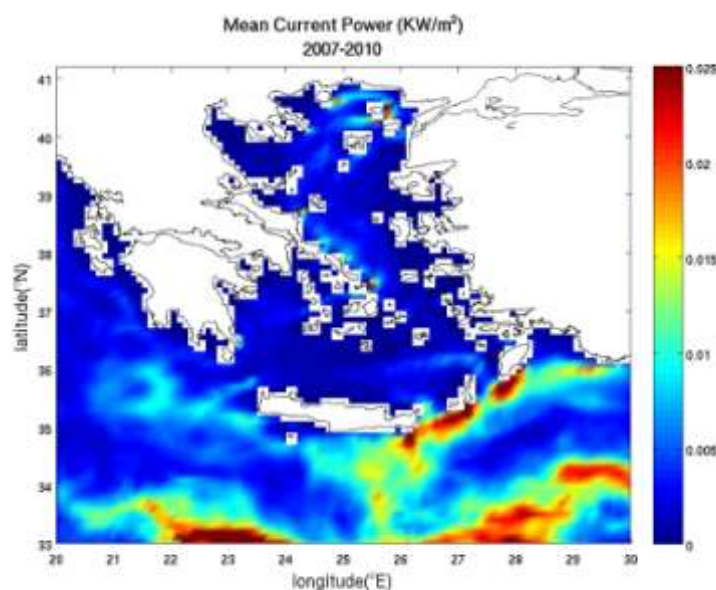
Σχήμα 3-7: Βαθυμετρία περιοχής μελέτης

Η μελέτη της κυκλοφορίας και της ενέργειας των ρευμάτων πραγματοποιήθηκε με χρήση εβδομαδιαίων δεδομένων τριών ετών από τις 2 Μαρτίου του 2007 έως τις 30 Απριλίου το 2010. Στην παρούσα εργασία δεν ασχολούμαστε με φαινόμενα μικρότερης χρονικής κλίμακας, πέραν της συνοπτικής, και συνεπώς μία μεγαλύτερη διακριτοποίηση στον χρόνο δεν θα άλλαζε σημαντικά την κυκλοφορία στη λεκάνη. Οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν από το ALERMO για τον υπολογισμό της ενέργειας, είναι η ζωνική και μεσημβρινή οριζόντια ταχύτητα του επιφανειακού στρώματος βάρους 10m. Όπως προαναφέρθηκε, ο υπολογισμός της ισχύος των θαλασσιών ρευμάτων έγινε μέσω της σχέσης:

$$P = (1/2) \rho A V^3 \quad (W)$$

Η πυκνότητα (ρ) και το εμβαδόν διατομής του ρότορα (A) θεωρήθηκαν σταθερά, με τυπικές τιμές $\rho=1024 \text{ kg/m}^3$ και $A=1 \text{ m}^2$ (στη μονάδα επιφάνειας). Καθώς η ισχύς εξαρτάται ουσιαστικά από τον κύβο της ταχύτητας, περιοχές που χαρακτηρίζονται από έντονη κυκλοφορία, αναμένεται να παρουσιάζουν κι αυξημένη ενεργειακή πυκνότητα.

Από τη χωρική κατανομή της μέσης ισχύος ρεύματος για όλη την περίοδο μελέτης, παρατηρούμε ότι στο Νότιο τμήμα της περιοχής εμφανίζεται ένα αρκετά ισχυρό σήμα που εκτείνεται ανατολικά μέχρι και την περιοχή μεταξύ Κρήτης-Καρπάθου-Ρόδου. Εξαιτίας αυτού, όλες οι επιμέρους κυκλοφοριακές δομές που χαρακτηρίζονται από σχετικά μεγάλη ισχύ, παρουσιάζονται υποβαθμισμένες και συνεπώς είναι δύσκολο να εξαχθούν συγκεκριμένα συμπεράσματα. Παρόλα αυτά, είναι εμφανές ότι σε μέση ετήσια βάση, αυξημένες τιμές ισχύος εμφανίζονται στο Βόρειο Αιγαίο και συγκεκριμένα στην περιοχή του στενού των Δαρδανελίων και του αντικυκλώνα της Σαμοθράκης, λόγω της εξόδου των BSW προς το Αιγαίο (Σχήμα 3-8). Επιπλέον, η ισχύς αυξάνεται κατά μήκος των ανατολικών ακτών της Εύβοιας, περιοχή όπου συναντάται το Ενοία Jet. Στο Νοτιοανατολικό τμήμα της Πελοποννήσου είναι εμφανής ο κυκλώνας Πέλοπας με τιμές ισχύος περίπου $0.003\text{-}0.012 \text{ KW/m}^2$.



Σχήμα 3-8: Χωρική κατανομή της ισχύος των θαλασσιών ρευμάτων (KW/m^2) στην ευρύτερη περιοχή μελέτης

Στη συνέχεια κρίθηκε σκόπιμο τα δεδομένα της κυκλοφορίας να επεξεργαστούν στατιστικά. Τα μεγέθη που υπολογίστηκαν είναι η μέση τιμή, η μέγιστη, η ελάχιστη και η τυπική απόκλιση της ταχύτητας και της ισχύος των ρευμάτων αντίστοιχα, για όλα τα σημεία του πλέγματος από τις 2/3/2007 έως τις 30/4/2010 (Πίνακας 3-1). Αν και η ευρύτερη περιοχή μελέτης φαίνεται να χαρακτηρίζεται από μικρές ταχύτητες, από τη βιβλιογραφία γνωρίζουμε ότι υπάρχουν περιοχές στον ευρύτερο Ελληνικό χώρο, που εμφανίζουν υψηλές ταχύτητες ρεύματος, όπως για παράδειγμα τα στενά του Ευρίπου όπου έχουν καταγραφεί ταχύτητες υψηλότερες από 3.5 m/s [Alatsathianos S. & Fafali P., 2009].

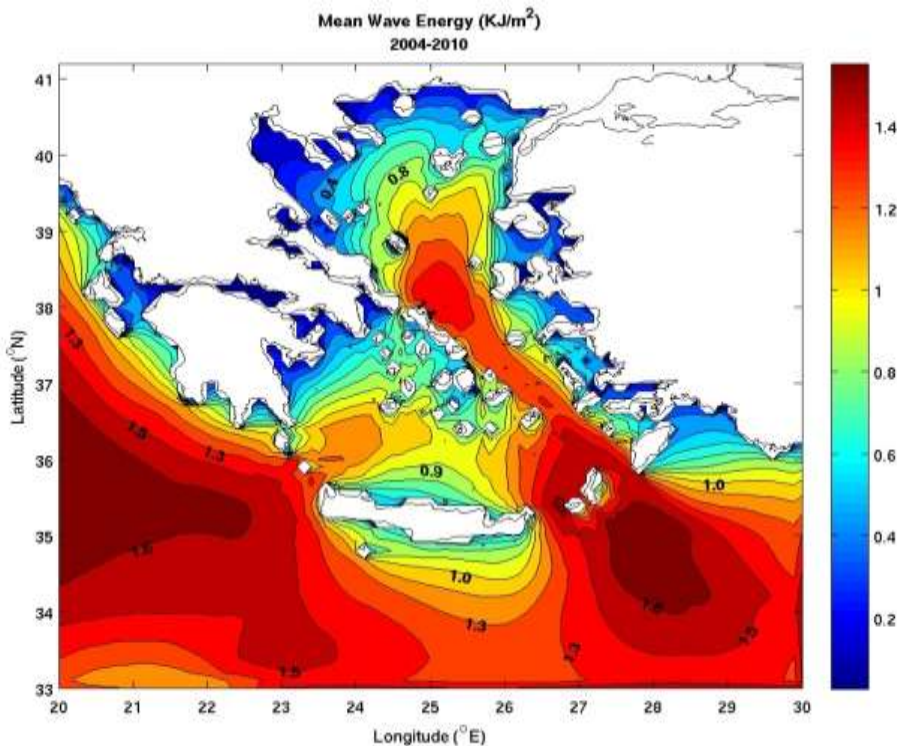
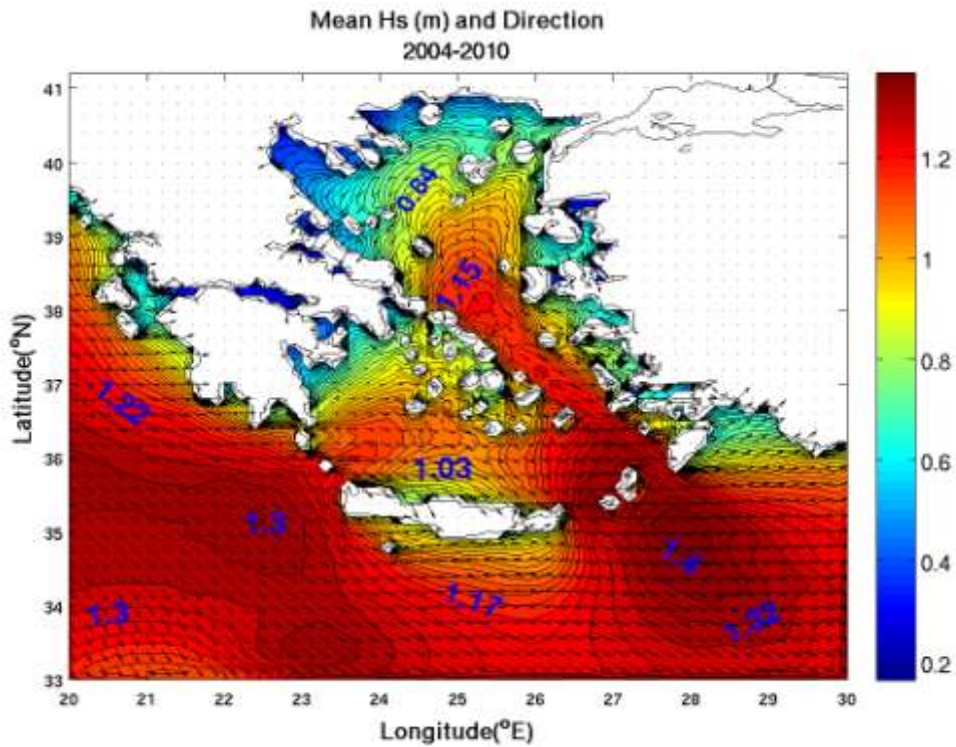
Πίνακας 3-1: Στατιστικές παράμετροι ταχύτητας και ισχύος ρεύματος.

Στατιστικά Μεγέθη	Ταχύτητα ρεύματος V (m/s)	Ισχύς ρεύματος P (KW/m ²)
Mean	0.1472	0.0058
Max	1.1120	0.7040
Min	0	0
St. Deviation	0.0071	0.0030

Για τη μελέτη της κυματικής ενέργειας των Ελληνικών θαλασσών, χρησιμοποιήθηκαν 3ωρα κυματικά δεδομένα εφτά ετών από το μοντέλο TRITON. Η περίοδος μελέτης είναι από 1/1/2004 έως 31/12/2010 και οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν είναι το σημαντικό ύψος κύματος (Significant Wave Height, H_s) καθώς και η ταχύτητα κύματος (μεσημβρινή και ζωνική). Ο υπολογισμός της πυκνότητας της κυματικής ενέργειας βασίστηκε στην παρακάτω σχέση:

$$E = \frac{1}{16} \rho g H_s^2 \quad (J/m^2)$$

Τόσο η πυκνότητα όσο και η επιτάχυνση της βαρύτητας, θεωρήθηκαν σταθερές με τυπικές τιμές $g=9.81m/s^2$ και $\rho=1024kg/m^3$. Από τα αποτελέσματα που προέκυψαν (Σχήμα 3-9), γίνεται φανερή η εξάρτηση της κυματικής ενέργειας από το σημαντικό ύψος κύματος. Ένα γενικό συμπέρασμα λοιπόν είναι ότι οι περιοχές όπου το κυματικό πεδίο παρουσιάζεται ισχυρό, χαρακτηρίζονται και από μεγάλη πυκνότητα ενέργειας. Οι μεγαλύτερες τιμές της ενέργειας εμφανίζονται στην ανοιχτή θάλασσα και μειώνονται καθώς πλησιάζουμε προς την ξηρά. Στην παράκτια ζώνη παρατηρείται μείωση του ύψους κύματος που εντείνεται όταν εμφανίζεται το φαινόμενο της κυματικής σκίασης (shadow effect), όπως Ανατολικά της Ρόδου, στην Νότια Κρήτη και στο μεγαλύτερο μέρος της Πελοποννήσου.

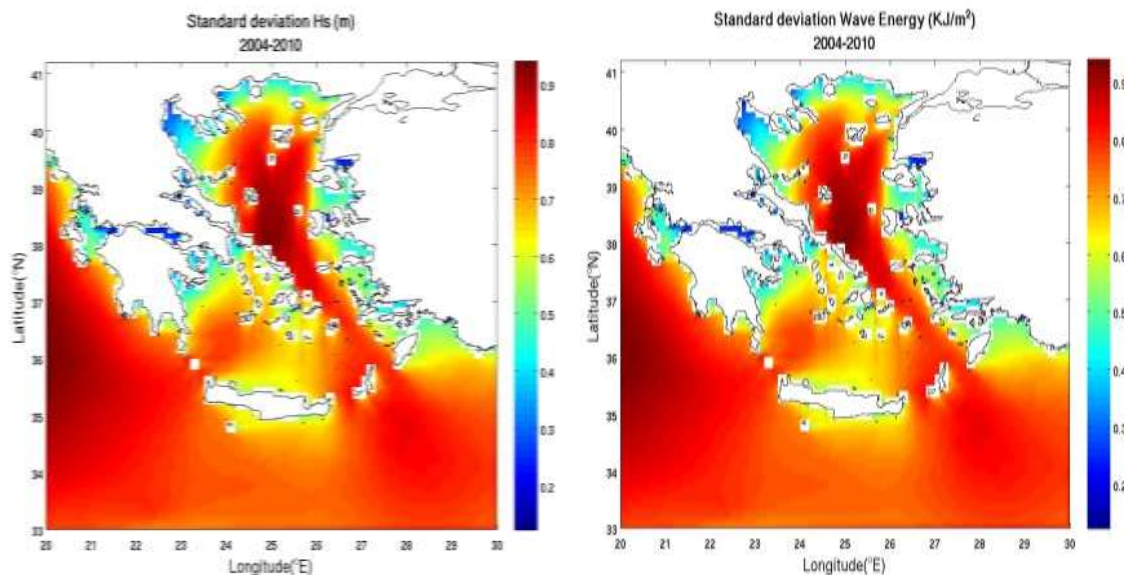


Σχήμα 3-9: Χωρική κατανομή του μέσου σημαντικού ύψους κύματος και της μέσης κυματικής ενέργειας στην ευρύτερη περιοχή μελέτης.

Το Αιγαίο χαρακτηρίζεται γενικά από μικρό fetch και χαμηλά swell και συνεπώς το κυματικό πεδίο καθορίζεται ως επί το πλείστον από το πεδίο των ανεμογενών κυμάτων. Οι υψηλότερες τιμές κύματος εμφανίζονται στον άξονα μεταξύ Βορείου Αιγαίου, Κυκλάδων, Καρπάθου και Κρήτης, κάτι το οποίο αναμενόταν καθώς εκεί αναπτύσσονται και οι μέγιστες ταχύτητες ανέμου. Συγκεκριμένα, τόσο ο άνεμος όσο και το κύμα, ξεκινάνε από Βόρειες-Βορειοανατολικές

διευθύνσεις στο στενό των Δαρδανελίων και κατόπιν κινούνται Βορειοδυτικά μέχρι και το νότιο Αιγαίο όπου εμφανίζονται και οι μεγαλύτερες τιμές της κυματικής ενέργειας.

Τα μεγαλύτερα ύψη κύματος εμφανίζονται σε περιοχές με μεγάλο fetch όπως στα Νότια της Πελοποννήσου και στο Κρητικό Πέλαγος. Στο Βόρειο Αιγαίο αντίθετα τα ύψη κύματος μειώνονται εξαιτίας της πολύπλοκης τοπογραφίας και του μικρού fetch (Σχήμα 3-9). Οι μεγαλύτερες τιμές της κυματικής ενέργειας (1.6 KJ/m^2) σημειώνονται στην θαλάσσια περιοχή ΝΑ της Καρπάθου και στο ΝΔ άκρο της Πελοποννήσου (1.6 KJ/m^2). Από τη χωρική κατανομή της τυπικής απόκλισης, για την περιοχή μελέτης, προκύπτει ότι στην ανοιχτή θάλασσα το κυματικό πεδίο και συνεπώς και η κυματική ενέργεια εμφανίζουν έντονες διακυμάνσεις.



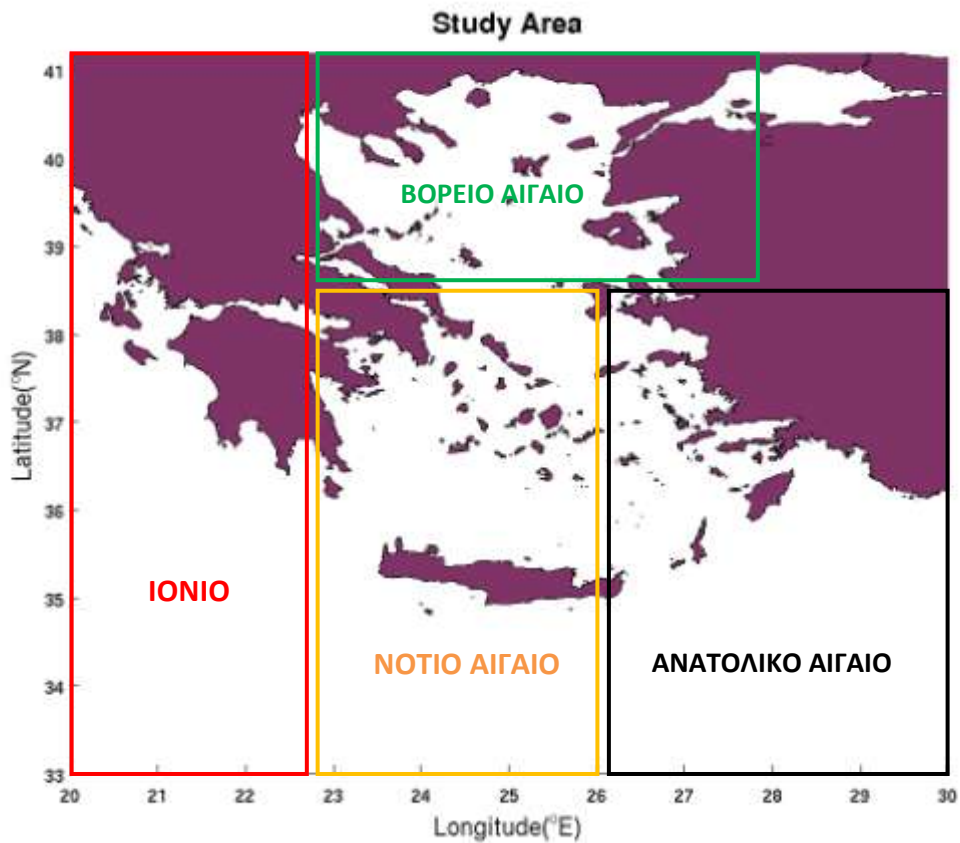
Σχήμα 3-10: Χωρικές κατανομές των τυπικών αποκλίσεων του κύματος και της κυματικής ενέργειας για την περίοδο μελέτης.

Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε στατιστική επεξεργασία των αποτελεσμάτων [Πίνακας 3-2]. Οι παράμετροι που εξετάστηκαν στην υπό μελέτη περιοχή είναι το μέσο, μέγιστο και ελάχιστο σημαντικό ύψος κύματος καθώς και η τυπική του απόκλιση. Τα ίδια στατιστικά μεγέθη υπολογίστηκαν και για την πυκνότητα της κυματικής ενέργειας.

Πίνακας 3-2: Στατιστικά στοιχεία ύψους κύματος και κυματικής ενέργειας για τα 7 χρόνια μελέτης.

Στατιστικά Μεγέθη	Σημαντικό ύψος κύματος Hs (m)	Πυκνότητα κυματικής ενέργειας E (KJ/m^2)
Mean	1.1034	1.1555
Max	11.8	87.4204
Min	10^{-5}	$6.2784 \cdot 10^{-11}$
St. Deviation	0.0353	0.0353

Για μία πιο λεπτομερή ανάλυση της τοπικής πλέον θαλάσσιας ενέργειας, κρίθηκε απαραίτητο, ο περαιτέρω διαχωρισμός της ευρύτερης περιοχής μελέτης σε τέσσερις υπολεκάνες: του Βορείου Αιγαίου, του Νότιου Αιγαίου, του Ανατολικού Αιγαίου και του Ιονίου (Σχήμα 3-11). Ως Βόρειο Αιγαίο ορίστηκε η περιοχή με συντεταγμένες $22.6-27.8^{\circ}\text{E}$ & $38.6-41.2^{\circ}\text{N}$ ως Νότιο η περιοχή $22.6-26^{\circ}\text{E}$ & $33-38.6^{\circ}\text{N}$. Το Ιόνιο περιλαμβάνει την περιοχή $20-22.6^{\circ}\text{E}$ & $33-41.2^{\circ}\text{N}$ και το Ανατολικό Αιγαίο το τμήμα $26-30^{\circ}\text{E}$ & $33-38.6^{\circ}\text{N}$. Οι τέσσερις λεκάνες συνδέονται μεταξύ τους γεωγραφικά και ο διαχωρισμός τους βασίστηκε στα τοπογραφικά χαρακτηριστικά και στις κυκλοφοριακές δομές που εμφανίζονται στην κάθε μία. Στο κεφάλαιο που ακολουθεί παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα που προέκυψαν για την κάθε υπολεκάνη μελέτης.



Σχήμα 3-11: Απεικόνιση των τεσσάρων λεκανών της ευρύτερης περιοχής μελέτης

4 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ – ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

4.1 Κυματικό πεδίο και κυματική ενέργεια

4.1.1 Χωρική Κατανομή

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται για κάθε υπολεκάνη ξεχωριστά, οι χωρικές κατανομές του μέσου σημαντικού ύψους κύματος και της μέσης κυματικής ενέργειας, για τα επτά χρόνια μελέτης. Επιπλέον απεικονίζονται και οι τυπικές αποκλίσεις των δύο παραμέτρων προκειμένου να εξαχθεί ένα γενικότερο συμπέρασμα σχετικά με τις διακυμάνσεις που υφίσταται η κυματική ενέργεια σε κάθε περιοχή και που είναι καθορίστηκες για την απόδοση των τεχνολογιών εκμετάλλευσης της θαλάσσιας ενέργειας. Για κάθε κυματικό μετατροπέα είναι σημαντικό η περιοχή τοποθέτησης να χαρακτηρίζεται όχι μόνο από σημαντικό αλλά και από σταθερό ενεργειακό δυναμικό.

Επίσης περιοχές με ακραία καιρικά φαινόμενα και ύψη κύματος πρέπει να αποφεύγονται για την ασφαλή λειτουργία των συσκευών. Συνεπώς κρίθηκε σκόπιμο σε κάθε υπολεκάνη να υπολογιστούν όχι μόνο οι μέσες τιμές και οι τυπικές αποκλίσεις των παραμέτρων αλλά και οι μέγιστες και ελάχιστες τιμές που έχουν εμφανιστεί κατά την περίοδο μελέτης. Από τη μελέτη της χωρικής κατανομής της μέσης κυματικής ενέργειας, προκύπτει ότι σε όλες τις υπολεκάνες οι μεγαλύτερες τιμές εντοπίζονται στην ανοιχτή θάλασσα όπου το κυματικό πεδίο είναι ενισχυμένο και μειώνονται κοντά στην ηπειρωτική χώρα λόγω της μείωσης και του ανέμου.

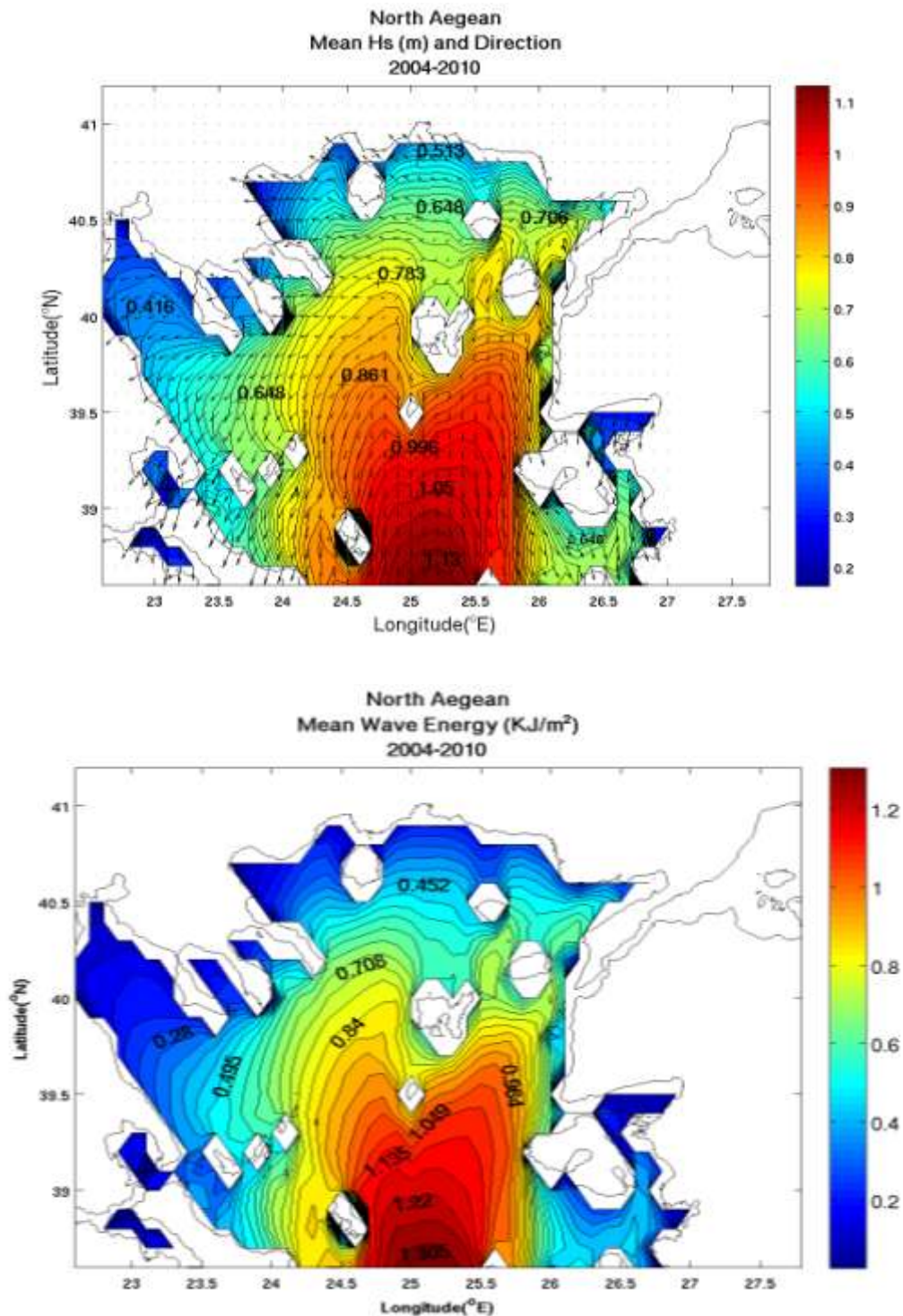
Πιο συγκεκριμένα, στο Βόρειο Αιγαίο (22.6°-27.8° E & 38.6°-41.2° N) επικρατούν κυρίως ανεμογενή κύματα που προέρχονται σε ετήσια βάση από Βόρειες και Βορειοανατολικές διευθύνσεις. Σε κλειστές λεκάνες όπως το Βόρειο Αιγαίο που χαρακτηρίζονται από μικρό fetch, εμποδίζεται η ανάπτυξη του κύματος και η δημιουργία σημαντικού swell.

Στην περιοχή του Θερμαϊκού κόλπου το κυματικό πεδίο παρουσιάζει μία δυτική-βορειοδυτική ροή με ύψη κύματος που κυμαίνονται από 0.4 m στο βόρειο τμήμα έως 0.6 m νοτιότερα. Τα μικρά ύψη κύματος οφείλονται ως επί το πλείστον στην χερσόνησο της Χαλκιδικής η οποία εμποδίζει την ανάπτυξη μεγαλύτερου κυματισμού. Η κυματική ενέργεια εμφανίζεται επίσης μειωμένη με μέγιστη τιμή 0.4 KJ/m² (Σχήμα4-1).

Χαμηλές τιμές κυματικής ενέργειας παρατηρούνται και κατά μήκος του ανατολικού τμήματος της βόρειας Εύβοιας ως αποτέλεσμα της κυματικής σκίασης που δημιουργείται από το σύμπλεγμα των Σποράδων. Αντίθετα, στο νοτιοανατολικό της τμήμα το κυματικό πεδίο αυξάνει εξαιτίας του φαινομένου του καναλισμού ανάμεσα στις Βόρειες Σποράδες και στη Σκύρο. Νότια της Σκύρου, στην υπήνεμη πλευρά του νησιού (lee side of the island) το κύμα αυξάνεται περαιτέρω με αποτέλεσμα να εμφανίζεται μεγάλη πυκνότητα κυματικής ενέργειας στα παράλια της Εύβοιας με τιμές που κυμαίνονται από 0.7-0.8 KJ/m².

Στα ανατολικά παράλια του Βορείου Αιγαίου το μέσο σημαντικό ύψος κύματος εμφανίζει βορειοδυτική ροή με τιμές από 0.7-0.95m ανατολικά των ακτών της Μυτιλήνης. Μικρότερα ύψη παρουσιάζονται κοντά στην ξηρά και στην περιοχή ανάμεσα στη Μυτιλήνη και τη Χίο. Όπως

ήταν αναμενόμενο τα μέγιστα ύψη κύματος εμφανίζονται στην περιοχή με συντεταγμένες 38.6-39.5 N & 24.5-25.7 E. Δεδομένου ότι οι άνεμοι στο Αιγαίο έχουν κυρίως Βόρειες διευθύνσεις το τμήμα αυτό χαρακτηρίζεται από μεγάλο σχετικά fetch και συνεπώς παρουσιάζει και την μεγαλύτερη κυματική ενέργεια με τιμές από 0.9 έως 1.3 KJ/m^2 .



Σχήμα 4-1: Χωρικές κατανομές του μέσου σημαντικού ύψους κύματος (m) και της μέσης κυματικής ενέργειας (KJ/m^2) στο Βόρειο Αιγαίο.

Ως Νότιο Αιγαίο ορίστηκε η θαλάσσια περιοχή με συντεταγμένες 22.6-26 E & 33-38.6 N που περιλαμβάνει από τα Ανατολικά προς τα Δυτικά, τα στενά των Κυθήρων και Αντικυθήρων, το

Μυρτώο Πέλαγος, το Ανατολικό και κεντρικό τμήμα του Κρητικού Πελάγους, το πλατό των Κυκλάδων καθώς και τμήμα του Λιβυκού. Στην περιοχή αυτή σημειώνονται αρκετά μεγάλες τιμές κυματικής ενέργειας ιδιαίτερα στο Βορειοανατολικό και Νοτιοδυτικό τμήμα (Σχήμα 4-2).

