

ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

Διπλωματική Εργασία

“ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΣΚΟΠΙΜΟΤΗΤΑΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ
ΕΠΑΚΤΙΩΝ ΚΥΜΑΤΙΚΩΝ ΣΥΣΚΕΥΩΝ ΣΕ ΛΙΜΑΝΙΑ ΤΟΥ ΑΙΓΑΙΟΥ
ΠΕΛΑΓΟΥΣ.”

«Statistical analysis of the feasibility of installing shoreline wave energy
devices at Aegean Sea Ports»

Τζιβίλογλου Μαρία
Α.Μ. 2013050012

Επιβλέπων Καθηγητής: Τρύφων Δάρας
Επιβλέπων Ερευνητής: Τακβόρ Σουκισσιαν

Χανιά, Οκτώβριος 2019

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για μη κερδοσκοπικό σκοπό, εκπαιδευτικού ή ερευνητικού χαρακτήρα, με την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για άλλη χρήση θα πρέπει να απευθύνονται προς το συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Πολυτεχνείου Κρήτης.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά, τον επιβλέποντα καθηγητή κ. Τρύφωνα Δάρα για την πολύ καλή συνεργασία που είχαμε καθ' όλη την διάρκεια εκπόνησης της εργασίας αυτής.

Τον κύριο Τακβόρ Σουκισσιάν για αναθεση αυτού του τόσο ενδιαφέροντος θέματος, την καθοδήγηση και την εμπιστοσύνη του.

Το Ελληνικό Κέντρο Θαλασσίων Ερευνών για την πολύτιμη βοήθεια.

Θα ήθελα ακόμα να ευχαριστήσω την κα Κολοκοτσά που δέχτηκε να συμμετάσχει στην αξιολόγηση της εργασίας μου.

Τέλος να ευχαριστήσω την οικογένεια και τους φίλους μου που στάθηκαν δίπλα μου με υπομονή μέχρι και το τέλος.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	2
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	6
ABSTRACT	7
1. “ΚΥΜΑΤΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ”	8
1.1. Εισαγωγή	8
1.2. Ορισμοί και Βασικά Μεγέθη	11
1.1. Εκτίμηση Κυματικού Δυναμικού	12
1.3. Παγκόσμιοι Ενεργειακοί Πόροι	15
1.4. Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της κυματικής ενέργειας - Περιβαλλοντικές επιπτώσεις	17
2. ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΗΣ ΤΗΣ ΚΥΜΑΤΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	19
2.1. Η εξέλιξη των τεχνολογιών εκμετάλλευσης της κυματικής ενέργειας	19
2.1.1. Οι πρώτες τεχνολογίες	19
2.1.2. Από το 1990 μέχρι και σήμερα.	22
2.2. Βασικά χαρακτηριστικά και κατηγορίες τεχνολογιών εκμετάλλευσης της κυματικής ενέργειας	23
2.2.1. Τύπος και τοποθεσία εγκατάστασης	24
2.2.2. Μέγεθος συσκευής και χαρακτηριστικά κατεύθυνσης κύματος	25
2.2.3. Αρχή Λειτουργίας	27
2.2.4. Άλλες Τεχνολογίες	31
2.3. Παλλόμενη Στήλη Ύδατος (ΠΣΥ) - Oscillating Water Column (OWC)	32
2.3.1. Αρχή Λειτουργίας της Συσκευής	32
2.3.2. Η ιστορική εξέλιξη της ΠΣΥ	34
2.3.3. Τεχνολογίες Παλλόμενης Στήλης Ύδατος (ΠΣΥ)	35
3. “ΚΥΜΑΤΙΚΟ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟ ΔΥΝΑΜΙΚΟ ΤΗΣ ΕΛΛΑΔΟΣ”	43
3.1. Εισαγωγή	43
3.2. Μέθοδοι εκτίμησης του κυματικού δυναμικού	45
3.2.1. Είδη Κυματικών Δεδομένων	45
3.2.2. Πηγές Κυματικών Δεδομένων	46
3.3. Κυματικό Ενεργειακό Δυναμικό του Αιγαίου Πελάγους	52
3.3.1. Άτλαντας Ανέμου και Κύματος των Ελληνικών Θαλασσών	52
3.3.2. Εκτίμηση Κυματικού Δυναμικού Των Ελληνικών Θαλασσών	55
4. “ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΚΑΙ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΘΗΚΑΝ”	64
4.1. Στάδια Της Μελέτης	64
4.2. Επιλογή Παράκτιας Κυματικής Συσκευής	65

4.3.	Επιλογή Νησιωτικών Περιοχών Βάση Του Κυματικού Δυναμικού	66
4.4.	Αριθμητικών Δεδομένων και Διαδικασία Επεξεργασίας Τους	68
5.	ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ	69
5.1.	Ανάλυση και Σχολιασμός Των Επιλεγμένων Νησιωτικών Περιοχών	69
5.2.	Σύγκριση Αποτελεσμάτων Έρευνας - Τελική Επιλογή Λιμανιού	88
6.	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	91

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η ανάπτυξη της ανθρώπινης δραστηριότητας είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με την κατανάλωση ενέργειας. Η αύξηση του πληθυσμού και η άνοδος του βιοτικού επιπέδου, οδηγούν στην ραγδαία αύξηση της κατανάλωσης ενέργειας, σε παγκόσμιο επίπεδο. Έτσι η ικανοποίηση των ενεργειακών αναγκών δεν μπορεί να καλυφθεί πλήρως από τις συμβατικές πηγές ενέργειας που οδηγούνται σε εξάντληση. Στο πλαίσιο αυτού του «ενεργειακού προβλήματος» που ανακύπτει, η αξιοποίηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και η ενσωμάτωσή τους στην ενεργειακή αγορά με την εμπορική εκμετάλλευσή τους καθίσταται πιο αναγκαία από ποτέ.

Η συγκεκριμένη διπλωματική εργασία ασχολείται με μια νέα και όχι τόσο ευρέως διαδεδομένη κυρίως στην χώρα μας, ανανεώσιμη πηγή ενέργειας, με σημαντικές προοπτικές εκμετάλλευσης στο άμεσο μέλλον. Πρόκειται για την ενέργεια που παρέχεται από την θάλασσα. Το δυναμικό της ενέργειας του θαλάσσιου κυματισμού μπορεί να έχει αξιοσημείωτη συνεισφορά στην παραγωγή ενέργειας από Ανανεώσιμες Πηγές (ΑΠΕ). Παρ' ότι οι μηχανές κυματικής ενέργειας σχεδιάζονται και δοκιμάζονται εδώ και τρεις δεκαετίες, δεν έχουν φτάσει σε ώριμη εμπορική μορφή, όπως συμβαίνει με τεχνολογίες που εκμεταλλεύονται άλλες μορφές ΑΠΕ. Επίσης, καμία από τις τεχνολογίες που δοκιμάζονται δεν έχει αποδειχθεί ως η βέλτιστη τεχνολογία και για τον λόγο αυτό υπάρχει μεγάλο περιθώριο για την προώθηση νέων ιδεών.

Στην παρούσα λοιπόν εργασία, αρχικά γίνεται μια ανασκόπηση του θεωρητικού υποβάθρου σχετικά με τη ενέργεια και πιο συγκεκριμένα την κυματική ενέργεια, την προέλευση και την δημιουργία των θαλάσσιων κυματισμών, καθώς και με τα κύρια πλεονεκτήματα της χρήσης αυτής της ενέργειας. Στην συνέχεια γίνεται αναφορά στις τεχνολογίες εκμετάλλευσης της κυματικής ενέργειας, η ιστορική τους εξέλιξη, αλλά και οι κατηγορίες στις οποίες διακρίνονται ανάλογα με τον τρόπο λειτουργίας τους και την τοποθεσία εγκατάστασής τους. Έπειτα στην 3η ενότητα, περιγράφονται τα απαραίτητα στοιχεία για την εκτίμηση του κυματικού δυναμικού στις Ελληνικές θάλασσες και συγκεκριμένα στα νησιά του Αιγαίου Πελάγους. Από την ανάλυση αυτών των δεδομένων επιλέχθηκαν ορισμένες νησιωτικές περιοχές, έξω από την λιμενική περιοχή των οποίων εμφανίζονται υψηλές τιμές κυματικού δυναμικού. Στην συνέχεια, στην 5η ενότητα, γίνεται σύγκριση των επιμέρους πλεονεκτημάτων και μειονεκτημάτων της κάθε περίπτωσης, καταλήγοντας στην πρόταση μιας περιοχής που θα θεωρείται κατάλληλη, για την εγκατάσταση της τεχνολογίας.

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η διερεύνηση των δυνατοτήτων εγκατάστασης επάκτιας κατασκευής κυματικής ενέργειας ενσωματωμένη σε κυματοθραύστη σε λιμάνι νησιού του Αιγαίου Πελάγους, με σκοπό την αξιοποίηση της κυματικής ενέργειας για την τροφοδότηση ηλεκτρικής ενέργειας για τις ανάγκες του νησιού.

Η μελέτη κατέληξε στις εξής προτάσεις:

- Πρόταση για εγκατάσταση επάκτιας κυματικής κατασκευής Παλλόμενης Στήλης Ύδατος, ενσωματωμένη σε κυματοθραύστη.
- Λαμβάνοντας υπόψη το κυματικό δυναμικό των νησιών του Αιγαίου και άλλα κριτήρια σχετικά με τον κυματοθραύστη που βρίσκεται στο κάθε λιμάνι που μελετήθηκε, καταλληλότερο νησί για την εγκατάσταση της παραπάνω κατασκευής είναι η Κρήτη και πιο συγκεκριμένα το λιμάνι του Πλατανιά.

Λέξεις Κλειδιά:

Κυματική Ενέργεια, Ανανεώσιμη Ενέργεια, Παράκτια Κυματική Ενέργεια, Αιγαίο Πέλαγος, Τεχνολογία Παλλόμενης Στήλης Ύδατος

ABSTRACT

The development of human activity is inextricably linked to energy consumption. Population growth and rising living standards lead to a rapid increase in global energy consumption. Satisfying energy needs cannot be fully met by conventional sources of depletion. In the context of this emerging 'energy problem', the exploitation of renewable energy sources and their integration into the energy market by commercial exploitation is becoming more necessary than ever.

This thesis deals with a new and less widely used renewable energy source in Greece, with significant prospects for exploitation in the near future. This is the energy provided by the sea. The energy potential of marine ripple can have a significant contribution to the production of renewable energy. Although wave power engines have been designed and tested for three decades, they have not reached commercial form, as is the case with technologies utilizing other forms of renewables. Also, none of the technologies being tested have proven to be the dominant technology and therefore there is room for promoting new ideas.

In the present thesis, therefore, first there is an overview of the theoretical background on energy and specifically on wave energy, the origin and creation of waves, as well as the main advantages and disadvantages of using this energy. Reference is made to the technologies of wave energy exploitation, their historical evolution, as well as the categories in which they are distinguished according to their mode of operation and location. Then, in the third section, the necessary data for the estimation of wave potential in the Greek seas and in particular the islands of the Aegean are described. The analysis of these data reveals some areas outside of the Aegean islands' ports where high dynamic values are present. In section 5, after comparing the individual advantages and disadvantages of each case, it is concluded to propose an area considered appropriate for the technology installation.

The purpose of this thesis is to explore the potential of installing surface energy for the construction of wave energy embedded in a wind farm at a port in the Aegean Sea, with the aim of harnessing the energy to supply electricity to the island.

The study concluded:

- Proposal for installation of offshore Wave Water Pillar construction incorporated on a breakwater.
- Taking into account the wave dynamics of the Aegean islands and other criteria regarding the decline in each of the ports examined, the most appropriate island for installation is Crete and more specifically the port of Platanias.

Keywords:

Wave Energy, Renewable Energy, Coastal Wave Energy, Aegean Sea, Water Pulse Technology

1. “ΚΥΜΑΤΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ”

1.1. Εισαγωγή

Η επιφάνεια της θάλασσας βρίσκεται συνεχή κίνηση, με διαρκείς αναταράξεις. Φυσικά φαινόμενα, όπως ο άνεμος, οι μεταβολές της θερμοκρασίας, της πίεσης και της πυκνότητας, αλλά ακόμα και οι βαρυτικές αλληλεπιδράσεις της Γης με τον Ήλιο και τη Σελήνη μεταφέρουν ενέργεια, η οποία προξενεί τις περιοδικές κινήσεις των μορίων του νερού. Αυτή η κίνηση του νερού στους ωκεανούς του κόσμου δημιουργεί ένα τεράστιο απόθεμα κινητικής ενέργειας, την λεγόμενη **Θαλάσσια Ενέργεια (Blue Energy)**, ή αλλιώς **Ενέργεια των ωκεανών**.



Εικόνα 1.1: Απεικόνιση Κύματος

(Πηγή: <https://www.irena.org/ocean>)

Η θαλάσσια ενέργεια υπάρχει σε διάφορες μορφές στις θάλασσες και τους ωκεανούς. Αποτελεί μια ανανεώσιμη μορφή ενέργειας και μπορεί να αντληθεί με διάφορους τρόπους, οι οποίοι αξιοποιούν την **ρευστοδυναμική** της περιοχής και τις **φυσικοχημικές ιδιότητες** του νερού. Οι κυριότερες μορφές της θαλάσσιας ενέργειας που μπορούν να εκμεταλλευτούν είναι:

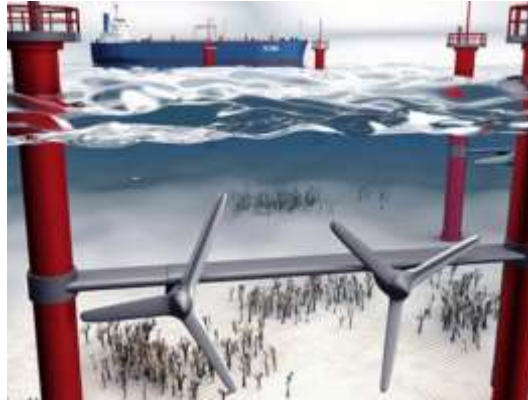
- i) η **Ανεμογενής Κυματική Ενέργεια**: η οποία οφείλεται στην κινητική ενέργεια του ανέμου, η οποία ασκείται στην ανώτερη επιφάνεια των ωκεανών
- ii) η **Ενέργεια από Παλίρροιες**: οι βαρυτικές έλξεις που αναπτύσσονται μεταξύ της Σελήνης, τη Γης και του Ήλιου, έχουν σαν αποτέλεσμα την ανοδική και καθοδική κίνηση της στάθμης της θάλασσας



Εικόνα 1.1 Κυματικές συσκευές εκμετάλλευσης της κυματικής ενέργειας.

(Πηγή: www.elem.tee.gr)

iii) η **Ενέργεια από Ρεύματα**: α) τα **Θαλάσσια Ρεύματα**, τα οποία οφείλονται στην κυκλοφορία του νερού είτε στην επιφάνεια της θάλασσας είτε στο εσωτερικό της και β) τα **Παλιρροιακά Ρεύματα**, τα οποία οφείλονται στην άνοδο και την πτώση της στάθμης της θάλασσας από παραλιακές περιοχές,



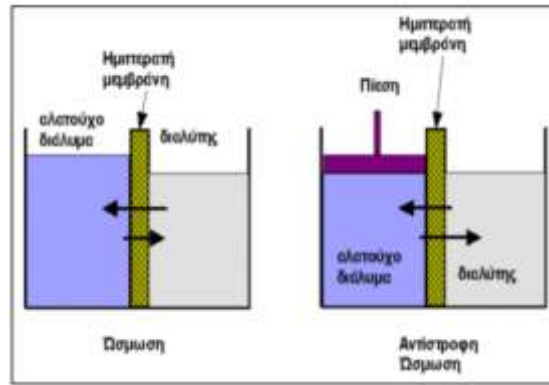
Εικόνα 1.2. Συσκευές εκμετάλλευσης της παλιρροιακής ενέργειας
(Πηγή: www.thebest.gr)

iv) το **θερμοκλινές** του θαλάσσιου νερού: το οποίο αποτελεί ένα στρώμα έντονης πτώσης της θερμοκρασίας ανάμεσα σε άλλα θερμότερα στρώματα, το οποίο ονομάζεται θερμοκλινές. Στους ωκεανούς αποτελεί μόνιμο χαρακτηριστικό με πολύ μικρή εποχιακή μεταβολή και ονομάζεται μόνιμο θερμοκλινέ,



Εικόνα 1.3. Θερμική στρωμάτωση βαθιάς λίμνης
(Πηγή: kpe-kastor.kas.sch.gr/)

v) η **ωσμωτική ενέργεια**: η οποία οφείλεται στην μεταβολή της πυκνότητας λόγω της διαφορετικής αλατότητας δυο στρωμάτων. [A31, A32]



Εικόνα 1.4. : Σχηματική αναπαράσταση όσμωσης και αντίστροφης όσμωσης.

Τα κύματα βαρύτητας που στην βιβλιογραφία αναφέρονται και ως **ανεμογενή κύματα** παρουσιάζουν την υψηλότερη ενεργειακή συγκέντρωση και είναι τα πιο σημαντικά από την άποψη των επιπτώσεων τους στον άνθρωπο. Δυνατοί άνεμοι πρέπει να είναι παρόντες για αρκετό χρονικό διάστημα για να ξεκινήσουν την δημιουργία πλήρως ανεπτυγμένων κυμάτων και αυτό πρέπει να συμβαίνει για τακτά χρονικά διαστήματα στην διάρκεια ενός έτους ώστε να δημιουργήσουν μια χρήσιμη πηγή ενέργειας.

Στην διαμόρφωση των κυμάτων της συγκεκριμένη κατηγορίας παίζουν ρόλο τα εξής:

- i) η ταχύτητα και η διεύθυνση του ανέμου
- ii) το μέτωπο του κύματος ή αλλιώς το αναπτύγμα του, δηλαδή την απόσταση πάνω στην επιφάνεια της θάλασσας στην οποία ταξιδεύει ο άνεμος χωρίς να συναντήσει κάποιο εμπόδιο.
- iii) η διάρκεια πνοής του ανέμου και τέλος
- iv) η μορφολογία και το βάθος του πυθμένα της θάλασσας.

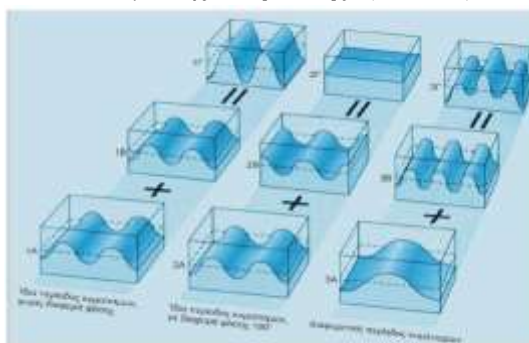
Σε πολλές περιπτώσεις σημαντικό ρόλο στην διαμόρφωση του κύματος φαίνεται να παίζουν και παράγοντες όπως το πλάτος πνοής (fetch width) και η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ νερού και αέρα. Ισχυρά κύματα δημιουργούνται από τον συνδυασμό ανέμων με σταθερή διεύθυνση, μεγάλη ταχύτητα και μεγάλο μέτωπο κύματος. Παρόλα αυτά ισχυρά κύματα μπορούν να δημιουργηθούν και από ισχυρούς ανέμους αλλά για μικρό μέτωπο. [A38]

Οι ανεμογενείς κυματισμοί που παρατηρούνται σε μια θαλάσσια περιοχή, διακρίνονται σε **θάλασσες** (seas) και σε **αποθάλασσες** ή ρεστίες (swells). Στην πρώτη κατηγορία, οι κυματισμοί επηρεάζονται απευθείας από το υποκείμενο τυρβώδες πεδίο ροής του ανέμου, ενώ οι δεύτεροι είναι το αποτέλεσμα της διάδοσης των πρώτων, οι οποίοι έχουν όμως παραχθεί από την δράση του ανέμου σε άλλες περιοχές. Οι διαφορές στην μορφολογία των θαλασσών και των αποθαλασσών είναι πολλές

Στην πρώτη περίπτωση, οι **θάλασσες** είναι κυματισμοί έντονα “ανακατεμένοι”, παρουσιάζουν βραχείες κορυφές και η διάδοση τους γίνεται προς διάφορες κατευθύνσεις. Επίσης σε αυτήν την κατηγορία κυματισμών, παρατηρείται μεγάλη τιμή του λόγου ύψους κύματος, με αποτέλεσμα συχνά να συμβαίνει θραύση των κυματισμών και εμφάνιση αφρού.

Ενώ στην περίπτωση των **αποθαλασσών**, οι κυματισμοί είναι πιο ομαλοί και λείοι, σχεδόν ημιτονοειδείς. Παρουσιάζουν επιμήκεις κορυφές, η κατεύθυνση διαδοσης τους είναι σαφής και όσων αφορά την διάταξή τους, ο λόγο ύψους προς μήκος είναι μικρός. Εάν οι συγκεκριμένοι κυματισμοί δεν βρεθούν κάτω από την επίδραση άλλου τοπικού πεδίου ανέμου ή άλλου αιτίου διέγερσης τύρβης, η ροή στο νερό μπορεί να θεωρηθεί μη τυρβώδης και συνήθως δεν εμφανίζει και θραύση κυματισμών.

Παρατηρώντας την επιφάνεια της θάλασσας δεν φαίνεται να υπάρχει ομοιογένεια στις μορφές των κυμάτων. Αυτό οφείλεται στο γεγονός πως στην πράξη έχουμε διάφορους κυματισμούς που συμβάλλουν μεταξύ τους με διάφορους συνδυασμούς διαφοράς φάσης και έτσι η μορφή της θαλάσσιας επιφάνειας είναι αποτέλεσμα της **υπέρθωσης**. (Εικ. 1.5)

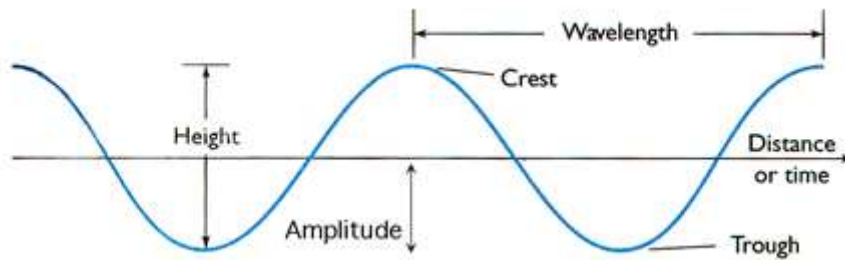


Εικόνα 1.5: Σχηματική απεικόνιση υπέρθεσης κυματισμών

1.2. Ορισμοί και Βασικά Μεγέθη

Κυματισμός ορίζεται κάθε περιοδική ή μη περιοδική διαταραχή της επιφάνειας της θάλασσας, σε ένα πεπερασμένο ή άπειρο πεδίο. Τα μεγέθη εκείνα που χαρακτηρίζουν έναν κυματισμό είναι: (Εικ. 1.6.)

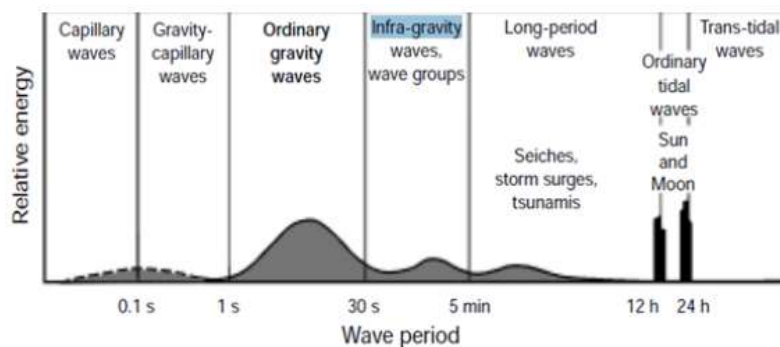
- το **μήκος κύματος** (Wave Length) (λ ή L) [m]: η οριζόντια απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών κορυφών,
- το **πλάτος** (Amplitude) (α) [m]: η κάθετη απόσταση ανάμεσα στην κορυφή του κύματος και στη στάθμη ηρεμίας,
- το **ύψος κύματος** (Wave Height) (H_s) [m]: η κάθετη απόσταση ανάμεσα σε ένα χαμήλωμα (Trough) και την αμέσως επόμενη κορυφή (Crest),
- το **σημαντικό ύψος κύματος** (Significant Wave Height) [m]: η μέση τιμή ύψους (από κορυφή σε κοιλιά) του ενός τρίτου των υψηλότερων κυμάτων σε μια περιοχή. Το πιθανό αναμενόμενο μέγιστο ύψος κύματος μπορεί να φτάσει μέχρι δύο φορές το υπολογιζόμενο σημαντικό ύψος,
- η **περίοδος** (Period) (T) [s]: ο χρόνος που απαιτείται για να περάσουν δύο διαδοχικές κορυφές από ένα ορισμένο σημείο,
- η **ταχύτητα διάδοσης** (Wave Velocity) (U) [m/s]: βρίσκεται σε μεγάλη προσέγγιση από τον λόγο του μήκους κύματος προς την περίοδο ($U=\lambda/T$)



Εικόνα 1.6: Σχηματική απεικόνιση των βασικών χαρακτηριστικών ενός κύματος
(Πηγή: www.eoas.ubc.ca)

Τα κύματα ανάλογα με την περίοδο τους μπορούν να χαρακτηριστούν ως εξής: (Εικ. 1.7)

- i) **Τριχοειδή** (Capillary waves): για περίοδο T έως 0,1sec
 - ii) **Τριχοειδή - Βαρύτητας** (Gravity - capillary waves): για περίοδο μεταξύ 0,1 - 1sec
 - iii) **Βαρύτητας** (Ordinary gravity waves): για περίοδο μεταξύ 1 - 30sec
 - iv) **Υπο-Βαρύτητας** (Infra-gravity waves): με περίοδο μεταξύ 30sec - 5min
- Ενώ τα κύματα με περίοδο πάνω από 5min, προέρχονται είτε από τσουνάμι είτε από παλίρροιες.



Εικόνα 1.7: Χαρακτηρισμός κυμάτων με βάση την περίοδο τους.

Τέλος, στα πλαίσια της μελέτης των κυμάτων, σημαντική είναι και η αναφορά στις κύριες ιδιότητες τους.

1.1. Εκτίμηση Κυματικού Δυναμικού

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω (Παράγραφος 3.1), μια από τις βασικές αιτίες κυματισμού είναι η κινητική ενέργεια του ανέμου. Η κινητική ενέργεια μιας μάζας αέρα m που μετατοπίζεται με ταχύτητα u , εκφράζεται από την εξής σχέση:

$$E = \frac{1}{2} m u^2 \quad (1)$$

Ενώ, για αέρα πυκνότητας ρ , που διέρχεται με ταχύτητα u , από μια συγκεκριμένη διατομή A , η ροή μάζας υπολογίζεται από:

$$\dot{m} = \frac{dm}{dt} = \rho u A \quad (2)$$

Το ποσό ενέργειας E, που περνά μέσα από την διατομή A και παράγουν η κινητική ενέργεια του κινούμενου αέρα και η ροής μάζας, είναι ίδιο με την ισχύ P και δίνονται από την σχέση:

$$P = \dot{E} = \frac{1}{2} \dot{m} u^2 = \frac{1}{2} \rho A u u^2 = \frac{1}{2} \rho A u^3 \quad (3)$$

Όπου ρ: η πυκνότητα του αέρα (ρ = 1,225 kg/m³)

A: η επιφάνεια αναφοράς (m²) και

u: η ταχύτητα του ανέμου (m/s)

Τέλος, η αιολική ενέργεια που πραγματοποιείται ανα μονάδα επιφάνειας (A=1 m²) υπολογίζεται από:

$$\frac{P}{A} = \frac{1}{2} \rho u^3 \quad (4)$$

Σε αυτό το σημείο θα πρέπει να αναφερθεί το γεγονός, ότι οι παραπάνω ιδανικές σχέσεις αναφέρονται σε ιδανικές περιπτώσεις ροής, δηλαδή χωρίς την παρουσία τριβής. Όπως επίσης θα πρέπει να εξεταστεί και ο μετατροπείας αιολικής ενέργειας, καθώς ακόμα και σε ιδανική ροή αέρα, χωρίς απώλειες μετατροπής, ο λόγος της εξαχθείσας μηχανικής ενέργειας προς την ισχύ που περιέχεται στον άνεμο (C_p), περιορίζεται στην τιμή C_p=0,593. Άρα, από την συνολική αιολική ενέργεια μόνο το περίπου 60% μπορεί να μετατραπεί σε μηχανική ισχύ. Όταν ο ιδανικός συντελεστής ισχύος επιτυγχάνει τη μέγιστη τιμή C_p=0.593, η ταχύτητα του ανέμου στο επίπεδο της ροής του μετατροπεία ισοδυναμεί με τα δύο τρίτα της μη διαταραγμένης ταχύτητας ανέμου και μειώνεται στο ένα τρίτο πίσω από το μετατροπεία.

Όσον αφορά την θεωρητική εκτίμηση της κυματικής ενέργειας, θα πρέπει αρχικά να θεωρηθεί η παρουσία απλών κυματισμών και ακολούθως μια ρεαλιστική θαλάσσια κατάσταση στην οποία υπάρχουν πολλά αρμονικά κύματα με διαφορά φάσης. Σύμφωνα με την γραμμική θεωρία, για έναν προοδευτικό μονοχρωματικό κύμα με πλάτος a, ύψος κύματος H=2 m και κυκλική συχνότητα ω, η συνολική ενέργεια ανά μονάδα επιφάνειας είναι το άθροισμα της κινητικής (E_k) και της δυναμικής ενέργειας (E_p):

$$E = E_k + E_p = \frac{1}{16} \rho g H^2 + \frac{1}{16} \rho g H^2 = \frac{1}{8} \rho g H^2 \quad (5)$$

Όπου, ρ: η πυκνότητα του θαλασσινού νερού (1025 kg/m³)

g: η επιτάχυνση της βαρύτητας (9.81 m/s²) και

H: το ύψος κύματος (m).

Η ενέργεια αυτή, ονομάζεται **πυκνότητα κυματικής ενέργειας E** και εκφράζει την μέση ροή ενέργειας ανά μονάδα επιφάνειας διαμέσου ενός επιπέδου κάθετου στην κατεύθυνση του κύματος. Με μονάδες μέτρησης J/m², όπου 1 J = (1/3600) Wh.

Συνήθως για την περιγραφή του κύματος, χρησιμοποιείται και η **κυματική ισχύς P** (wave power), ή αλλιώς ροή ενέργειας, που μεταδίδεται ανα μήκος μετώπου του κύματος διαμέσου ενός επιπέδου κάθετου στη διεύθυνση της κίνησης του κύματος. Σε βαθιά νερά είναι ανεξάρτητη του βάθους και δίνεται από την σχέση:

$$P_{\text{wave-front}} = \frac{1}{32\pi} \rho g^2 H^2 T \quad (6)$$

Με λίγα λόγια, παρατηρούμε πως η παραγόμενη κυματικής ισχύς είναι ανάλογη του ύψους κύματος και της περιόδου.