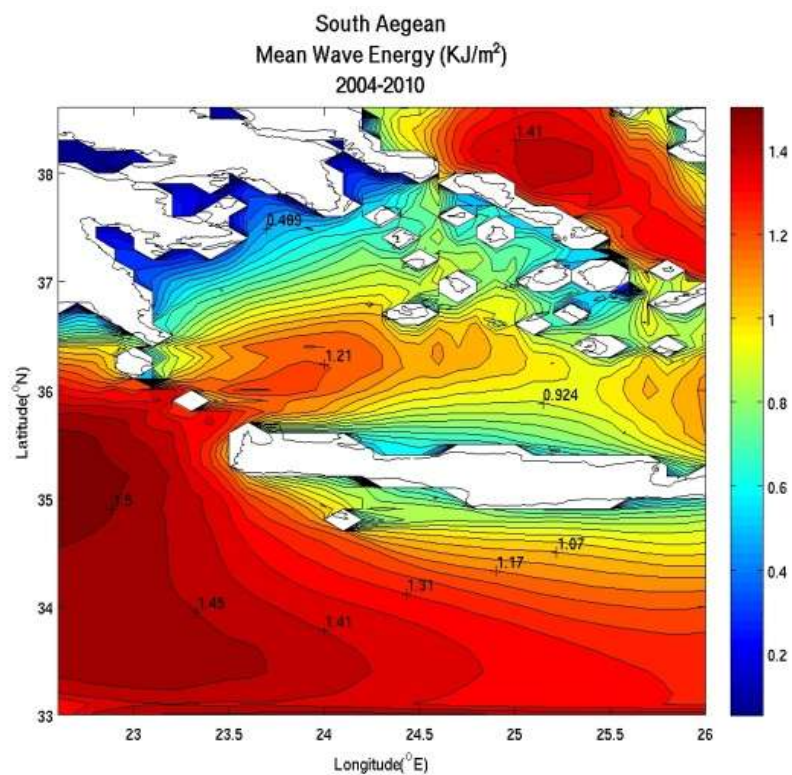
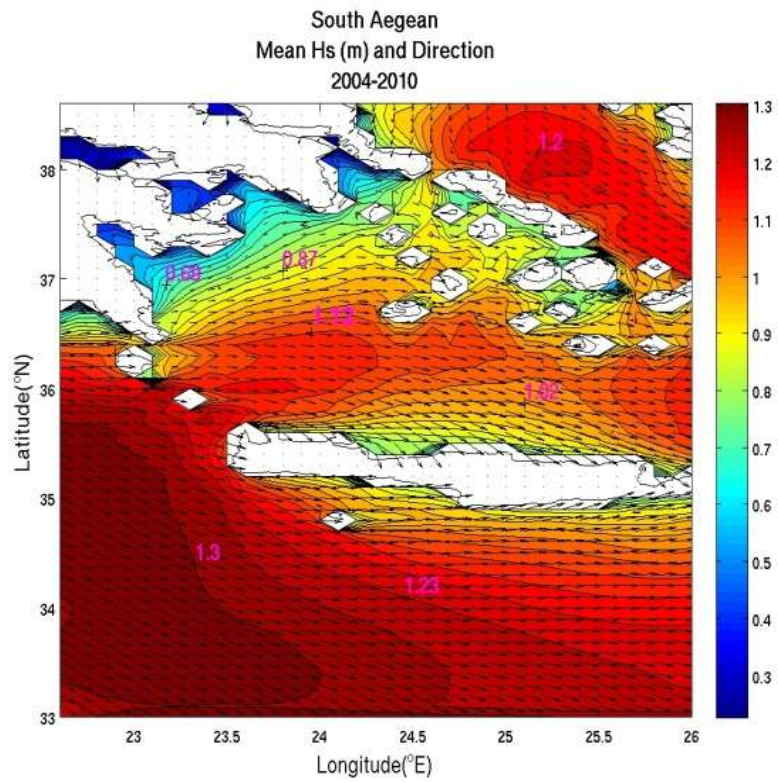
Στο Βορειοανατολικό τμήμα του συμπλέγματος των Κυκλάδων το σημαντικό ύψος κύματος εμφανίζεται αυξημένο λόγω της μεγάλης έντασης των ανέμων. Η μέση τιμή της κυματικής ενέργειας για τα 7 χρόνια μελέτης είναι 1.41 KJ/m^2 . Η περιοχή αυτή βρίσκεται στο τόξο όπου σημειώνονται οι πιο έντονες ανεμολογικές και κυματικές συνθήκες σε μέση ετήσια βάση. Το τόξο αυτό ξεκινά από το άκρο των Στενών των Δαρδανελλίων και εκτείνεται Νότια μέχρι και τα στενά μεταξύ Κρήτης και Ρόδου επηρεάζοντας και τη θαλάσσια περιοχή της Ανατολικής Λεβαντίνης.

Στις Βορειοανατολικές Κυκλάδες η ροή του ανέμου και του κύματος αποκόπτεται ανάμεσα στα νησιά με αποτέλεσμα η κυματική ενέργεια να παρουσιάζεται μειωμένη. Παρόλα αυτά, σε τοπικό επίπεδο τα ύψη κύματος παρουσιάζουν αύξηση εξαιτίας του φαινομένου του καναλισμού. Αν και το Κυκλαδίτικο σύμπλεγμα αποτελεί λοιπόν εμπόδιο στη ροή του ανέμου και του κυματικού πεδίου από το Βόρειο τμήμα του Αιγαίου προς το Νότιο, ταυτόχρονα μέσω του καναλισμού καθοδηγεί και ενισχύει τα κυματικά πεδία νοτιοανατολικά.

Το κυματικό πεδίο εμφανίζεται μειωμένο στο Νότιο Ευβοϊκό, στο Σαρωνικό, στον Αργολικό και στο Μεσσηνιακό κόλπο λόγω της κυματικής σκίασης που δημιουργείται από την Εύβοια και τις χερσονήσους που βρίσκονται κάθετοι στη διεύθυνση των Βορείων και Βορειοανατολικών ανέμων. Στη θαλάσσια περιοχή γύρω από την Κρήτη η κυματική ενέργεια κυμαίνεται από $1-0.4 \text{ KJ/m}^2$ με τις τιμές του σημαντικού ύψους κύματος να μειώνονται στο παράκτιο τμήμα Βόρεια και Νότια της νήσου ως αποτέλεσμα του orographic steering. Οι μέγιστες τιμές της κυματικής ενέργειας σε ετήσια βάση καταγράφονται στο Νοτιοδυτικό τμήμα της Κρήτης και Νότια του Λακωνικού κόλπου φτάνοντας μέχρι τα στενά των Κυθήρων και Αντικυθήρων με τιμές $1.3-1.5 \text{ KJ/m}^2$ (Σχήμα 4-2).

Η περιοχή των Αντικυθήρων συγκεκριμένα, θα μπορούσε να αποτελέσει πιθανό σημείο τοποθέτησης ενός κυματικού μετατροπέα, καθώς παρουσιάζει μεγάλη ενεργειακή πυκνότητα σε μικρή απόσταση από την ακτή. Επιπλέον καθώς το κυματικό πεδίο δεν επηρεάζεται άμεσα από τα μελτέμια όπως το Βορειοανατολικό τμήμα του Αιγαίου, αλλά από τα συστήματα συνοπτικού καιρού, παρουσιάζει σχετικά μικρότερες διακυμάνσεις όπως μπορεί να φανεί από τη χωρική κατανομή της τυπικής απόκλισης του σημαντικού ύψους κύματος (Σχήμα 4-5).

Οι παράμετροι αυτοί είναι πολύ σημαντικοί για έναν κυματικό μετατροπέα καθώς σε μία παράκτια εγκατάσταση μειώνεται το κόστος λειτουργίας και συντήρησης ενώ ένα μεγάλο και σταθερό κυματικό δυναμικό εξασφαλίζει την ικανοποιητική και συνεχή απόδοση της συσκευής. Φυσικά υπάρχουν και πολλοί άλλοι παράγοντες που διαδραματίζουν καθοριστικό ρόλο στην επιλογή της περιοχής τοποθέτησης όπως η αντίδραση της τοπικής κοινωνίας, η αλιευτική δραστηριότητα, οι ενδεχόμενες περιβαλλοντικές επιπτώσεις κ.ά.



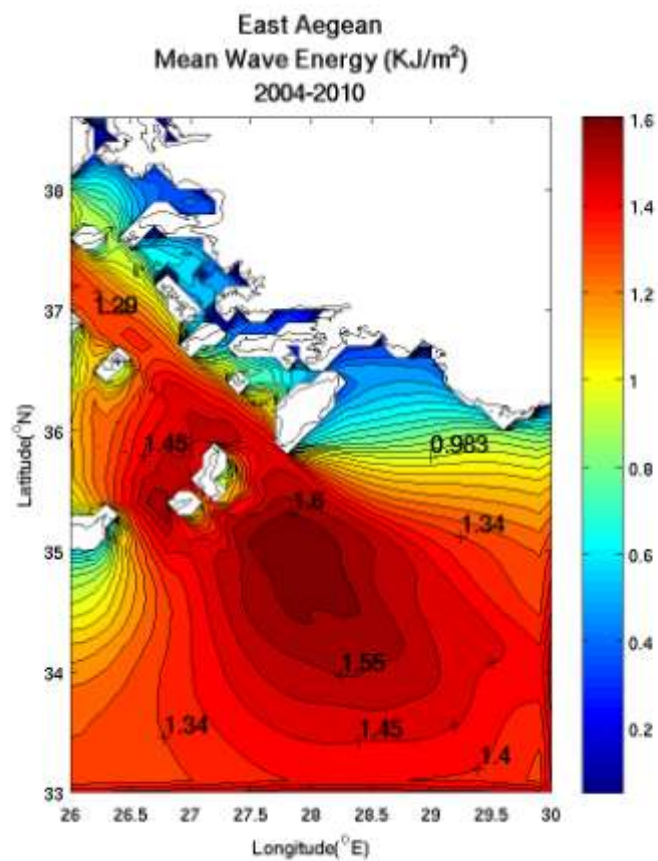
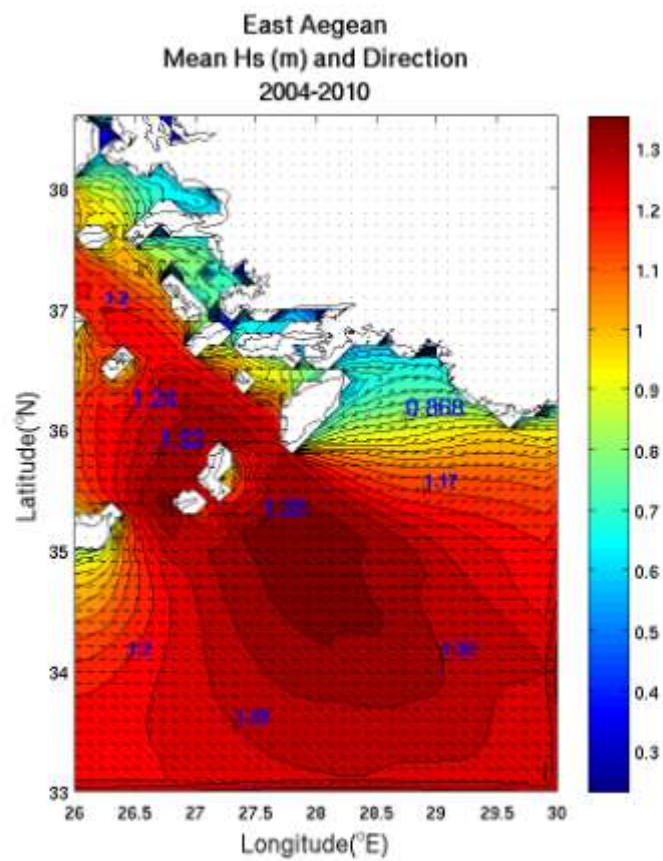
Σχήμα 4-2: Χωρική κατανομή του μέσου κυματικού πεδίου και της μέσης κυματικής ενέργειας στο Νότιο Αιγαίο όπως προέκυψε ύστερα από επεξεργασία κυματικών δεδομένων από το μοντέλο TPITΩΝ για την περίοδο μελέτης.

Ως Ανατολικό Αιγαίο επιλέχθηκε να οριστεί η περιοχή 26° - 30° E & 33° - 38.6° N που περιλαμβάνει το Καρπάθιο και το Ανατολικό Λιβυκό Πέλαγος και στο νοτιοανατολικό του άκρου επικοινωνεί με τη θάλασσα της Λεβαντίνης. Χαρακτηριστικό της περιοχής είναι το ιδιαίτερα υψηλό αιολικό και κυματικό δυναμικό (Σχήμα 4-3). Το Ανατολικό Αιγαίο βρίσκεται πάνω στον άξονα όπου το αιολικό και κυματικό πεδίο ενισχύεται κατά τους θερινούς μήνες εξαιτίας των Ετησιών, με αποτέλεσμα να εμφανίζει μεγάλη ενεργειακή πυκνότητα και το καλοκαίρι.

Οι υψηλότερες τιμές της κυματικής ενέργειας παρατηρούνται στο νοτιοανατολικό άκρο της λεκάνης με τιμές που φτάνουν τα 1.6 KJ/m^2 . Οι επιπτώσεις που έχει τόσο το fetch όσο και το φαινόμενο του καναλισμού στο ύψος κύματος, είναι ιδιαίτερα εμφανείς στα στενά μεταξύ Κρήτης-Κάσου, Κάσου-Καρπάθου και Καρπάθου-Ρόδου. Στις περιοχές αυτές είναι γνωστό ότι εμφανίζονται και swell αλλά με μικρά ύψη κύματος. Το μέσο σημαντικό ύψος κύματος για την περίοδο μελέτης στην ευρύτερη περιοχή του ανατολικού Αιγαίου, κυμαίνεται σε ιδιαίτερα υψηλά επίπεδα με μέση τιμή 1.17m (Πίνακας 4-1). Η μέση τιμή της κυματικής ενέργειας είναι αντίστοιχα 1.24 KJ/m^2 .

Συγκεκριμένα, στη θαλάσσια περιοχή γύρω από την Κάρπαθο και την Κάσο το κυματικό δυναμικό θα μπορούσε να εκμεταλλευτεί για την παραγωγή ηλεκτρισμού εγκαθιστώντας έναν κατάλληλο κυματικό μετατροπέα. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι για ύψος κύματος 1.2m , μήκος 5m και επανάληψη ανά 3 sec η διαθέσιμη ενέργεια ενός μέτρου μετώπου κύματος μπορεί να κινήσει ηλεκτρογεννήτρια ισχύος 3 kW . Ένας τυπικός πλωτήρας για παράδειγμα έχει τη δυνατότητα να παράγει 58KWh την ημέρα για ένα καλό κυματικό κλίμα. Θεωρώντας ότι η ημερήσια κατανάλωση μιας οικίας με τέσσερα μέλη είναι 10 KWh , ένα θαλάσσιο πάρκο 50 πλωτήρων, διαμέτρου 5m ο καθένας που θα καταλαμβάνει μία έκταση 5 στρεμμάτων, θα μπορούσε να παράγει 2935 KWh ημερησίως ποσό ικανό για την τροφοδότηση 300 σπιτιών.

Όσο για το πόσιμο νερό, ένας μόνο πλωτήρας με διάμετρο 5 μέτρα και με έναν μέσο ετήσιο κυματισμό ενός μέτρου, μπορεί να αποδώσει 16 κυβικά νερό την ημέρα. Εάν υπολογίσουμε ότι ένας άνθρωπος χρειάζεται 100 με 120 λίτρα νερού την ημέρα, ένας μόνο πλωτήρας θα αρκούσε να καλύψει τις ανάγκες σε νερό για 200 άτομα. Στη συγκεκριμένη περίπτωση του κυματικού πάρκου των 50 πλωτήρων, διαμέτρου 5 μέτρων, η ημερήσια παραγωγή σε καθαρό πόσιμο νερό την ημέρα είναι 830 κυβικά και συνεπώς θα μπορούσε να καλύψει τις ανάγκες 8000 ατόμων. Στην περίπτωση της Κάσου και της Καρπάθου ένα θαλάσσιο πάρκο θα μπορούσε να καλύψει μεγάλο μέρος των ενεργειακών τους αναγκών.



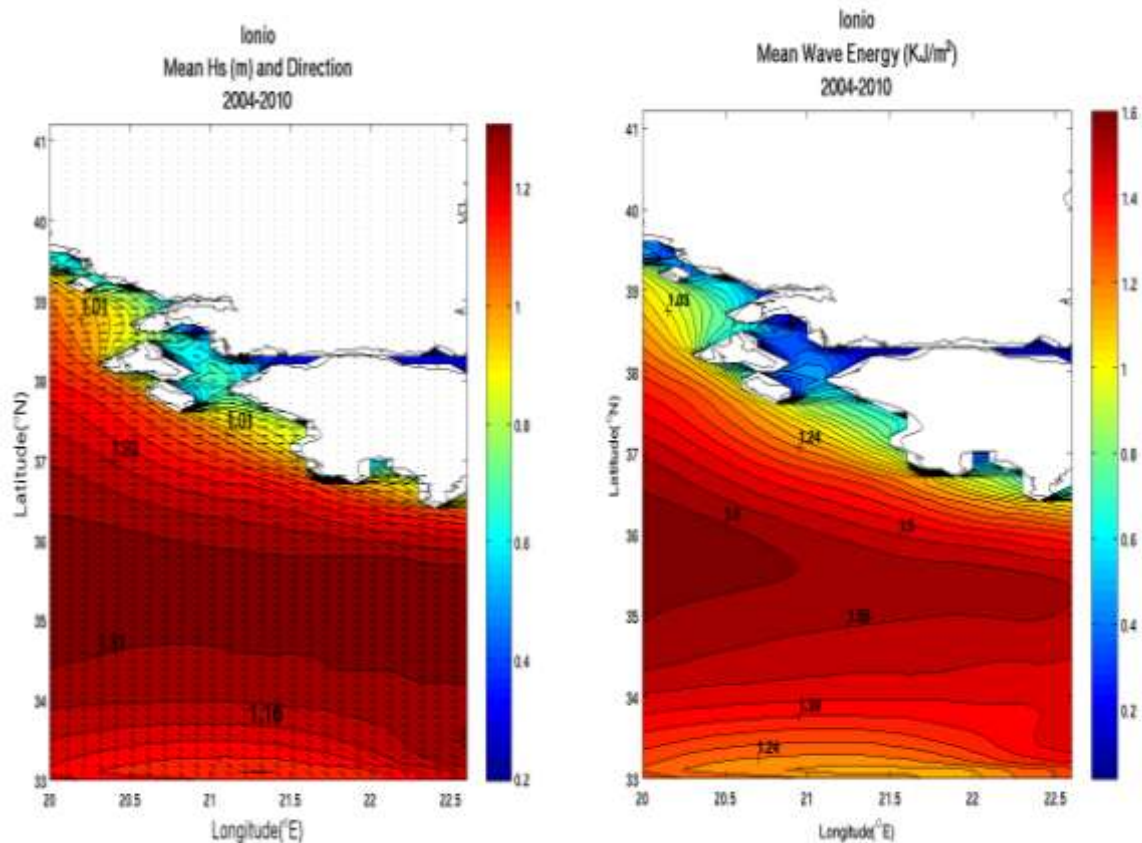
Σχήμα 4-3: Χωρική κατανομή του μέσου κυματικού πεδίου και της μέσης κυματικής ενέργειας στην υπολεκάνη του Ανατολικού Αιγαίου για την περίοδο μελέτης.

Η επόμενη υπολεκάνη μελέτης είναι το Ιόνιο Πέλαγος που ορίζεται από τις συντεταγμένες 20° E- 22.6° E & 33° N- 41.2° N. Στην περιοχή αυτή και συγκεκριμένα ανοιχτά της Πύλου, εντοπίζεται το βαθύτερο σημείο της Μεσογείου, με βάθη που φτάνουν τα 5000m. Η επικοινωνία του Ιονίου με το υπόλοιπο Αιγαίο γίνεται μέσω των στενών Κύθηρα-Αντικύθηρα-Κρήτη. Η κυματική ενέργεια εμφανίζει υψηλές τιμές κυρίως στο κεντρικό του τμήμα που μειώνονται κοντά στην ηπειρωτική χώρα. Αν και γενικά οι Ετησίες κατά τους θερινούς μήνες δεν φαίνεται να επηρεάζουν το Ιόνιο Πέλαγος, εντούτοις σύμφωνα με τους Theocharis et al. (1993) έχουν παρατηρηθεί υψηλές ταχύτητες ανέμου πάνω από τη νότια Πελοπόννησο και τη δυτική Κρήτη όταν οι άνεμοι στο Αιγαίο φτάσουν τα 8-9 Beaufort.

Οι μικρότερες τιμές της ενέργειας εμφανίζονται στις παράκτιες περιοχές κατά μήκος της ηπειρωτικής χώρας (Σχήμα 4-4). Η σκίαση που δημιουργείται από το σύμπλεγμα των Επτανήσων μειώνει το κυματικό πεδίο στον Κυπαρισσιακό κόλπο και ανατολικά του Κορινθιακού κόλπου με αποτέλεσμα οι τιμές της ενέργειας να μην ξεπερνάνε το 1 KJ/m^2 . Μειωμένες τιμές εμφανίζονται και στο Μεσσηνιακό κόλπο που περικλείεται από τα ακρωτήρια της Πελοποννήσου.

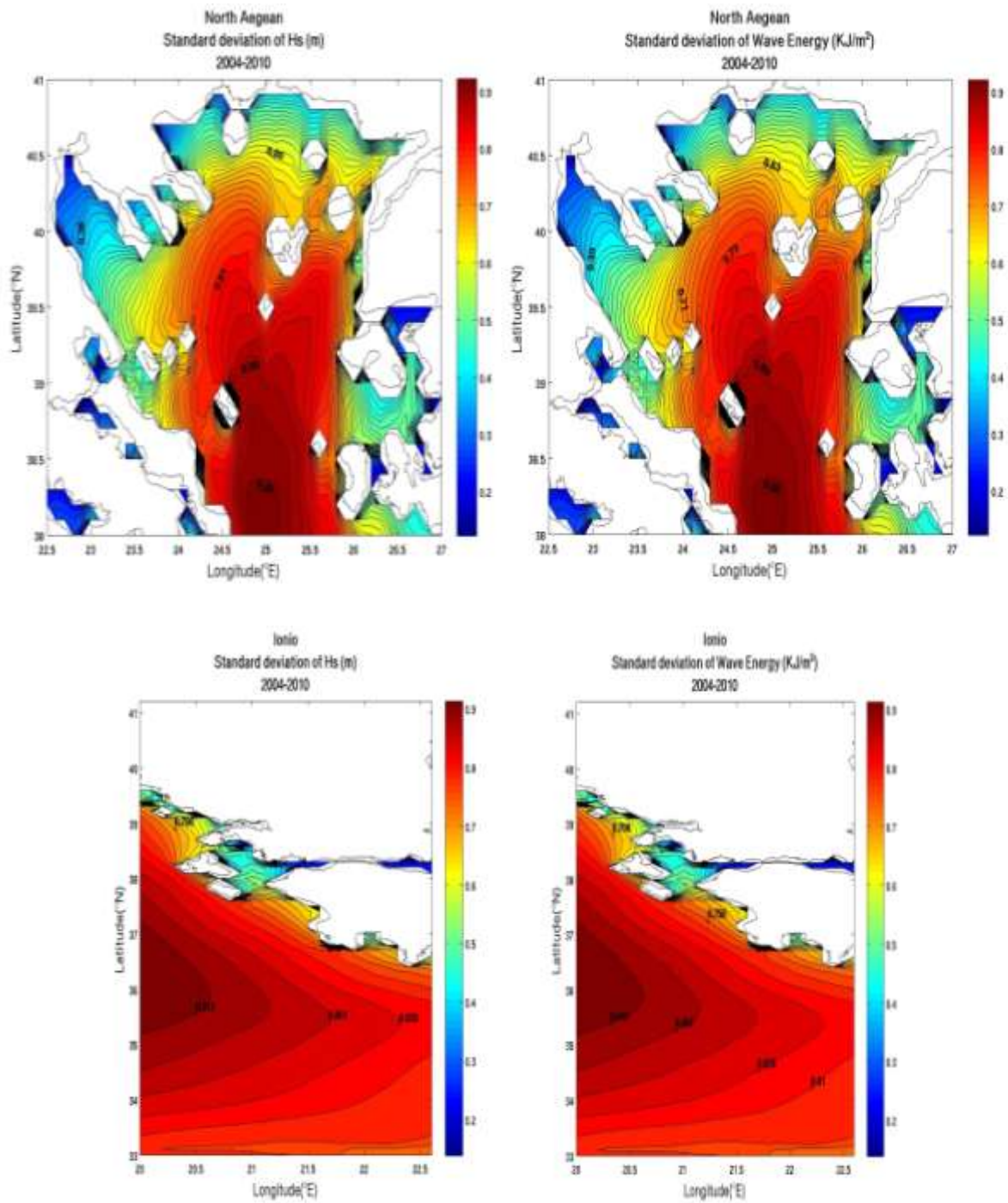
Μεγάλη ενεργειακή πυκνότητα εμφανίζεται στο Νοτιοδυτικό τμήμα του Ιονίου λόγω της ισχυρών ανέμων και του μεγάλου fetch. Από τις χωρικές κατανομές του μέσου σημαντικού ύψους κύματος και της μέσης κυματικής ενέργειας παρατηρούμε ότι στο κεντρικό τμήμα της υπολεκάνης οι τιμές της κυματικής ενέργειας κυμαίνονται από 1.2 KJ/m^2 έως 1.6 KJ/m^2 για αντίστοιχα ύψη κύματος 1.2m – 1.3m, περίπου (Σχήμα 4-4).

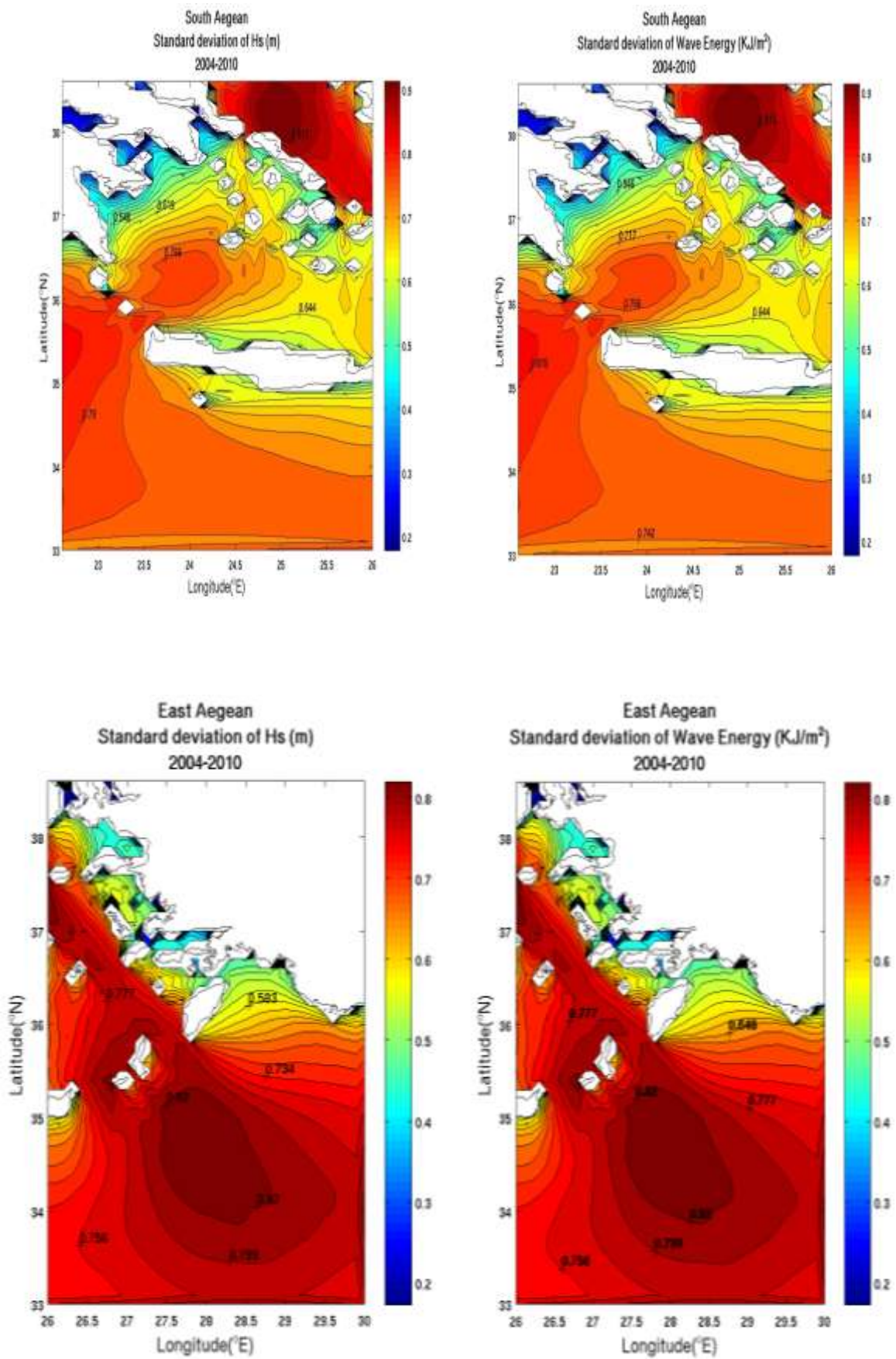
Στο Ιόνιο επικρατούν γενικά Βόρειες-Βορειοδυτικές διευθύνσεις τόσο για τον άνεμο όσο και για το κύμα. Το fetch που αντιστοιχεί σ' αυτές τις διευθύνσεις αλλά κι αυτό που αντιστοιχεί στις Νότιες-Νοτιοδυτικές διευθύνσεις είναι πολύ μεγάλο και συνεπώς σε μέση ετήσια βάση το Ιόνιο κατέχει μεγαλύτερο αιολικό και κυματικό δυναμικό σε σχέση με τις υπόλοιπες Ελληνικές θάλασσες. Καθοριστικό ρόλο στην τελική διαμόρφωση του κυματικού πεδίου κατέχουν και τα swell που εμφανίζονται στην περιοχή.



Σχήμα 4-4: Χωρική κατανομή του μέσου κυματικού πεδίου και της μέσης κυματικής ενέργειας στην υπολεκάνη του Ιονίου για την περίοδο μελέτης.