Η διάδοση των ανεμογενών κυμάτων γίνεται με την κατεύθυνση των τοπικών ανέμων και εξαρτώνται άμεσα από την ταχύτητά τους. Αντίθετα με την γραμμική θεωρία, σε μια ρεαλιστική κατάσταση θάλασσας ένα κύμα, αποτελείται από πολλά κύματα, με διαφορετική συχνότητα, μήκος και κατεύθυνση διάδοσης. Σε ένα δεδομένο σημείο της θάλασσας παρατηρούνται κυματικές συνθήκες σε διάστημα μερικών ωρών (καταστάσεις θάλασσας) οι οποίες περιγράφονται συνοπτικά από την κατανομή της ενεργειακής πυκνότητας $S_f(\cdot, \theta)$ (directional spectrum). Στην πράξη χρησιμοποιούνται συνήθως ορισμένα μόνον φασματικά χαρακτηριστικά όπως είναι το σημαντικό ύψος κύματος, η μέση ενεργειακή περίοδος ή η περίοδος κορυφής φάσματος και η μέση κατεύθυνση. Σε πραγματικές καταστάσεις θάλασσας και σε βαθιά νερά η κυματική ισχύς για μία δεδομένη κατάσταση θάλασσας δίνεται από την σχέση που ακολουθεί:

$$P = \frac{\rho g^2}{64\pi} H_{m_0}^2 T_p \approx \left(0.5 \frac{kW}{m^3 s} \right) H_{m_0}^2 T_p, \quad (7)$$

σε kW/m μετώπου κύματος. Όπου:

$H_{m_0} = H_s$: το σημαντικό ύψος κύματος (m) που δίνεται από την σχέση:

$$H_{m_0} = H_s = 4\sqrt{m_0}, \quad (8)$$

και

$T_p = 2\pi/\omega_p$, είναι η **φασματική περίοδο κορυφής** (s), όπου ω_p είναι η φασματική συχνότητα κορυφής. Μία άλλη σχέση που χρησιμοποιείται στην βιβλιογραφία για τον υπολογισμό της κυματικής ενέργειας σε μια κατάσταση θάλασσας είναι:

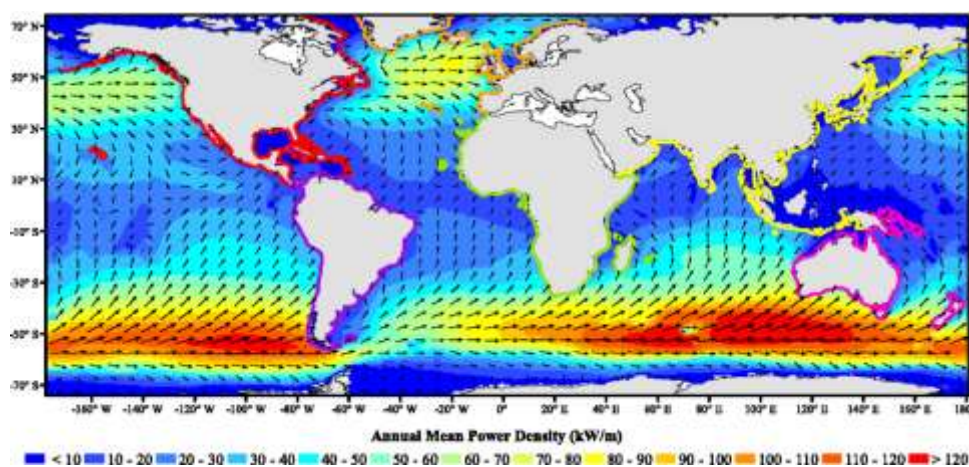
$$P = \frac{\rho g^2}{64\pi} H_{m_0}^2 T_e \approx \left(0.5 \frac{kW}{m^3 s} \right) H_{m_0}^2 T_e, \quad (9)$$

όπου T_e είναι η **ενεργειακή περίοδος** που δίνεται από τη σχέση: [A33, A35]

$$T_e = \frac{m_{-1}}{m_0} \quad (10)$$

1.3. Παγκόσμιοι Ενεργειακοί Πόροι

Η κυματική ισχύς όπως προαναφέρθηκε και στην προηγούμενη ενότητα, είναι ο ρυθμός με τον οποίο η κυματική ενέργεια μεταδίδεται κατα την κατεύθυνση της διάδοσης του κύματος. Τα υψηλότερα επίπεδα κυματικής ενέργειας στον πλανήτη μας εμφανίζονται στις περιοχές του Ανατολικού Ατλαντικού και του Νότιου Ειρηνικού. Στην εικόνα 1.8. απεικονίζεται ο παγκόσμιος χάρτης κυματικής ισχύος, όπου παρουσιάζεται η μέση κυματική ισχύς ανα m μετώπου κύματος σε kW/m, στις διάφορες περιοχές της Γης. [A36]



Εικόνα 1.8.: Παγκόσμιος Χάρτης Κυματικής Ισχύος [A36]

Στην εικόνα 1.8 τα απεικονιζόμενα βέλη, δείχνουν τη μέση κατεύθυνση (δηλαδή την κατεύθυνση των διανυσμάτων πυκνότητας ισχύος). Αυτό καταδεικνύει ότι οι θαλάσσιες τοποθεσίες με το μεγαλύτερο ενδιαφέρον, σε ότι αφορά το κυματικό τους ενεργειακό στις δυτικές ακτές των ορεινών περιοχών, καθώς η μέση κατεύθυνση κυμαίνεται κυρίως από δυτικά προς ανατολικά. Οι υψηλότερες τιμές κυματικού ενεργειακού δυναμικού εντοπίζονται κατά κύριο λόγο μεταξύ της 40ης και της 60ης γραμμής γεωγραφικού πλάτους βορρά και νότου, με μεγαλύτερη αναλογία στο νότιο ημισφαίριο.

Οι χώρες που βρίσκονται σε καλύτερη θέση όσον αφορά τη μετατροπή ωκεάνιας κυματικής ενέργειας είναι η Μεγάλη Βρετανία, η Ιρλανδία και η Νορβηγία, η Νέα Ζηλανδία και η νότια Αυστραλία, καθώς και η Χιλή ακολουθούμενες από την Ισπανία και την Πορτογαλία, τις ακτές της Βορείου και Νοτίου Αμερικής και τη Νότια Αφρική.

Ανάλογα με τον προσανατολισμό της ακτογραμμής, ιδίως στα νησιά, και των σημαντικών καταστάσεων της θάλασσας (π.χ. καιρικές συνθήκες στο σημείο δημιουργίας των κυμάτων), τα κύματα μπορεί να φτάσουν στην περιοχή προορισμού υπό διαφορετικές συνθήκες. Στις ακτές της δυτικής Ευρώπης, ιδιαίτερα της Πορτογαλίας, Ισπανίας και Γαλλίας, οι θερινοί μήνες (π.χ. Ιούνιος – Σεπτέμβριος και ιδίως Ιούλιος – Αύγουστος) μπορεί να είναι εξαιρετικά φτωχοί σε κυματικούς πόρους. Εκτός από τη σημασία της όσον αφορά τη συμβατότητα των γενικών επιπέδων κυματικής ενέργειας μεταξύ διαφορετικών περιοχών, η ετήσια μέση ενέργεια μπορεί να οδηγήσει σε παραπλανητικά αποτελέσματα εάν δεν ερμηνευθεί σε συνδυασμό με την εποχιακή της

διαφοροποίηση. Οι ετήσιες μέσες τιμές μπορεί να βασίζονται σε υψηλά επίπεδα ενέργειας, τα οποία δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν, αλλά ενδέχεται να έχουν καταστροφικές εντάσεις σε σύντομα χρονικά διαστήματα, καθώς και μεγάλα χρονικά διαστήματα με σχεδόν καθόλου εκμεταλλεύσιμο πόρο. Είναι σημαντικό η περιοδικότητα αυτή να μην είναι δυσανάλογη με την τοπική ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας, εάν πρόκειται να συμβάλλει σημαντικά η κυματική ενέργεια στον εφοδιασμό της περιοχής με ηλεκτρική ενέργεια.

Στην Εικόνα 1.9 παρουσιάζεται ο χάρτης κυματικής ισχύος για την Ευρώπη. Παρατηρείται ότι οι υψηλότερες τιμές εμφανίζονται στις δυτικές ακτές της Ευρώπης οι οποίες βρέχονται από τον Ατλαντικό Ωκεανό. Οι υψηλότερες τιμές εμφανίζονται κατά κύριο λόγο στις περιοχές όπου υπάρχουν ισχυροί άνεμοι, οι οποίοι έχουν διασχίσει μεγάλες αποστάσεις. Συγκεκριμένα οι χώρες που εμφανίζουν το υψηλότερο κυματικό δυναμικό είναι το Ηνωμένο Βασίλειο, η Ιρλανδία, η Ισλανδία, η Νορβηγία, η Πορτογαλία, καθώς και η Γαλλία και η Ισπανία. Σε ετήσια βάση, ο μέσος όρος κυματικής ισχύος για τις ευρωπαϊκές χώρες σε ακτές στον Ανατολικό Ατλαντικό Ωκεανό κυμαίνεται σε 25 με 70 kW/m, ενώ στην Βόρεια Θάλασσα 10 με 25 kW/m.

Στην περιοχή του Αιγαίου, το οποίο το οποίο αποτελεί τον καλύτερο ενεργειακό πόρο της Μεσογείου, εμφανίζονται τιμές κυματικού δυναμικού μεταξύ 4 και 13 kW/m. Το Αιγαίο εμφανίζει σχετικά μεγάλο μήκος μετώπου κύματος και υψηλό αιολικό δυναμικό.



Εικόνα 1.9.: Ο χάρτης της Ευρώπης στον οποίο φαίνεται πάνω η ετήσια μέση κυματική ισχύς με τιμές σε kW/m. [A39]

Σε πολλές χώρες στην Ευρώπη, βρίσκονται σε εξέλιξη προγράμματα έρευνας για την αξιοποίηση αυτού του τόσο μεγάλου ενεργειακού πόρου. Η δέσμευση ωστόσο, στην αξιοποίηση της ενέργειας των κυμάτων εξαρτάται έντονα από τον διαθέσιμο πόρο ενέργειας κυμάτων. Σε χώρες με μεγάλους πόρους, η ενέργεια από τα κύματα θα μπορούσε να καλύψει σημαντικό μέρος της ενεργειακής ζήτησης στη χώρα και να γίνει ακόμη πρωταρχική πηγή ενέργειας. Οι χώρες με μέτριους, αν και εφικτούς πόρους, θα μπορούσαν να χρησιμοποιήσουν συμπληρωματική ενέργεια κύματος σε άλλες διαθέσιμες ανανεώσιμες ή / και συμβατικές πηγές ενέργειας. Η εντατική έρευνα πάνω σε αυτόν τον τομέα ξεκίνησε το 1973, με την άνοδο της τιμής του πετρελαίου. Ενώ, το 1986 και πιο εντατικά το 1993 ξεκίνησε η χρηματοδότηση ερευνητικών προγραμμάτων από την Ευρωπαϊκή Ένωση. Σε χώρες όπως η Δανία και η Σουηδία, οι οποίες είναι χώρες με παράδοση στον τομέα των ΑΠΕ, παρατηρείται μεγάλη ερευνητική δραστηριότητα. [A12 , A39]

1.4. Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της κυματικής ενέργειας - Περιβαλλοντικές επιπτώσεις

Όπως όλες οι Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας, έτσι και η κυματική ενέργεια, παρουσιάζει πολλά πλεονεκτήματα, όπως είναι η **συνεχώς ανανεώσιμη και πρακτικά ανεξάντλητη ενέργεια** της αλλά και οι ελάχιστοι ή ακόμα και **μηδενικοί δείκτες ρύπανσης** σε επίπεδο κύκλου ζωής, καθώς δεν χρησιμοποιείται κανένα είδος καύσιμης ύλης για την παραγωγή της. Επίσης, η παραγωγή μπορεί να αποκεντρωθεί και να εφαρμοστεί ανεξάρτητα από τις εισαγωγές, ενισχύοντας έτσι την οικονομία της κάθε χώρας. Τέλος, τα **αποθέματα της πρώτης ύλης** υπάρχουν σε αφθονία μιας και το υδάτινο στοιχείο καλύπτει το 75% της επιφάνειας του πλανήτη.

Όσων αφορά τις τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται για την εκμετάλλευση της κυματικής ενέργειας, ένα από τα βασικά πλεονεκτήματα που παρουσιάζουν είναι το σχετικά **σύντομο χρονικό διάστημα που απαιτείται για την ολοκλήρωση ενός έργου**, από την φάση της έρευνας, έως την εγκατάσταση και την ομαλή λειτουργία μιας τέτοιας μονάδας. Είναι επίσης **φιλικές προς το περιβάλλον**, καθώς δεν παράγονται απόβλητα κατά την λειτουργία τους. Όπως επίσης, ορισμένες διατάξεις έχουν την δυνατότητα να **ενσωματωθούν** στις ήδη υπάρχουσες δομές, όπως είναι οι κυματοθραύστες και τα αναχώματα, δίνοντας έτσι στα συγκεκριμένα στοιχεία πολλαπλές χρήσεις και επομένως μια **σημαντική προστιθέμενη αξία**.

Ειδικότερα τώρα η κυματική ενέργεια έχει τα ακόλουθα πρόσθετα πλεονεκτήματα σε σχέση με τις άλλες ΑΠΕ:

- Εμφανίζει τη **μεγαλύτερη ενεργειακή πυκνότητα** και τη μεγαλύτερη απόδοση ανά μονάδα επιφάνειας εγκατάστασης (area efficient) από τις υπόλοιπες ΑΠΕ. Με τον όρο ενεργειακή πυκνότητα (energy density) εννοούμε το ποσό ενέργειας που αποθηκεύεται (πιθανή ενέργεια) σε ένα δεδομένο σύστημα ανά μονάδα όγκου. Επίσης μπορεί να εκφραστεί και σε μονάδες ενέργειας ανά μονάδα επιφάνειας (m²) των εγκατεστημένων συστημάτων. Αντίστοιχος όρος υπάρχει και για την ισχύ (πυκνότητα ισχύος). Η θαλάσσια ενέργεια (κυματική και παλιρροιακή) εμφανίζει την υψηλότερη ενεργειακή πυκνότητα σε σύγκριση με τις υπόλοιπες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ). Αυτό μπορούμε να το κατανοήσουμε απλά, με το ακόλουθο παράδειγμα: η έντονη ηλιακή ακτινοβολία του τροπικού ήλιου μπορεί να αντιμετωπιστεί εύκολα με τη χρήση ενός σκίαστρου, ενώ ακόμη και στους πολύ δυνατούς ανέμους μπορεί να αντέξει ένα συνηθισμένο κτίριο. Όμως στη θάλασσα, για να αντιμετωπιστεί η ενέργεια των κυμάτων, στα λιμάνια κατασκευάζονται κυματοθραύστες πάχους πολλών μέτρων με χρήση ογκολίθων πολλών τόνων!
- Εμφανίζει **μεγάλη ενεργειακή σταθερότητα** (consistency) και αξιοπιστία, γεγονός που οφείλεται στην ικανότητα των κυμάτων να ταξιδεύουν σε μεγάλες αποστάσεις χωρίς σημαντική απώλεια ενέργειας.
- Είναι περισσότερο **προβλέψιμη** από την αιολική ενέργεια, με αποτέλεσμα να μπορεί να ενσωματωθεί ευκολότερα και αποτελεσματικότερα στο δίκτυο της ηλεκτρικής ενέργειας. Συνήθως το μέγεθος των κυμάτων μπορεί να προβλεφθεί με ακρίβεια 3 έως 5 μέρες πριν την εκδήλωσή τους.

- Επειδή εξαρτάται σημαντικά από την ταχύτητα του ανέμου, η αξιοποιήσιμη κυματική ενέργεια (όπως και η αιολική ενέργεια) είναι **μεγαλύτερη τον χειμώνα**, οπότε σημειώνεται και η μεγαλύτερη ενεργειακή ζήτηση. Στο βόρειο ημισφαίριο η μέση τιμή της κυματικής ενέργειας τον Νοέμβριο μπορεί να είναι δύο ή περισσότερες φορές μεγαλύτερη από αυτήν τον Μάιο. Για να καλύπτεται η ζήτηση όλες τις εποχές του έτους, καλό είναι να συνδυάζεται η κυματική ή η αιολική ενέργεια με την ηλιακή, που έχει τη μεγαλύτερη απόδοση το καλοκαίρι.
- Οι εγκαταστάσεις αξιοποίησης της κυματικής ενέργειας χωροθετούνται συνήθως σε απόσταση από την ακτή, ενώ οι επάκτιες προσαρμόζονται κατάλληλα στη διαμόρφωση της ακτής, με αποτέλεσμα **να μην προκαλούν οπτική όχληση** στους κατοίκους και στους επισκέπτες των γειτονικών περιοχών. Επιπλέον, στις υπεράκτιες εγκαταστάσεις τα κύματα έχουν μεγαλύτερο ενεργειακό περιεχόμενο, άρα και μεγαλύτερη παραγωγή ενέργειας.