Προκειμένου να καθοριστεί η καταλληλότητα μιας περιοχής ως προς την τοποθέτηση ενός κυματικού μετατροπέα, πέραν από το καλό μέσο κυματικό δυναμικό, σημαντική παράμετρος είναι και η διακύμανση που υφίσταται το κυματικό πεδίο και συνεπώς και η ενέργεια σε ετήσια βάση. Περιοχές όπου το κυματικό πεδίο εμφανίζει μεγάλες μεταβολές δεν θεωρούνται κατάλληλες ειδικά για μετατροπείς που λειτουργούν για συγκεκριμένο εύρος τιμών. Ένας ποιοτικός τρόπος ελέγχου αυτών των διακυμάνσεων, είναι η απεικόνιση της χωρικής κατανομής της τυπικής απόκλισης του ύψους κύματος και της ενέργειας (Σχήμα 4-5). Οι μεγαλύτερες τυπικές αποκλίσεις εντοπίζονται στην ανοιχτή θάλασσα και μειώνονται κοντά στην ηπειρωτική χώρα.





Σχήμα 4-5: Τοπικές αποκλίσεις κύματος και κυματικής ενέργειας σε κάθε υπολεκάνη μελέτης.

Στη συνέχεια κρίθηκε σκόπιμο να εφαρμοστεί η κατάλληλη στατιστική επεξεργασία στα κυματικά δεδομένα από το μοντέλο TRITΩΝ. Για κάθε υπολεκάνη υπολογίστηκαν οι μέγιστες τιμές, οι ελάχιστες, οι μέσες και οι τυπικές αποκλίσεις τόσο για το σημαντικό ύψος κύματος όσο και για την κυματική ενέργεια για όλα τα χρόνια μελέτης (Πίνακας 4-1). Παρατηρούμε ότι η μέση τιμή του σημαντικού ύψους κύματος στην λεκάνη του Βορείου Αιγαίου είναι μικρότερη από ότι στην Ανατολική και στη Νότια. Το Ιόνιο Πέλαγος εμφανίζει το ισχυρότερο κυματικό κλίμα με μέση κυματική ενέργεια 1.3 KJ/m^2 . Το μέγιστο ύψος κύματος εντοπίζεται στην υπολεκάνη του Νοτίου Αιγαίου και του Ανατολικού με τιμές 11.8m.

Αν και τα μεγαλύτερα ύψη κύματος είναι αυτά που διαθέτουν και τη μεγαλύτερη ενεργειακή πυκνότητα, η μικρή συχνότητα εμφάνισής τους έχει ως αποτέλεσμα να μειώνεται η συνεισφορά τους στην τελική διαμόρφωση της ετήσιας κυματικής ενέργειας. Όσον αφορά το μέγιστο ύψος κύματος, ο προσδιορισμός του σε κάθε λεκάνη μελέτης είναι ιδιαίτερα σημαντικός καθώς από αυτό εξαρτάται η βιωσιμότητα ενός κυματικού μετατροπέα. Ακραία ύψη κύματος όχι μόνο θέτουν σε κίνδυνο τις συσκευές αλλά δεν είναι και εκμεταλλεύσιμα καθώς κάθε κυματικός μετατροπέας λειτουργεί εντός κάποιων ορίων.

Έτσι για παράδειγμα το ανώτερο όριο λειτουργίας για την υπεράκτια συσκευή Mighty Whale είναι τα 8m ενώ για τη Pico που εγκαθίσταται στην ακτογραμμή τα 7.5m. Κάθε κυματικός μετατροπέας διαθέτει λοιπόν ένα κατώτερο όριο λειτουργίας προκειμένου να εξασφαλίζεται η οικονομική του λειτουργία κι ένα ανώτερο που αφορά την ασφάλεια της εκάστοτε συσκευής. Τα όρια αυτά είναι διαφορετικά για κάθε τεχνολογία αν και όπως θα δούμε παρακάτω ένα τυπικό όριο θεωρείται το 1-5m.

Πίνακας 4-1: Στατιστικά μεγέθη κυματικών παραμέτρων για κάθε υπολεκάνη μελέτης.

Υπολεκάνες Μελέτης	Παράμετρος	Mean	Max	Min	Std
Βόρειο Αιγαίο	Hs (m)	0.63	10.5	10^{-5}	0.04
	E (KJ/m ²)	0.49	69.22	$6.28 \cdot 10^{-11}$	0.04
Νότιο Αιγαίο	Hs (m)	1.086	11.8	10^{-5}	0.029
	E (KJ/m ²)	1.093	87.42	$6.28 \cdot 10^{-11}$	0.029
Ανατολικό Αιγαίο	Hs (m)	1.17	11.8	$2.47 \cdot 10^{-5}$	0.034
	E (KJ/m ²)	1.24	87.42	$3.83 \cdot 10^{-10}$	0.034
Ιόνιο	Hs (m)	1.18	8.89	$9.18 \cdot 10^{-5}$	0.0272
	E (KJ/m ²)	1.31	49.62	$5.29 \cdot 10^{-9}$	0.0272

4.1.1.1 Κυματική ισχύς ανά μήκος μετώπου κύματος

Προκειμένου να μπορέσει να συγκριθεί το κυματικό δυναμικό των ελληνικών θαλασσών με το θαλάσσιο δυναμικό των υπόλοιπων Ευρωπαϊκών χωρών, κρίθηκε σκόπιμο να υπολογιστεί πέραν από τη κυματική ενέργεια (KJ/m^2) κι η κυματική ισχύς ανά μήκος μετώπου κύματος (KW/m). Η πυκνότητα ροής της κυματικής ενέργειας ή αλλιώς η κυματική ισχύς ανά μήκος μετώπου κύματος (wave power) δίνεται από τη σχέση:

$$P_{\text{wavefront}} = 0.5H_s^2 T_z \text{ (KW/m)}$$

Όπου T_z : η μέση περίοδος κύματος (s).

Ο λόγος που επιλέχθηκε να υπολογιστεί κατά βάση η κυματική ενέργεια κι όχι η κυματική ισχύς, είναι γιατί τα δεδομένα που εξήχθησαν από το επιχειρησιακό σύστημα ΤΡΙΤΩΝ, δεν περιέχουν την περίοδο του κύματος. Παρόλα αυτά βασιζόμενοι σε μελέτη που πραγματοποιήθηκε από το Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο και συγκεκριμένα από τη Σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών, η παραπάνω σχέση υπολογίστηκε θεωρώντας τυπικές τιμές για την περίοδο του κύματος (http://users.ntua.gr/ddeli/GSE/2_GSE_SatAlt.html).

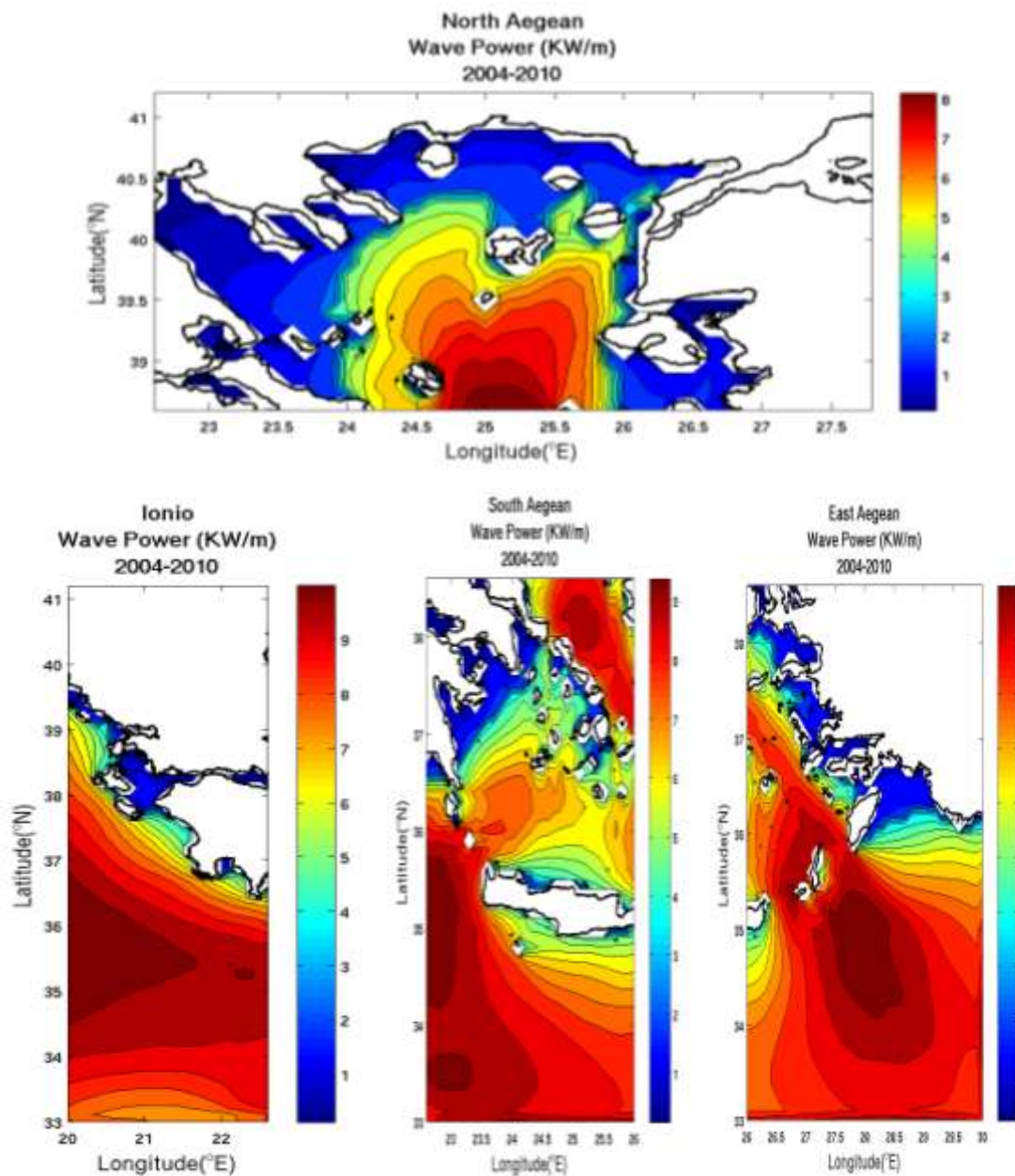
Γνωρίζουμε λοιπόν ότι στον ελλαδικό χώρο για σημαντικά ύψη κυμάτων $H_s > 1\text{m}$, η περίοδος των κυμάτων κυμαίνεται μεταξύ των τιμών $T=6\text{ sec}$ έως $T=10\text{sec}$, ενώ για ύψη κυμάτων $H_s < 1\text{m}$, είναι περίπου $T=4\text{sec}$. Στην παρούσα εργασία υπολογίζεται η μέση κυματική ισχύ ανά μήκος μετώπου κύματος σε κάθε σημείο του πλέγματος και για κάθε υπολεκάνη ξεχωριστά, θεωρώντας ότι η περίοδος είναι $T=4\text{sec}$ για $H_s < 1\text{m}$ και $T=8\text{sec}$ για $H_s > 1\text{m}$.

Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία η μεγαλύτερη κυματική ισχύς εντοπίζεται στα γεωγραφικά πλάτη $30^\circ-60^\circ$ λόγω της επικράτησης των Δυτικών ανέμων. Στην Ευρώπη, μεγάλες τιμές κυματικής ισχύος εντοπίζονται στην Ιρλανδία (375MWh/m), στην Αγγλία ($45-75\text{KW/m}$), στην Γαλλία (Ατλαντικός, 40KW/m), στο Βέλγιο (10KW/m) κι αλλού. Στην Πορτογαλία που έχει τοποθετηθεί και ο κυματικός μετατροπέας Pelamis, οι υψηλότερες τιμές εμφανίζονται στις ΒΔ ακτές και στο αρχιπέλαγος των Αζόρων. Η Ιταλία αν και ενδείκνυται για εκμετάλλευση της κυματικής ενέργειας, λόγω της μεγάλης ακτογραμμής σε σχέση με την ηπειρωτική χώρα, μελέτες έδειξαν ότι η μέση ετήσια κυματική ισχύς δεν ξεπερνά τα 5KW/m . Παρόλα αυτά υπάρχουν περιοχές όπως η Σαρδηνία και η Σικελία όπου η μέση κυματική ισχύς είναι περίπου 10 KW/m .

Από την επεξεργασία των δεδομένων προέκυψε ότι στον ελληνικό χώρο οι υψηλότερες τιμές κυματικής ισχύος ανιχνεύονται στην υπολεκάνη του Ιονίου και στο Ανατολικό Αιγαίο. Εντοπίζονται τρεις ζώνες μεγίστων. Η πρώτη ζώνη περιλαμβάνει το θαλάσσιο τμήμα ΝΔ της Πελοποννήσου και τα στενά μεταξύ Κρήτης-Κυθίων όπου η κυματική ισχύς ξεπερνά τα 8KW/m σε μέση ετήσια βάση (Σχήμα 4-6). Στη δεύτερη ζώνη περιλαμβάνονται τα στενά μεταξύ Κρήτης-Κάσσου και Ρόδου-Καρπάθου, με μέγιστη μέση ισχύ περίπου 10 KW/m . Η τρίτη ζώνη αφορά το θαλάσσιο τμήμα νότια και νοτιοανατολικά του συμπλέγματος των Κυκλάδων καθώς και το στενό μεταξύ Μυκόνου και Κυθίων. Πραγματοποιώντας την κατάλληλη στατιστική επεξεργασία στις χωρικές κατανομές της κυματικής ισχύος ανά μήκος μετώπου κύματος, προέκυψε ότι οι μέσες τιμές για την περίοδο μελέτης σε κάθε υπολεκάνη είναι:

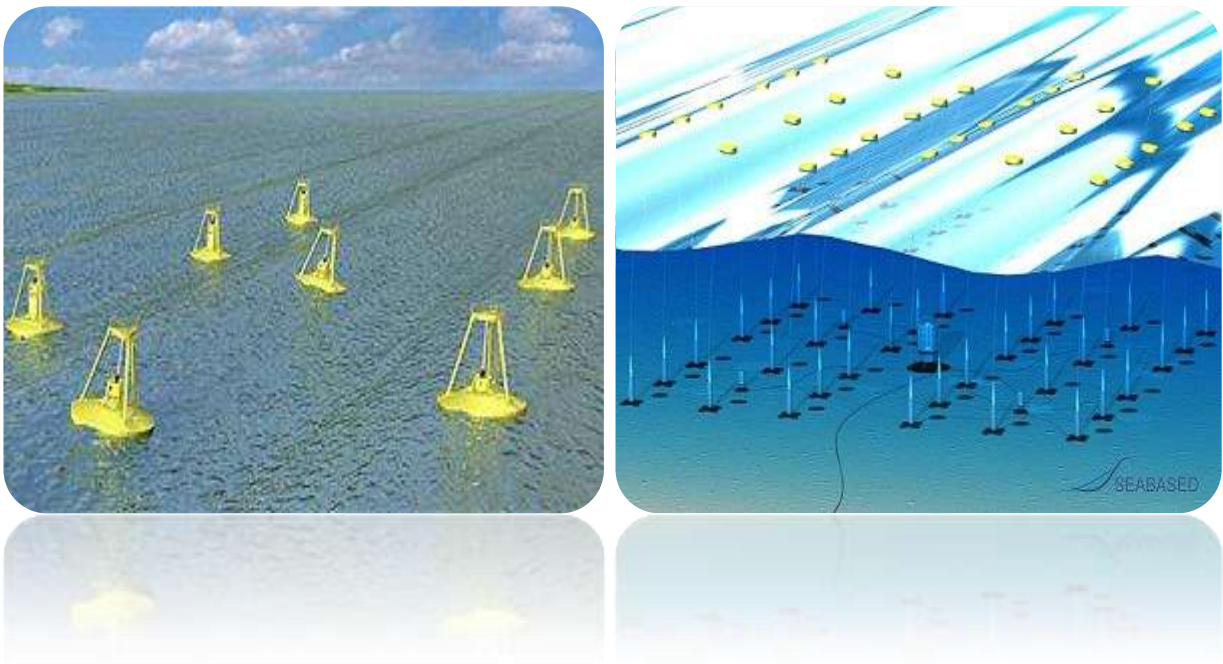
- ❖ Ιόνιο: 8.3 KW/m
- ❖ Ανατολικό Αιγαίο: 7.7 KW/m
- ❖ Νότιο Αιγαίο: 6.8 KW/m
- ❖ Βόρειο Αιγαίο: 2.5 KW/m

Αν και η μέση διαθέσιμη κυματική ισχύς στον ελληνικό χώρο είναι μικρή συγκριτικά με κάποιες Ευρωπαϊκές χώρες, η Ελλάδα θεωρείται ότι διαθέτει το υψηλότερο κυματικό δυναμικό από όλες τις χώρες της Μεσογείου. Επιπλέον, εντοπίζονται θαλάσσιες περιοχές «εστιασμού» κυματικής ενέργειας (hot spots), λόγω φαινομένων ανάκλασης και περίθλασης των κυμάτων. Η εκμετάλλευση της κυματικής ενέργειας θα μπορούσε να συνεισφέρει στην ηλεκτροδότηση πολλών νησιών του Αιγαίου αλλά και μέσω της αφαλάτωσης να προσφέρει πόσιμο νερό.



Σχήμα 4-6: Κυματική ισχύς ανά μήκος μετώπου κύματος (KW/m) για κάθε υπολεκάνη μελέτης.

Η μέση διαθέσιμη κυματική ισχύς είναι φαινομενικά μικρή σε σχέση με την παραγόμενη ισχύ από τις συμβατικές πηγές ενέργειας. Παρόλα αυτά η συνολική ισχύς αυξάνεται αρκετά θεωρώντας μία συστοιχία από κυματικούς μετατροπείς. Η απόδοση κάθε συσκευής εξαρτάται από τον τύπο της τεχνολογίας αλλά σε γενικές γραμμές ανέρχεται στο 20% της διαθέσιμης ισχύος [Defne et al., 2009]. Έτσι στο Ανατολικό Αιγαίο η μέση κυματική ισχύς ανά μέτρο κύματος είναι 7.7KW/m. Θεωρώντας έναν κυματικό μετατροπέα όπως για παράδειγμα έναν σημειακό απορροφητή που έχει απόδοση 20% τότε για ένα κύμα 5m η παραγόμενη ισχύς είναι μόλις 7.7 KW. Σε μία συστοιχία όμως από 20 μετατροπείς η ισχύς ανέρχεται στα 154KW ενώ μία κυματική «φάρμα» θα μπορούσε να παράγει ακόμη περισσότερο. Επιπλέον χρησιμοποιώντας αρκετούς μικρής κλίμακας κυματικούς μετατροπείς αντί για έναν μόνο με παρόμοια απόδοση αποφεύγεται ο κίνδυνος διακοπής της παραγωγής σε περίπτωση τεχνικών προβλημάτων.



Εικόνα 4-1: Συστοιχία σημειακών απορροφητών. OPT's PowerBuoy (αριστερά) και SEABASED (δεξιά)

4.1.2 Χρονική Κατανομή

Προκειμένου να καθοριστεί το κυματικό κλίμα μιας περιοχής και συνεπώς η κυματική ενέργεια, πέραν από τη χωρική κατανομή, σημαντική είναι και η εποχιακή διακύμανση. Η μεταβλητότητα της κυματικής ενέργειας σε ημερήσια, εβδομαδιαία, μηνιαία και εποχιακή βάση είναι ένας πολύ σημαντικός παράγοντας, καθώς μπορεί να επηρεάσει τη βιωσιμότητα των κυματικών μετατροπέων. Περιοχές με μικρότερο αλλά σταθερό ενεργειακό δυναμικό, μπορεί να αποδειχτούν καταλληλότερες ειδικά για τεχνολογίες που λειτουργούν με συγκεκριμένο εύρος μήκους κύματος και περιόδου [Cornett, 2008].

Στη συνέχεια λοιπόν κατασκευάστηκαν οι χρονοσειρές για το σημαντικό ύψος κύματος και την κυματική ενέργεια σε κάθε υπολεκάνη μελέτης. Τα δύο μεγέθη υπολογίστηκαν σε όλα τα σημεία του πλέγματος με χρονικό βήμα τριών ωρών και κατόπιν εξήχθη η μέση τιμή τους για κάθε τρίωρο. Λόγω του μεγάλου όγκου δεδομένων, η απεικόνιση των χρονοσειρών έγινε ανά εβδομάδα με αποτέλεσμα κάποιες τιμές να παραληφθούν. Παρόλα αυτά οι μέγιστες και οι ελάχιστες τιμές που εμφανίζονται σε κάθε περιοχή φαίνονται στον Πίνακα 4-2.

Προκειμένου να γίνουν πιο εμφανής οι εποχιακές διακυμάνσεις του κύματος και της κυματικής ενέργειας κρίθηκε σκόπιμο να εφαρμοστεί σε κάθε υπολεκάνη μελέτης η μέθοδος της αρμονικής ανάλυσης ενώ παράλληλα απεικονίστηκε και η εποχιακή μεταβολή των δύο παραμέτρων για ένα μόνο έτος. Το έτος που επιλέχθηκε είναι το 2010 και αυτό γιατί στις προηγούμενες χρονιές ανιχνεύθηκαν κάποια κενά στα δεδομένα τα οποία όμως καλύφθηκαν μέσω interpolation.

Από τη μελέτη των χρονοσειρών του σημαντικού ύψους κύματος παρατηρείται, όπως ήταν κι αναμενόμενο, ότι ο κυματισμός είναι ένα συνοπτικό φαινόμενο που υπόκειται σε μεγάλες διακυμάνσεις κατά τη διάρκεια του έτους (Σχήμα 4-7). Παρ' όλα αυτά, τόσο το κύμα όσο και η κυματική ενέργεια χαρακτηρίζονται από έναν μικρό σε εύρος αλλά εμφανή εποχιακό κύκλο σε όλες τις υπολεκάνες μελέτης. Επιπλέον, σε όλες τις λεκάνες εκτός από το Ιόνιο είναι εμφανής κι ένας δεύτερος ημι-εποχιακός κύκλος με μικρότερο εύρος τιμών που οφείλεται στην εμφάνιση των Ετησιών την περίοδο του θέρους.

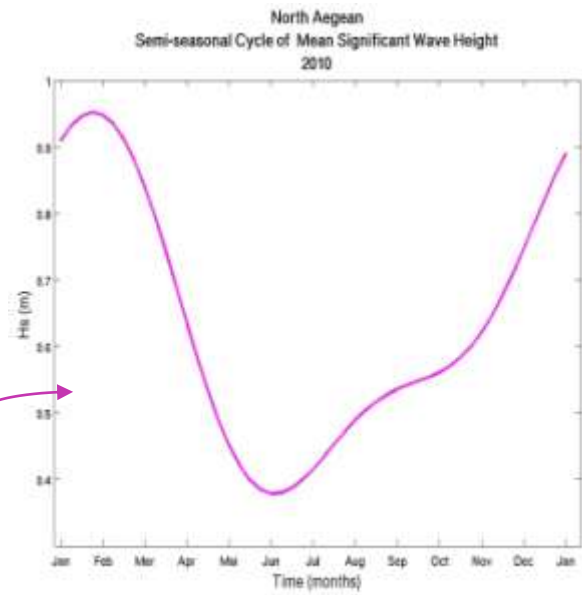
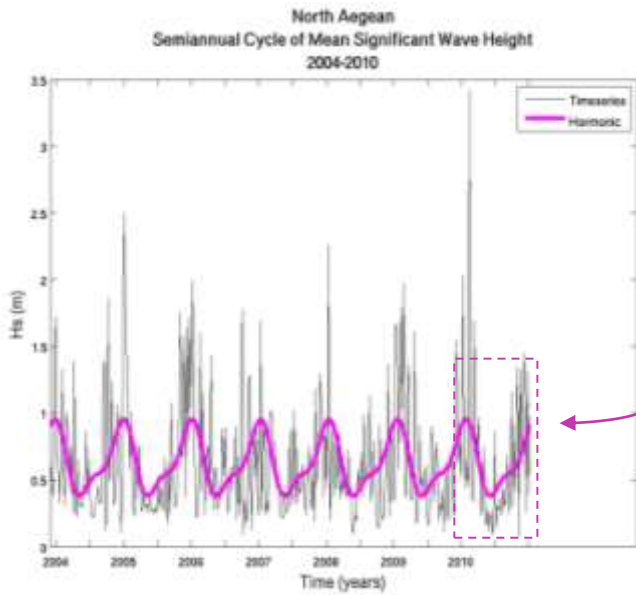
Οι μέγιστες τιμές του σημαντικού ύψους κύματος και της κυματικής ενέργειας καταγράφονται στα μέσα της χειμερινής περιόδου, τον μήνα Φεβρουάριο. Την περίοδο αυτή σημειώνονται και οι μεγαλύτερες εντάσεις του ανέμου. Σύμφωνα με τους Chronopoulou et al.(2010), κατά τη διάρκεια του χειμώνα, η μέση ταχύτητα του ανέμου κυμαίνεται από 1-6m/s με τις μέγιστες τιμές να εμφανίζονται στο κεντρικό Αιγαίο (5.5-6m/s). Ανατολικά και δυτικά του κεντρικού Αιγαίου καθώς και στο βόρειο Αιγαίο η ταχύτητα του ανέμου εμφανίζει μείωση. Στο Ιόνιο παρατηρούνται επίσης μικρές ταχύτητες οι οποίες αυξάνουν και φτάνουν τα 3.5-5m/s στις νότιες ακτές της Πελοποννήσου.

Από τη μελέτη των χρονοσειρών του σημαντικού ύψους κύματος, παρατηρούμε ότι ο άνεμος παίζει καθοριστικό ρόλο στη διαμόρφωση του κυματικού κλίματος μιας περιοχής. Τα μεγαλύτερα ύψη κύματος κατά τη διάρκεια του χειμώνα εμφανίζονται στο Ανατολικό Αιγαίο και στο Ιόνιο και τα μικρότερα στο Βόρειο Αιγαίο. Από τον εποχιακό κύκλο της κυματικής ενέργειας προκύπτει ότι οι μέγιστες τιμές είναι 2.3 KJ/m² και 2.7 KJ/m² στο Ανατολικό Αιγαίο και στο Ιόνιο αντίστοιχα και μόλις 1 KJ/m² στο Βόρειο Αιγαίο όπου επικρατούν ηπιότερες συνθήκες (Πίνακας 4-3).

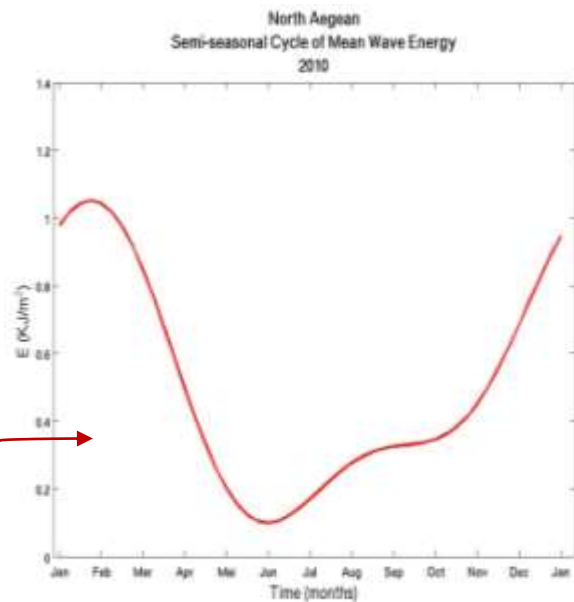
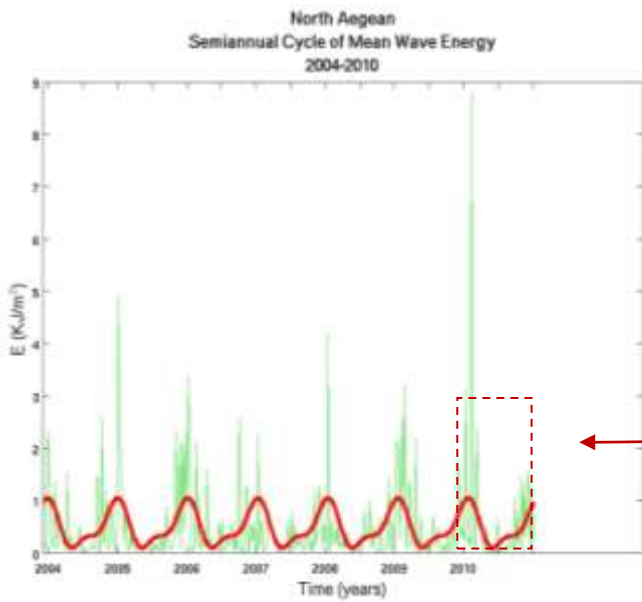
Οι μέγιστες τιμές του κύματος και της ενέργειας που ανιχνεύονται τον χειμώνα ακολουθούνται από ένα έντονο ελάχιστο την περίοδο της άνοιξης. Γενικά η άνοιξη θεωρείται η λιγότερο ανεμογενής εποχή του έτους και συνεπώς παρόμοια μείωση εμφανίζει και το κυματικό πεδίο. Οι τιμές της κυματικής ενέργειας είναι περίπου 0.5 KJ/m^2 σε όλες τις υπολεκάνες μελέτης εκτός από το Βόρειο Αιγαίο που υφίστανται περαιτέρω μείωση.

Τους θερινούς μήνες στο Αιγαίο επικρατούν οι Ετησίες με αποτέλεσμα να παρατηρούνται ιδιαίτερα υψηλές ταχύτητες ανέμου που επάγουν έντονη κυματική δραστηριότητα στην περιοχή. Όπως προαναφέρθηκε οι Ετησίες ξεκινάνε από Βόρειες διευθύνσεις και καθώς κινούνται προς Νότο ενισχύονται στο Βορειοανατολικό τμήμα των Κυκλάδων και φτάνοντας μέχρι και τα στενά των Κυθήρων επηρεάζουν τελικά και τη θαλάσσια περιοχή της Λεβαντίνης. Τόσο το κύμα όσο και η κυματική ενέργεια εμφανίζουν λοιπόν έναν μικρότερο σε εύρος ημι-εποχιακό κύκλο με τις τιμές να αυξάνουν την περίοδο του Ιουλίου και να φτάνουν σ' ένα μέγιστο περίπου προς τα τέλη Αυγούστου αρχές Σεπτεμβρίου (Σχήμα 4-7).

Οι υψηλότερες τιμές της κυματικής ενέργειας την περίοδο του θέρους, εμφανίζονται στο Νότιο και στο Ανατολικό Αιγαίο. Στις περιοχές αυτές επικρατούν και οι μεγαλύτερες εντάσεις ανέμου. Αντίθετα, στο Βόρειο Αιγαίο η κυματική ενέργεια παρουσιάζει μικρότερη αύξηση. Η λεκάνη του Ιονίου δεν επηρεάζεται γενικά από τα Μελτέμια με αποτέλεσμα να απουσιάζει ο ημι-εποχιακός κύκλος και οι τιμές να παραμένουν χαμηλές (Σχήμα 4-7/d). Από τον εποχιακό κύκλο της κυματικής ενέργειας για το Ιόνιο βλέπουμε ότι η μέγιστη τιμή την χειμερινή περίοδο είναι 2.7 KJ/m^2 και το καλοκαίρι περίπου 0.5 KJ/m^2 (Σχήμα 4-7/d₂). Τους φθινοπωρινούς μήνες η κυματική ενέργεια μειώνεται φτάνοντας σ' ένα ελάχιστο περίπου τον Οκτώβρη, σε όλες τις υπολεκάνες εκτός από το Ιόνιο. Παρόλα αυτά η μείωση αυτή είναι μικρότερη από ότι την άνοιξη και γίνεται πιο εμφανείς στο Νότιο και στο Ανατολικό Αιγαίο (Σχήμα 4-7/ b₂,c₂).

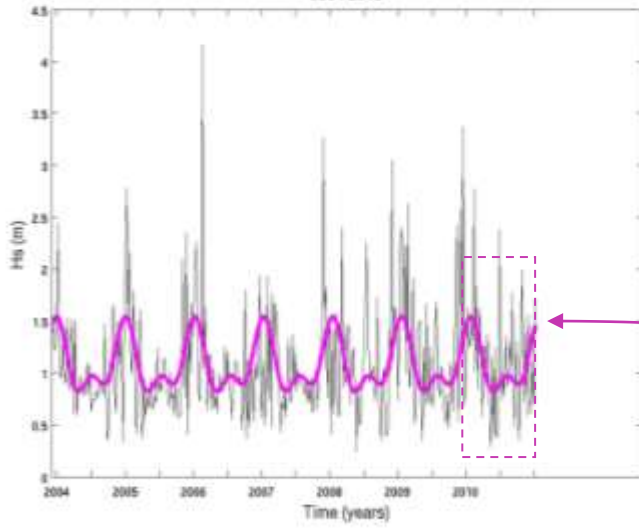


a_1

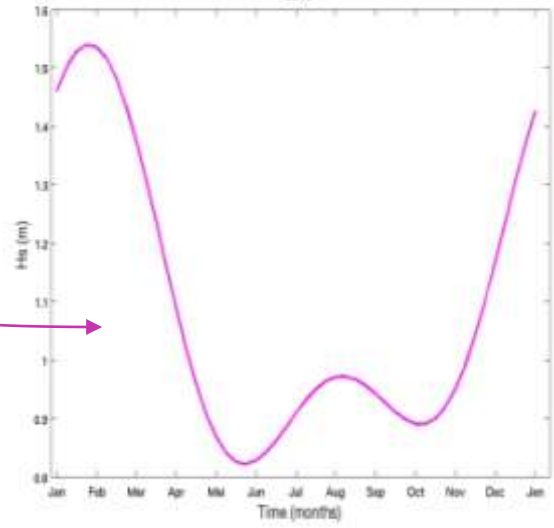


a_2

South Aegean
Semiannual Cycle of Mean Significant Wave Height
2004-2010

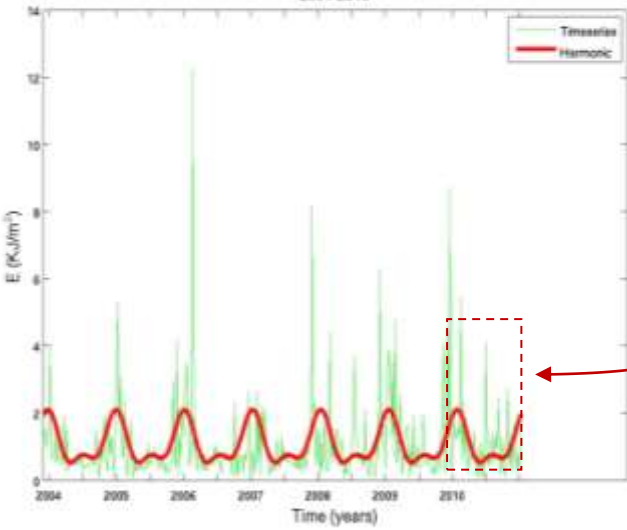


South Aegean
Semi-seasonal Cycle of Mean Significant Wave Height
2010

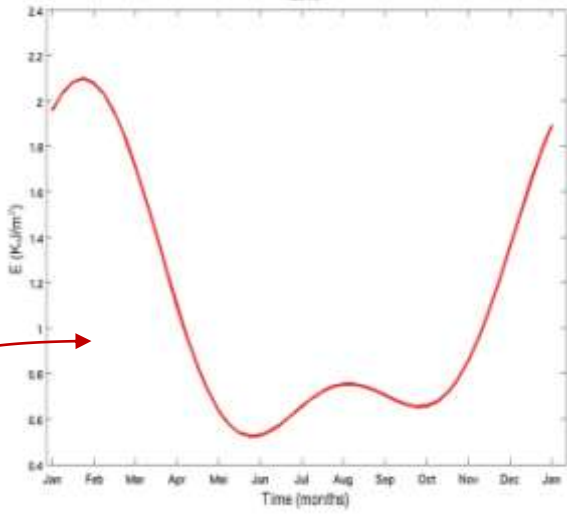


b_1

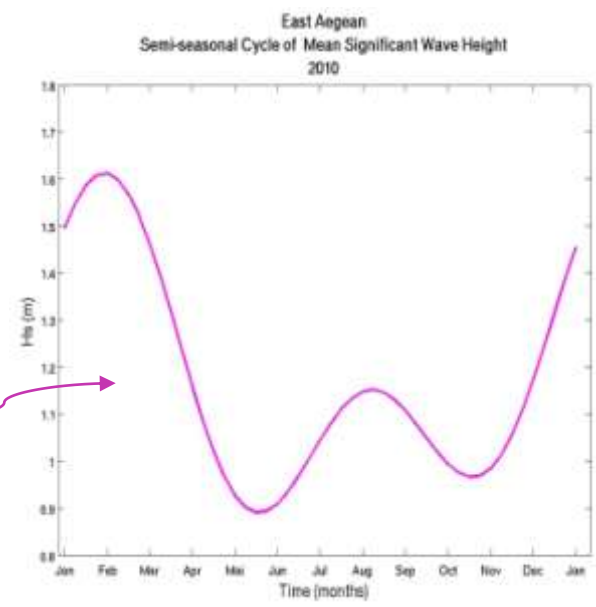
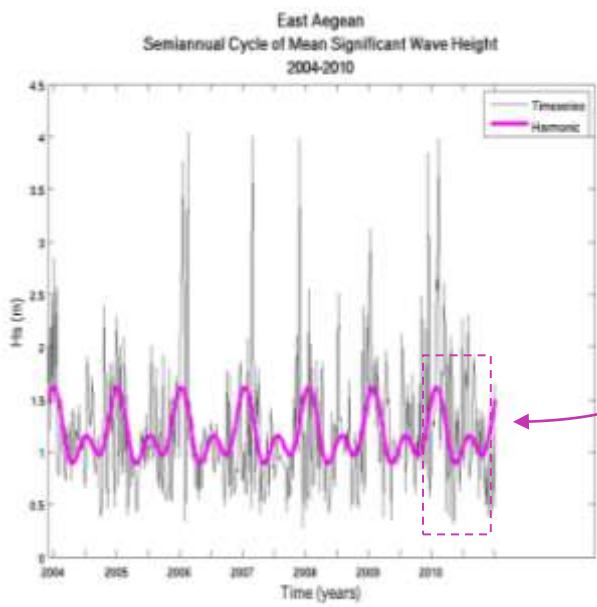
South Aegean
Semiannual Cycle of Mean Wave Energy
2004-2010



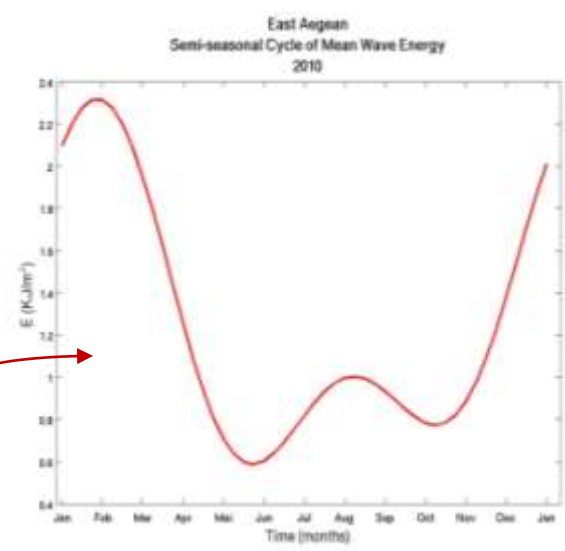
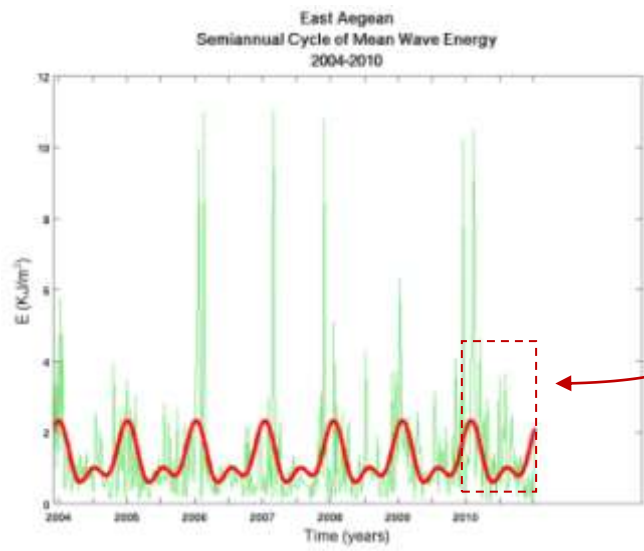
South Aegean
Semi-seasonal Cycle of Mean Wave Energy
2010



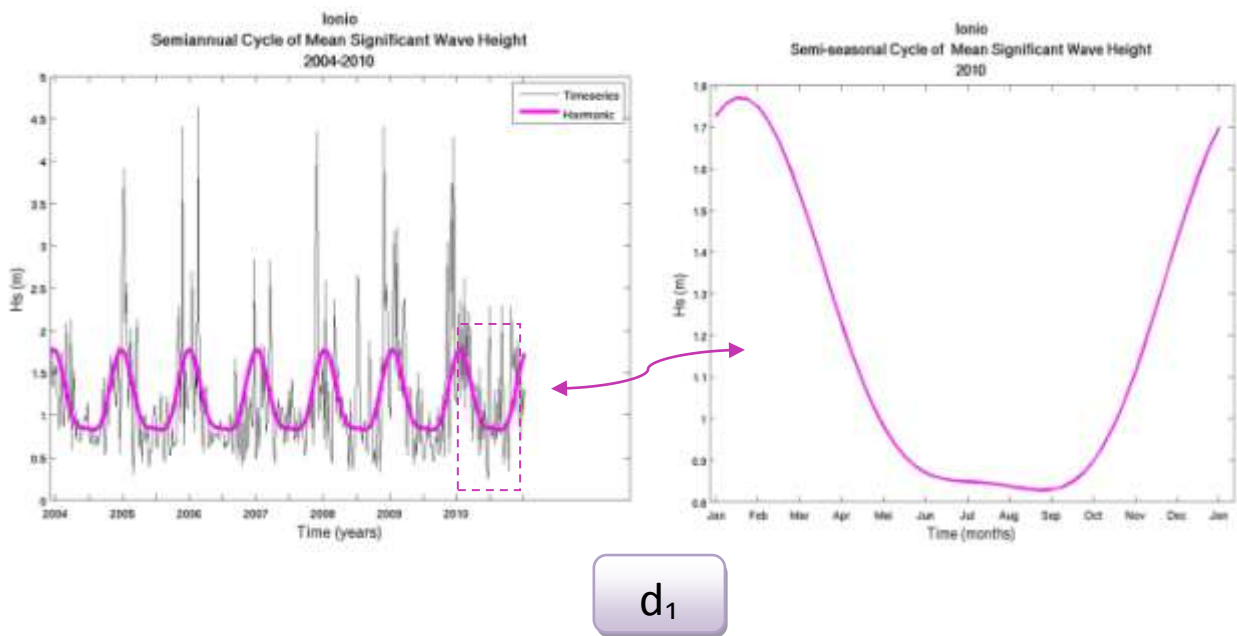
b_2



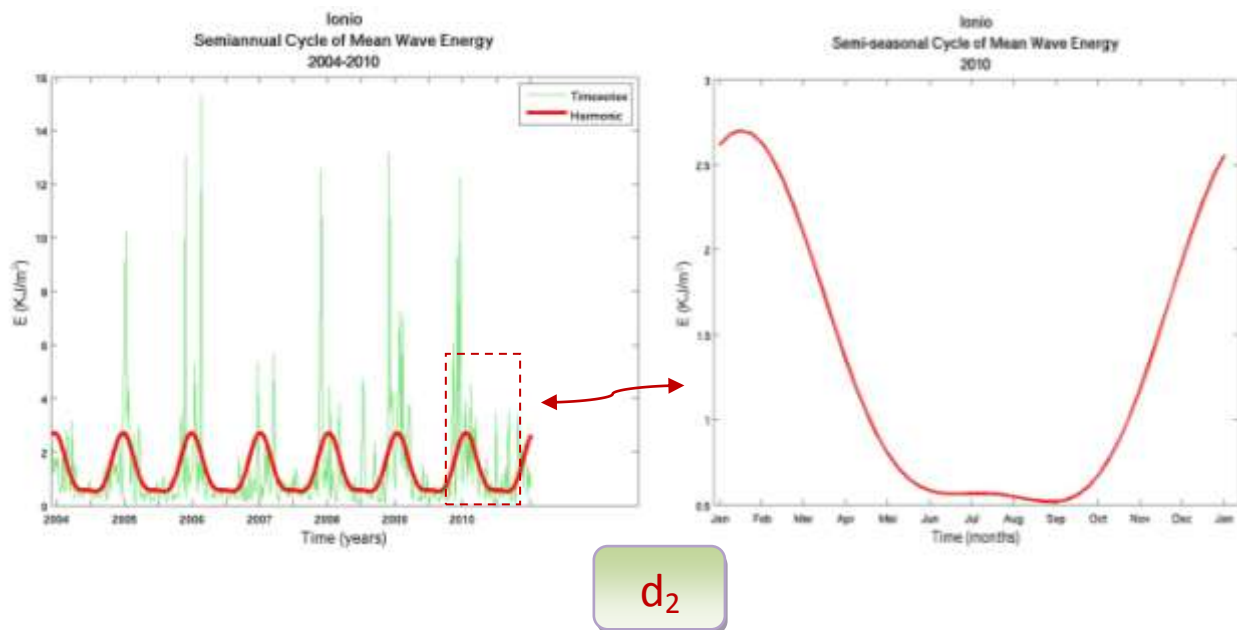
C₁



C₂



d₁



d₂

Σχήμα 4-7: Χρονοσειρές και εποχιακός κύκλος του σημαντικού ύψους κύματος (m) και της κυματικής ενέργειας (KJ/m²) σε κάθε υπολεκάνη για την περίοδο 1/1/2004-31/12/2010.

Στις παραπάνω χρονοσειρές κρίθηκε σκόπιμο η απεικόνιση των δεδομένων να γίνει σε εβδομαδιαία βάση προκειμένου να φανούν καλύτερα οι διακυμάνσεις της κυματικής ενέργειας και του κύματος. Αποτέλεσμα αυτού ήταν να παραληφθούν κάποιες τιμές καθώς τα δεδομένα από το μοντέλο TRITON είναι τρίαωρα. Στους πίνακες 4-2 και 4-3 φαίνονται αναλυτικότερα τα στατιστικά αποτελέσματα που προέκυψαν από την χρονική επεξεργασία των δεδομένων.

Πίνακας 4-2: Στατιστικές παράμετροι χρονοσειρών σημαντικού ύψους κύματος (H_s) και κυματικής ενέργειας (E).

Υπολεκάνες Μελέτης	Παράμετρος (DATA)	Mean	Max	Min	Std	Range
Βόρειο Αιγαίο	H_s (m)	0.63	5.09	0.03	0.49	5.06
	E (KJ/m ²)	0.49	20.73	$6.98 \cdot 10^{-4}$	1.04	20.73
Νότιο Αιγαίο	H_s (m)	1.09	7.12	0.11	0.59	7.01
	E (KJ/m ²)	1.093	34.49	0.01	1.54	34.49
Ανατολικό Αιγαίο	H_s (m)	1.17	7.82	0.17	0.65	7.65
	E (KJ/m ²)	1.23	41.42	0.02	1.84	41.39
Ιόνιο	H_s (m)	1.18	6.67	0.17	0.73	6.49
	E (KJ/m ²)	1.31	30.01	0.02	2.04	29.98

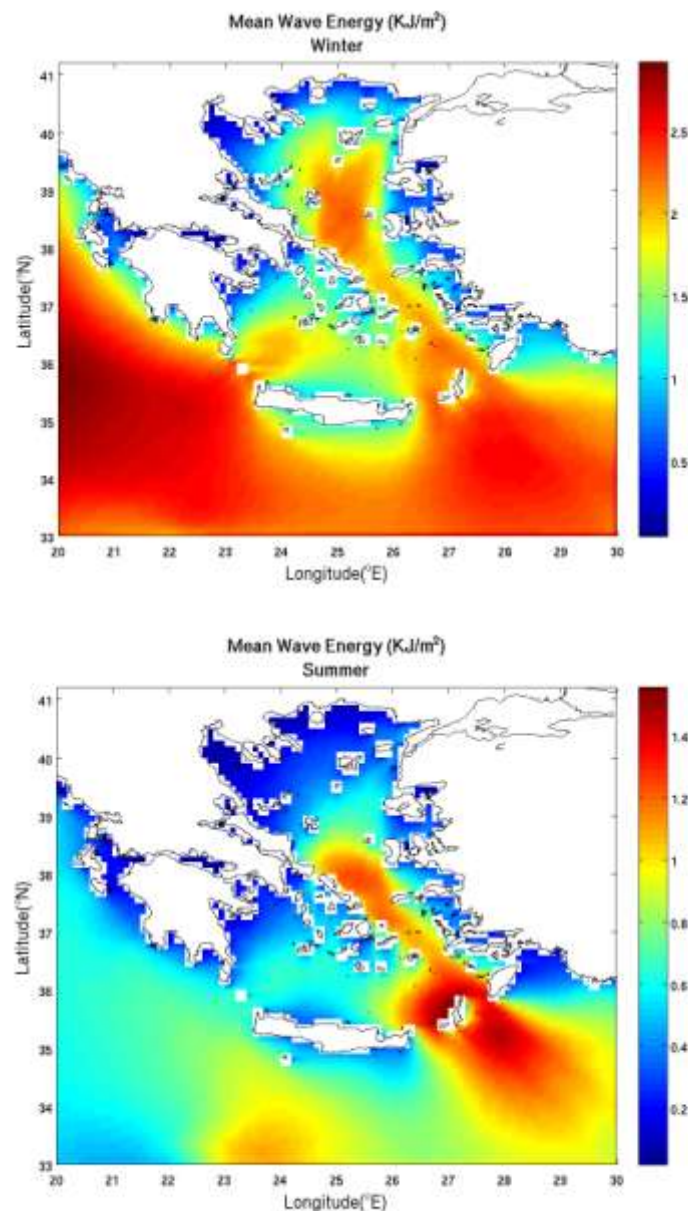
Πίνακας 4-3: Στατιστικές παράμετροι σημαντικού ύψους κύματος (H_s) και κυματικής ενέργειας (E) όπως προέκυψαν ύστερα από αρμονική ανάλυση.

Υπολεκάνες Μελέτης	Παράμετρος (HARMONIC)	Mean	Max	Min	Std	Range
Βόρειο Αιγαίο	H_s (m)	0.63	0.95	0.38	0.19	0.57
	E (KJ/m ²)	0.49	1.05	0.09	0.31	0.95
Νότιο Αιγαίο	H_s (m)	1.09	1.54	0.82	0.24	0.72
	E (KJ/m ²)	1.09	2.09	0.52	0.53	1.58
Ανατολικό Αιγαίο	H_s (m)	1.17	1.61	0.89	0.22	0.72
	E (KJ/m ²)	1.23	2.32	0.59	0.56	1.73
Ιόνιο	H_s (m)	1.18	1.77	0.83	0.34	0.94
	E (KJ/m ²)	1.31	2.69	0.52	0.79	2.18

Προκειμένου να γίνουν πιο εμφανείς οι εποχιακές διακυμάνσεις του σημαντικού ύψους κύματος και της κυματικής ενέργειας για το σύνολο των ελληνικών θαλασσών, κρίθηκε σκόπιμο να κατασκευαστούν οι εποχιακοί χάρτες για την ψυχρή και για τη θερμή περίοδο του έτους (Σχήμα 4-8). Για την κατασκευή τους, υπολογίστηκε αρχικά η κυματική ενέργεια σε κάθε σημείο του πλέγματος, για την καλοκαιρινή και τη χειμερινή περίοδο μελέτης. Κατόπιν, εξήχθη η μέση τιμή της κυματικής ενέργειας για τα 7 χρόνια μελέτης και για κάθε εποχή ξεχωριστά.

Η μέγιστη τιμή της κυματικής ενέργειας κατά τους χειμερινούς μήνες για όλη την περίοδο μελέτης είναι περίπου 3 KJ/m^2 και οι περιοχές εμφάνισης των μέγιστων περιλαμβάνουν κυρίως το νοτιοανατολικό και νοτιοδυτικό τμήμα της λεκάνης. Στις περιοχές αυτές το αιολικό πεδίο εμφανίζεται αυξημένο ενώ το μεγάλο fetch καθιστά δυνατή τη δημιουργία swell με αποτέλεσμα την περαιτέρω αύξηση του κύματος.

Τους θερινούς μήνες η εμφάνιση των Ετησιών διαφοροποιεί τη χωρική κατανομή του κύματος και της μέσης κυματικής ενέργειας. Η επιτάχυνση που υφίσταται η ροή του ανέμου στο ανατολικό τμήμα του κυκλαδίτικου συμπλέγματος, συντελεί στην αύξηση της κυματικής ενέργειας στην περιοχή, που μεγιστοποιείται στα στενά μεταξύ Κρήτης-Κάσσου και Ρόδου Καρπάθου και στο ΝΑ τμήμα τους. Υψηλές τιμές ενέργειας εμφανίζονται και νότια της Κρήτης ενώ στο υπόλοιπο τμήμα του ελληνικού χώρου οι τιμές παραμένουν σε χαμηλά επίπεδα.



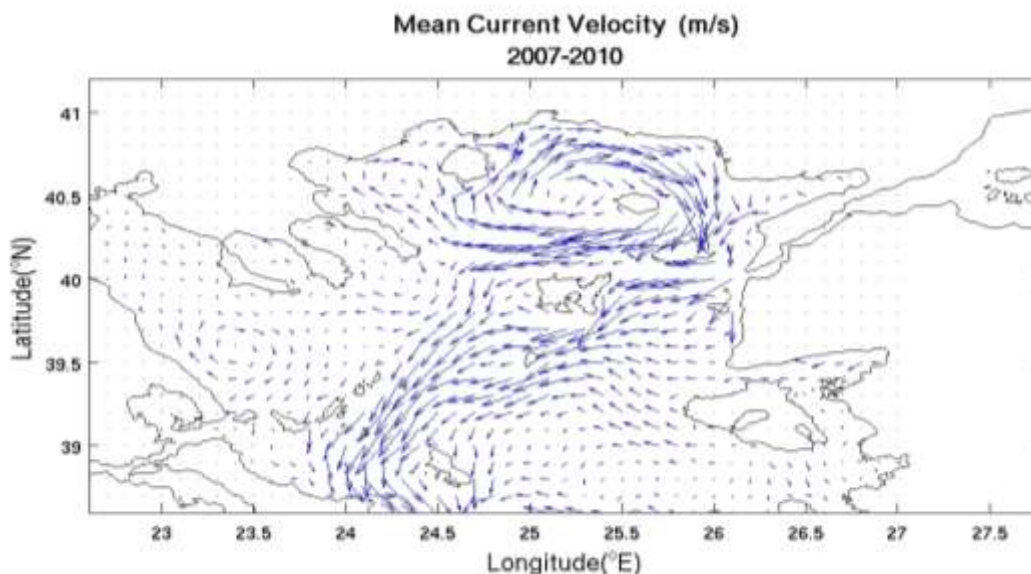
Σχήμα 4-8: Χωρικές κατανομές της μέσης κυματικής ενέργειας (KJ/m^2) για την ψυχρή (πάνω) και θερμή (κάτω) περίοδο του έτους.

4.2 Κυκλοφορία και ισχύς θαλασσίων ρευμάτων

4.2.1 Χωρική Κατανομή

Η γενική κυκλοφορία στο Αιγαίο χαρακτηρίζεται από σχηματισμούς διαφορών κλιμάκων. Περιλαμβάνει κυκλωνικές δομές κλίμακας λεκάνης, πολλαπλές δίνες κλίμακας υπολεκάνης καθώς και αρκετά μεταβατικά eddies. Στο βορειότερο τμήμα του Αιγαίου κυρίαρχο ρόλο διαδραματίζουν τα γλυκά και χαμηλής θερμοκρασίας ύδατα της Μαύρης θάλασσας (BSW). Το Βορειοδυτικό τμήμα επηρεάζεται επιπλέον από την απορροή μεγάλων ποταμών στο Θερμαϊκό Κόλπο. Ένα μεγάλο τμήμα του ανατολικού Αιγαίου καταλαμβάνεται από τα υψηλής θερμοκρασίας και αλατότητας Λεβαντινά νερά, τα οποία εισέρχονται στην περιοχή από τα ανατολικά στενά όπου και συναντάται ο ένας κλάδος του ρεύματος της Μικράς Ασίας (Asia Minor current) [Nittis & Perivoliotis, 2002]. Η παρουσία θαλασσίων μαζών με τόσο διαφορετικά χαρακτηριστικά, σε συνδυασμό με την περιπλοκή τοπογραφία και την εποχικότητα της ατμοσφαιρικής δράσης, δημιουργούν μία περίπλοκη κυκλοφορία στην ευρύτερη περιοχή του Αιγαίου, με εποχιακή μεταβλητότητα.

Η κυκλοφορία των υδάτων στο Βόρειο Αιγαίο επηρεάζεται από το ανεμολογικό πεδίο και από την εισροή υδάτων χαμηλής αλατότητας από τη Μαύρη Θάλασσα μέσω του στενού των Δαρδανελλίων. Η Μαύρη θάλασσα αποτελεί μία δεξαμενή νερών χαμηλής αλατότητας και θερμοκρασίας καθώς δέχεται γλυκά νερά από πολλούς ποταμούς της Ρωσίας και της Βόρειας Ευρώπης. Η κύρια μάζα των νερών της Μαύρης Θάλασσας (Black Sea Waters, BSW) μετά την είσοδό της στο Αιγαίο, διακλαδίζεται σε δύο ρεύματα (Σχήμα 4-9). Το ένα κατευθύνεται προς τα ΒΔ και διερχόμενο ανάμεσα στην Λήμνο και στην Ίμβρο κινείται προς τη Θράκη. Το δεύτερο ρεύμα κατευθύνεται προς τα ΝΔ, διερχόμενο ΝΔ της Λήμνου και ακολουθώντας το ρεύμα της Εύβοιας, φτάνει μέχρι το Νότιο Αιγαίο [Nittis & Perivoliotis, 2002].



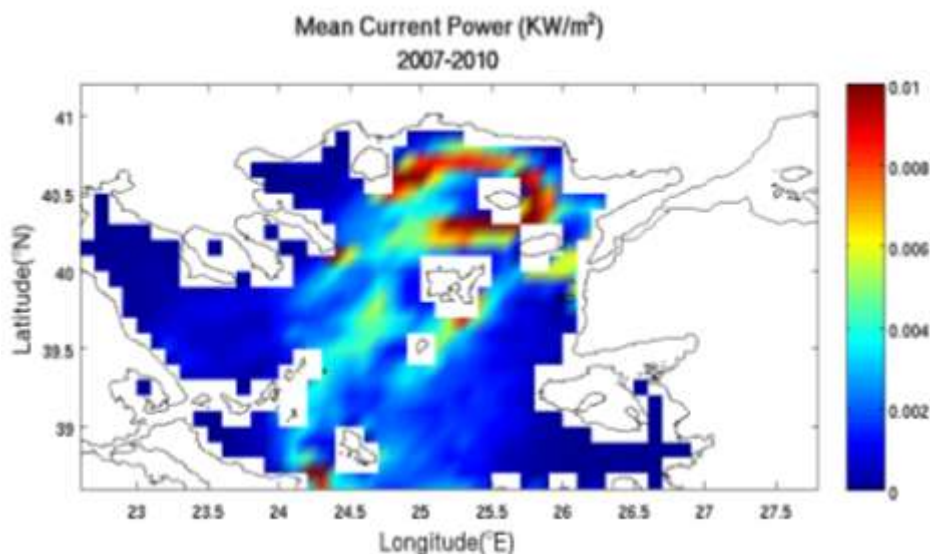
Σχήμα 4-9: Πεδίο μέσων ταχυτήτων στο επιφανειακό στρώμα των 10m για την περίοδο 2/3/2007 έως 30/4/2010.

Ο κλάδος των BSW που κινείται προς Βορρά συμβάλλει στην ενίσχυση του αντικυκλώνα της Σαμοθράκης που εκτείνεται βορειοανατολικά περικλείοντας την νήσο της Σαμοθράκης. Στην περιοχή αυτή η ταχύτητα του ρεύματος αυξάνει με αποτέλεσμα να παρουσιάζεται και μεγάλη ισχύς ρεύματος με τιμές που φτάνουν τα 0.01 KW/m^2 (Σχήμα 4-10). Ένας μικρότερος αντικυκλώνας παρατηρείται και στις δυτικές ακτές της Θάσου αλλά και στον Θερμαϊκό Κόλπο με μικρές όμως τιμές ενέργειας.

Οι πιο ενεργοί σχηματισμοί στην περιοχή του Βορείου Αιγαίου, θεωρούνται τα μέσης κλίμακας κυκλωνικά και αντικυκλωνικά eddies που μπορούν να εκτείνονται σε αρκετές ακτίνες Rossby ($\sim O(10\text{Km})$). Κάποιες από αυτές τις δομές φαίνονται να είναι μόνιμες ενώ άλλες παρουσιάζουν μεταβατικό χαρακτήρα. Αν και η χωρική και χρονική μεταβλητότητα που τις χαρακτηρίζει, δεν έχει κατανοηθεί πλήρως, η δημιουργία τους και οι χωροχρονικές διακυμάνσεις που παρουσιάζουν, φαίνεται να εμπλέκεται με το θερμοαλατικό μέτωπο, το πεδίο του ανέμου και την αλληλεπίδραση αυτών των δομών με την περίπλοκη τοπογραφία [Tzali et al., 2010].