Ωστόσο η παραγωγή ενέργειας από τα κύματα παρουσιάζει και πολλές δυσκολίες με την βασικότερη να εντοπίζεται στην πρώτη ύλη, την δύναμη από τα κύματα, όπου τα ποσά της ενέργειας που λαμβάνονται δεν είναι πάντα σταθερά. Αντίστοιχα στην παλίρροια η παραγωγή ενέργειας εξαρτάται από την κίνηση των υδάτων.

Τα κυριότερα μειονεκτήματα που παρουσιάζονται στις τεχνολογίες κυματικής ενέργειας 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 - πλαίσιο των μέσων καταπονήσεων. Αυτό απαιτεί υψηλό βαθμό μηχανικής αντοχής των κατασκευών, με αποτέλεσμα μεγάλο κατασκευαστικό κόστος. Απαιτείται επίσης πολύ προσεκτική επιλογή της τοποθεσίας στην οποία θα γίνει η εγκατάσταση της μονάδας, όπως για παράδειγμα ο προσανατολισμός της καθώς απαραίτητη προϋπόθεση για τα ποσοστά ενέργειας που θα παραχθούν, είναι η ύπαρξη δυνατών κυμάτων.

Το κυματικό δυναμικό εμφανίζει **μεγάλη χωρική διασπορά** και μειώνεται σημαντικά κοντά στις ακτές. Η μέγιστη ένταση συναντάται σε κύματα μακριά από την ακτή. Η μεγάλη απόσταση και η δυσπροσιτότητα υπεράκτιων ή υποβρύχιων εγκαταστάσεων δυσχεραίνει την κατασκευή, τον έλεγχο, τη συντήρηση, την ασφάλεια και την επισκευή τους και αυξάνει το κόστος διασύνδεσης και λειτουργίας τους, ενώ ταυτόχρονα απαιτεί την ανάπτυξη ενός εκτεταμένου μεταφορικού και αποθηκευτικού δικτύου για τη διασύνδεση παραγωγής και κατανάλωσης. Το υψηλό κόστος κατασκευής και λειτουργίας μπορεί να αντισταθμιστεί μόνο με την αξιοποίηση του κυματικού δυναμικού στο μέγιστο δυνατό βαθμό, δηλαδή την επίτευξη υψηλών δεικτών απόδοσης. Η τεχνολογική εξέλιξη έχει οδηγήσει μέχρι στιγμής σε σημαντική βελτίωση του δείκτη απόδοσης για τις περισσότερες τεχνολογίες, ενώ τα περιθώρια βελτίωσης παραμένουν μεγάλα. Για τον λόγο αυτό, εκτιμάται ότι η συνεχιζόμενη εξέλιξη της τεχνολογίας θα οδηγήσει σε περαιτέρω μείωση του ηλεκτροπαραγωγικού κόστους, σε επίπεδα συγκρίσιμα με αυτά των συμβατικών μορφών ενέργειας.

Τέλος, η κυματική ενέργεια όσον αφορά τις εμπορικές εγκαταστάσεις της βρίσκεται ακόμη στα πρώτα στάδια της ανάπτυξής της, με αποτέλεσμα να έχει προς το παρόν σχετικά υψηλό κόστος εγκατάστασης και αβεβαιότητα σχετικά με τη διάρκεια ζωής και τον χρόνο

λειτουργίας των εγκαταστάσεων. Έτσι προς το παρόν δεν εμφανίζονται οικονομικά βιώσιμες σε εμπορική κλίμακα, χωρίς εξωτερική χρηματοδότηση.

Οι **περιβαλλοντικές επιπτώσεις** που παρουσιάζονται ή είναι πιθανό να παρουσιαστούν, από την εγκατάσταση τεχνολογιών κυματικής ενέργειας, **είναι ήπιες**. Η οπτική και ηχητική όχληση, καθώς και οι παρεμβάσεις στο περιβάλλον πιθανόν να αποτελούν ανασταλτικό παράγοντα για παράκτιες εγκαταστάσεις, αν και, στη περίπτωση περιοχών με έντονη κυματική δραστηριότητα δεν ενδείκνυται για άλλου είδους αξιοποίηση, όπως είναι οι ιχθυοκαλλιέργειες ή η γενικότερη τουριστική εκμετάλλευση. Αντίθετα, όπως προαναφέρθηκε και στα πλεονεκτήματα παραπάνω, οι παράκτιες εγκαταστάσεις, με κατάλληλο σχεδιασμό, θα μπορούσαν να λειτουργήσουν σαν κυματοθραύστες ή να ενσωματωθούν σε ήδη υπάρχοντες δομές κυματοθραυστών, με σκοπό και την περαιτέρω προστασία της ακτής στη πρώτη περίπτωση ή την μείωση του κόστους εγκατάστασης στην δεύτερη περίπτωση. [A12, A40, A41]

2. ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΗΣ ΤΗΣ ΚΥΜΑΤΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

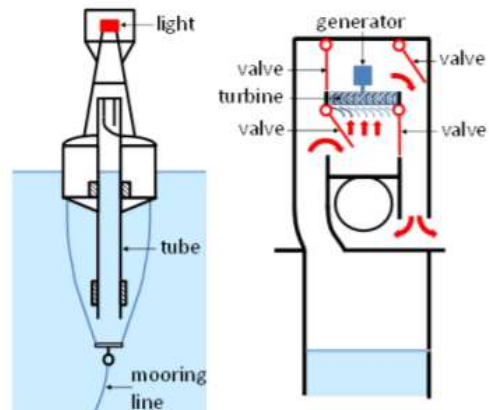
2.1. Η εξέλιξη των τεχνολογιών εκμετάλλευσης της κυματικής ενέργειας

2.1.1. Οι πρώτες τεχνολογίες

Η δυνατότητα μετατροπής της κυματικής ενέργειας σε χρήσιμη ενέργεια έχει εμπνεύσει πολλούς εφευρέτες. Περισσότερες από χίλιες ευρεσιτεχνίες έχουν καταγραφεί μέχρι το 1980 και ο αριθμός τους έχει αυξηθεί αισθητά έκτοτε. Το παλαιότερο δίπλωμα ευρεσιτεχνίας κατατέθηκε το 1799 από τον Γάλλο μηχανικό Pierre Girard και τον γιο του. [B1] Η συγκεκριμένη ευρεσιτεχνία αφορούσε την τεχνολογία παλλόμενης στήλης ύδατος (ΠΣΥ), η εφαρμογή της οποίας σκόπευε στην παραγωγή μηχανικής ενέργειας με σκοπό την μεταφορά και την επεξεργασία ξυλείας, αλλά δεν κατασκευάστηκε ποτέ. Το 1910 κατασκευάστηκε η πρώτη συσκευή ΠΣΥ, για την ηλεκτροδότηση της οικίας του Bochaux - Praceique στην περιοχή Royan, κοντά στο Bordeaux της Γαλλίας. Θεωρείται η πρώτη πραγματική εφαρμογή τεχνολογίας ΠΣΥ. [A1]

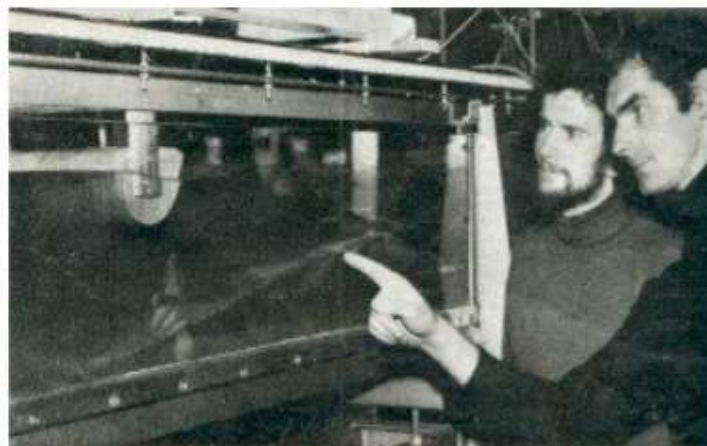
Ο Yoshio Masuda (1925-2009) (πρώην ιαπωνικός αξιωματικός του Ναυτικού) μπορεί να θεωρηθεί πατέρας της σύγχρονης τεχνολογίας κυμάτων ενέργειας, με μελέτες στην Ιαπωνία από τη δεκαετία του 1940. Ανέπτυξε μια πλωτή συσκευή πλοήγησης η οποία τροφοδοτούνταν από κυματική ενέργεια και ήταν εξοπλισμένη με έναν τετραπλό αεραγωγό. (Εικόνα 2.1) Η οποία συσκευή αργότερα ονομάστηκε (πλωτή) παλλόμενη στήλη ύδατος (ΠΣΥ) (oscillating water column - OWC). Οι συγκεκριμένες πλωτές συσκευές εμπορευματοποιήθηκαν στην Ιαπωνία από το 1965 και αργότερα στις ΗΠΑ. Αργότερα, το 1976 στην Ιαπωνία, ο Masuda προώθησε την κατασκευή μιας πολλής μεγαλύτερης συσκευής, μιας φορτηγίδας (80m x 12m), ονομαζόμενη Kaimei (Εικόνα 2.2), η οποία λειτουργούσε ως πλωτή πλατφόρμα δοκιμών που στέγαζε διάφορα συστήματα ΠΣΥ, εξοπλισμένα με διαφορετικούς τύπους αεροστροβίλων.

Εικόνα 2.1. Σχεδιάγραμμα της Ιαπωνικής πλωτής συσκευής πλοήγησης εξοπλισμένη με αεροστρόβιλο (Πηγή: Modeling of Wave Energy Conversion by Antonio F.O. Falcao, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, 2017).



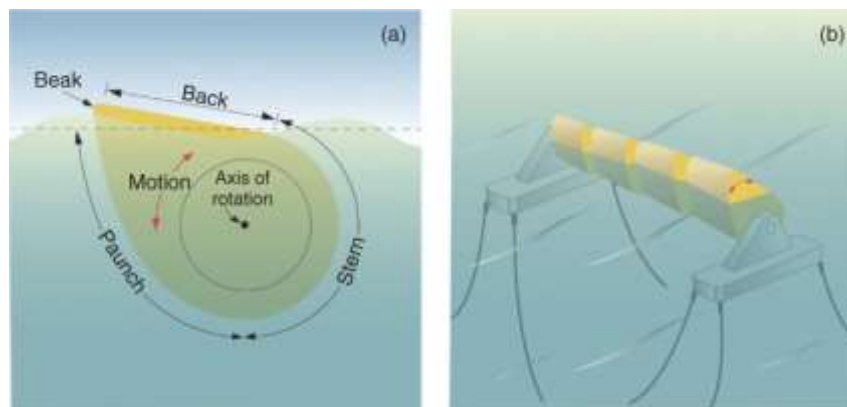
Εικόνα 2.2: Ο Ιαπωνικός πλωτός μετατροπέας της κυματικής ενέργειας Kaimei (Πηγή: Modeling of Wave Energy Conversion by Antonio F.O. Falcao, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, 2017).

Η πετρελαϊκή κρίση του 1973 προκάλεσε σημαντική αλλαγή στο σενάριο των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και αύξησε το ενδιαφέρον για την παραγωγή ενέργειας μεγάλης κλίμακας από τα κύματα. Ένα έγγραφο που δημοσιεύθηκε το 1974 στο διάσημο περιοδικό Nature από τον Stephen Salter, του Πανεπιστημίου του Εδιμβούργου, έγινε ένα ορόσημο και έφερε την ενέργεια των κυμάτων στην προσοχή της διεθνούς επιστημονικής κοινότητας. Η βρετανική κυβέρνηση ξεκίνησε το 1975 ένα σημαντικό ερευνητικό και αναπτυξιακό πρόγραμμα για την ενέργεια των κυμάτων, το οποίο ακολούθησε σύντομα η νορβηγική κυβέρνηση.



Εικ. 2.3 Αρχική εκπόνηση δοκιμών στην “Πάπια του Salter”, σε εργαστήριο του Πανεπιστημίου του Εδιμβούργου, 1974. Ο Stephen Salter φαίνεται στα αριστερά. (Πηγή: Modeling of Wave Energy Conversion by Antonio F.O. Falcao, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, 2017).

Στις αρχές της δεκαετίας του 1970, μετά την μεγάλη πετρελαϊκή κρίση, ξεκίνησε η πιο συντονισμένη και εντατική έρευνα στον τομέα της κυματικής ενέργειας, από διάφορες χώρες της Δυτικής Ευρώπης με ακτές προς τον Ατλαντικό, που είχαν υψηλό κυματικό δυναμικό. Τα Πανεπιστήμια του Εδιμβούργου (Εικ. 2.3), του Μπρίστολ, του Λάνκαστερ, του Νορβηγικού Τεχνολογικού Ινστιτούτου, της Ναυτικής Ακαδημίας των ΗΠΑ και το MIT, ήταν κάποια από τα Πανεπιστήμια των οποίων οι επιστήμονες μελέτησαν τις δυνατότητες της κυματικής ενέργειας. Σημαντική θεωρείται η επινόηση από τον Stephen Salter το 1974 της κυματικής συσκευής “**Πάπια του Salter**” ή αλλιώς “κουνιστή πάπια”. (Εικόνα 2.4) Πρόκειται για μια κυματική διάταξη σε σχήμα αχλαδιού, όπου η δράση των κυμάτων περιστρέφει γυροσκόπια που υπάρχουν στο εσωτερικό της συσκευής (με απόδοση 90%), και στην συνέχεια μέσω της γεννήτριας γίνεται μετατροπή της περιστροφικής κινητικής ενέργειας σε ηλεκτρική (με απόδοση 90%), άρα η συνολική απόδοση είναι 81%. [A1]



Εικόνα 2.4.: Η συσκευή κυματικής ενέργειας “Πάπια του Salter”

Κατά την δεκαετία του 1970 διαγράφονται θετικές προοπτικές για την κυματική ενέργεια και την εκμετάλλευσή της, παρά τα προβλήματα που προέκυπταν, όπως η καταστρεπτική δύναμη των ωκεάνιων κυμάτων στις συσκευές, όπου σε ορισμένες περιπτώσεις πρώιμων συσκευών τα αποτελέσματα δεν ήταν ικανοποιητικά. Όμως κατά την δεκαετία του 1980, μετά την πετρελαϊκή κρίση, παρατηρείται μείωση της τιμής του πετρελαίου με αποτέλεσμα η χρηματοδότηση της ενέργειας από τα κύματα να μειωθεί δραστικά. Παρ' όλα αυτά, μερικά πρωτότυπα πρώτης γενιάς αναπτύχθηκαν και δοκιμάστηκαν στη θάλασσα. Το 1985, έχουμε την κατασκευή δύο πρωτότυπων συσκευών εκμετάλλευσης της κυματικής ενέργειας πλήρους μεγέθους (ονομαστικής ισχύς 350 και 500 kW), σε ακτογραμμή του Toftefjallen της Νορβηγίας (Εικ. 2.5). Μέσα στα επόμενα έτη και μέχρι τις αρχές της δεκαετίας του 1990, η δραστηριότητα στην Ευρώπη παρέμεινε κυρίως σε ακαδημαϊκό επίπεδο, με το πιο αναγνωρισμένο επίτευγμα να είναι το 1991, μια μικρή ΠΣΥ που αναπτύχθηκε στο νησί Islay της Σκωτίας. (Εικ. 2.6)



Εικ. 2.5 (Αριστερή) Η πρωτότυπη συσκευή που τοποθετήθηκε 1985 σε ακτογραμμή στο Toftestallen της

Εικ. 2.6 (Δεξιά) ΠΣΥ που εγκαταστάθηκε το 1991 στο νησί Islay, Σκωτία, Ηνωμένο Βασίλειο
(Πηγή: Modeling of Wave Energy Conversion by Antonio F.O. Falcao, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, 2017).

2.1.2. Από το 1990 μέχρι και σήμερα.