Μεγάλη ισχύς ρεύματος παρουσιάζεται και στο ΝΑ άκρο της Χαλκιδικής (Όρος Άθως) λόγω της ύπαρξης ενός μικρότερου σε έκταση αντικυκλωνικού σχηματισμού. Οι τιμές της ισχύος κυμαίνονται από 0.006 KW/m^2 έως 0.01 KW/m^2 . Η περιοχή αυτή επηρεάζεται από τη δυτική ροή των BSW αλλά κι από αρκετά μεταβατικά eddies. Ο σχηματισμός τους συνδέεται με το θερμοαλατικό μέτωπο που δημιουργείται από την είσοδο των γλυκών και κρύων BSW, σ' ένα θερμότερο και υψηλότερης αλατότητας περιβάλλον [Nittis & Perivoliotis, 2002].

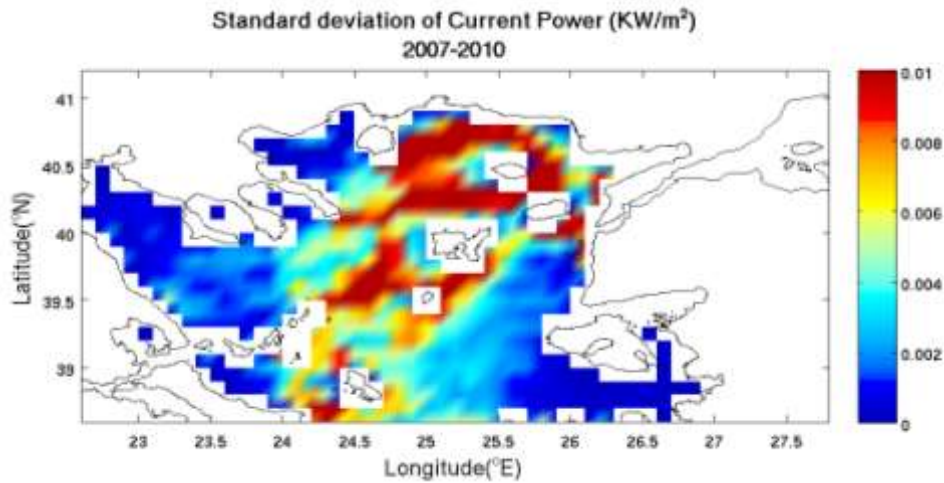
Καθώς τα εισερχόμενα ύδατα από την Μαύρη Θάλασσα κινούνται προς τα ΝΔ, παρατηρείται μία έντονη ροή ανάμεσα στις Βόρειες Σποράδες και στη Σκύρο που καταλήγει στις ακτές της Εύβοιας σχηματίζοντας το Enoia coastal jet (Σχήμα 4-9). Το ρεύμα αυτό μεταφέρει το τροποποιημένο BSW στο νοτιοδυτικό τμήμα του Αιγαίου. Στη συνέχεια αυτή η τροποποιημένη υδάτινη μάζα απορρέει στο Ιόνιο Πέλαγος μέσω του στενού Κρήτης-Πελοποννήσου.



Σχήμα 4-10: Χωρική κατανομή της μέσης τιμής της ισχύος του ρεύματος στο Βόρειο Αιγαίο.

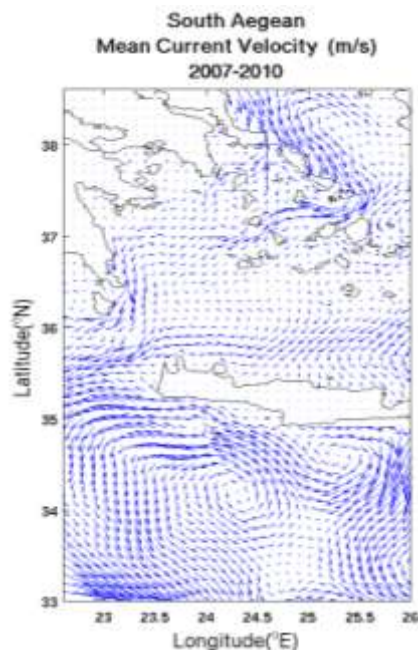
Η γενικότερη κυκλοφορία στο Βόρειο Αιγαίο Πέλαγος είναι αρκετά περίπλοκη και εμφανίζει έντονη εποχιακή μεταβλητότητα καθώς εξαρτάται από την εισροή των BSW. Από τη μελέτη της τυπικής απόκλισης της μέσης ισχύς ρεύματος για την περίοδο μελέτης (Σχήμα 4-11), προέκυψε

ότι η κυκλοφορία εμφανίζει έντονες διακυμάνσεις, κυρίως στις περιοχές που επηρεάζονται ιδιαίτερα από την εισροή των νερών από τη Μαύρη Θάλασσα. Οι περιοχές αυτές περιλαμβάνουν το θαλάσσιο τμήμα Βόρεια και Δυτικά της Σαμοθράκης, το ΝΔ τμήμα της Λήμνου μέχρι και τις Σποράδες καθώς και τις Νότιες ακτές της Εύβοιας.



Σχήμα 4-11: Τοπική απόκλιση της μέσης ισχύος ρεύματος για την περίοδο μελέτης.

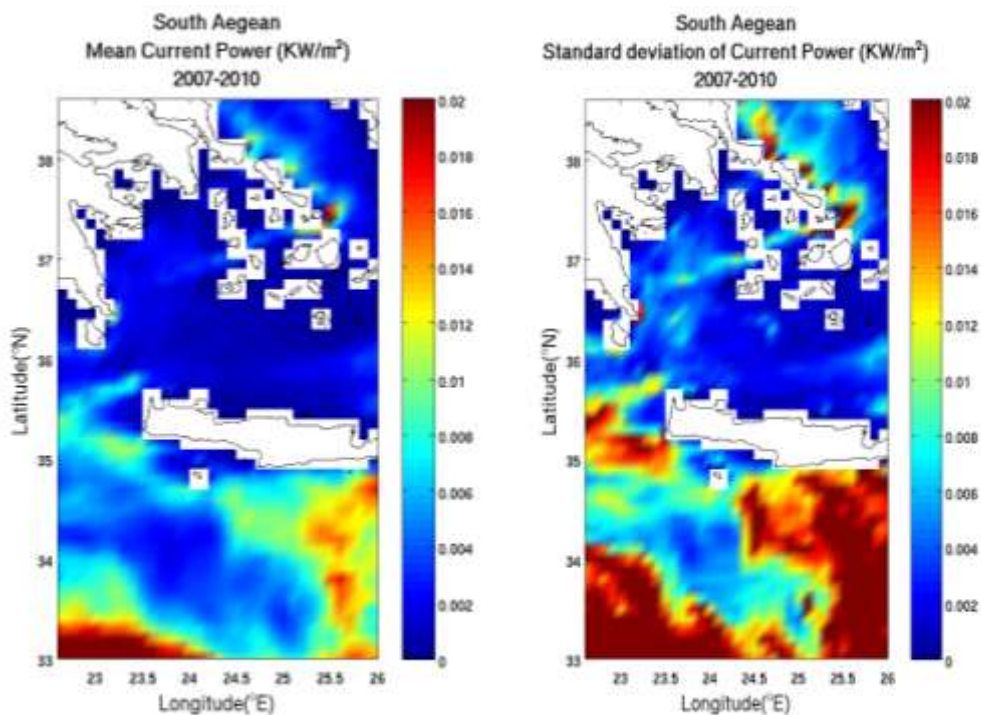
Η επόμενη υπολεκάνη μελέτης είναι το Νότιο Αιγαίο Πέλαγος που ορίζεται από τις συντεταγμένες 22.6°E - 26°E & 33°N - 38.6°N. Στην περιοχή αυτή επικρατούν μεγαλύτερες ταχύτητες ρεύματος σε μέση ετήσια βάση, συγκριτικά με το Βόρειο Αιγαίο. Ξεκινώντας από το Βορειοανατολικό τμήμα του Νοτίου Αιγαίου (Σχήμα 4-12), παρατηρούμε ένα ιδιαίτερα έντονο ρεύμα στο ΝΑ τμήμα της Εύβοιας γνωστό ως Ενοία coastal jet. Στο σημείο αυτό η ροή ενισχύεται από τον κυκλώνα της Χίου. Ο κυκλώνας της Χίου αποτελεί την πιο έντονη δομή στο κεντρικό Αιγαίο. Η ανατολική του πλευρά περιλαμβάνει τα νερά της Ανατολικής Μεσογείου που εισέρχονται στο Αιγαίο ενώ δυτικά συνορεύει με το ρεύμα της Εύβοιας [Olson et al., 2007].



Σχήμα 4-12: Κυκλοφορία στο Νότιο Αιγαίο για το επιφανειακό στρώμα των 10m.

Στη συνέχεια το ρεύμα κινείται κατά μήκος το δυτικών ακτών της Άνδρου και της Τήνου με αυξημένη ισχύ και περνώντας μέσα από το σύμπλεγμα των Κυκλάδων καταλήγει στο Μυρτώο Πέλαγος. Μεγάλη ισχύς ρεύματος ανιχνεύεται κυρίως στα ανατολικά παράλια της Μυκόνου με τις τιμές να κυμαίνονται από 0.012-0.02 KW/m² (Σχήμα 4-13). Έντονη είναι και η κυκλοφορία στα στενά μεταξύ Κρήτης και Κυθήρων. Η μεγαλύτερη ισχύς ρεύματος εντοπίζεται στο Νότιο τμήμα της Κρήτης το οποίο περιλαμβάνει αρκετούς σχηματισμούς. Οι πιο έντονοι είναι ο κυκλώνας της Κρήτης και ο αντικυκλώνας της Ιεράπετρας. Σύμφωνα με τους Hamad et al. (2006), ο αντικυκλώνας της Ιεράπετρας εντοπίζεται στο νοτιοανατολικό τμήμα της Κρήτης, έχει διάμετρο 100-150 km και βάθος πάνω από 1500m. Θεωρείται ότι η δημιουργία του οφείλεται στον στροβιλισμό που υπόκεινται οι Ετησίες λόγω της Κρητικής ορογραφίας και στην κυματική σκίαση από την Κρήτη. Χαρακτηρίζεται από ένα ιδιαίτερα ισχυρό επιφανειακό σήμα, δεν έχει σταθερή θέση και μέγεθος και το βάθος του ξεπερνά τα 1500m [Theocharis et al., 1999].

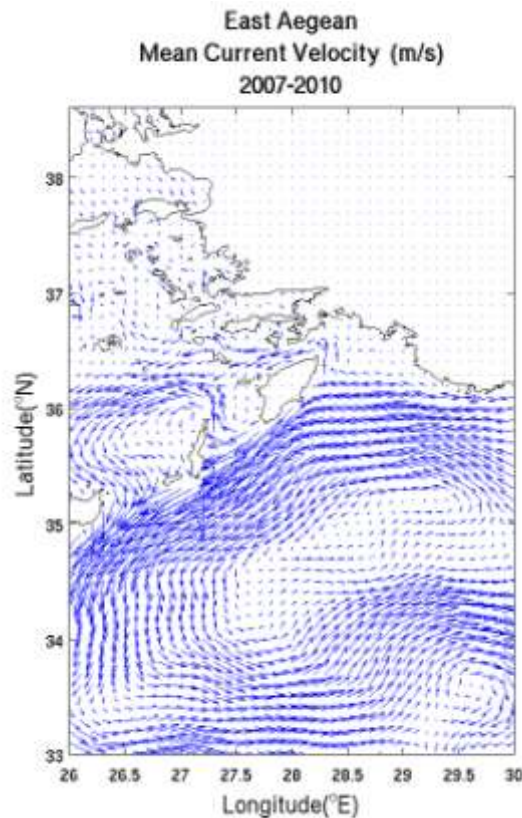
Στο νοτιότερο τμήμα της υπό μελέτη λεκάνης η ισχύς του ρεύματος μεγιστοποιείται με τιμές που κυμαίνονται από 0.01 KW/m² έως 0.02 KW/m². Στο τμήμα αυτό εντοπίζεται ένα κομμάτι του North African Current (NAC) με νοτιοανατολική ροή. Το σήμα αυτό είναι τόσο ισχυρό που υπερκαλύπτει τις υπόλοιπες δομές. Από τη μελέτη της τυπικής απόκλισης της ισχύς των θαλασσιών ρευμάτων για την περιοχή του Νοτίου Αιγαίου προκύπτει ότι οι μεγαλύτερες διακυμάνσεις εμφανίζονται στο Λιβυκό Πέλαγος, Νοτιοανατολικά και Νοτιοδυτικά της Κρήτης, καθώς και στο Βορειοδυτικό τμήμα της λεκάνης που κυριαρχεί το Ρεύμα της Εύβοιας. Η μέση τιμή της ταχύτητας των ρευμάτων στην περιοχή για όλη την περίοδο μελέτης είναι 0.14m/s αντιστοιχώντας σε ισχύ 0.01 KW/m² (Πίνακας 4-4).



Σχήμα 4-13: Χωρική κατανομή της μέσης ισχύος κύματος και της αντίστοιχης τυπικής απόκλισης.

Η επόμενη υπολεκάνη μελέτης είναι το Ανατολικό Αιγαίο που επιλέχθηκε ως η θαλάσσια περιοχή που ορίζεται από τις συντεταγμένες 26°E – 30°E & 33°N – 38.6°N. Περιλαμβάνει τόσο το Καρπάθιο Πέλαγος όσο και το δυτικό τμήμα της λεκάνης της Λεβαντίνης. Ο πιο έντονος

σηματισμός που ανιχνεύεται στην περιοχή και καταλαμβάνει σχεδόν όλο το νότιο τμήμα της, είναι ο Κυκλώνας της Ρόδου (Σχήμα 4-14) στον οποίο δημιουργούνται τα Ενδιάμεσα Νερά της Λεβαντίνης (LIW). Κατά τη διάρκεια του χειμώνα, η ψύξη του επιφανειακού στρώματος, αυξάνει την πυκνότητα του νερού και σε συνδυασμό με τον κατάλληλο στροβιλισμό του ανέμου, η θαλάσσια μάζα βυθίζεται σε μεγάλα βάθη, παράγοντας έτσι τα LIW. Τα LIW χαρακτηρίζονται από υψηλές τιμές αλατότητας και το βάθος τους αυξάνει καθώς κινούνται δυτικά, από 200-400 m στην Ανατολική Μεσόγειο σε 300-700 m στη Δυτική.

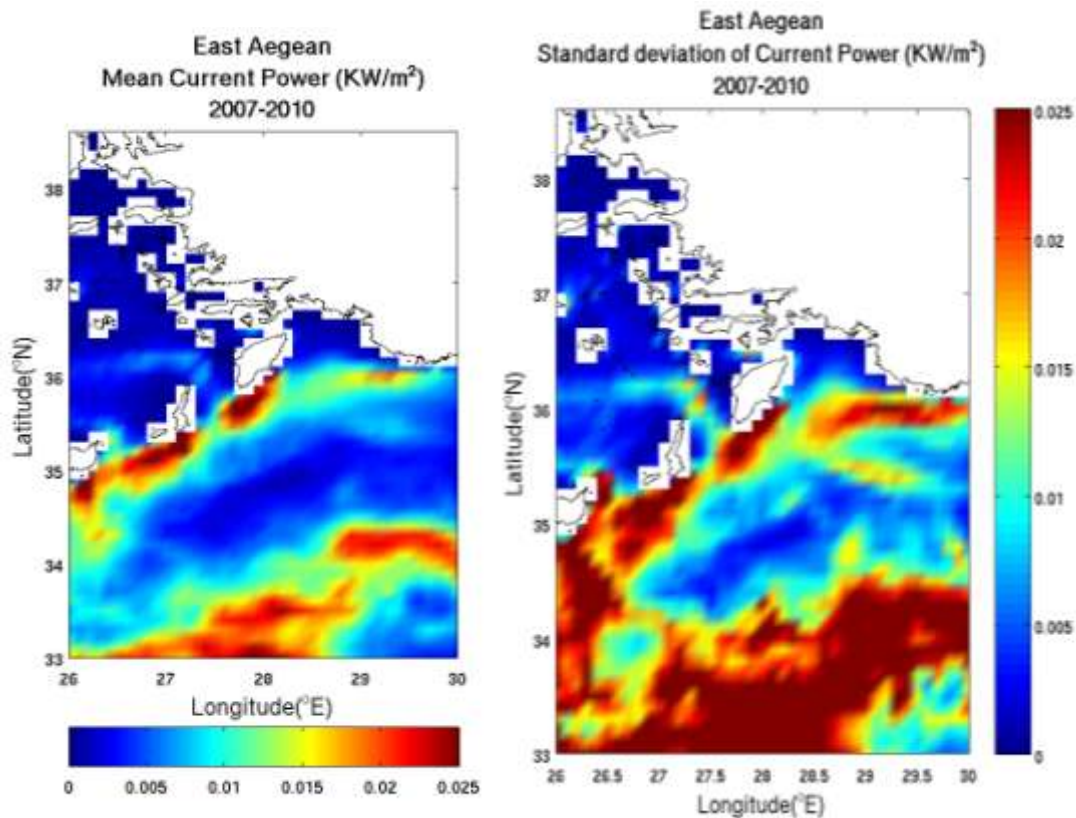


Σχήμα 4-14: Μέση επιφανειακή κυκλοφορία στο Ανατολικό Αιγαίο για την περίοδο μελέτης.

Σύμφωνα με τους Theocharis et al. (1999), ο κυκλώνας της Ρόδου εκτείνεται δυτικά μέχρι τις ΝΑ ακτές της Κρήτης κατά τη διάρκεια του χειμώνα και περιορίζεται ανατολικότερα τους θερινούς μήνες. Στο βόρειο και δυτικό του τμήμα συνορεύει με το Ρεύμα της Μικράς Ασίας (AMC) ένα μέρος του οποίου εισέρχεται στο νοτιοανατολικό Αιγαίο μέσω των στενών του Κρητικού τόξου, μεταφέροντας έτσι τα θερμά και αλμυρά ύδατα της Λεβαντίνης στο Αιγαίο Πέλαγος. Κατά μήκος του Βόρειου και Δυτικού τμήματος του Κυκλώνα της Ρόδου, η μέση ισχύς του ρεύματος αυξάνεται (Σχήμα 4-15) με τιμές που κυμαίνονται από 0.01-0.025 KW/m².

Μεγάλη ισχύς ρεύματος ανιχνεύεται και στο νοτιοδυτικό τμήμα του Ανατολικού Αιγαίου κυρίως στη θαλάσσια περιοχή που καταλαμβάνεται από το Mid-Mediterranean Jet (MMJ). Το MMJ είναι ένα ανατολικό ρεύμα που μεταφέρει τα MAW κατά μήκος του Κρητικού τόξου και θεωρείται ως συνέχεια του North African Current ή του AIS. Ένα μέρος του κινείται δεξιόστροφα και τροφοδοτεί σχηματισμούς όπως ο Mersa-Matruh και ο Shikmona και το άλλο κινείται αριστερόστροφα δυτικά της Κύπρου σχηματίζοντας τον κυκλώνα της Ρόδου και το West Cyprus gyre πριν συνδεθεί με το Asia Minor Current (AMC). Στην περιοχή του Mersa-Matruh η ισχύς των ρευμάτων μειώνεται με τιμές που δεν ξεπερνάνε τα 0.015 KW/m².

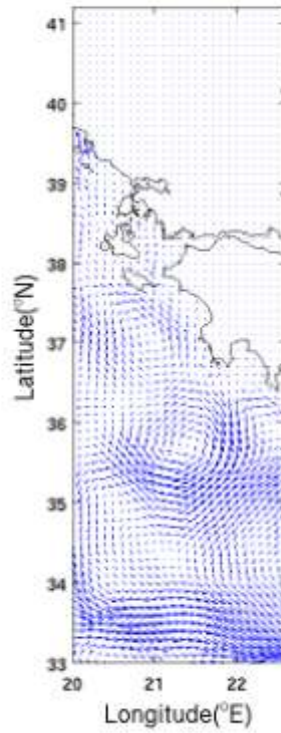
Στο κεντρικό τμήμα της υπολεκανής μελέτης, βορειοανατολικά της Καρπάθου, εντοπίζεται άλλος ένας σχηματισμός με μικρότερη όμως ισχύ. Ένα γενικό συμπέρασμα, που μπορεί να εξαχθεί από τη μελέτη της τυπικής απόκλισης (Σχήμα 4-15), για την ευρύτερη περιοχή του Ανατολικού Αιγαίου, είναι ότι η ισχύς ρεύματος των διαφόρων σχηματισμών υπόκειται σε σημαντικές διακυμάνσεις. Η μέση ταχύτητα των ρευμάτων στην υπολεκανή μελέτης είναι 0.17m/s αντιστοιχώντας σε ισχύ 0.008 KW/m² και η μέγιστη 1.11m/s με αντίστοιχη ισχύ 0.7 KW/m² (Πίνακας 4-4).



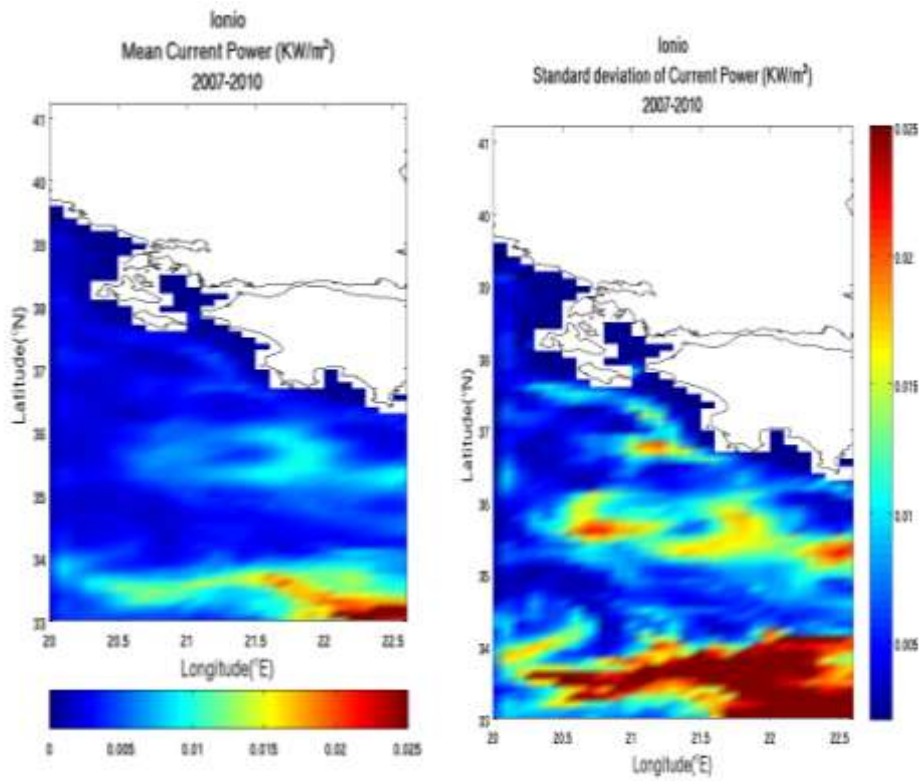
Σχήμα 4-15: Μέση ισχύς ρεύματος (αριστερά) και τυπική απόκλιση (δεξιά) για τα τρία χρόνια μελέτης στο Ανατολικό Αιγαίο.

Το Ιόνιο Πέλαγος καλύπτει την περιοχή 20°E - 22.6°E & 33°N - 41.2°N και κυριαρχείται από έναν σημαντικό, μόνιμο σχηματισμό κλίμακας υπολεκανής, τον Πέλοπα (Σχήμα 4-16). Ο Πέλοπας αποτελεί έναν από τους ισχυρότερους σχηματισμούς στην ευρύτερη περιοχή της Ανατολικής Μεσογείου. Δεν έχει σταθερό σχήμα και διαστάσεις και ενισχύεται υποεπιφανειακά και στα ενδιάμεσα στρώματα με αποτέλεσμα το σήμα του να παραμένει ισχυρό ακόμα και σε βάθη μεγαλύτερα από 2000m [Theocharis et al.,1999]. Η ισχύς του ρεύματος κυμαίνεται από 0.005-0.01 KW/m² (Σχήμα 4-17) με τις υψηλότερες τιμές να εντοπίζονται περιφερειακά του σχηματισμού. Οι μέγιστες τιμές της ισχύος ανιχνεύονται στο νότιο τμήμα της υπολεκανής που περιλαμβάνει τμήμα του North African Current. Μία δευτερεύουσα κυκλοφοριακή δομή συναντάται και νότια της Ζακύνθου αλλά με μικρότερες τιμές ισχύος.

Ionio
Mean Current Velocity (m/s)
2007-2010



Σχήμα 4-16: Χωρική κατανομή επιφανειακής κυκλοφορίας στην υπολεκάνη του Ιονίου.



Σχήμα 4-17: Χωρική κατανομή της ισχύος και της τυπικής απόκλισης των ρευμάτων στο Ιόνιο Πέλαγος από τις 2/3/2007 έως 30/4/2010.

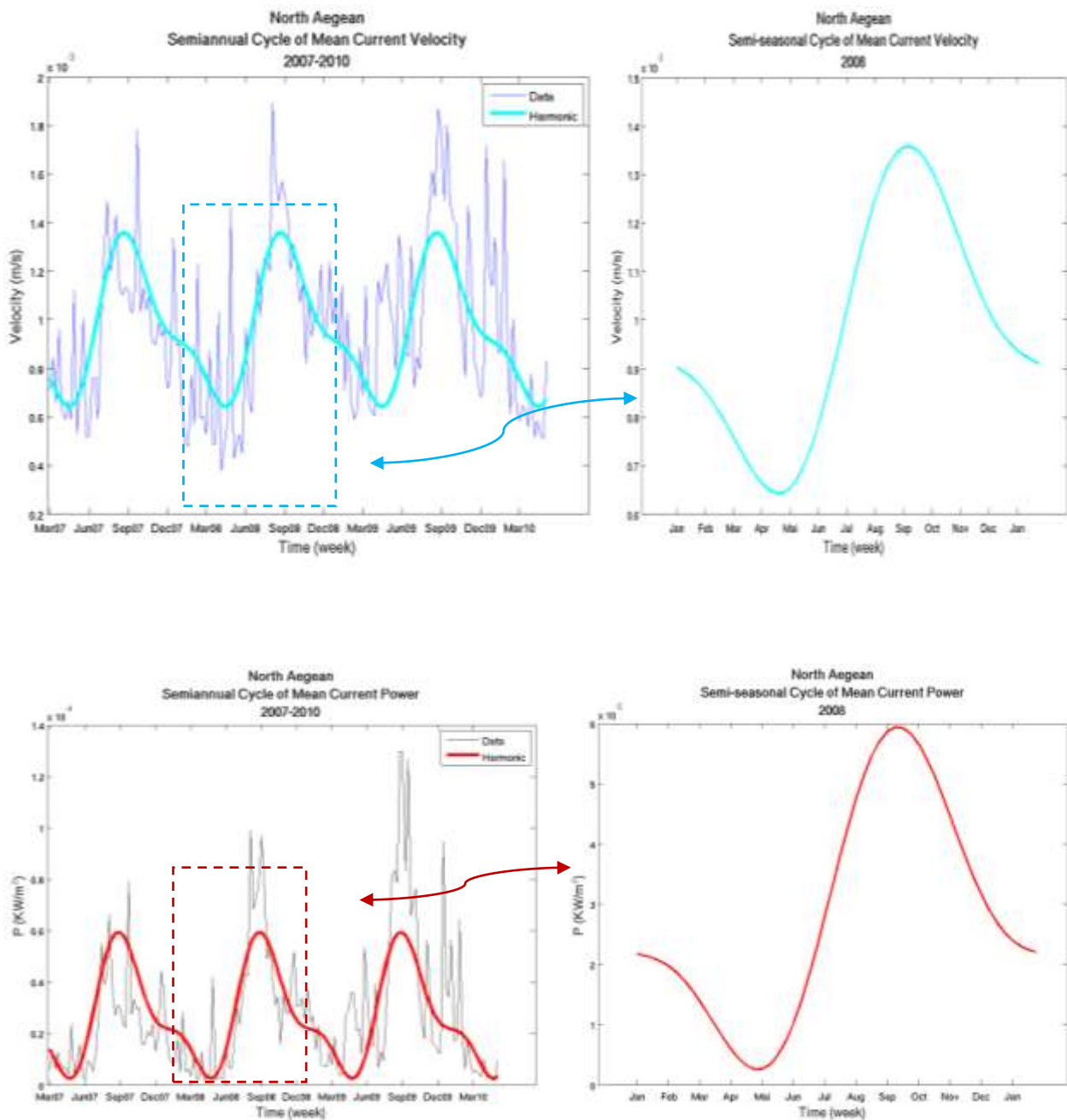
Στον πίνακα 4-4 φαίνονται οι κυριότερες στατιστικές παράμετροι της ισχύος και της ταχύτητας των ρευμάτων. Σε κάθε υπολεκάνη μελέτης υπολογίστηκαν η μέση, η μέγιστη και η ελάχιστη ταχύτητα και ισχύς των ρευμάτων καθώς και οι τυπικές τους αποκλίσεις. Ο υπολογισμός έγινε σε κάθε σημείο του πλέγματος και για τα τρία χρόνια μελέτης και οι τιμές αναφέρονται στο επιφανειακό στρώμα των 10m.

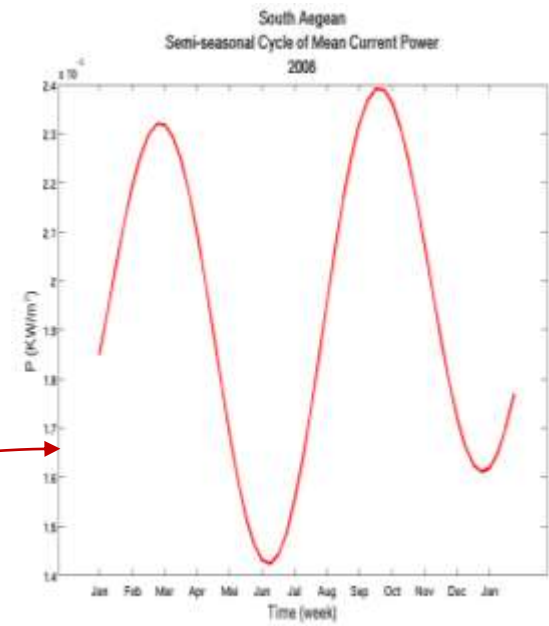
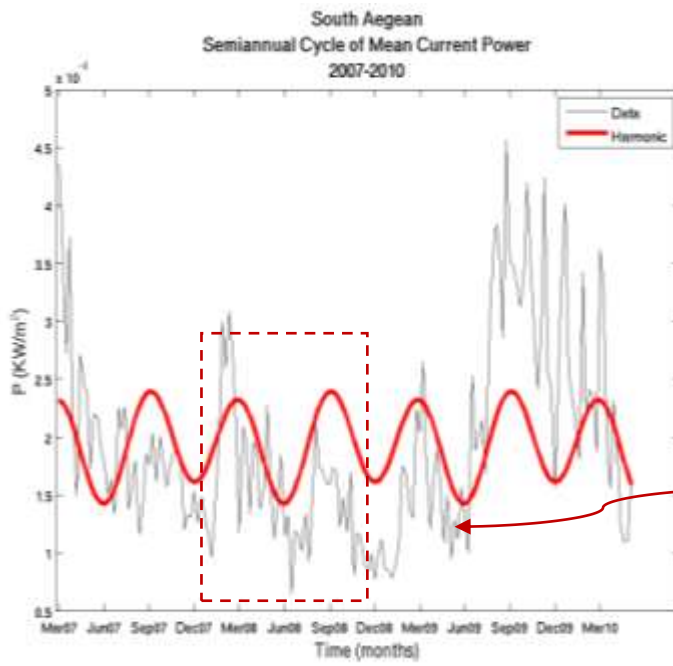
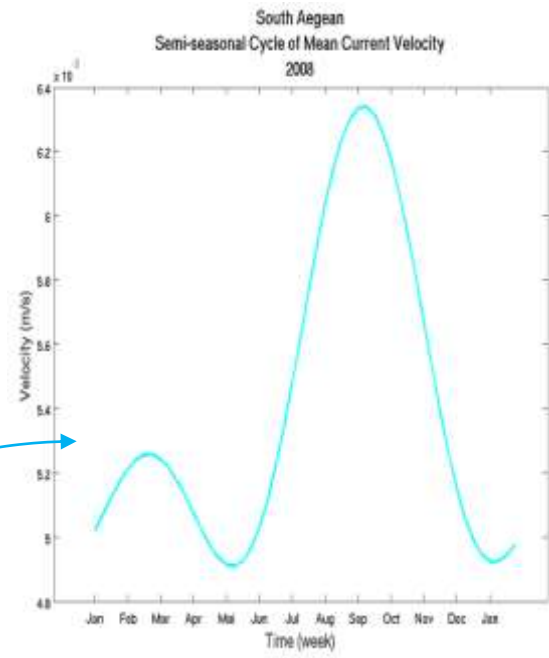
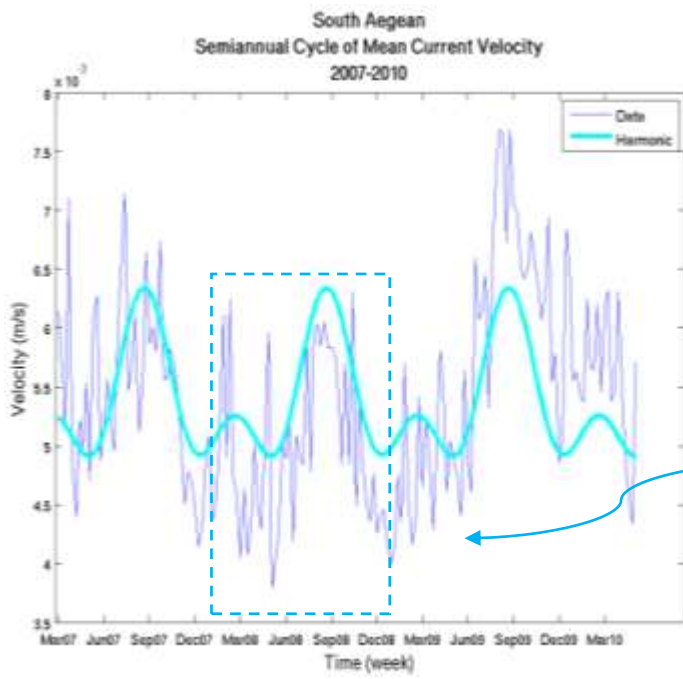
Πίνακας 4-4: Στατιστικές παράμετροι ισχύος και ταχύτητας ρεύματος.

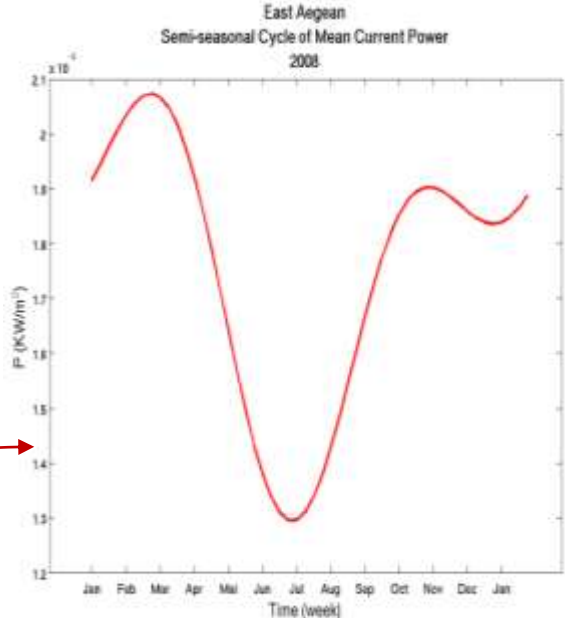
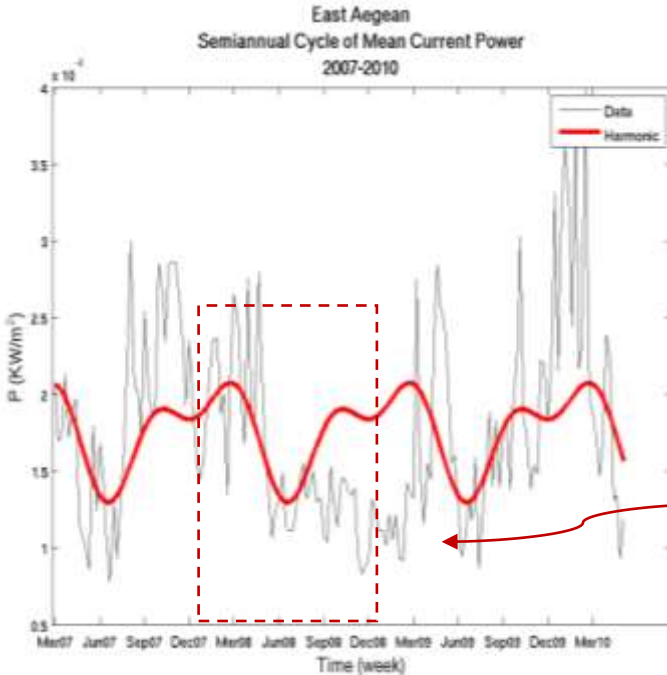
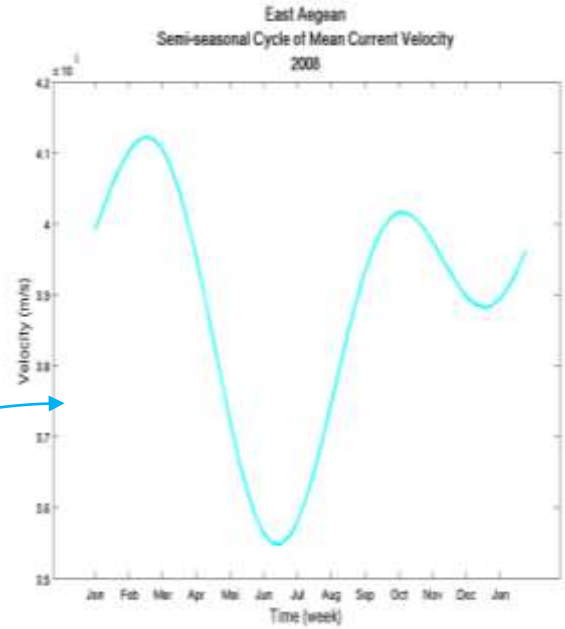
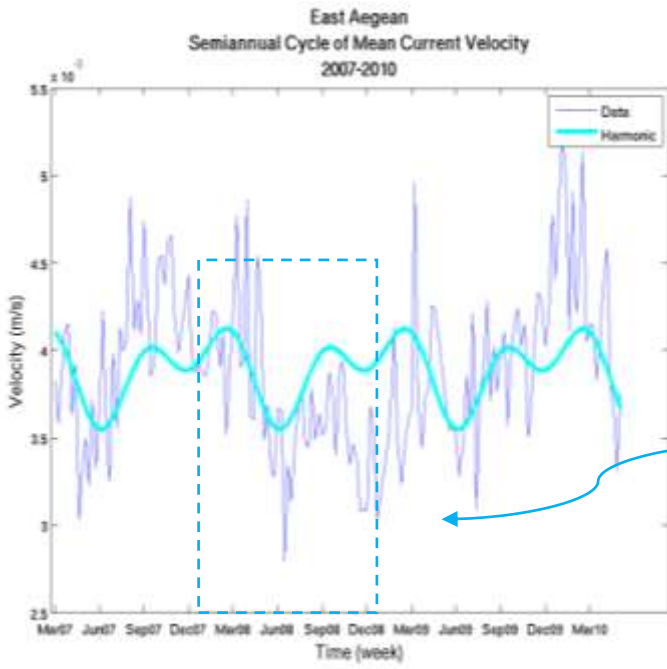
Υπολεκάνες Μελέτης	Παράμετρος	Mean	Max	Min	Std
Βόρειο Αιγαίο	V (m/s)	0.08	1.00	0	0.01
	P (KW/m ²)	0.002	0.513	0	0.004
Νότιο Αιγαίο	V (m/s)	0.14	1.09	0	0.005
	P (KW/m ²)	0.005	0.657	0	0.004
Ανατολικό Αιγαίο	V (m/s)	0.17	1.11	0	0.006
	P (KW/m ²)	0.008	0.7041	0	0.001
Ιόνιο	V (m/s)	0.14	1.07	0	0.007
	P (KW/m ²)	0.005	0.629	0	0.004

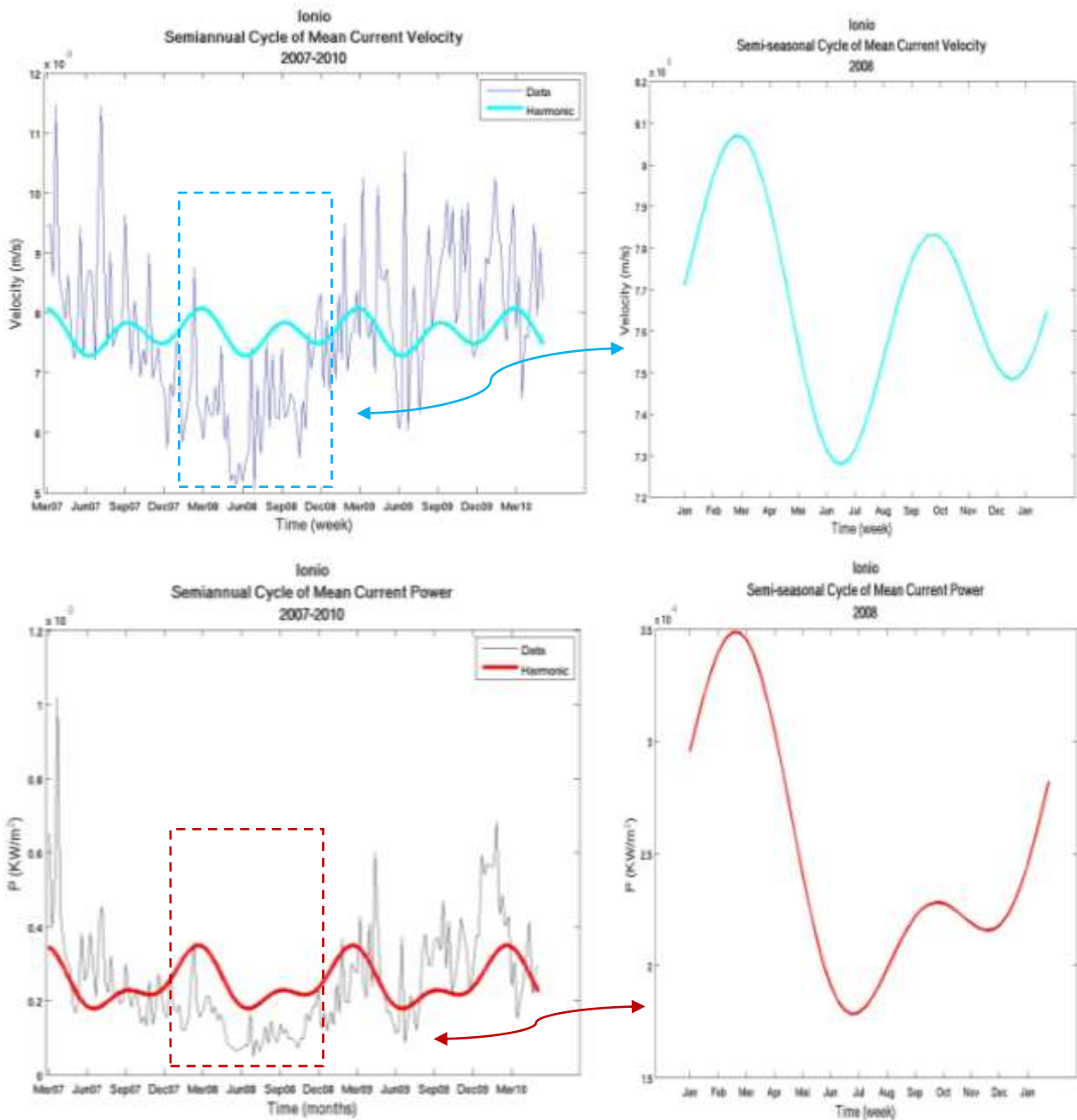
4.2.2 Χρονική Κατανομή

Για τη μελέτη της χρονικής διακύμανσης της κυκλοφορίας των υδάτων, για το επιφανειακό στρώμα των 10m, καθώς και της ισχύος των ρευμάτων, κατασκευάστηκαν οι αντίστοιχες χρονοσειρές για τα δύο μεγέθη (Σχήμα 4-18). Επιπλέον, στις προκύπτουσες χρονοσειρές, εφαρμόστηκε η μέθοδος της αρμονικής ανάλυσης προκειμένου να μελετηθεί εκτενέστερα ο εποχιακός κύκλος. Σε όλες τις υπολεκάνες μελέτης εκτός από τον εποχιακό κύκλο, εμφανίζεται κι ένας μικρότερος σε εύρος ημι-εποχιακός κύκλος, που οφείλεται ως επί το πλείστον στην εξάρτηση της επιφανειακής κυκλοφορίας από το ανεμολογικό καθεστώς.









Σχήμα 4-18: Χρονοσειρές και εποχιακοί κύκλοι της ισχύος και της ταχύτητας των ρευμάτων για το επιφανειακό στρώμα των 10m σε όλες τις υπολεκάνες μελέτης.

Ο εποχιακός και ο ημι-εποχιακός κύκλος παρουσιάζονται πιο έντονοι στην υπολεκάνη του Βορείου Αιγαίου όπου η κυκλοφορία επηρεάζεται τόσο από την διάτμηση του ανέμου όσο και από την έξοδο των BSW. Όπως προαναφέρθηκε το Αιγαίο συνδέεται με τη θάλασσα του Μαρμαρά μέσω του στενού των Δαρδανελίων και συνεπώς και με τη Μαύρη θάλασσα μέσω των στενών του Βοσπόρου. Στην περιοχή αυτή έχουν ανιχνευτεί δύο στρώματα με αντίθετες ροές. Το επιφανειακό στρώμα καταλαμβάνεται από τα γλυκά ύδατα της Μαύρης θάλασσας που ρέουν προς το Αιγαίο ενώ στα κατώτερα στρώματα επικρατούν τα πυκνότερα ύδατα του Αιγαίου (Aegean Sea Waters, ASW) που κινούνται με μικρότερες ταχύτητες προς τη θάλασσα του Μαρμαρά. Και οι δύο αυτές ροές υπόκεινται σε μία έντονη εποχικότητα [Poulos et al., 1997].

Σύμφωνα με τους Tzali et al. (2010) η εποχικότητα που παρουσιάζει η εισροή των BSW σχετίζεται με τον εποχιακό κύκλο της απορροής των ποταμών στη Μαύρη Θάλασσα. Αν και η μέγιστη απορροή των ποταμών παρουσιάζεται το Μάιο, το σήμα φτάνει στο στενό των Δαρδανελλίων δύο μήνες μετά. Συνεπώς, η μέγιστη εισροή των υφάλμυρων BSW στο Αιγαίο παρατηρείται στο τέλος της θερινής περιόδου. Οι χρονοσειρές της ταχύτητας και της ισχύος των ρευμάτων υπόκεινται στις ίδιες διακυμάνσεις (Σχήμα 4-18) καταδεικνύοντας τον καθοριστικό ρόλο των BSW στη διαμόρφωση της κυκλοφορίας στο Βόρειο Αιγαίο. Αυξημένη εισροή υδάτων οδηγεί σε αύξηση της κινητικής ενέργειας κι ενίσχυση της κυκλοφορίας και των κυκλοφοριακών δομών μέσης κλίμακας. Η μέση ισχύς ρεύματος στην περιοχή είναι $2.2 \cdot 10^{-5} \text{ KW/m}^2$ (Πίνακας 4-5) με τις μέγιστες τιμές να σημειώνονται στο τέλος του καλοκαιριού.

Η αύξηση των ταχυτήτων κατά τη διάρκεια του θέρους ακολουθείται από μία μείωση το φθινόπωρο και κατόπιν από μία ακόμη μικρότερη αύξηση το χειμώνα, περίπου στις αρχές του Ιανουαρίου έως και τα μέσα του Φεβρουαρίου. Οι ελάχιστες τιμές παρατηρούνται στο τέλος Απριλίου-αρχές Μαΐου λόγω της μειωμένης ροής από τα Δαρδανέλλια αλλά και της μείωσης της ταχύτητας του ανέμου. Παρόμοια συμπεριφορά εμφανίζει και η λεκάνη του Νοτίου Αιγαίου με τα δύο μέγιστα να παρουσιάζονται προς το τέλος της θερινής περιόδου και τα μέσα της χειμερινής αντίστοιχα.

Τόσο στο Ιόνιο όσο και στο Ανατολικό Αιγαίο, ο εποχιακός και ημι-εποχιακός κύκλος παρουσιάζουν διαφορετική διακύμανση. Η ταχύτητα του ρεύματος μεγιστοποιείται τον χειμώνα και μειώνεται στις αρχές του καλοκαιριού. Ακολουθεί μία δεύτερη αύξηση στο τέλος του καλοκαιριού και μείωση στο τέλος του φθινοπώρου. Αυτή η διαφοροποίηση ενδεχομένως να οφείλεται στο γεγονός ότι οι δύο περιοχές δεν επηρεάζονται άμεσα από την ροή των BSW και την εποχικότητα που παρουσιάζει. Αντίθετα, η κυκλοφορία φαίνεται να ελέγχεται από φαινόμενα μέσης κλίμακας και από τις έντονες κυκλοφοριακές δομές που κυριαρχούν. Στο Ανατολικό Αιγαίο συναντάται ο κυκλώνας της Ρόδου που επηρεάζει την ευρύτερη περιοχή και στο Ιόνιο ο Πέλοπας η ισχύς του οποίου εμφανίζει εποχιακή διακύμανση.

Στους πίνακες 4-5 και 4-6 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της στατιστικής επεξεργασίας των χρονοσειρών και των αντίστοιχων αρμονικών. Σε κάθε υπολεκάνη μελέτης υπολογίστηκε η μέση τιμή, η μέγιστη, η ελάχιστη καθώς και οι τυπικές αποκλίσεις και το εύρος. Οι μεγαλύτερες ταχύτητες ρεύματος εμφανίζονται στο Ιόνιο και οι μικρότερες στο Βόρειο Αιγαίο.

Πίνακας 4-5: Στατιστικές παράμετροι χρονοσειρών ταχύτητας (m/s) και ισχύος (KW/m²) ρεύματος.

Υπολεκάνες Μελέτης	Παράμετρος (DATA)	Mean	Max	Min	Std	Range
Βόρειο Αιγαίο	V (m/s)	$9.7 \cdot 10^{-4}$	0.0019	$3.8 \cdot 10^{-4}$	$3.5 \cdot 10^{-4}$	0.002
	P (KW/m ²)	$2.2 \cdot 10^{-5}$	$1.1 \cdot 10^{-4}$	$6.9 \cdot 10^{-7}$	$2.3 \cdot 10^{-5}$	$1.1 \cdot 10^{-4}$
Νότιο Αιγαίο	V (m/s)	0.005	0.008	0.004	$8.6 \cdot 10^{-4}$	0.004
	P (KW/m ²)	$1.9 \cdot 10^{-4}$	$4.6 \cdot 10^{-4}$	$6.4 \cdot 10^{-5}$	$8.4 \cdot 10^{-5}$	$3.9 \cdot 10^{-4}$
Ανατολικό Αιγαίο	V (m/s)	0.004	0.005	0.003	$4.6 \cdot 10^{-4}$	0.003
	P (KW/m ²)	$1.8 \cdot 10^{-4}$	$3.9 \cdot 10^{-4}$	$7.8 \cdot 10^{-5}$	$6.4 \cdot 10^{-5}$	$3.2 \cdot 10^{-4}$
Ιόνιο	V (m/s)	0.007	0.01	0.005	0.0013	0.006
	P (KW/m ²)	$2.5 \cdot 10^{-4}$	0.001	$4.9 \cdot 10^{-5}$	$1.5 \cdot 10^{-4}$	$9.7 \cdot 10^{-4}$

Πίνακας 4-6: Στατιστικές παράμετροι ταχύτητας (m/s) και ισχύος (KW/m²) ρεύματος όπως προέκυψαν ύστερα από αρμονική ανάλυση.

Υπολεκάνες Μελέτης	Παράμετρος (HARMONIC)	Mean	Max	Min	Std	Range
Βόρειο Αιγαίο	V (m/s)	$9.5 \cdot 10^{-4}$	0.001	$6.4 \cdot 10^{-4}$	$2.3 \cdot 10^{-4}$	$7.2 \cdot 10^{-4}$
	P (KW/m ²)	$5 \cdot 10^{-5}$	$2.1 \cdot 10^{-5}$	$2.6 \cdot 10^{-6}$	$1.5 \cdot 10^{-5}$	$4.7 \cdot 10^{-5}$
Νότιο Αιγαίο	V (m/s)	0.005	0.006	0.005	$4.7 \cdot 10^{-4}$	0.001
	P (KW/m ²)	$1.9 \cdot 10^{-4}$	$2.3 \cdot 10^{-4}$	$1.4 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-5}$	$9.7 \cdot 10^{-5}$
Ανατολικό Αιγαίο	V (m/s)	0.0039	0.0041	0.0035	$1.7 \cdot 10^{-4}$	$5.7 \cdot 10^{-4}$
	P (KW/m ²)	$1.8 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-4}$	$1.3 \cdot 10^{-4}$	$2.4 \cdot 10^{-5}$	$7.8 \cdot 10^{-5}$
Ιόνιο	V (m/s)	0.007	0.008	0.007	$2.3 \cdot 10^{-4}$	$7.9 \cdot 10^{-4}$
	P (KW/m ²)	$2.5 \cdot 10^{-4}$	$3.5 \cdot 10^{-4}$	$1.8 \cdot 10^{-4}$	$5.4 \cdot 10^{-5}$	$1.7 \cdot 10^{-4}$

4.3 Διαθεσιμότητα του κυματικού δυναμικού με βάση τα όρια λειτουργίας των κυματικών μετατροπέων

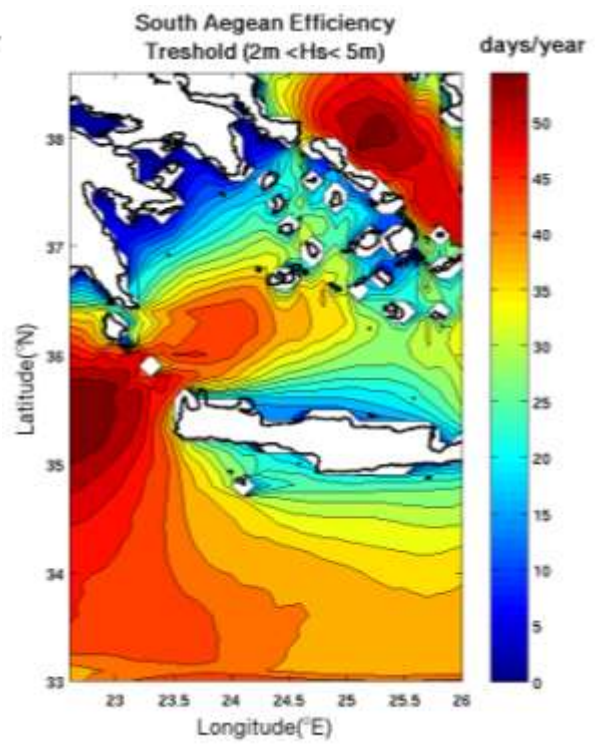
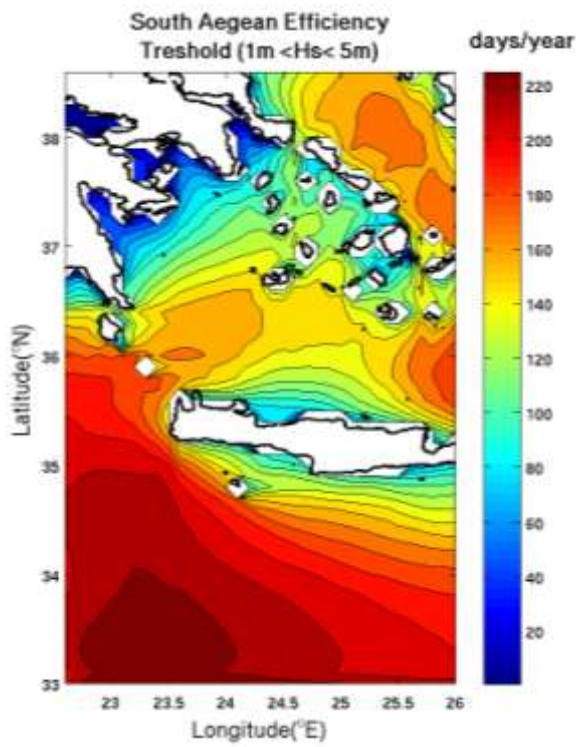
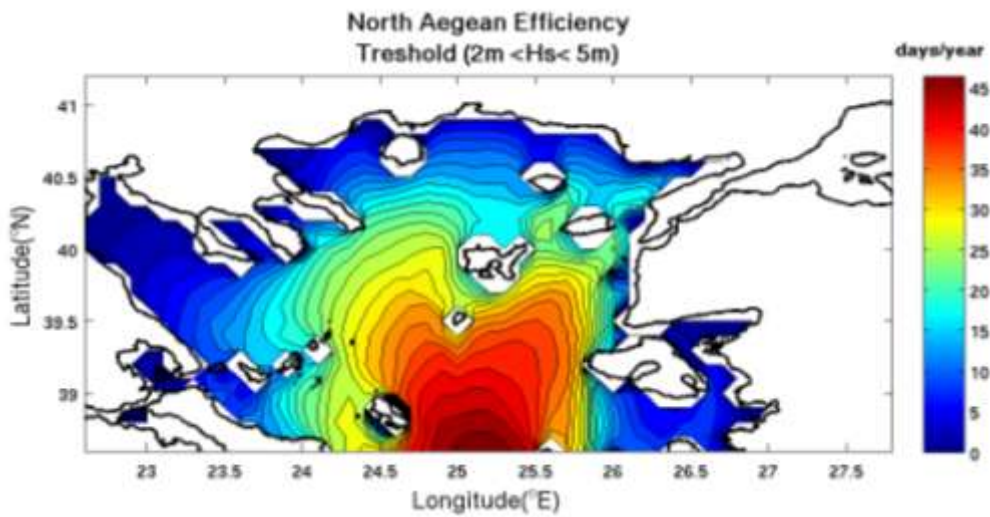
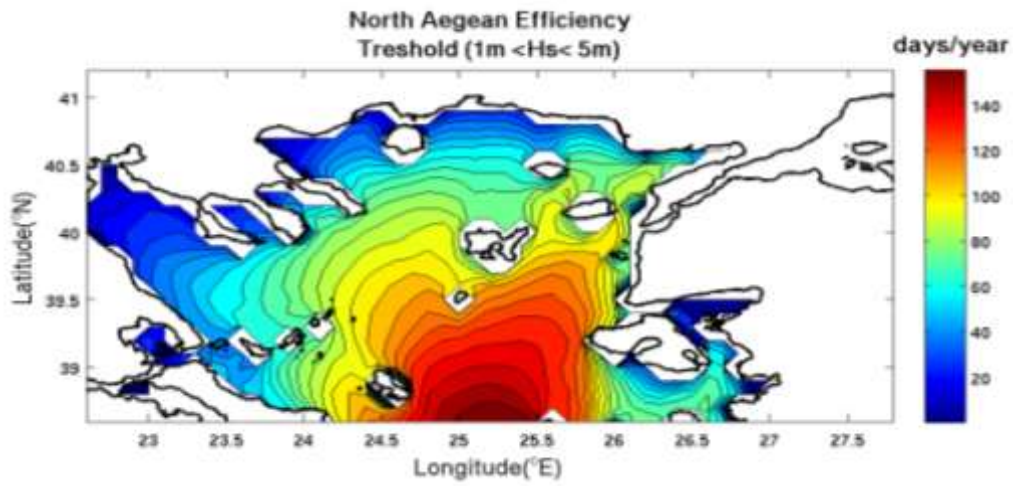
Προκειμένου να γίνει η επιλογή της κατάλληλης τοποθεσίας για την εγκατάσταση ενός κυματικού μετατροπέα ή μιας κυματικής “φάρμας” υπάρχουν πολλοί παράγοντες που πρέπει να ληφθούν υπ’ όψιν. Πέραν από το σημαντικό ενεργειακό δυναμικό που οφείλει να έχει η περιοχή τοποθέτησης υπάρχουν κι άλλοι παράμετροι που περιορίζουν την επιλογή όπως η απόσταση της συσκευής από την ακτή, η ύπαρξη κοντινού δικτύου διασύνδεσης, η αλιευτική δραστηριότητα, οι επιπτώσεις στο οικοσύστημα, η αντίδραση της τοπικής κοινωνίας κ.ά.