Η κατάσταση στην Ευρώπη άλλαξε δραματικά μετά το 1991, όπου η Ευρωπαϊκή Επιτροπή υποστήριξε μια σειρά διεθνών συσκέψεων σχετικά με την κυματική ενέργεια, όπως αυτή στην Πάτρα το 1998, οι οποίες συνέβαλαν σημαντικά στην ενεργοποίηση και στον συντονισμό δραστηριοτήτων που γίνονται σε πανεπιστήμια, εθνικά ερευνητικά κέντρα αλλά και στον τομέα της βιομηχανίας. Τα πρώτα έργα άρχισαν το 1992. Έκτοτε, πολλά έργα για την ενέργεια των κυμάτων χρηματοδοτήθηκαν από την Ευρωπαϊκή Επιτροπή, με τη συμμετοχή μεγάλου αριθμού ομάδων που δραστηριοποιούνται στην Ευρώπη. [A2]

Τα συνέδρια για την ενέργεια των ωκεανών (με σημαντική ή κυρίαρχη συμβολή των εγγράφων για την ενέργεια των κυμάτων) γίνονται ολοένα και συχνότερα σε ετήσιες διασκέψεις για τη μηχανική των ωκεανών και στην ενέργεια, όπως το Παγκόσμιο Συνέδριο για τις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας. Το 2001, ο Διεθνής Οργανισμός Ενέργειας καθιέρωσε μια Συμφωνία Εφαρμογής για τα Ενεργειακά Συστήματα Ωκεανών (με παρευρισκόμενες 20 χώρες ως συμβαλλόμενα μέρη), η οποία είχε ως σκοπό τη διευκόλυνση και τον συντονισμό της έρευνας, της ανάπτυξης και της επίδειξης στον τομέα της ενέργειας στον ωκεανό μέσω της διεθνούς συνεργασίας ανταλλαγή πληροφοριών. [B1]

Τα τελευταία χρόνια, αυξάνεται το ενδιαφέρον για την ενέργεια των κυμάτων και στη Βόρεια Αμερική (ΗΠΑ και Καναδάς), όπου συμμετέχουν οι εθνικές και περιφερειακές διοικήσεις, τα ερευνητικά ιδρύματα και οι εταιρείες και οργανώνοντας συχνές συναντήσεις και συνέδρια με βασικό θέμα τους την ενέργεια των ωκεανών και την διαχείρισή της.

Τα τελευταία 45 χρόνια η κυματική ενέργεια έχει περάσει από φάσεις ενθουσιασμού, απογοήτευσης και επαναπροσδιορισμού. Παρόλα αυτά, οι επίμονες προσπάθειες στην έρευνα και στην ανάπτυξη σε συνδυασμό και με την εμπειρία που αποκτήθηκε όλα αυτά τα χρόνια, έχει παρατηρηθεί σημαντική βελτίωση στην απόδοση των τεχνολογιών εκμετάλλευσης της κυματικής ενέργειας, η οποία και έχει οδηγήσει σήμερα στην εμπορική τους εκμετάλλευση. Στον τομέα της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από την ενέργεια των κυμάτων είναι πολλές οι μονάδες οι οποίες έχουν αποδείξει την αντοχή τους κάτω από αντίξοες συνθήκες λειτουργίας και τόσο στην Ευρώπη

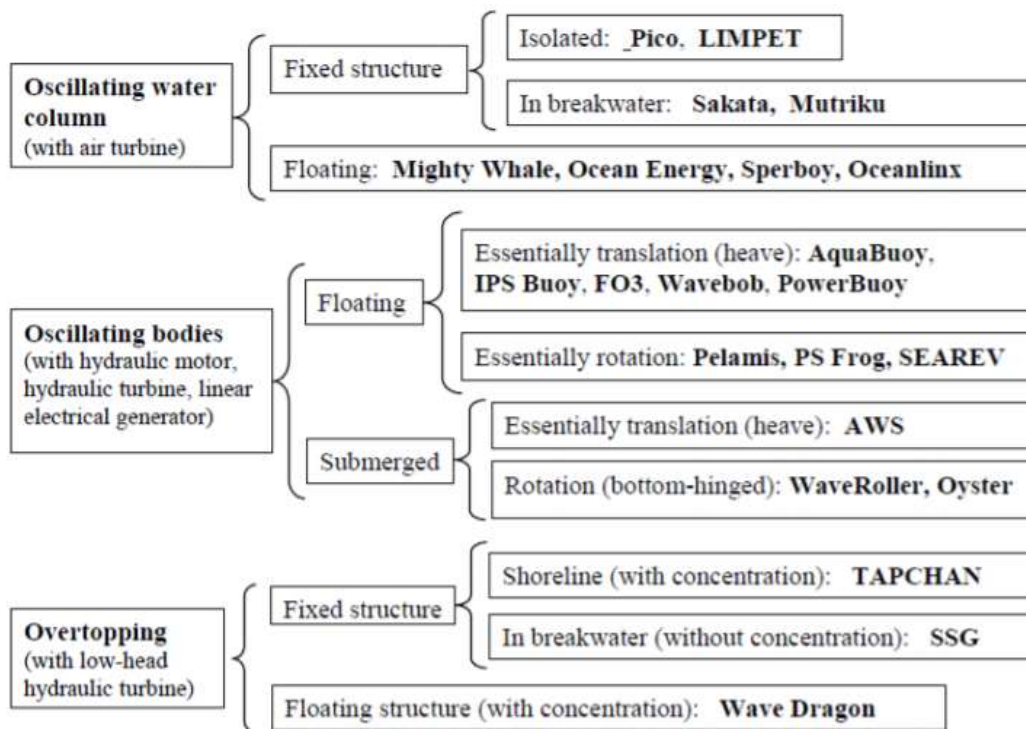
και την Ασία, όσο και στην Αυστραλία και σε άλλες χώρες, έχουν δημιουργηθεί εμπορικές εγκαταστάσεις. Στο τελικό επίσης στάδιο έρευνας και ανάπτυξης βρίσκονται και άλλες διατάξεις με προοπτικές για επιτυχή εφαρμογή. Ωστόσο, για να επιτευχθεί η βελτίωση και κυρίως η σταθεροποίηση της απόδοσης των τεχνολογιών αυτών, απαιτείται εκτενής έρευνα και ανάπτυξη, με σκοπό και την καθιέρωση της ανταγωνιστικότητας τους στην αγορά ενέργειας σε παγκόσμιο επίπεδο.

2.2. Βασικά χαρακτηριστικά και κατηγορίες τεχνολογιών εκμετάλλευσης της κυματικής ενέργειας

Κατά την δεκαετία του 1970 η Ιαπωνία και η Μεγάλη Βρετανία είναι οι μοναδικές χώρες στις οποίες μέσα από ερευνητικά προγράμματα ήταν οι χώρες στις οποίες κατάφεραν να αναδειχθούν οι δυνατότητες των συστημάτων κυματικής ενέργειας. Μετά από επίμονες προσπάθειες των ερευνητών τους, κατάφεραν να βελτιώσουν την απόδοση παραγωγικότητας των συγκεκριμένων συστημάτων. Έκτοτε έχουν καταχωρηθεί πάνω από 1200 ευρεσιτεχνίες για την παραγωγή ενέργειας από τα κύματα, ενώ παρατηρείται πληθώρα διαφορετικών διατάξεων και συστημάτων υψηλής τεχνολογίας, τα οποία έχουν ήδη δοκιμαστεί ή βρίσκονται σε φάση δοκιμών. Ωστόσο, όποια και να είναι η διάταξη που ακολουθεί η συσκευή σε κάθε περίπτωση, για την απόληψη της ενέργειας των κυμάτων και την μετατροπή της σε ωφέλιμο έργο απαιτείται η αλληλεπίδραση των κυματισμών με ένα Μετατροπέα Κυματικής Ενέργειας (ΜΚΕ, Wave Energy Converter, WEC).

Ο Μετατροπέας Κυματικής Ενέργειας είναι μια συσκευή πολλαπλών στοιχείων που μετατρέπει την κίνηση από την άνοδο και την κάθοδο των θαλάσσιων κυματισμών σε διάφορες μορφές ενέργειας. Οι σύγχρονοι ΜΚΕ βασίζονται στην ίδια αρχή λειτουργίας παρά τις πολυάριθμες παραλλαγές που παρουσιάζουν. Ένας ΜΚΕ αποτελείται από κάποιο κινούμενο ή ελαστικό σώμα που προσλαμβάνει την κυματική ενέργεια και ένα σύστημα εξαρτημάτων, πλωτήρων και ράβδων που αρχικά μετατρέπουν την ενέργεια αυτή στην επιθυμητή μορφή, που συνήθως είναι η ηλεκτρική ενέργεια. Στην συνέχεια η ενέργεια αυτή αποθηκεύεται ή διοχετεύεται απευθείας σε κάποιο δίκτυο μεταφοράς για άμεση κατανάλωση. Οι περιορισμοί στην τοποθέτηση των συγκεκριμένων συσκευών είναι ελάχιστες, καθώς μπορούν να τοποθετηθούν σε οποιοδήποτε σημείο στη θάλασσα. Έχουν την δυνατότητα να είναι υποβρύχιες, πλωτές ή να εγκατασταθούν στον πυθμένα της θάλασσας, ή ακόμα και να είναι σταθερές κατασκευές άνω στην ακτή.

Με το πέρασμα των χρόνων, έχει αναπτυχθεί μεγάλη ποικιλία μετατροπέων κυματικής ενέργειας, φθάνοντας στις μέρες μας να υπάρχουν πάνω από χίλια πρωτότυπα, τα οποία σε γενικές γραμμές μπορούν να ταξινομηθούν σύμφωνα με τρία βασικά χαρακτηριστικά: την τοποθεσία εγκατάστασης, το μέγεθος της συσκευής και την αρχή λειτουργίας της. Επομένως, κάθε ΜΚΕ μπορεί να ταξινομηθεί σε διαφορετικές ομάδες ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του και ανάλογα με τον τρόπο λειτουργίας του, μια συνοπτική παρουσίαση των οποίων ομάδων φαίνεται και παρακάτω στην Εικόνα 2.7 και στην συνέχεια ακολουθεί αναλυτική περιγραφή της κάθε μιας ομάδας. [A3, A4, A5]



Εικ. 2.7: Συνοπτική παρουσίαση των κατηγοριών των ΜΚΕ [Α5]

2.2.1. Τύπος και τοποθεσία εγκατάστασης

Μια πρώτη διάκριση των τεχνολογιών κυματικής ενέργειας βασίζεται στον **τύπο της εγκατάστασης** και χαρακτηρίζονται ως: **πλωτά** ή **σταθερά συστήματα**. Πιο αναλυτικά, στα πλωτά συστήματα ανήκουν εκείνα τα οποία επιπλέουν στη θάλασσα ή είναι υποβρύχια, ενώ τα σταθερά συστήματα είναι εγκατεστημένα σταθερά στις ακτές ή στα ρηχά ή είναι στερεωμένα στον βυθό (bottom-standing). (Εικ. 2.8)

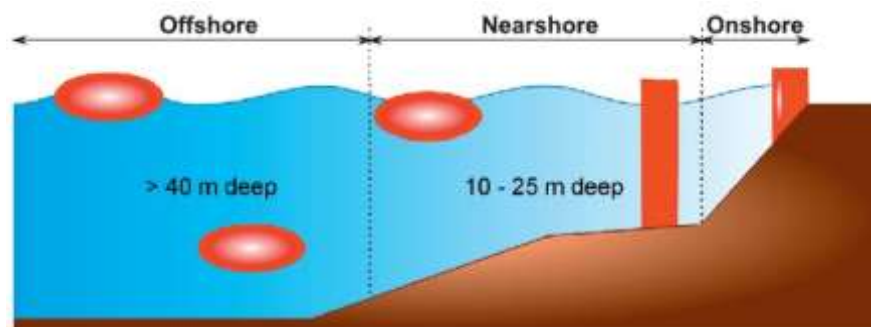
Τα **σταθερά συστήματα** έχουν σημαντικά πλεονεκτήματα συγκριτικά με τα πλωτά, στο κομμάτι της συντήρησής τους. Ωστόσο, ένα επίσης σημαντικό μειονέκτημα είναι ο περιορισμένος αριθμός των διαθέσιμων περιοχών οι οποίες μπορούν να θεωρηθούν κατάλληλες για την εγκατάσταση σταθερών συστημάτων. Ενώ, η παραγωγή ενέργειας στα **πλωτά συστήματα**, πηγάζει από την αρμονική κίνηση του πλωτού τμήματος της κατασκευής. Στην περίπτωση αυτών των συστημάτων οι οδηγοί ανεβαίνουν και κατεβαίνουν ανάλογα με την κίνηση του κύματος, μέσα από την οποία κίνηση παράγεται και η ηλεκτρική ενέργεια.

Ένα επίσης βασικό κριτήριο διάκρισης των ΜΚΕ είναι **απόσταση της τοποθέτησης της εγκατάστασης** τους σε σχέση με την ακτή. Το βάθος και η φορά του νερού, τα επίπεδα ισχύος και άλλα υδροδυναμικά χαρακτηριστικά που σχετίζονται άμεσα με τη μετατροπή την κυματικής ενέργειας εμφανίζουν διαφορές στο μέγεθός του ανάλογα με το βάθος των υδάτων και την απόσταση από την ακτή. Σε συνάρτηση λοιπόν με την απόστασή τους από την ακτή υπάρχουν τρεις κατηγορίες συσκευών: οι **επάκτιες** (onshore), οι **παράκτιες** (coastal ή nearshore) και οι **υπεράκτιες** (offshore). [Α6]

Οι **Επάκτιες Συσσκευές** (onshore), είναι σταθερές ή εγκατεστημένες στην ακτογραμμή, με βασικό πλεονέκτημά τους την εύκολη εγκατάσταση και συντήρησή τους. Οι συγκεκριμένες συσκευές δεν απαιτούν αγκυροβόληση σε μεγάλο βάθος υδάτων (λιγότερο από 10 μέτρα), ούτε και υποθαλάσσια ηλεκτρικά καλώδια μεταφοράς. Ωστόσο, υπόκεινται σε ένα κυματικό καθεστώς σημαντικά μικρότερης ισχύος, απώλεια η οποία μπορεί να ανακτηθεί, με την κατάλληλη επιλογή του σημείου εγκατάστασης.

Οι **Παράκτιες Συσσκευές** (offshore), εγκαθίστανται σε μέτριο βάθος υδάτων (περίπου 10-25 μέτρα), σε απόσταση μέχρι και 500 μέτρων από την ακτή. Σε αυτήν την περίπτωση εγκατάστασης μια βασική προϋπόθεση αποτελεί η επιφάνεια του πυθμένα, ο οποίος θα πρέπει να είναι ισόπεδος από άμμο ή ιλη χωρίς κάλυψη από πέτρε για το στρώσιμο ηλεκτρικών καλωδίων μεταφοράς στην ακτή. Οι παράκτιες συσκευές παρουσιάζουν σχεδόν τα ίδια πλεονεκτήματα με τις επάκτιες, αξιοποιώντας όμως κυματικό δυναμικό μεγαλύτερης ισχύος και έχουν την δυνατότητα να είναι και πλωτές και σταθερές στον πυθμένα της θάλασσας.

Τέλος, οι **Υπεράκτιες Συσσκευές**, είναι τοποθετημένες σε μεγάλο βάθος υδάτων (πάνω από 40 μέτρα) και πολύ μακριά από την ακτή, δίνοντας έτσι την ευκαιρία και εκμετάλλευση των πιο ισχυρών κυματικών επιπέδων. Η ενέργεια των κυμάτων στην ανοιχτή θάλασσα διατίθεται με την μορφή εναλλασσόμενων ανοδικών και καθοδικών κινήσεων του νερού. Οι συγκεκριμένες τεχνολογίες έχουν την δυνατότητα όπως και στην περίπτωση των παράκτιων συσκευών να είναι είτε πλωτές είτε σταθερές στον πυθμένα της θάλασσας.



Εικ. 2.8: Τοποθεσία εγκατάστασης συσκευών κυματικής ενέργειας

(Πηγή: López, I., Andreu, J.(2013). Review of wave energy technologies and the necessary power-equipment. Renewable and sustainable energy reviews)

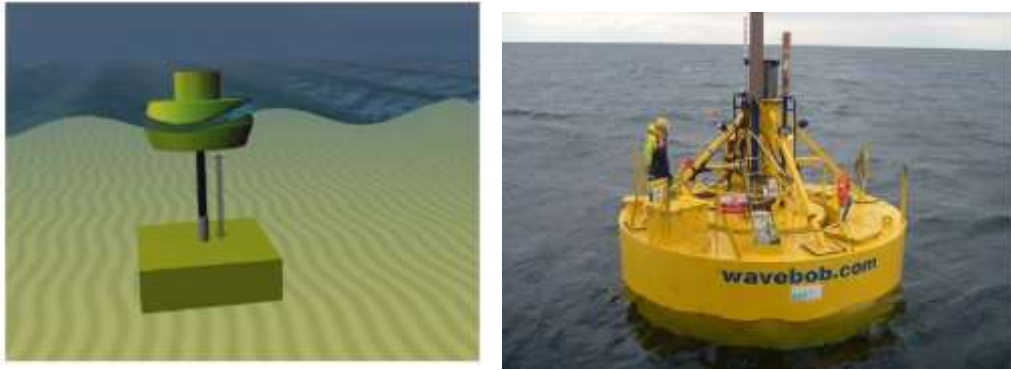
2.2.2. Μέγεθος συσκευής και χαρακτηριστικά κατεύθυνσης κύματος

Σύμφωνα με το μέγεθος της συσκευής και την κατεύθυνση της σε σχέση με τον απερχόμενο κυματισμό οι μετατροπείς κυματικής ενέργειας διακρίνονται στους εξής τύπους:

Σημειακοί Απολήπτες ή Απορροφητές (Point Absorbers):

Σύστημα που επιπλέει στην επιφάνεια και συγκρατείται με την βοήθεια καλωδίων τα οποία προσδένονται στον βυθό. Πρόκειται για μια πλωτή συσκευή σχετικά μικρών διαστάσεων, η διάμετρος είναι της τάξεως των λίγο μέτρων. Αντίθετα με τις υπόλοιπες τεχνολογίες κυματική ενέργειας είναι οι μόνες των οποίων η κίνηση δίνει την δυνατότητα να συλλέξουν την ενέργεια του κύματος από οποιαδήποτε κατεύθυνση κι αν προέρχεται αυτό. Ο σχεδιασμός της θυμίζει σημαδούρα (buoy) και ο σχεδιασμός της είναι αξονοκεντρικός. (Εικ.2.9) Η κατακόρυφη κίνηση της σημαδούρας

είναι απαραίτητη ώστε να επιτευχθεί η συμπίεση και αποσυμπίεση του αερίου ή υγρού που είναι εγκλωβισμένο στη συσκευή. Το ρευστό αναγκάζεται σε περιστροφή το σύστημα παραγωγής μηχανικής ενέργειας (για παράδειγμα τον ρότορα ενός στροβίλου) που συνδέεται με τον άξονα περιστροφής της ηλεκτρικής γεννήτριας. Έτσι η κατακόρυφη κίνηση των κυμάτων μετατρέπεται σε περιστροφική. [A5, A6]



Εικ. 2.9.: Υπεράκτια συσκευή σημειακού απορροφητή (αριστερά) (Πηγή: Ιστοσελίδα AQUARET) και η εφαρμογή Wavebob (δεξιά) [A7]

Το μικρό μέγεθος των συγκεκριμένων τεχνολογιών, διευκολύνει την λειτουργία και περισσότερων συστημάτων υπο κοινό θαλάσσιο καλώδιο με σκοπό την δημιουργία πάρκου επιθυμητής ονομαστικής ισχύος. Παραδείγματα σημειακών απορροφητών που έφτασαν στο επίπεδο της πραγματικής δοκιμής και λειτουργίας στη θάλασσα είναι οι συσκευές: OPT PowerBuoy (Ocean Power Technologies, ΗΠΑ/ΗΒ), AquaBuoy (Ιρλανδία) και WaveBob (Ιρλανδία). [A5, A6]

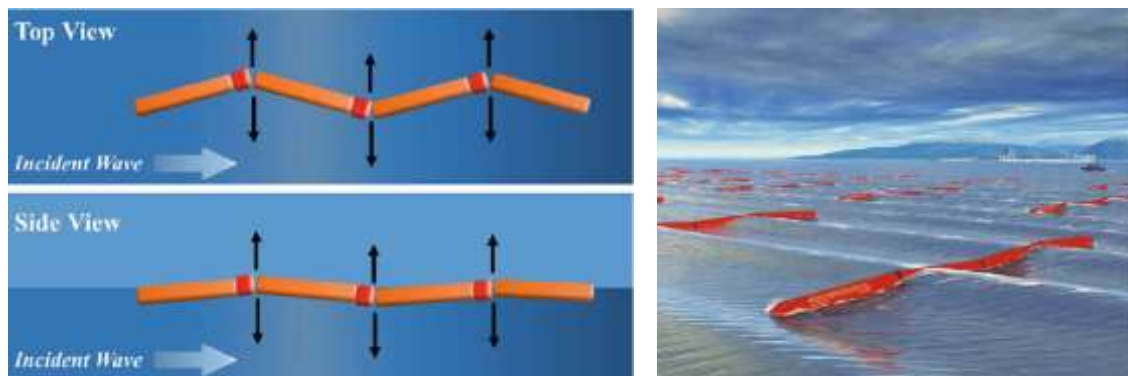
Εξασθενητές κυμάτων ή Αποσβεστήρες (Attenuators):

Αποτελεί μια είναι μια ημι-βυθισμένη αρθρωτή δομή αποτελούμενη από κυλινδρικές τομές που συνδέονται με αρθρωτές αρθρώσεις, τοποθετημένη παράλληλα προς την διεύθυνση διάδοσης του κύματος. (Εικ. 2.10) Με τις κινήσεις των κυματισμών, η συσκευή επιπλέει επί των διερχόμενων κυματισμών και αποσπά την ενέργεια τους με την επιλεκτική δέσμευση των κινήσεων καθ' όλο το μήκος της. Οι συσκευές συγκριτικά με άλλες όπου το κύμα τερματίζει την πορεία τους, έχουν μικρή μετωπική επιφάνεια προς το κύμα. Στις μέρες μας ένα σύστημα εξασθενητή κυματισμών είναι η συσκευή Pelamis (Εικ. 2.11) , ενώ παλαιότερα σχέδια ήταν η σχεδία Cockerel και για θαλάσσιες δοκιμές η αντλία MCCabe.



Εικ. 2.10.: Εξασθενητής κυματισμών (Πηγή: Ιστοσελίδα AQUARET)

Η συσκευή **Pelamis**, η οποία πήρε το όνομά της από το pelamis platurus, το οποίο είναι θαλάσσιο φίδι των τροπικών νερών, αναπτύχθηκε από Σκωτσέζικη εταιρεία. Αποτελεί μια από τις πρώτες υπεράκτιες συσκευές η οποία το 2004 παρήγαγε ρεύμα και συνδέθηκε επιτυχώς με το ηλεκτρικό δίκτυο, στο EMEC (European Marine Energy Center), στην Σκωτία.



Εικ. 2.11.: Τεχνολογία Pelamis [A8,A9]

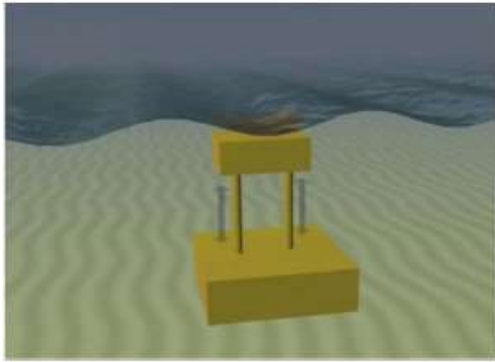
2.2.3. Αρχή Λειτουργίας

Βυθισμένοι μετατροπείς διαφορικής υδροστατικής πίεσης (Submerged pressure differential):

Οι συσκευές που ανήκουν σε αυτήν την κατηγορία μπορούν να διαιρεθούν σε δύο υποκατηγορίες, εκείνες που βασίζονται στην τεχνολογία της **AWS (Archimedes Wave Swing)** και και εκείνες που βασίζονται στην τεχνολογία της **Παλλόμενης στήλης ύδατος**.

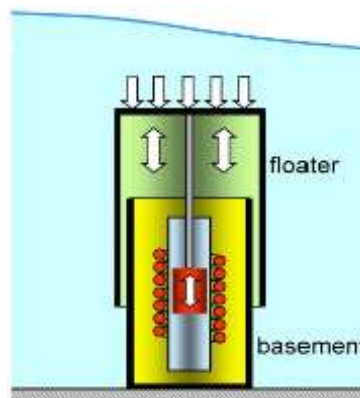
Στην πρώτη κατηγορία, που βασίζονται στην τεχνολογία της **AWS**, παρατηρούμε ένα παρεμφερές σύστημα με τον σημειακό απολήπτη. Πρόκειται για έναν απορροφητή δευτερεύοντος συγχωνευμένου σημείου, που βρίσκεται συνήθως κοντά στην ακτή και στερεώνεται στον πυθμένα της θάλασσας, ο οποίος όμως χρησιμοποιεί τη διαφορά πίεσης που δημιουργείται μεταξύ των κορυφών των κυμάτων και των κοιλοτήτων πάνω από τη συσκευή. Η κίνηση των κυμάτων προκαλεί πάνω από την συσκευή την άνοδο και την πτώση της στάθμης της θάλασσας, φαινόμενο στο οποίο οφείλεται στην δημιουργία υδροστατικής πίεσης, η οποία αναγκάζει την συσκευή να διαγράφει μια κατακόρυφη κίνηση από πάνω προς τα κάτω και αντίστροφα. (Εικ. 2.12)

Η συγκεκριμένη κατηγορία κυματικής ενέργειας παρουσιάζει αξιοσημείωτα χαρακτηριστικά σημειακής απορρόφησης, εάν και εφόσον γίνει σωστός σχεδιασμός για τη συγκεκριμένη θάλασσα στην οποία έχει προγραμματιστεί να τοποθετηθεί.



Εικόνα 2.12.: Τυπική μορφή μετατροπείας διαφορικής πίεσης (Πηγή: Ιστοσελίδα AQUARET)

Ένα καλό παράδειγμα υλοποίησης της σχεδίασης των βυθισμένων μετατροπέων διαφορικής υδροστατικής πίεσης, είναι η **AWS (Archimedes Wave Swing)**. (Εικ. 2.13) Μια τεχνολογία πλήρως βυθισμένης συσκευής ανόδου με καλά χαρακτηριστικά σημειακής απορρόφησης, η οποία αρχικά αναπτύχθηκε στην Ολλανδία. Στην συνέχεια και για αρκετά χρόνια η συσκευή μεταφέρθηκε στα πλαίσια ενός προγράμματος με σκοπό την θεωρητική και φυσική του μοντελοποίηση, με αποτέλεσμα να κατασκευαστεί ένα πρωτότυπο, με ονομαστική ισχύ 2MW (μέγιστη στιγμιαία ισχύς). Μετά από επιτυχείς δοκιμές το 2001, την επόμενη χρονιά εγκαταστάθηκε στον βυθό κοντά στις βόρειες ακτές της Πορτογαλίας, όπου και αναπτύχθηκε και δοκιμάστηκε με επιτυχία το δεύτερο εξάμηνο του 2004. Η AWS ήταν η πρώτη τεχνολογία κυματικής ενέργειας στην οποία γινόταν χρήση γραμμικής ηλεκτρικής γεννήτριας. [A5]



Εικόνα 2.13.: Σχηματική απεικόνιση του Archimedes Wave Swing [A5]

Όσον αφορά την **Παλλόμενη Στήλη Ύδατος**, μια επίσης πολύ σημαντική κυματική τεχνολογία, γίνεται εκτενής παρουσίασή της στην Παράγραφο 2.3, καθώς αποτελεί βασικό αντικείμενο της παρούσας εργασίας.

Συστήματα υπερακόντισης ή υπερχειλίσσης ή υπερπήδησης του νερού (Overtopping Devices):

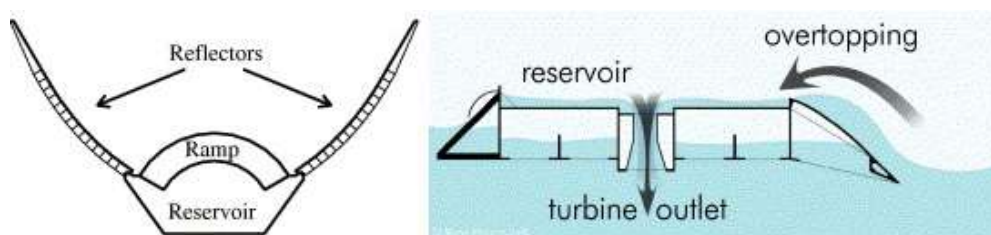
Ένας διαφορετικός τρόπος μετατροπής της κυματικής ενέργειας περιλαμβάνει την συλλογή του νερού σε στάδιο υψηλότερο από την Μέση Στάθμη Κυματισμού (ΜΣΚ) και στην συνέχεια την ρίψη του σε δεξαμενή, η οποία βρίσκεται επίσης σε υψηλότερο επίπεδο από την ΜΣΚ και στην συνέχεια το νερό καταλήγει πάλι στην θάλασσα. Η συγκεκριμένη διαφορά στάθμης χρησιμοποιείται για την

κίνηση ενός ή περισσότερων υδροστρόβιλων χαμηλής πίεσης. (εικ. 2.14) Η δυναμική ενέργεια του νερού εκμεταλλεύεται με τον ίδιο τρόπο όπως σε έναν υδροηλεκτρικό σταθμό.

Τα συγκεκριμένα συστήματα έχουν την δυνατότητα να τοποθετηθούν είτε στην επάκτια (SSG, Sea Slot Cone Generator, σταθερή κατασκευή που ενσωματώνεται σε κυματοθραύστη), είτε στην παράκτια ή ακόμα και στην υπεράκτια ζώνη (Wave Dragon). Η υπεράκτια τεχνολογία του **Wave Dragon** (Εικ. 2.15) αναπτύχθηκε στην Δανία, το 2003 και από τότε αποτελεί την πρώτη υπεράκτια συσκευή που παρήγαγε ηλεκτρικό ρεύμα, και συνδέθηκε και τροφοδότησε το ηλεκτρικό δίκτυο, μέχρι και το 2011, όπου και σταμάτησε να λειτουργεί η συγκεκριμένη μονάδα. Μέχρι τότε παράλληλα η τεχνολογία εξελίχθηκε δυναμικά, με εφαρμογές σε διάφορες περιοχές, όπως η Ουαλία. [A11]

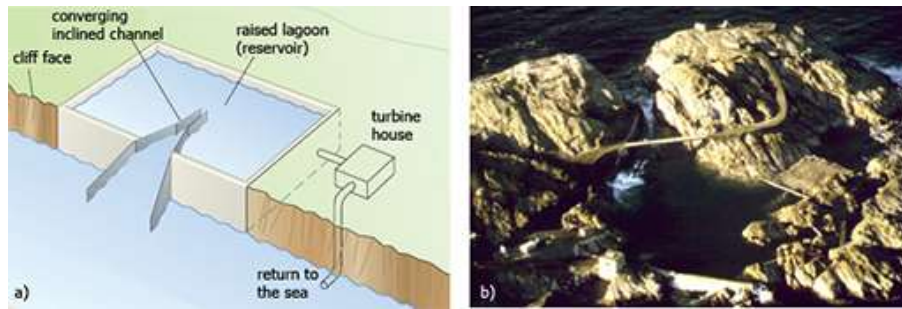


Εικόνα 2.14.: Τυπική μορφή μετατροπέα τύπου Wave Dragon [A13]



Εικόνα 2.15.: Σχηματική απεικόνιση της λειτουργίας του Dragon Wave [A14]