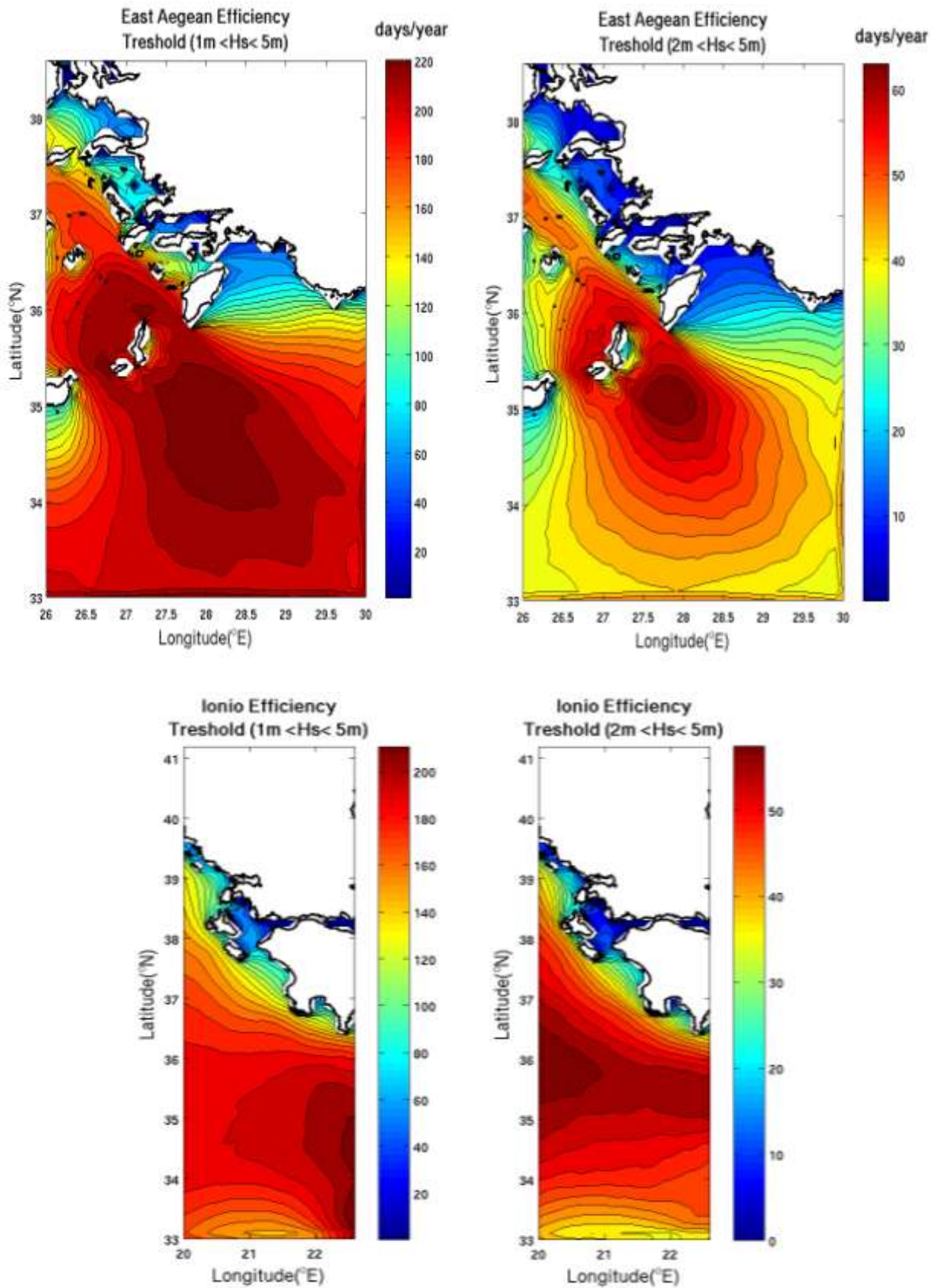
Ένας επιπλέον σημαντικός παράγοντας είναι η διαθεσιμότητα της κυματικής ενέργειας σε ετήσια βάση. Περιοχές όπου το κυματικό δυναμικό εμφανίζεται αυξημένο αλλά με μικρή συχνότητα δεν κρίνονται κατάλληλες προς εκμετάλλευση καθώς οι μέρες λειτουργίας της συσκευής θα είναι περιορισμένες. Αντίθετα, η ύπαρξη ενός σταθερού κυματισμού ακόμη και με μικρότερα ύψη εξασφαλίζει τη συνεχή λειτουργία του μετατροπέα και την αύξηση της απόδοσης σε ετήσια βάση. Για κάποιους κυματικούς μετατροπέες σημαντικό είναι και το σταθερό μήκος κύματος αλλά και η διεύθυνση του κυματισμού.

Ο κυριότερος όμως παράγοντας που πρέπει να ληφθεί υπ’ όψιν σε κάθε εγκατάσταση είναι η βιωσιμότητα της συσκευής. Η υψηλή ενεργειακή πυκνότητα των κυμάτων συνεπάγεται μεγάλες καταπονήσεις στην περίπτωση ακραίων καιρικών φαινομένων, οι οποίες μπορούν να υπερβούν το 100-πλάσιο των μέσων καταπονήσεων. Τούτο απαιτεί υψηλό βαθμό μηχανικής αντοχής των κατασκευών, με αποτέλεσμα την αύξηση του κατασκευαστικού κόστους. Η αξιοπιστία και η απόδοση των συσκευών σε συνάρτηση με το κατασκευαστικό και λειτουργικό κόστος αποτελούν το σημαντικότερο μειονέκτημα στην εκμετάλλευση της θαλάσσιας ενέργειας.

Αν και η υψηλότερη ενέργεια περικλείεται στα μεγάλα ύψη κύματος, η πιθανότητα καταστροφής της συσκευής τα καθιστά μη εκμεταλλεύσιμα. Προκειμένου λοιπόν να εξασφαλιστεί η βιωσιμότητα των συσκευών, κάθε κυματικός μετατροπέας διαθέτει ένα ανώτερο όριο λειτουργίας. Όταν το ύψος κύματος ξεπεράσει αυτό το όριο, η λειτουργία αναστέλλεται για λόγους ασφαλείας. Επιπλέον κάποιες συσκευές διαθέτουν κι ένα κατώτερο όριο δεδομένου ότι για μικρά ύψη κύματος το κόστος υπερσχύει της απόδοσης. Έτσι για παράδειγμα στη συσκευή CETO (Cylindrical Energy Transfer Oscillator) η λειτουργία διακόπτεται για σημαντικό ύψος κύματος μικρότερο του ενός μέτρου [Hughes&Hearp, 2010] ενώ στη συσκευή Wave Dragon τα όρια λειτουργίας είναι $1\text{m} < H_s < 5\text{m}$ [Knapp et al]. Φυσικά υπάρχουν και μετατροπέες που επιδέχονται υψηλότερα κύματα όπως η Sakata OWC που το ανώτερο όριο λειτουργίας είναι 15.3m.

Στη συνέχεια λοιπόν ελέγχθηκε η διαθεσιμότητα της κυματικής ενέργειας σε κάθε υπολεκάνη μελέτης σε σχέση με το ύψος κύματος (Σχήμα 4-19). Συγκεκριμένα εξετάστηκε πόσες μέρες τον χρόνο το σημαντικό ύψος κύματος βρίσκεται εντός εκμεταλλεύσιμων ορίων. Αν και τα όρια λειτουργίας είναι διαφορετικά για κάθε συσκευή, στην παρούσα μελέτη θεωρήθηκε ένας τυπικός κυματικός μετατροπέας που λειτουργεί για $1\text{m} < H_s < 5\text{m}$. Επιπλέον η διαθεσιμότητα της κυματικής ενέργειας μελετήθηκε και για ύψη κύματος $2\text{m} < H_s < 5\text{m}$ καθώς περικλείουν υψηλότερη ενεργειακή πυκνότητα.





Σχήμα 4-19: Χωρικές κατανομές της αποδοτικότητας κάθε λεκάνης για δύο όρια λειτουργίας $1m < H_s < 5m$ και $2m < H_s < 5m$.

Η μικρότερη αποδοτικότητα εμφανίζεται στο Βόρειο Αιγαίο. Το Νότιο Αιγαίο και το Ιόνιο και συγκεκριμένα τα στενά μεταξύ Κρήτης – Κυθήρων και ΝΔ της Πελοποννήσου χαρακτηρίζονται όχι μόνο από υψηλή ενέργεια αλλά και από μεγάλη αποδοτικότητα καθώς ένας κυματικός μετατροπέας θα μπορούσε να λειτουργεί θεωρητικά περίπου 200 μέρες τον χρόνο εκ των οποίων τις 50 με αυξημένη ισχύ. Μεγάλη αποδοτικότητα εντοπίζεται και στη θαλάσσια περιοχή μεταξύ Κρήτης και Ρόδου όπου το σημαντικό ύψος κύματος βρίσκεται εντός των ορίων λειτουργίας το μεγαλύτερο μέρος του χρόνου.

Αξίζει να αναφερθεί ότι ένα βασικό πλεονέκτημα που παρουσιάζει η θαλάσσια ενέργεια έγκειται στο γεγονός ότι αυξάνεται την ίδια περίοδο που αυξάνεται και η ζήτηση σε ηλεκτρισμό, δηλαδή τους ψυχρούς και θερμούς μήνες του έτους. Από αυτήν την άποψη τα στενά μεταξύ Κρήτης-Κάσου και Ρόδου Καρπάθου ενδείκνυται προς εκμετάλλευση καθώς οι μέρες λειτουργίας καλύπτουν αυτές τις περιόδους. Αν και τα ύψη κύματος στο Αιγαίο είναι μικρά και συνεπώς η ενέργεια κινείται σε μικρότερα επίπεδα απ' ό,τι σε άλλες Ευρωπαϊκές χώρες, εμφανίζουν σταθερότητα σε ετήσια βάση και συνεπώς η κατασκευή μιας διάταξης από κυματικούς μετατροπείς θα μπορούσε να καλύψει αρκετές από τις ενεργειακές ανάγκες αυτών των νησιών.



Εικόνα 4-2: Αξιοποίηση της θαλάσσιας ενέργειας με παράλληλη τοποθέτηση κυματικών μετατροπέων (Pelamis & Oyster) και στροβίλων εκμετάλλευσης της ενέργειας των ρευμάτων.

4.4 Υπεράκτια Κυματική Ενέργεια

Υπάρχουν τρεις κύριες ζώνες στις οποίες μπορεί να τοποθετηθεί ένας κυματικός μετατροπέας και που καθορίζουν συνήθως τη μορφή του και τη μέθοδο απορρόφησης της διαθέσιμης ενέργειας. Η πρώτη ζώνη είναι η ακτογραμμική όπου η τοποθέτηση γίνεται πάνω στην ξηρά και το βάθος λειτουργίας είναι μικρότερο από 10m. Οι τεχνολογίες ακτογραμμής συνήθως εκμεταλλεύονται την τοπογραφία για να σχηματίσουν το κυρίως σώμα της συσκευής όπως η LIMPET ενώ η νέα τάση είναι η ενσωμάτωση των συσκευών σε ήδη υπάρχουσες δομές όπως οι κυματοθραύστες.

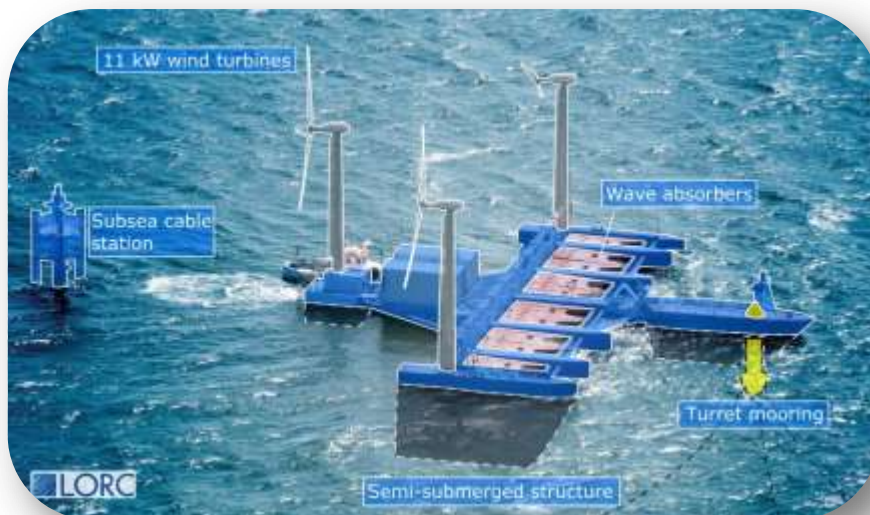
Η δεύτερη και η τρίτη ζώνη είναι η παράκτια και η υπεράκτια αντίστοιχα. Για τις δύο αυτές ζώνες τα όρια είναι συγκεχυμένα και η οριοθέτησή τους βασίζεται είτε στην απόσταση από την ξηρά είτε στο βάθος. Ο διαχωρισμός των ζωνών έγκειται στο γεγονός ότι καθώς το κύμα ταξιδεύει προς την ξηρά και το βάθος μειώνεται οι παράμετροι που το καθορίζουν και συνεπώς και η κυματική ενέργεια, υφίστανται σημαντικές αλλαγές εξαιτίας της τριβής με τον πυθμένα. Φαινόμενα όπως το σπάσιμο του κύματος, η ανάκλαση, η περίθλαση και η κυματική συμβολή διαφοροποιούν το ύψος των κυμάτων, τη διεύθυνση αλλά και την κυματική ενέργεια.

Συνήθως ως παράκτιες ορίζονται οι συσκευές που απέχουν από την ακτή 0.5-2Km και το βάθος τοποθέτησης δεν ξεπερνά τα 20m. Αν και η κυματική ενέργεια υφίσταται μείωση εξαιτίας της τριβής, η μικρή απόσταση από την ακτή συντελεί στην εύκολη συντήρηση και επιδιόρθωση των συσκευών και στη μείωση του κόστους καθώς δεν απαιτούνται μεγάλα υποθαλάσσια καλώδια για τη μεταφορά της παραγόμενης ενέργειας. Όσον αφορά τους υπεράκτιους κυματικούς μετατροπέες, τα βάθη εγκατάστασης συνήθως ξεπερνάνε τα 40m με αποτέλεσμα να δέχονται τη μέγιστη κυματική ισχύ. Λαμβάνοντας υπ' όψιν το κόστος των υποθαλάσσιων καλωδίων που μεταφέρουν την ενέργεια στην ακτή, η μέγιστη απόσταση εγκατάστασης ενός οποιουδήποτε συστήματος ορίζεται στα 100Km, καθώς για μεγαλύτερες αποστάσεις το κόστος είναι προς το παρόν απαγορευτικό.

Προκειμένου να μελετηθεί η διαθέσιμη υπεράκτια κυματική ενέργεια στα ελληνικά πελάγη χρησιμοποιήθηκαν δύο τρόποι, δεδομένου ότι δεν υπάρχει σαφής ορισμός για την υπεράκτια ζώνη. Αρχικά η υπεράκτια ενέργεια ορίστηκε με βάση την απόσταση από την ακτογραμμική και κατόπιν με βάση το βάθος. Και στις δύο περιπτώσεις τα όρια που επιλέχθηκαν δεν αφορούν την τοποθέτηση ενός κυματικού μετατροπέα ή ενός στροβίλου εκμετάλλευσης της ισχύος των ρευμάτων αλλά ενός μελλοντικού υβριδικού συστήματος που θα συνδυάζει την εκμετάλλευση τόσο της κυματικής όσο και της υπεράκτιας αιολικής ενέργειας.

Η συσκευή Wave Treader (*Εικόνα 4-3*) που κατασκευάστηκε το 2007 από την εταιρεία Green Ocean Energy, αποτελεί ένα τέτοιο σύστημα καθώς αποτελείται από έναν κυματικό μετατροπέα στον οποίο δύναται να εφαρμοστεί μία ανεμογεννήτρια. Άλλο παράδειγμα αποτελεί το OWAP (Ocean Wave Air Piston) το οποίο αποτελείται από τρεις κυματικούς μετατροπέες ενσωματωμένους στη βάση στήριξης μιας ανεμογεννήτριας. Μία διαφορετική προσέγγιση είναι η πλατφόρμα Poseidon 37 (*Εικόνα 4-3*). Πρόκειται για μία ημιβυθισμένη πλωτή κατασκευή που αποτελείται από τρεις ανεμογεννήτριες ενσωματωμένες σ' έναν κυματικό μετατροπέα (Front Pivot Hinged Wave Absorber). Η πλατφόρμα έχει διαστάσεις 25m μήκος x 37m πλάτος x 6m ύψος ενώ το ύψος κάθε ανεμογεννήτριας είναι 12m.

Τα υβριδικά συστήματα, αν και καινούργια τεχνολογία, έχουν το πλεονέκτημα της υψηλής απόδοσης και της συνεχής ροής με μικρότερο λειτουργικό κόστος. Επιπλέον, στην περίπτωση του Poseidon 37, η χρήση του κυματικού μετατροπέα ως βάση στήριξης των ανεμογεννητριών αυξάνει τη σταθερότητα του συστήματος καθώς ο κυματικός μετατροπέας απορροφά τα μεγάλα ύψη κύματος. Η απορρόφηση των κυμάτων δημιουργεί ηπιότερες κυματικές συνθήκες όπισθεν της πλατφόρμας και συνεπώς το σύστημα μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για τη πρόσδεση μικρών πλοίων σε περίπτωση ακραίων καιρικών φαινομένων. Τα όρια λειτουργίας του συγκεκριμένου κυματικού μετατροπέα είναι $0.2\text{m} < H_s < 1.5\text{m}$ και συνεπώς ενδείκνυται για ήπια κυματικά κλίματα όπως στα ελληνικά πελάγη.



Εικόνα 4-3: Wave Treader (πάνω), Poseidon 37 (κάτω) (Πηγή: www.power-technology.com/projects/greenoceanenergywav/, www.lorc.dk/Knowledge/Wind/Support-structures/Floating-structure-combining-wind-and-wave)

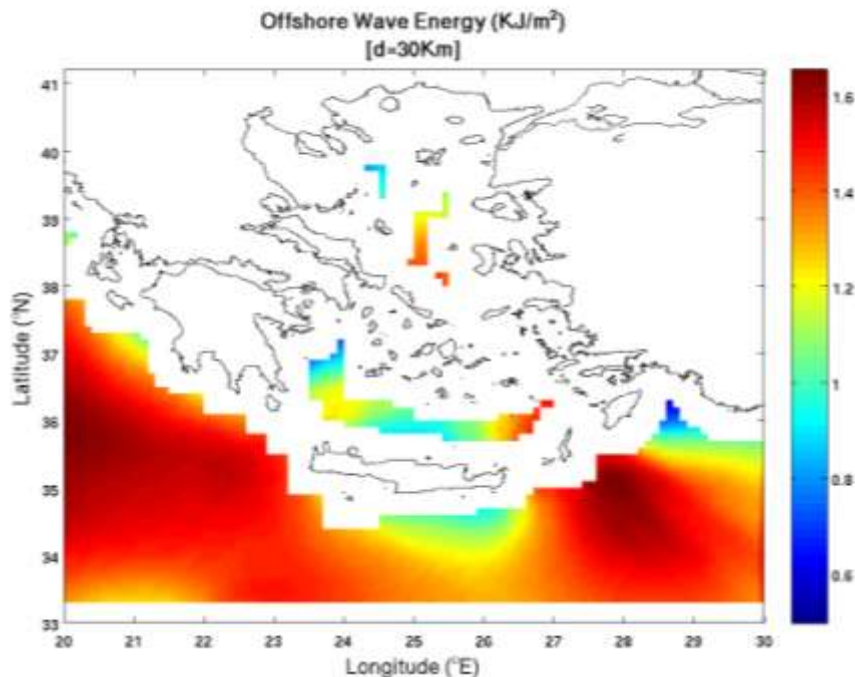
4.4.1 Υπολογισμός της υπεράκτιας ενεργείας με βάση την απόσταση από την ακτογραμμή

Για τον υπολογισμό της θεωρητικής υπεράκτιας κυματικής ενέργειας θεωρήθηκε ένα υβριδικό σύστημα που αποτελείται από ένα κυματικό μετατροπέα και μία ανεμογεννήτρια. Καθώς ένα βασικό πρόβλημα στις ανεμογεννήτριες είναι η οπτική όχληση, ως όριο της υπεράκτιας ζώνης ορίστηκε η ελάχιστη απόσταση από την ακτή ώστε να μην είναι ορατή μία τουρμπίνα με τυπικό ύψος 40m. Φυσικά υπάρχουν και ανεμογεννήτριες με ύψη μεγαλύτερα από 70m και διάμετρο ρότορα μεγαλύτερη από 100m. Κατόπιν λαμβάνοντας υπ' όψιν την καμπυλότητα της γης και την ατμοσφαιρική σκέδαση υπολογίστηκε ο οπτικός ορίζοντας σύμφωνα με τη σχέση:

$$D=4.2(\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2})$$

Όπου D: η απόσταση από την ακτογραμμή (Km), h_1 : ύψος παρατηρητή (m), h_2 : ύψος ανεμογεννήτριας (m). Θεωρώντας ότι $h_1=1.7m$ και $h_2=40m$ η απόσταση του ορίζοντα είναι περίπου 30Km.

Λόγω της περίπλοκης ακτογραμμής που χαρακτηρίζει το Αιγαίο Πέλαγος και της ύπαρξης πολλών νησιών διαπιστώνουμε ότι ο παραπάνω ορισμός έχει νόημα μόνο για την περιοχή του Κρητικού και Λιβυκού Πελάγους καθώς και για το Νότιο Ιόνιο (Σχήμα 4-20). Οι υψηλότερες τιμές της μέσης υπεράκτιας κυματικής ενέργειας στην ευρύτερη περιοχή μελέτης, εντοπίζονται ΝΑ των στενών Κρήτης-Ρόδου καθώς και ΝΔ της Πελοποννήσου. Τοποθετώντας ένα υβριδικό σύστημα σ' αυτές τις περιοχές αφενός μεν δεν θα υπήρχε οπτική όχληση κι αφετέρου θα εξασφαλιζόταν η υψηλή απόδοση καθώς διαπιστώνονται υψηλές τιμές κύματος αλλά κι ανέμου.



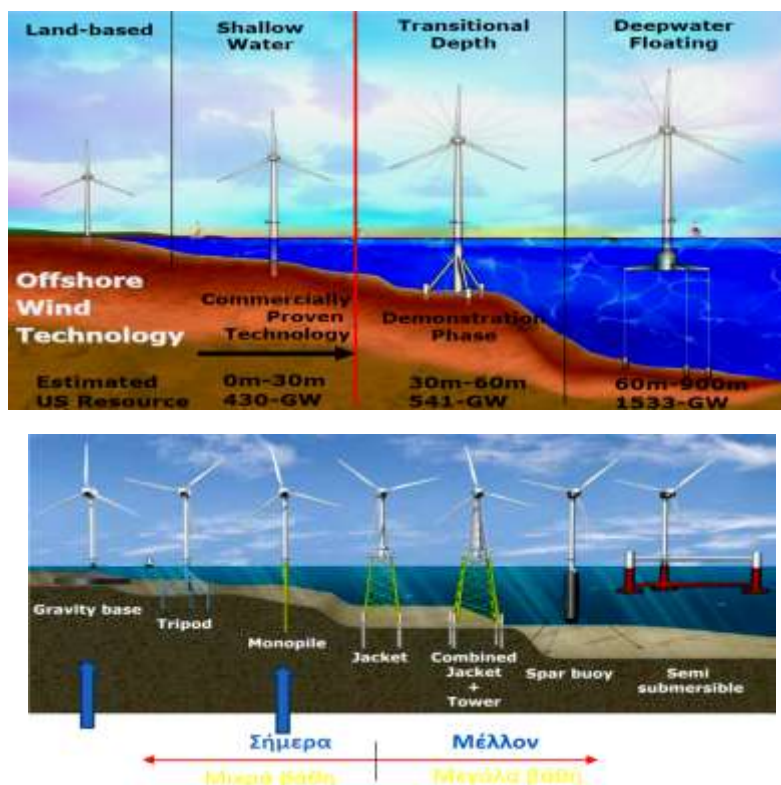
Σχήμα 4-20: Μέση υπεράκτια κυματική ενέργεια στα ελληνικά πελάγη με βάση την απόσταση από την ακτογραμμή.

4.4.2 Υπολογισμός της υπεράκτιας κυματικής ενέργειας σύμφωνα με το βάθος εγκατάστασης

Στους υπεράκτιους κυματικούς μετατροπείς το βάθος εγκατάστασης εξαρτάται από την τεχνολογία αν και γενικά δεν ξεπερνάει τα 150m για οικονομικούς λόγους. Για παράδειγμα οι συσκευές AWS και Anaconda τοποθετούνται σε βάθη 40-100m ενώ στη Pelamis τα βάθη κυμαίνονται από 50m έως 100m. Οι περισσότεροι πλωτοί σημειακοί απορροφητές είναι ιδανικοί για μεγάλα βάθη, όπως ο WaveBob που το βάθος τοποθέτησης ξεπερνά τα 70m. Όσον αφορά τους στροβίλους εκμετάλλευσης της ενέργειας των ρευμάτων τα βάθη παραμένουν μικρά ενώ στις μελλοντικές τεχνολογίες αναμένεται να ξεπεράσουν τα 50m.

Σημαντική πρόοδος σημειώνεται στις υπεράκτιες ανεμογεννήτριες στις οποίες το βάθος εγκατάστασης εξαρτάται ως επί το πλείστον από τον τρόπο στήριξης (Εικόνα 4-3). Οι σημερινές εμπορικές τεχνολογίες τοποθετούνται σε ρηχά ύδατα (βάθος > 30m) αν και σε επιδεικτικό στάδιο βρίσκεται και η τοποθέτηση τους στα λεγόμενα μεταβατικά ύδατα όπου τα βάθη κυμαίνονται από 30-60m. Η εταιρεία Blue H Technologies ανέπτυξε πρόσφατα μία πλωτή ανεμογεννήτρια για τοποθέτηση σε βάθη μεγαλύτερα από 60m. Η τουρμπίνα στηρίζεται σε μία ημιβυθισμένη πλατφόρμα (Submerged Deepwater Platform, SDP) η οποία συγκρατείται στον πυθμένα με ειδικές αλυσίδες.

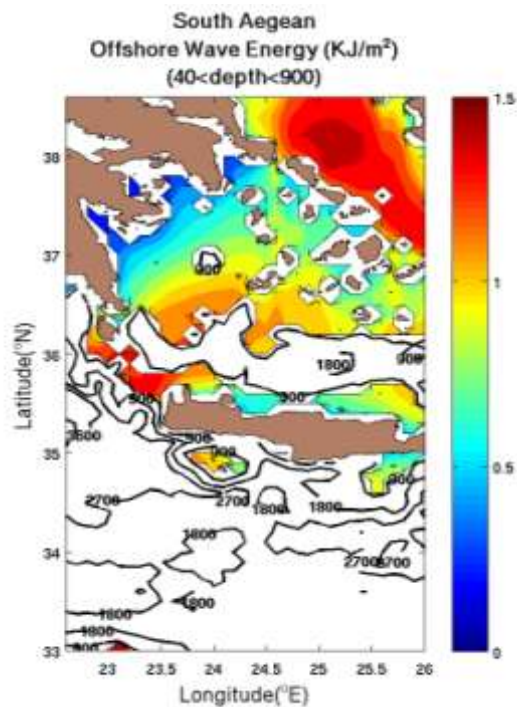
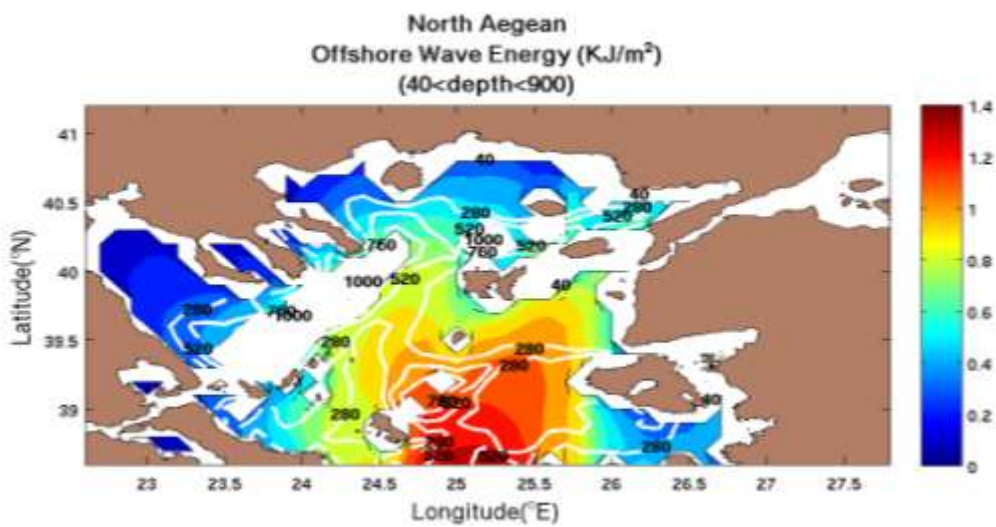
Καθώς όσο αυξάνεται το βάθος και η απόσταση από την ακτή εξασφαλίζεται μεγαλύτερη απόδοση και ελάχιστη οπτική όχληση, οι μελλοντικές πλωτές ανεμογεννήτριες υπολογίζεται ότι θα μπορούν να εγκατασταθούν στα λεγόμενα βαθιά νερά με βάθη τοποθέτησης από 60m έως 900m.

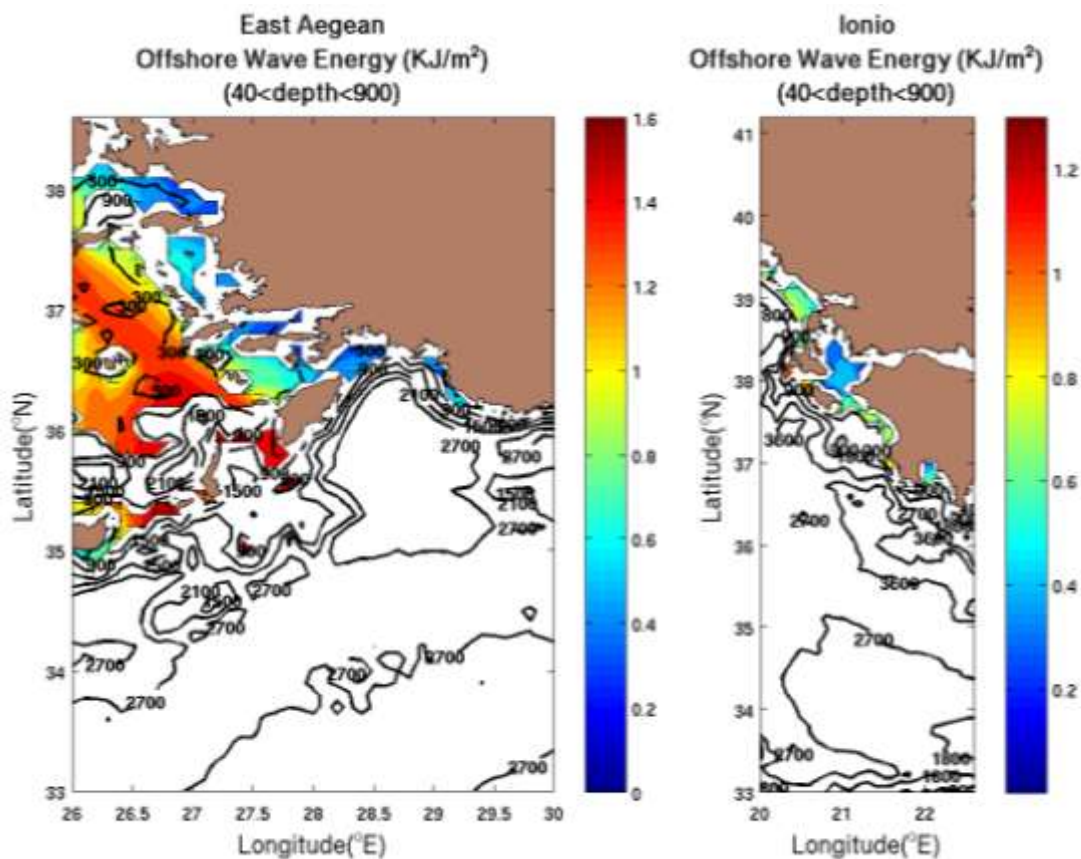


Εικόνα 4-4: Περιοχές τοποθέτησης ανεμογεννητριών και διαφορετικοί τρόποι στήριξης σύμφωνα με το βάθος.