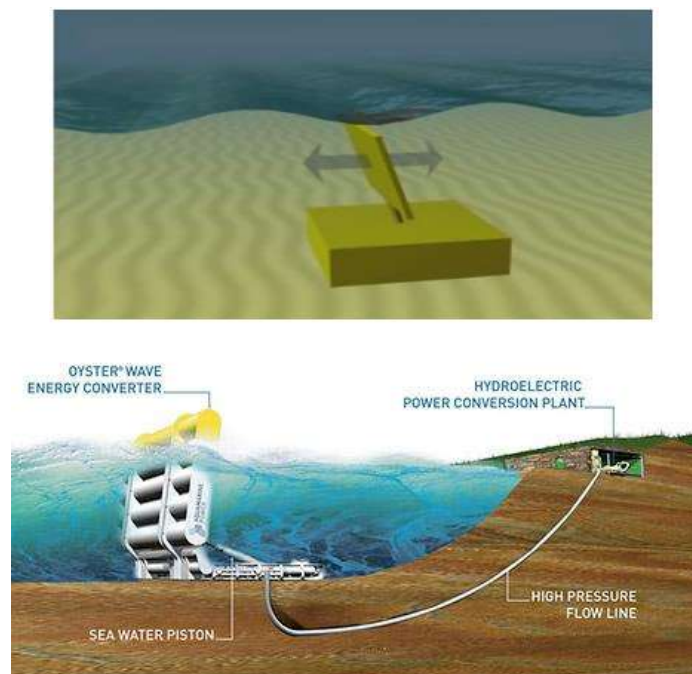
Μια επόμενη πολύ σημαντική τεχνολογία που ακολουθεί το σύστημα υπερακόντισης είναι η διάταξη **Tapchan (Tapered Wave Power Device)**, μια τεχνολογία που αναπτύχθηκε στη Νορβηγία τη δεκαετία του '80. Ένα πρωτότυπο, με ονομαστική ισχύς 350 kW κατασκευάστηκε το 1985 στο Toftestallen της Νορβηγίας και λειτουργήσε για αρκετά χρόνια. Η συγκεκριμένη διάταξη περιλαμβάνει συλλέκτη, μετατροπέα, δεξαμενή νερού και ανεμογεννήτρια χαμηλής κεφαλής. Ο συλλέκτης με σφυρήλατο σκελετό εξυπηρετεί το σκοπό της συγκέντρωσης των εισερχομένων κυμάτων προτού εισέλθουν στον μετατροπέα. Στο πρωτότυπο, ο συλλέκτης ήταν σκαλισμένος σε ένα βραχώδες βράχο και ήταν περίπου 60 μέτρα πλάτος στην είσοδό του. (Εικ. 2.16) [A5, A14]



Εικόνα 2.16.: (a) Η συσκευή μετατροπής ενέργειας (TAPCHAN) (b) Αεροφωτογραφία του Νορβηγικού TAPCHAN: Το νερό εισέρχεται στη δεξαμενή στο κέντρο της εικόνας, όπου η συσκευή καναλιού μπορεί να δει μόνο μεταξύ των τοίχων

Επιμήκεις μετατροπείς τερματικού τύπου (Terminator):

Οι λειτουργίες των συγκεκριμένων διατάξεων βασίζονται στην κίνηση μάζας νερού των κυμάτων, εκμεταλλευόμενες έτσι το φαινόμενο της ρήξης κατά το οποίο οι τροχιές κίνησης των μορίων του νερού γίνονται ελλειπτικές. Αυτός είναι και ο λόγος για τον οποίον οι συγκεκριμένες τεχνολογίες εγκαθίστανται σε παράκτιες περιοχές όπου το βάθος της θάλασσας είναι μικρό. Σε αντίθεση με τους Αποσβεστήρες, οι συγκεκριμένες είναι τοποθετημένες με διεύθυνση παράλληλη με το μέτωπο του κύματος. Πρόκειται για έναν συλλέκτη με την μορφή επίπεδης πλάκας, ο οποίος εδράζεται πάνω σε περιστρεφόμενο βραχίονα που είναι αγκυρωμένος κοντά στον πυθμένα. Ο συγκεκριμένος βραχίονας ταλαντεύεται διαγράφοντας κίνηση ανάστροφου εκκρεμής. (Εικ. 2.17) Η υποβρύχια συσκευή Waveroller και η εφαρμογή Aquamarine Power Oyster (800kW), αποτελούν κάποια από τα σημερινά παραδείγματα της τεχνολογίας των επιμήκεις μετατροπέων.



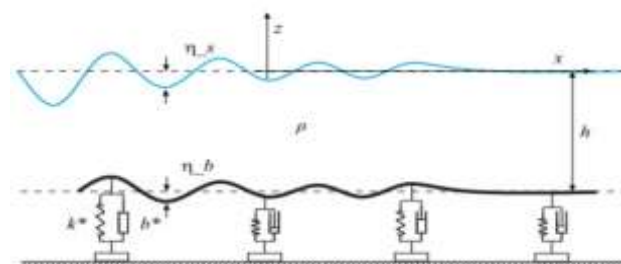
Εικόνα 2.17.: Επιμήκεις μετατροπείς τερματικού τύπου (Πηγή: Ιστοσελίδα AQUARET)
Και η Τεχνολογία Aquamarine Power Oyster [A8,A9]

2.2.4. Άλλες Τεχνολογίες

Εκτός από τις παραπάνω κατηγορίες τεχνολογιών κυματικής ενέργειας που αναφέραμε, με το πέρασμα των χρόνων και την εξέλιξη της τεχνολογίας έχουν αναπτυχθεί και άλλες διατάξεις, πιο σύγχρονες, οι οποίες λόγω διαφορετικού σχεδιασμού δεν κατατάσσονται στις παραπάνω κατηγορίες. Κάποια παραδείγματα αυτών των σύγχρονων τεχνολογιών αναπτύσσονται παρακάτω.

Wave Carpet (CWEK - Carpet of Wave Energy Conversion)

Εμπνευσμένο από το φυσικό φαινόμενο της ισχυρής εξασθένησης των ωκεάνιων κυμάτων από την λασπώδη επιφάνεια των πυθμένων, το Εργαστήριο Θεωρητικής και Εφαρμοσμένης Ρευστοδυναμικής στο Πανεπιστήμιο της Καλιφόρνιας, στο Μπέρκλεϊ, διερεύνησε πρόσφατα ένα συνθετικό συμπαγές χαλί βυθού, το λεγόμενο **Wave Carpet**. Ο εφευρέτης της συγκεκριμένης τεχνολογίας Mohammad-Raza Alam, δήλωσε: “Εάν η λάσπη μπορεί να πάρει τόσο πολύ ενέργεια από τα κύματα των ωκεανών, τότε γιατί να μην χρησιμοποιήσουμε αυτήν την ιδέα για να σχεδιάσουμε έναν μετατροπέα κυμάτων ενέργειας που είναι πολύ αποδοτικός;” Πρόκειται για έναν ελαστικό τάπητα τοποθετημένο πάνω από ένα κατακόρυφο σύστημα από γραμμικά ελατήρια και γεννήτριες, τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον σκοπό της μετατροπής της ενέργειας των κυμάτων. Κατά την κάμψη του λόγω της ενέργειας του κύματος, το χαλί οδηγεί τις αντλίες να συμπιεστούν και να πιέσουν το θαλασσινό νερό μέσω ενός σωλήνα εκκένωσης. Το νερό από που αναβλύζει τροφοδοτεί έναν στρόβιλο ο οποίος είναι στερεωμένος στην ξηρά, που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος ή για αφαλάτωση. (Εικ. 2.18)



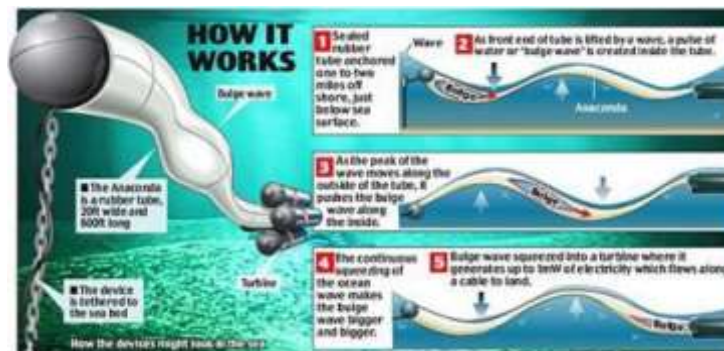
Εικόνα 2.18.: Σχηματική απεικόνιση της λειτουργίας του Wave Carpet [A18]

Τα πλεονεκτήματα χρήσης της συγκεκριμένης τεχνολογίας είναι αρκετά, καθώς από άποψη ανθεκτικότητας, είναι αρκετά επιβιώσιμη ενάντια στα ορμητικά κύματα καταιγίδας, προστατεύοντας ταυτόχρονα και την ακτή από τα ισχυρά κύματα, ενώ παράλληλα θέτει ελάχιστο κίνδυνο προς την θαλάσσια ζωή και προκαλεί ελάχιστη οπτική ρύπανση. Ένα μειονέκτημά του Wave Carpet είναι η μείωση της αποτελεσματικότητάς της ανάλογα με το βάθος του νερού, γεγονός που το κάνει κατάλληλο μόνο για εγκαταστάσεις μεταξύ της επιφάνειας και περίπου μέχρι 20 μέτρα βάθος. [A16, A17, A18]

Anaconda

Η συσκευή Anaconda, επινοήθηκε το 2005 από Βρετανούς ερευνητές και πρόκειται για έναν πλωτό εύκαμπτο σωλήνα, κλειστό στα 2 άκρα του και γεμάτο νερό, ο οποίος βρίσκεται κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας και είναι αγκυρωμένο στον πυθμένα της στα 2-3 km μακριά από την ακτή. (Εικ. 2.19) Κάθε συσκευή είναι τοποθετημένη κατα μέτωπο με τα επερχόμενα κύματα, χρησιμοποιώντας την κίνηση τους για να οδηγήσει έναν στρόβιλο. Οι διακυμάνσεις της πίεσης που οφείλονται σε εξωτερικά κύματα δημιουργούν κύματα διογκώσεως σε αυτόν τον σωλήνα, μπορούν

να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με σύστημα απογείωσης ισχύος στην πρύμνη του σωλήνα. Ένα από τα πλεονεκτήματα της συγκεκριμένης συσκευής είναι το γεγονός του ότι μπορεί να εγκατασταθεί σε οποιαδήποτε ακτή με μήκος κύματος της τάξεως των 25 kW. [A19]

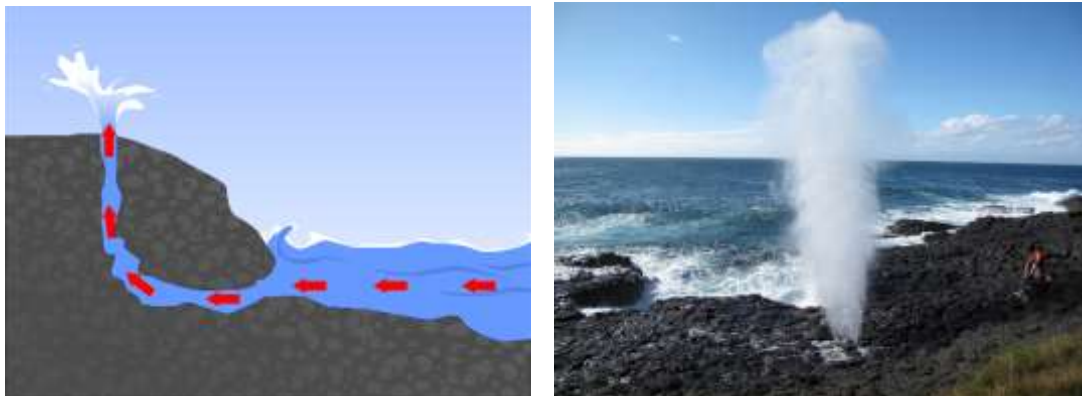


Εικόνα 2.19.: Η τεχνολογία Anaconda

2.3. Παλλόμενη Στήλη Ύδατος (ΠΣΥ) - Oscillating Water Column (OWC)

2.3.1. Αρχή Λειτουργίας της Συσκευής

Συγκριτικά με τις προαναφερόμενες συσκευές κυματικής ενέργειας αλλά και τις πολυάριθμες που έχουν αναπτυχθεί ανά τα χρόνια, η τεχνολογία της Παλλόμενης Στήλης Ύδατος ξεχωρίζει, καθώς είναι ίσως η μόνη που αντιπροσωπεύει μια διάταξη που συναντάται στην φύση, την διάταξη του γεωλογικού φουσητήρα (blowhole). (Εικ. 2.20)

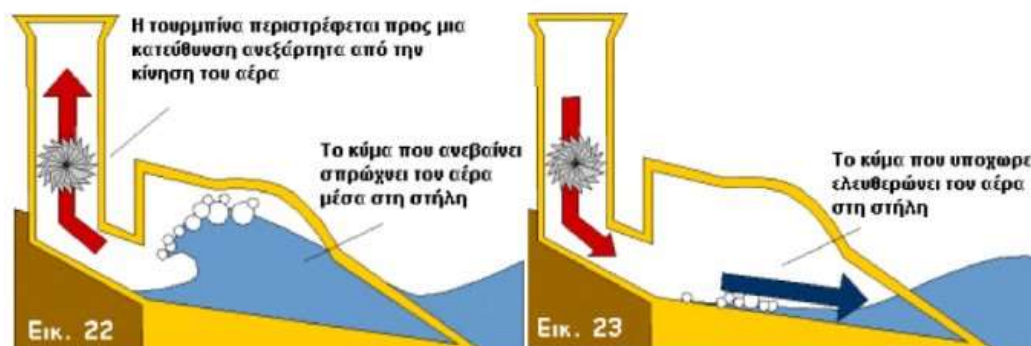


Εικόνα 2.20.: Απεικόνιση του γεωλογικού φουσητήρα

Σε μια διάταξη ΠΣΥ η μηχανική διαδικασία απορρόφησης ενέργειας από τα κύματα απαιτεί μια κινητή διασύνδεση, η οποία αποτελείται κυρίως από 2 μέρη: (i) τον **θάλαμο συλλογής** και (ii) τον **αεροστρόβιλο**, ο οποίος είναι και ο μετατροπέας της κυματικής ενέργειας. Ο θάλαμος συλλογής είναι μερικώς βυθισμένος στο νερό και στο εσωτερικό του υπάρχει εγκλωβισμένος αέρας και νερό. Πάνω από την ελεύθερη επιφάνεια του νερού, δημιουργείται μια στήλη αέρα. Επίσης, υπάρχει ένα άνοιγμα στο μέρος του θαλάμου κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας από όπου η δράση των κυμάτων που εισέρχονται, εναλλάξ συμπιέζει και αποσυμπιέζει τον παγιδευμένο αέρα ο οποίος αναγκάζει την ροή του αέρα να κινεί τον αεροστρόβιλο. Η ροπή από την περιστροφική κίνηση αυτή χρησιμοποιείται για την κίνηση μιας γεννήτριας και την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Όταν η συχνότητα του κύματος που εισέρχεται συντονιστεί με την συχνότητα της κίνησης του συστήματος αέρος/νερού, μέσα στην στήλη, τότε επιτυγχάνεται η βέλτιστη παραγωγή ενέργειας. [A22, A23]

Οι ΠΣΥ αρχικά σχεδιάστηκαν για να είναι σταθερές, εγκατεστημένες στην επάκτια ζώνη πάνω σε κάποιο κυματοθραύστη είτε σε άλλη κατασκευή. Ένώ μετέπειτα έγιναν δοκιμές για εγκατάσταση των συγκεκριμένων τεχνολογιών στην ανοιχτή θάλασσα με κατάλληλη αγκύρωση. Στην πρώτη περίπτωση των επάκτιων σταθερών συσκευών, το βασικό δομικό στοιχείο αποτελεί ο θάλαμος συλλογής, ο οποίος είναι ανοιχτός προς την θάλασσα, με το άνοιγμα να είναι κάτω από την στάθμη του μέσου κυματισμού. Αναλυτικά η λειτουργία μια σταθερής εγκατάστασης ΠΣΥ φαίνεται και στην Εικόνα 2.21.