Ο υπολογισμός της υπεράκτιας κυματικής ενέργειας στις ελληνικές θάλασσες, βασίστηκε στη θεώρηση ενός μελλοντικού υβριδικού συστήματος, που θα εκμεταλλεύεται τόσο την κυματική όσο και την αιολική ενέργεια και που θα δύναται να τοποθετηθεί σε βάθη 40m-900m. Με βάση αυτήν την υπόθεση υπολογίστηκε η χωρική κατανομή της μέσης κυματικής ενέργειας σε κάθε υπολεκάνη μελέτης (Σχήμα 4-21). Κατόπιν στατιστικής επεξεργασίας των αποτελεσμάτων βρέθηκε ότι η λεκάνη του Νοτίου Αιγαίου παρουσιάζει την μεγαλύτερη μέση τιμή για βάθη 40-900m. Συγκεκριμένα οι μέσες τιμές της θεωρητικής υπεράκτιας κυματικής ενέργειας για κάθε υπολεκάνη μελέτης είναι:

- ▶ Βόρειο Αιγαίο: 0.57 KJ/m^2
- ▶ Νότιο Αιγαίο: 0.92 KJ/m^2
- ▶ Ανατολικό Αιγαίο: 0.76 KJ/m^2
- ▶ Ιόνιο: 0.78 KJ/m^2





Σχήμα 4-21: Χωρικές κατανομές υπεράκτιας κυματικής ενέργειας για βάθη 40m έως 900m.

Στο Βόρειο Αιγαίο αν και εντοπίζονται αρκετές περιοχές με κατάλληλο βάθος τοποθέτησης, η κυματική ενέργεια σε μέση ετήσια βάση κυμαίνεται σε μικρά επίπεδα. Παρόλα αυτά από μελέτη που πραγματοποιήθηκε από την ελληνική επιστημονική ένωση αιολικής ενέργειας, εντοπίστηκαν θαλάσσιες περιοχές που κρίνονται κατάλληλες για τοποθέτηση ανεμογεννητριών. Η τοποθέτηση αφορά μικρά και μεσαία βάθη (>50m) και στις πιθανές θέσεις περιλαμβάνονται κυρίως το θαλάσσιο τμήμα ΒΑ και ΒΔ της Σαμοθράκης καθώς και το ΝΑ τμήμα της Λήμνου και της Μυτιλήνης.

Όπως είδαμε η λεκάνη του Ιονίου εμφανίζει υψηλές τιμές κυματικής ενέργειας σε μέση ετήσια βάση ενώ επιπλέον πάνω από τις μισές μέρες του χρόνου το σημαντικό ύψος κύματος κυμαίνεται εντός των εκμεταλλεύσιμων ορίων ($1m < H_s < 5m$). Παρόλα αυτά, οι μέγιστες τιμές της κυματικής ενέργειας εντοπίζονται ως επί το πλείστον σε μεγάλα βάθη όπου η εκμετάλλευση είναι προς το παρόν οικονομικά ασύμφορη.

Οι λεκάνες του Νοτίου και Ανατολικού Αιγαίου είναι οι μόνες στις οποίες εντοπίζεται υψηλή ενεργειακή πυκνότητα σε μικρά βάθη. Ειδικά τα στενά μεταξύ Κρήτης-Κυθίων και Κρήτης-Ρόδου αποτελούν περιοχές με καλό κυματικό δυναμικό σε εκμεταλλεύσιμα βάθη και μεγάλη αποδοτικότητα σε ετήσια βάση.

5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η θαλάσσια ενέργεια αποτελεί μία πολλά υποσχόμενη μορφή ΑΠΕ, καθώς χαρακτηρίζεται από υψηλή ενεργειακή πυκνότητα και προβλεψιμότητα, μηδαμινές περιβαλλοντικές επιπτώσεις, ελάχιστη οπτική όχληση και δεν απαιτεί δέσμευση γης. Εμφανίζεται σε διάφορες εκμεταλλεύσιμες μορφές, αν και προς το παρόν, οι προσπάθειες βρίσκονται σε πιλοτικό στάδιο κι επικεντρώνονται κυρίως στη μετατροπή της κυματικής ενέργειας, μέσω κυματικών μετατροπέων (WEC) και στη δέσμευση της ισχύος των ρευμάτων, μέσω στροβίλων παρόμοιων με τις ανεμογεννήτριες. Μία σύντομη περιγραφή των κυριότερων συστημάτων εκμετάλλευσης των θαλασσίων ρευμάτων, επιχειρείται στο δεύτερο κεφάλαιο ενώ έμφαση δίνεται στους κυματικούς μετατροπείς, η κατηγοριοποίηση των οποίων, έγινε αρχικά σύμφωνα με την απόσταση από την ακτογραμμή και κατόπιν με βάση τη μέθοδο δέσμευσης της ενέργειας.

Η γενική κυκλοφορία στο Αιγαίο, αν και σε μεγάλη κλίμακα θεωρείται κυκλωνική, παρουσιάζει πολυπλοκότητα που φαίνεται να οφείλεται στην περίπλοκη τοπογραφία, στην ισχυρή εποχικότητα της ατμοσφαιρικής δράσης και στην παρουσία πολλών και διαφορετικών θαλασσίων μαζών. Περιλαμβάνει κυκλωνικές δομές κλίμακας λεκάνης, πολλαπλές δίνες κλίμακας υπολεκάνης καθώς και αρκετά μεταβατικά eddies. Μεγάλες τιμές ισχύος ρεύματος εντοπίζονται στην περιοχή του αντικυκλώνα της Σαμοθράκης, κατά μήκος του Ρεύματος της Εύβοιας καθώς και στην περιοχή του κυκλώνα της Ρόδου, κυρίως στο ΒΔ και ΝΔ του τμήμα. Στο Ιόνιο, οι τιμές της ισχύος αυξάνουν στην περιοχή του Πέλοπα καθώς και νοτιότερα όπου συναντάται τμήμα του NAC. Η μέση ισχύς ρεύματος στην ευρύτερη περιοχή μελέτης, είναι της τάξης των $O(10^{-3} \text{ KW/m}^2)$ και συνεπώς η εκμετάλλευση της με τις υπάρχουσες τεχνολογίες, δεν θεωρείται οικονομικά συμφέρουσα.

Η χρονική κατανομή της ισχύος των θαλασσίων ρευμάτων, για το επιφανειακό στρώμα των 10m, χαρακτηρίζεται από έναν εποχιακό κι έναν ημι-εποχιακό κύκλο. Στις υπολεκάνες του Βορείου και Νοτίου Αιγαίου, οι μέγιστες τιμές παρατηρούνται την περίοδο του θέρους, όπου η αυξημένη εισροή των BSW από το στενό των Δαρδανελλίων, οδηγεί σε αύξηση της κινητικής ενέργειας κι ενίσχυση της κυκλοφορίας και των κυκλοφοριακών δομών μέσης κλίμακας. Αντίθετη διακύμανση εμφανίζουν οι υπολεκάνες του Ιονίου και του Ανατολικού Αιγαίου, με τα μέγιστα να εντοπίζονται τη χειμερινή περίοδο. Αυτή η διαφοροποίηση ενδεχομένως να οφείλεται στο γεγονός, ότι οι δύο περιοχές δεν επηρεάζονται άμεσα από την ροή των BSW και την εποχικότητα που τη χαρακτηρίζει, αλλά από φαινόμενα μέσης κλίμακας και από τις έντονες κυκλοφοριακές δομές που κυριαρχούν.

Από τη μελέτη της χωρικής κατανομής της κυματικής ενέργειας, προκύπτει ότι οι υψηλότερες τιμές σε μέση ετήσια βάση εμφανίζονται στην περιοχή του Ιονίου (1.3 KJ/m^2 ή 8.3 KW/m) καθώς και στα στενά Κρήτης-Πελοποννήσου λόγω των ισχυρών ανέμων, του μεγάλου fetch και των swell που εμφανίζονται στην περιοχή. Οι νοτιοανατολικές Κυκλάδες, αν κι αποτελούν εμπόδιο στη ροή του ανέμου και στη διάδοση του κυματισμού, από το Βόρειο τμήμα του Αιγαίου προς το Νότιο, ταυτόχρονα μέσω του καναλισμού, καθοδηγούν κι ενισχύουν το κυματικό πεδίο νοτιοανατολικά, με αποτέλεσμα το Ανατολικό Αιγαίο να χαρακτηρίζεται από υψηλή ενεργειακή πυκνότητα (1.2 KJ/m^2 ή 7.7 KW/m). Οι επιπτώσεις που έχει τόσο το fetch όσο και το φαινόμενο του καναλισμού στο ύψος κύματος, είναι ιδιαίτερα εμφανείς στα στενά μεταξύ Κρήτης-Ρόδου. Κατά μήκος της ηπειρωτικής χώρας, η κυματική σκίαση που δημιουργείται από την περίπλοκη ακτογραμμή και τα πολυάριθμα νησιά, οδηγεί σε μείωση της κυματικής ενέργειας, με τις ελάχιστες τιμές να παρατηρούνται παράκτια, λόγω της παράλληλης μείωσης

που υφίσταται το ανεμολογικό πεδίο και της επίδρασης του βυθού. Παρόλα αυτά, φαινόμενα όπως η ανάκλαση κι η περίθλαση των κυμάτων καθώς και ο καναλισμός του ανέμου ανάμεσα στα νησιά, δύναται να οδηγήσουν σε ενίσχυση του κυματικού πεδίου, δημιουργώντας περιοχές «εστιασμού» (hot spots) κυματικής ενέργειας.

Αν και ο κυματισμός αποτελεί συνοπτικό φαινόμενο, παρουσιάζοντας μεγάλες διακυμάνσεις κατά τη διάρκεια του έτους, σε όλες τις υπολεκάνες μελέτης, είναι εμφανής ένας μικρός σε εύρος εποχιακός κύκλος με μέγιστες τιμές τον χειμώνα, καθώς κι ένας δεύτερος μικρότερος ημι-εποχιακός κύκλος, που οφείλεται στην εμφάνιση των Ετησιών, κατά την διάρκεια του θέρους. Ο κύκλος αυτός απουσιάζει από το Ιόνιο, καθώς η περιοχή δεν επηρεάζεται άμεσα από τα Μελτέμια, αν και έχουν παρατηρηθεί υψηλές ταχύτητες ανέμου πάνω από τη νότια Πελοπόννησο και τη δυτική Κρήτη, όταν οι άνεμοι στο Αιγαίο φτάσουν τα 8-9 Beaufort. Οι υψηλότερες τιμές της κυματικής ενέργειας την περίοδο του θέρους, εμφανίζονται στο Νότιο και στο Ανατολικό Αιγαίο, όπου παρατηρούνται και οι μεγαλύτερες εντάσεις ανέμου.

Η καταλληλότητα μιας περιοχής, για πόντιση κυματικών μετατροπών, εξαρτάται κι από τη σταθερότητα του κυματικού πεδίου κατά τη διάρκεια του έτους. Στον Ελληνικό χώρο, περιοχές που συνδυάζουν υψηλά επίπεδα κυματικής ενέργειας και σταθερότητα σε μέση ετήσια βάση, είναι τα στενά μεταξύ Κρήτης-Κυθίων, κυρίως στα Αντικύθηρα, τα στενά μεταξύ Κρήτης-Κάσου και Ρόδου-Καρπάθου καθώς και το ΝΑ τους τμήμα και το θαλάσσιο τμήμα ΝΔ της Πελοποννήσου. Στις περιοχές αυτές το σημαντικό ύψος κύματος βρίσκεται εντός εκμεταλλεύσιμων ορίων τη μεγαλύτερη διάρκεια του έτους. Θεωρώντας ένα υβριδικό σύστημα παράλληλης εκμετάλλευσης του αιολικού και κυματικού πεδίου και ορίζοντας την υπεράκτια ενέργεια με βάση την απόσταση από την ακτογραμμή, υψηλή απόδοση με μηδαμινή οπτική όχληση, εξασφαλίζεται μόνο στο ΝΔ τμήμα της Πελοποννήσου και ΝΑ των στενών Κρήτης-Ρόδου. Ορίζοντας κατόπιν την υπεράκτια κυματική ενέργεια σύμφωνα με το βάθος εγκατάστασης, ικανοποιητική απόδοση σε εκμεταλλεύσιμα βάθη, εντοπίζεται στην περιοχή των Αντικυθίων και στα στενά μεταξύ Κρήτης-Κάσου και Ρόδου-Καρπάθου ενώ το ΝΔ τμήμα της Πελοποννήσου εξαιρείται λόγω βαθυμετρίας.

Συμπεραίνουμε λοιπόν, ότι αν και η μέση θεωρητική διαθέσιμη κυματική ισχύς στον ελληνικό χώρο είναι μικρή, σε σχέση με κάποιες Ευρωπαϊκές χώρες, η εμπορική της εκμετάλλευση είναι εφικτή σε κάποιες περιοχές και θα μπορούσε να συνεισφέρει στην ηλεκτροδότηση αρκετών νησιών του Αιγαίου καθώς και στην εξασφάλιση πόσιμου νερού μέσω αφαλάτωσης. Καθώς όμως παράγοντες όπως το ίζημα του πυθμένα, η αλιευτική δραστηριότητα, η οπτική όχληση, η απόκριση του οικοσυστήματος κ.ά. μπορούν να περιορίσουν τις περιοχές τοποθέτησης, κρίνεται αναγκαία μία εκτενέστερη και πιο εστιασμένη μελέτη στις περιοχές ενδιαφέροντος. Επιπλέον, χρήσιμη θα ήταν η εφαρμογή ενός μοντέλου με υψηλότερη χωρική διακριτοποίηση και ο συνδυασμός του με δορυφορικά δεδομένα ή δεδομένα από buoys, προκειμένου να εντοπιστούν τα “hot spots” στο Αιγαίο αλλά και να μελετηθεί η ισχύς των ρευμάτων, σε περιοχές όπως τα Στενά του Ευρίπου, όπου τα παλιρροιακά ρεύματα εμφανίζονται ενισχυμένα.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- ❖ Alatsathianos S, Fafali P. Wave and current energy: A viable scheme to exploit the energy potential of Greek seas. SynEnergy Forum (S.E.F)-2, Conference for International Synergy in Energy, Environment, Tourism and Information Technology. Piraeus, Greece, 24-26 September 2009. (http://synenergy.teipir.gr/papers/III_5.pdf)
- ❖ Alhammoud B., Beranger K., Mortier L., Crepon M., Dekeyser I. (2005). Surface circulation of the Levantine Basin: Comparison of model results with observations. *Progress in Oceanography* 66: 299-320.
- ❖ Amundarain M, Alberti M, Garrido A.J, Garrido I, Maseda J. (2010). Wave energy plants: Control strategies for avoiding the stalling behavior in the Wells turbine. *Renewable Energy* 35: 2639-2648.
- ❖ Bahaj A.S., Myers L., (2004). Analytical estimates of the energy yield potential from the Alderney Race (Channel Islands) using marine current energy converters. *Renewable Energy* 29: 1931–1945.
- ❖ Barstow Stephen, Athanassoulis Gerassimos A., Cavaleri Luigi (2000). EUROWAVES Integration of data from many sources in a user-friendly software package for calculation of wave statistics in European coastal waters. Presented at the OCEANOLOGY International 2000 Conference, Brighton, UK, 7 -10 March.
- ❖ Barstow Stephen, Mork Gunnar, Lonseth Lasse (2009). WorldWaves wave energy resource assessments from the deep ocean to the coast. Proceedings of the 8th European Wave and Tidal Energy Conference, Uppsala, Sweden, 2009.
- ❖ Bedard Roger, Previsic M., Siddigui O., Hagerman G., Robinson M (2005). Tidal In Stream Energy Conversion (TISEC) Devices, Final Survey and Characterization. EPRI North American Tidal In Stream Energy Conversion Feasibility Demonstration Project.
- ❖ Bhuyan Gouri S. Harnessing the Power of the Oceans. An IEA OPEN Energy Technology Bulletin Article Issue No. 52, July 2008.
- ❖ Blumberg Alan F., Mellor George L. (1987). A description of a three- dimensional coastal ocean circulation model, American Geophysical Union.
- ❖ Booij N., Ris R. C., Holthuijsen L. H. (1999). A third-generation wave model for coastal regions, model description and validation. *Journal of Geophysical Research*, Vol: 104, No C4, pages 7649-7666, April 15, 1999.
- ❖ Bryden Ian G., Couch Scott J., (2006). ME1—marine energy extraction: tidal resource analysis. *Renewable Energy* 31: 133–139.

- ❖ Cameron L., Doherty R., Henry A., Doherty K., Hoff J.Van't, Kaye D., Naylor D., Bourdier S., Whittaker T. Design of the Next Generation of the Oyster Wave Energy Converter, 3rd International Conference on Ocean Energy (ICOE), 2010, Bilbao.
- ❖ Christopoulos S. (1997). Wind-wave modelling aspects within complicate topography *Ann. Geophysicae* 15: 1340-1353 (1997).
- ❖ Chronopoulou S., Nastos P. T., Kampanis N. A. (2010). Estimation of the wind potential in Greece. DEMSEE Conference, 23-24 September, Sitia, Greece.
- ❖ Clement A, Lemonis G, Falcao A, Petroncini S, Pontes M.T et al. (2002). Wave Energy in Europe: Current status and perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 6: 405-431.
- ❖ Cornett Andrew M. (2008). A global wave energy resource assessment, *Renewable Energy* volume 1, pages 1-9.
- ❖ CRES (2006). *Ocean Energy Conversion in Europe, recent advancements and prospects.*
- ❖ Defne Z, Haas K.A, Hermann M.F. (2009). Wave power potential along the Atlantic coast of the southeastern USA. *Renewable Energy* 34: 2197-2205.
- ❖ Falcao Antonio F. de O. (2010). Wave energy utilization: A review of the technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14: 899–918.
- ❖ Falin Chen (2010). Kuroshio power plant development plan. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14: 2655–2668.
- ❖ Falnes J. (2007). A review of wave-energy extraction. *Marine Structures* 20: 185–201
- ❖ Falnes Johannes, Lovseth Jorgen (1991). *Ocean wave energy. Renewables Series, Energy Policy, Butterworth-Heinemann Ltd.*
- ❖ Final Technical Report (2004). Economically efficient floating device for wave power conversion into electricity (LabBuoy), Phase I: Mathematical & Physical model testing.
- ❖ Folley M., Whittaker T.J.T., Henry A. (2007). The effect of water depth on the performance of a small surging wave energy converter. *Ocean Engineering* 34: 1265–1274.
- ❖ Fraenkel P.L (2002). Power from marine currents. *Proc Instn Engrs Vol 216 Part A: J. Power and Energy.*
- ❖ Fraenkel Peter. Feedback on experience so far. *Energies Renouvelables en Mer.* 20 - 21 October 2004 - Brest, France.
- ❖ Frigaard P., Andersen Lykke T., Margheritini L., Vicinanz D. Design, Construction, Reliability and Hydraulic Performance of an Innovative Wave Overtopping Device. 8th International Congress on Advances in Civil Engineering, Cyprus, 2008.

- ❖ Fusco G, G. M. R. Manzella, A. Cruzado, M. Gacic, G. P. Gasparini, V. Kovacevic, C. Millot, C. Tziavos, Z. R. Velasquez, A. Walne, V. Zervakis, and G. Zodiatis (2003). Variability of mesoscale features in the Mediterranean Sea from XBT data analysis. *Annales Geophysicae* 21: 21-32.
- ❖ Galanis George, Kallos George, Chu Peter C., Yu-Heng Kuo. Evaluation of the new ECMWF WAM model. European Space Agency, Proc. of "SeaSar 2010", Frascati, Italy, 25-29 January 2010.
- ❖ Gotthardsson Bjorn (2011). Analysis and Evaluation of the Wavebox Wave Energy Converter.
- ❖ Guittet L., Kusulja M., Maitre T. Setting up of an experiment to test vertical axis water turbines.
- ❖ Hamad N., Millot C., Letage I.T. (2006). The surface circulation in the eastern basin of the Mediterranean Sea. *Scientia Marina* 70: 457-503.
- ❖ Henfridsson U., Neimane V., Strand K., Kapper R., Bernhoff H., Danielsson O., Leijon M., Sundberg J., Thorburn K., Ericsson E., Bergman K. (2007). Wave energy potential in the Baltic Sea and the Danish part of the North Sea, with reflections on the Skagerrak. *Renewable Energy* 32: 2069-2084.
- ❖ Henry A., Doherty K., Cameron L., Whittaker T., Doherty R. Advances in the design of the Oyster wave energy converter. Royal Institution of Naval Architect's Marine and Offshore Renewable Energy Conference, April 2010.
- ❖ Hughes Michael G., Heap Andrew D. (2010). National-scale wave energy resource assessment for Australia. *Renewable Energy* 35: 1783-1791.
- ❖ IEA| Ocean Energy Systems Annex II Report 2003, Implementing Agreement on Ocean Energy Systems, Development of recommended practices for testing and evaluating ocean energy systems.
- ❖ International Energy Agency's Ocean Energy Systems Implementing Agreement (IEA- OES) 2009. Potential opportunities and differences associated with integration of ocean wave and marine current energy plants in comparison to wind energy.
- ❖ IPCC Scoping Meeting on Renewable Energy Resources, Germany, 2008.
- ❖ IPCC Scoping Meeting on Renewable Energy Sources-Proceedings. Olav Hohmeyer, Tom Trittin. Lübeck, Germany, 20 – 25 January, 2008.
- ❖ Knapp Wilfried, Holmen Evald, Schilling Rudolf. Considerations for Water Turbines to be used in Wave Energy Converters.
- ❖ Kofoed J.P, Frigaard P, Madsen E.F, Sorensen H.C (2006). Prototype testing of the wave energy converter wave dragon. *Renewable Energy* 31:181–189.

- ❖ Korres G., Lascaratos A. (2003). A one-way nested eddy resolving model of the Aegean and Levantine basins: implementation and climatological runs. *Annales Geophysicae* 21: 205–220.
- ❖ Lascaratos Alex, Roether Wolfgang, Nittis Kostas, Klein Birgit (1999). Recent changes in deep water formation and spreading in the Mediterranean Sea: a review. *Progress in Oceanography* 44: 5-36.
- ❖ Lemonis George (2004). Wave and Tidal Energy Conversion. *Encyclopedia of Energy*, Volume 6.
- ❖ Lihui Guo (2010). Master's Thesis: Applicability and potential of wave power in China.
- ❖ Manases Tello Ruiz (2010). Master thesis: Dynamics and Hydrodynamics for floating wave energy converters.
- ❖ Murray Robin D., (2004). Economic Wave Energy Resource Assessment Methodology & European Assessment.
- ❖ Nittis K., Perivoliotis L. (2002). Circulation and hydrological characteristics of the North Aegean Sea: a contribution from real-time buoy measurements. *Mediterranean Marine Science*, Vol.3/1, 21-31.
- ❖ Norris J.V., Droniou E. Update on EMEC activities, resource description, and characterization of wave-induced velocities in a tidal flow. *Proceedings of the 7th European Wave and Tidal, Energy Conference*, Portugal, 2007.
- ❖ Olson D. B., Kourafallou V. H, Johns W. E., Geoff S., Veneziani M. (2007). Aegean Surface Circulation from a Satellite-Tracked Drifter Array. *JOURNAL OF PHYSICAL OCEANOGRAPHY*, Vol: 37.
- ❖ Pawar Yogesh N. (2010). A seminar on energy research: Bulge wave energy by rubber Anaconda.
- ❖ Poem group (1992). General circulation of the Eastern Mediterranean. *Earth-Science Reviews* 32: 285-309.
- ❖ Pontes M. Teresa, Falcao Antonio. Ocean energies: resources and utilization. 18th Congress, Buenos Aires, October 2001, World Energy Council.
- ❖ Poulos S. E., Drakopoulos P. G., Collins M. B. (1997). Seasonal variability in sea surface oceanographic conditions in the Aegean Sea (Eastern Mediterranean): an overview. *Journal of Marine Systems* 13: 225-244
- ❖ Robinson Michael C. Renewable Energy Technologies for Use on the Outer Continental Shelf, 6 June 2006.

- ❖ Sofianos S., Skliris N., Vervatis V., Olson D., Kourafalou V., Lascaratos A., Johns W. (2005). On the Forcing Mechanisms of the Aegean Sea Surface Circulation. *Geophysical Research*, Vol: 7.
- ❖ Soukissian Takvor, Prospathopoulos Aristides, Hatzinaki Maria and Kabouridou Maria (2008). Assessment of the Wind and Wave Climate of the Hellenic Seas Using 10-Year Hindcast Results. *The Open Ocean Engineering Journal*, Vol. 1:1-12.
- ❖ Technology White Paper on Ocean Current Energy Potential on the U.S. Outer Continental Shelf, 2006.
- ❖ The Engineering Business Ltd (2003). STINGRAY Tidal Stream Energy Device-Phase2.
- ❖ Theocharis A., Balopoulos E., Kiorogloy S., Kontoyiannis H., Iona A. (1999). A synthesis of the circulation and hydrography of the South Aegean Sea and the Straits of the Cretan Arc (March 1994–January 1995). *Progress in Oceanography* 44, 469–509.
- ❖ Theocharis A., Georgopoulos D., Laskaratos A., Nittis K. (1993). Water masses circulation in the central region of th Eastern Mediterranean: Eastern Ionian, South Aegean and Northwest Levantine, 1986-1987. *Deep-Sea Research II*, Vol.40, No.6, pp. 1121-1142.
- ❖ Thorpe T.W (1999). A brief review of wave energy. A report produced for the UK department of Trade and Industry.
- ❖ Thorpe T.W. An Overview of Wave Energy Technologies: Status, Performance and Costs. *Wave Power: Moving towards Commercial Viability*, 30 November 1999, Broadway House, Westminster, London.
- ❖ Tidal & Current Energy Resources in Ireland (report), SEI (Sustainable Energy Ireland), Name of Contractor: Kirk McClure Morton, Queens University Belfast, Natural Power Consultants, Completion Date: Dec 2004.
- ❖ Tzali M., Sarantis S., Mantziafou A., Skliris N. (2010). Modelling the impact of Black Sea water inflow on the North Aegean Sea hydrodynamics. *Ocean Dynamics*, DOI 10.1007/s10236-010-0277-3.
- ❖ Valerio Duarte, Beirao Pedro, Jose Sa da Costa (2007). Optimization of wave energy extraction with the Archimedes Wave Swing. *Ocean Engineering* 34: 2330–2344.
- ❖ Vining Jennifer Guinevere, 2007. Master Thesis, Ocean wave energy converters: overview, legal and economic aspects, and direct-drive power take-off.
- ❖ Walt Musial. Wave, Wind and Tidal Technologies and Future Trends. *Alternative energy development in the West Coast ocean environment*, 23/10/2008 Portland, Oregon.
- ❖ WaveNet: Results from the work of the European Thematic Network on Wave Energy, March 2003.

- ❖ Zavatarelli Marco, Mellor George L. (1994). A numerical study of the Mediterranean Sea circulation. *Journal of physical oceanography* Vol 25: 1384- 1414.
- ❖ Βουρδουμπάς Γ. (2006). Δοκίμια για την ενέργεια: Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και άλλες ενεργειακές τεχνολογίες.
- ❖ Γιουρούκου Δήμητρα (2011). Διπλωματική εργασία με θέμα: Μελέτη της επίδρασης της παλιρροιακής διακύμανσης, στη γενική κυκλοφορία της λεκάνης της Λεβαντίνης, με χρήση υδροδυναμικού αριθμητικού μοντέλου.
- ❖ Ελληνική Επιστημονική Ένωση Αιολικής Ενέργειας. Αξιοποίηση του υπεράκτιου αιολικού δυναμικού με θαλάσσια αιολικά πάρκα.
- ❖ Ζερβός Αρθούρος (2011). Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας. Σελ: 123-124, 272-275, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, Τομέας Ρευστών.
- ❖ Λεμονής Γιώργος. Κυματική ενέργεια στην Ευρώπη, εθνικές δραστηριότητες και προοπτικές αξιοποίησης. Ημερίδα με θέμα την «Κυματική Ενέργεια», 21/10/2010.
- ❖ Σουκισιάν Τακβόρ Χ., Προσπαθόπουλος Αριστείδης Μ. (2003). Εφαρμογή του Κυματικού Μοντέλου 3ης Γενιάς WAM-Cycle 4 στο Αιγαίο Πέλαγος. *Τεχν. Χρον. Επιστ. Έκδ. ΤΕΕ, IV*, τεύχ. 1-2.

ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΕΣ ΔΙΕΥΘΥΝΣΕΙΣ

- ❖ http://www.oc.phys.uoa.gr/workshop/Aegean_Draft_Report_f.htm (Aegean Sea workshop. Draft report, Rhodes, Greece, October 8-10, 2002)
- ❖ http://users.ntua.gr/ddeli/GSE/2_GSE_SatAlt.html
- ❖ http://www.geo.auth.gr/courses/gge/gge768e/E_OCEAN_ALBANAKIS/PDF/KEF_7_KYMATA.pdf
- ❖ http://www.wrsc.org/attach_image/average-anual-wave-power
- ❖ http://thefraserdomain.typepad.com/energy/ocean_power/
- ❖ <http://www.oceanlinx.com>
- ❖ <http://www.aw-energy.com/concept.html>
- ❖ <http://www.aquamarinepower.com/>
- ❖ http://www.thermalfluidscentral.org/encyclopedia/index.php/Power_Generation_from_Waves
- ❖ <http://www.eepe.murdoch.edu.au/resources/info/Tech/wave/index.html>
- ❖ www.aquaret.com
- ❖ <http://www.strath.ac.uk/>
- ❖ <http://www.openhydro.com>
- ❖ <http://www.orpc.co>
- ❖ <http://www.tidalstream.co.uk>
- ❖ <http://www.marineturbines.com>
- ❖ <http://www.hammerfeststrom.com>
- ❖ <http://www.lunarenergy.co.uk/newsDetail.php?id=14>
- ❖ <http://www.reuk.co.uk/Lunar-Energy-Tidal-Power.html>
- ❖ <http://www.see.murdoch.edu.au/resources/info/Tech/tidal/index.html>
- ❖ <http://www.minesto.com/deepgreentechnology/index.html>
- ❖ <http://www.see.murdoch.edu.au/resources/info/Tech/tidal/index.html>
- ❖ <http://www.darvill.clara.net/altenerg/tidal.htm>
- ❖ http://www.greenrhinoenergy.com/renewable/marine/tidal_range.php
- ❖ http://users.ntua.gr/ddeli/GSE/2_GSE_SatAlt.html
- ❖ <http://www.power-technology.com/projects/greenoceanenergywav/>
- ❖ <http://www.lorc.dk/Knowledge/Wind/Support-structures/Floating-structure-combining-wind-and-wave>