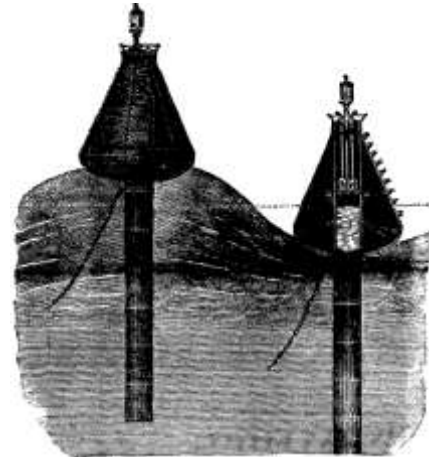
Εικόνα 2.21.: Απεικόνιση της λειτουργίας ενός σταθερού συστήματος ΠΣΥ

Το σύστημα του αεροστρόβιλου, είναι τυπικά ένα σύστημα απομάκρυνσης ισχύος (power take off). Η πιο συνηθισμένη μορφή συστήματος απομάκρυνσης ισχύος στην εφαρμογή της ΠΣΥ, είναι ο συνδυασμός στροβίλων / γεννήτριας επαγωγής **Wells** και ο κύριος εκθέτης αυτής της τεχνολογίας είναι η **Voith Hydro Wavegen**, η οποία έχει πάνω από 60 000 ώρες λειτουργίας από το εγκατεστημένο μετασχηματιστή θαλάσσιας ενέργειας (LIMPET). Η συγκεκριμένη τεχνολογία ΠΣΥ εγκαταστάθηκε στο νησί της Σκωτίας Islay. Άλλες μορφές στροβίλων, αποτελούν οι μηχανές ώθησης του Dresser-Rand και του Oceanlinx, βρίσκονται επίσης υπό ανάπτυξη. Οι κατασκευαστές ισχυρίζονται ότι αυτές οι μηχανές προσφέρουν υψηλότερη απόδοση μετατροπής από τον στρόβιλο Wells, αλλά δεν υπάρχουν διαθέσιμες στο κοινό πληροφορίες που να αποδεικνύουν σε πραγματικές θαλάσσιες συνθήκες και με κατάλληλη στρατηγική ελέγχου ότι τα νεότερα σχέδια μπορούν να ταιριάζουν είτε με την απόδοση είτε με την αξιοπιστία των στροβίλων σε 10 χρόνια συνεχούς λειτουργίας στο LIMPET. [A24]

Το κύριο πλεονέκτημα της ΠΣΥ έναντι των περισσότερων άλλων διατάξεων κυματικής ενέργειας, είναι η απλότητα του: το μόνο κινούμενο μέρος του μηχανισμού μετατροπής ενέργειας είναι ο ρότορας ενός στροβίλου, που βρίσκεται πάνω από την στάθμη του νερού, περιστρέφοντας σε σχετικά υψηλή ταχύτητα και οδηγώντας άμεσα ένα συμβατικό ηλεκτρικό γεννήτρια. Οι διατάξεις ΠΣΥ είναι μια μεγάλη κατηγορία μετατροπέων κυμάτων ενέργειας, πιθανώς η κατηγορία που έχει μελετηθεί εκτενέστερα και με τον μεγαλύτερο αριθμό πρωτοτύπων που έχουν αναπτυχθεί μέχρι τώρα στη θάλασσα. [A21]

2.3.2. Η ιστορική εξέλιξη της ΠΣΥ

Η πρώτη καταγεγραμμένη εφαρμογή ενός συστήματος ΠΣΥ είναι η **σημαδούρα-σφυρίχτρα** (whistling buoy), που χρησιμοποιείται ως βοήθημα πλοήγησης. Ως συσκευή ακουστικής προειδοποίησης, παρατηρήθηκε τον δέκατο ένατο αιώνα ως διάδοχος των παραδοσιακών καμπαναριών. Ο J. Courtney της Νέας Υόρκης κατοχύρωσε ένα τέτοιο σφύριγμα (Εικ. 2.22) και το 1885 αναφέρθηκε στην Scientific American ότι υπήρχαν 34 που λειτουργούσαν κατά μήκος των ακτών των ΗΠΑ.



Εικ.2.22.: Η σημαδούρα-Σφυρίχτρα του Courtney.[A24]

Ήταν πάνω από μισό αιώνα, πριν από την επόμενη σημαντική εξέλιξη στο τομέα των τεχνολογιών κυματικής ενέργειας, και πάλι αυτό συνέβη στον τομέα των πλωτήρων ναυσιπλοΐας το 1947, όταν ο **Masuda**, στην Ιαπωνία, σχεδίασε και εγκατέστησε το πρώτο σύστημα ΠΣΥ που οδηγούσε έναν παρορμητικό στρόβιλο για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Η μονάδα βρισκόταν στον κόλπο της Οζάκα και τα ηλεκτρικά φώτα πλοήγησης του παράγονταν με ηλεκτρική ενέργεια. Ασφάλεια λειτουργίας παρέχόταν από τις επαναφορτιζόμενες μπαταρίες που έπαιρναν την ισχύ τους από τον στρόβιλο / γεννήτρια σε περιόδους άφθονης. Από το πρωτότυπο αυτό αναπτύχθηκε μια εμπορική σειρά από σημαντήρες, όπου είναι διαθέσιμες σήμερα από την εταιρεία Ryokuseisha της Ιαπωνίας. Ενώ η απόδοση κάθε μονάδας είναι μικρή στα 70-500W, η εφαρμογή αυτή εξακολουθεί να αντιπροσωπεύει την πιο κοινή εφαρμογή μιας μονάδας ενέργειας κύματος. Η Εικόνα 2.23, δείχνει τον φανό φωτός Uraga που είναι εφοδιασμένος με τέσσερις γεννήτριες στροβίλων ενεργοποιούμενες από κύμα.



Εικόνα 2.23.: Η τεχνολογία Uraga [A24]

Μεταξύ του 1976 και του 1979, μια ομάδα ερευνητών που λειτουργούσε υπό την αιγίδα του Διεθνούς Οργανισμού Ενέργειας, εξέτασε τις μονάδες ΠΣΥ που ήταν τοποθετημένες σε μια πλωτή

φορτηγίδα, το Kaimeī. Η φορτηγίδα μήκους 800 τόνων μήκους 80 μέτρων αγκυροβολήθηκε στα ανοικτά των ακτών της Yura, της πόλης Tsuruoka, του νομού Yamagata. Με την Ιαπωνία ως κύριο εθνικό εταίρο, υπήρξαν συνεισφορές από το Ηνωμένο Βασίλειο, τον Καναδά, την Ιρλανδία και τις ΗΠΑ. Οκτώ θάλαμοι OWC τοποθετήθηκαν στην φορτηγίδα, καθένα με ονομαστική ονομαστική ισχύ 125 kW. Έγινε δοκιμή μιας σειράς μονάδων αεροστροβίλων, συμπεριλαμβανομένων των αυτορυθμιζόμενων στροβίλων Wells και McCormick και των συμβατικών συστημάτων στροβίλων με βαλβίδες αποκατάστασης.

Κατά τη διάρκεια της δεκαετίας του 1980 και του 1990, κατασκευάστηκαν και δοκιμάστηκαν αρκετά υπεράκτια συστήματα ΠΣΥ, που συνδέονται με την ακτή, συμπεριλαμβανομένου ενός αριθμού στην Ιαπωνία, την Ινδία, την Κίνα, τη Νορβηγία, την Πορτογαλία και τη Βρετανία. Το μεγαλύτερο από αυτά που χτίστηκαν στην Ιαπωνία ήταν το λιμάνι των Σακατών. Η πέντε μέτρων κατασκευή χτίστηκε ως μέρος ενός λιμανιού. Το μηχάνημα, το οποίο τέθηκε σε λειτουργία το 1989, ήταν εφοδιασμένο με ένα στρόβιλο τύπου Wells, με αρχική τιμή ισχύος 60 kW. Στην συνέχεια μια ενιαία μονάδα ονομαστικής ισχύος στα 75 kW, κατασκευάστηκε από το Queen's University Belfast στο Islay, της Σκωτίας (Εικόνα 2.24). Η συγκεκριμένη μονάδα συνδέθηκε με το δίκτυο και λειτουργούσε μεταξύ του 1991 και του 2000, προτού τεθεί εκτός λειτουργίας. Ο στρόβιλος από αυτό το εργοστάσιο ανακαινίστηκε πρόσφατα και τώρα εκτίθεται στο Μουσείο Deutsches στο Μόναχο.[A21]



Εικ.2.24 Η τεχνολογία που κατασκευάστηκε από το Queen's University Belfast στο νησί Islay της Σκωτίας [A21]

2.3.3. Τεχνολογίες Παλλόμενης Στήλης Ύδατος (ΠΣΥ)

Οι τεχνολογίες κυματικής ενέργειας όπως προαναφέρθηκε και στην § 2.2.1, διακρίνονται ανάλογα με τη τοποθεσία εγκατάστασής τους σε **σταθερές** και **πλωτές**, χαρακτηριστικό το οποίο βρίσκει εφαρμογή και στην περίπτωση των συσκευών ΠΣΥ. Στην πρώτη κατηγορία οι διατάξεις ΠΣΥ μπορεί να είναι κατασκευασμένες είτε στην επάκτια ζώνη, είτε στην παράκτια ή και την υπεράκτια ζώνη (στερεωμένες στο βυθό). Στις σταθερές διατάξεις η ενέργεια που απορροφά η συσκευή από τα κύματα οφείλεται στην αλληλεπίδραση της κίνησης της υδάτινης στήλης και των κυμάτων που δέχεται. Στις **πλωτές** συσκευές η κίνηση της υδάτινης στήλης αλλά και η κίνηση της κατασκευής που προκαλούνται από τα κύματα, συνεισφέρουν στην ενεργειακή απορρόφηση [A27]. Παρακάτω

αναλύονται οι βασικότερες κατηγορίες συσκευών ΠΣΥ, ανάλογα με την τοποθεσία εγκατάστασής τους.

Σταθερές, Επάκτιες Συσκευές ΠΣΥ

Το 1991 μετά από την εισαγωγή της κυματικής ενέργειας στο πρόγραμμα Έρευνας και Ανάπτυξης των ΑΠΕ, από την Ευρωπαϊκή Ένωση, η κατάσταση στην Ευρώπη άλλαξε σημαντικά. Αυτό οδήγησε στη μελέτη, στον σχεδιασμό και στην κατασκευή δύο πλήρους κλίμακας, σταθερών, επάκτιων μονάδων ΠΣΥ, στο νησί Pico στις Αζόρες και στο νησί Islay στην Σκωτία. Οι διατάξεις αυτές παρουσιάζονται στη συνέχεια [A21].

Limpet

Το 1988 το Queen's University Belfast σε συνεργασία με τις εταιρίες Wavegen Ireland Ltd, Charles Brand Ltd, Kirk McClure Morton και την I.S.T. Portugal ανέλαβαν να κατασκευάσουν και να δοκιμάσουν μία παράκτια εγκατάσταση παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από την ενέργεια των θαλάσσιων κυμάτων. Η μονάδα έχει συνολική ισχύ 500kW και η έναρξη της λειτουργίας πραγματοποιήθηκε τον Νοέμβριο του 2000. Έκτοτε η εγκατάσταση λειτουργεί και ελέγχεται εξ αποστάσεως, ενώ τροφοδοτεί το δίκτυο του ηνωμένου Βασιλείου με ηλεκτρική ενέργεια. Η μέχρι σήμερα επιτυχημένη λειτουργία χωρίς επίβλεψη της εγκατάστασης τους **LIMPET** απέδειξε τις δυνατότητες συνεισφοράς της παράκτιας κυματικής ενέργειας στα εθνικά αποθέματα ενέργειας. Η συσκευή χρησιμοποιεί τρεις στήλες ύδατος που ταλαντώνονται μέσα σε θαλάμους από τσιμέντο με εσωτερικές διαστάσεις 6 μέτρα επί 6 μέτρα και σε κλίση 45° ως προς την οριζόντιο εγκλωβίζοντας συνολική επιφάνεια νερού 169m². Οι επάνω επιφάνειες των θαλάμων συνδέονται μεταξύ τους και η μετατροπή ισχύος γίνεται μέσω ενός κοινού άξονα ενός στροβίλου που συνδέεται με μία γεννήτρια. Οι θάλαμοι έχουν εξωτερικό πλάτος 21 μέτρα και είναι τοποθετημένοι 17 μέτρα από τη φυσική ακτογραμμή σε ένα κατασκευασμένο βαθούλωμα μέσου βάθους 6 μέτρων. (Εικ.2.25)



Εικ. 2.25 Εγκατάσταση παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας [A24]

Το σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας περιλαμβάνει ένα στρόβιλο **Wells** διαμέτρου 2.6m που αποτελείται από δύο σειρές πτερυγίων που περιστρέφονται αντίστροφα (counter-rotating) κατασκευασμένο από ανοξείδωτο χάλυβα. Κάθε σειρά πτερυγίων αποδίδει ισχύ 250kW. Η ισχύ στην

έξοδο εξομαλύνεται και αντιστρέφεται πριν τη σύνδεση στο ηλεκτρικό δίκτυο μέσω μεταβολής της ταχύτητας περιστροφής σε εύρος από 700 έως 1400 rpm. Τα λειτουργικά χαρακτηριστικά της εγκατάστασης ελέγχονται από ειδικό λογισμικό και μπορούν να μεταβληθούν. Ο θόρυβος που παράγεται από την ροή του αέρα διαμέσου των στροβίλων μειώνεται σε ένα ειδικό ακουστικό θάλαμο πριν απελευθερωθεί στην ατμόσφαιρα. Επίσης υπάρχει και βαλβίδα ελέγχου της ροής του αέρα ώστε να ρυθμίζεται η παροχή.

Σημαντικά χαρακτηριστικά των στροβιλομηχανών Wells είναι ο συντελεστής απόσβεσης (damping coefficient) και η απόδοση μετατροπής (conversion efficiency). Ο συντελεστής 22 απόσβεσης υποδηλώνει τη σχέση μεταξύ της πτώσης πίεσης διαμέσου της μηχανής και της παροχής του αέρα που εισέρχεται στη μηχανή ενώ υπάρχει γραμμική σχέση μεταξύ τους σε μία μηχανή Wells για σταθερή ταχύτητα περιστροφής. Ο συντελεστής απόσβεσης είναι σημαντικό χαρακτηριστικό για την μετατροπή κυματικής ενέργειας καθώς συμβάλλει στον υπολογισμό της διαθέσιμης ισχύς στην έξοδο. Η απόδοση της μηχανής ορίζεται ως ο λόγος της ισχύς στην έξοδο της μηχανής προς την διαθέσιμη ενέργεια του αέρα. Μία αποτελεσματική μηχανή Wells απαιτεί υψηλή απόδοση για μεγάλο εύρος λειτουργίας.



Εικ. 2.26.: Απεικόνιση λειτουργίας της εγκατάστασης Limpet

Η κατασκευή του LIMPET (Εικ. 2.26) θεωρείται μεγάλη επιτυχία παρόλο που η παραγόμενη ισχύ είναι μικρότερη από την προβλεπόμενη. Συνέβαλε στην ανάπτυξη τεχνογνωσίας σχετικά με σχετικά με τον τρόπο κατασκευής, τη διαδικασία λειτουργίας το πως μπορεί να προσαρμόζεται η εγκατάσταση στις συνθήκες λειτουργίας του θαλάσσιου περιβάλλοντος ώστε να αποδίδει το μέγιστο δυνατό. Το LIMPET προσαρμόζεται αυτόματα στις συνθήκες λειτουργίας της θάλασσας καθώς έχει τη δυνατότητα να συνδέεται και να αποσυνδέεται από το δίκτυο. Ταυτόχρονα διεξάγονται πειραματικές μετρήσεις οι οποίες αποστέλλονται στο πανεπιστήμιο του Belfast μέσω ISDN γραμμών.

Το σύστημα συλλογής πληροφοριών του LIMPET ελέγχει όλες τις παραμέτρους λειτουργίας. Η διαθέσιμη κυματική ενέργεια έχει μετρηθεί για ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα χρησιμοποιώντας υποθαλάσσιους αισθητήρες. Τα δεδομένα από το σύστημα αξιολόγησης χωρίζονται σε εκείνα που χρησιμοποιούνται για ερευνητικούς σκοπούς και σε εκείνα που είναι απαραίτητα για τη σωστή σύνδεση στο ηλεκτρικό δίκτυο.

Η απόδοση του LIMPET είναι μικρότερη από το αναμενόμενο καθώς αρχικά υπερ εκτιμήθηκε η κυματική ενέργεια που φτάνει στις συσκευές ταλαντευόμενης υδάτινης στήλης. όπως επίσης και η απόδοση του στροβίλου Wells στην πραγματικότητα αποκλίνει από τα διαθέσιμα υπολογιστικά αποτελέσματα για μόνιμα ροή. Με βάση τα χρήσιμα αποτελέσματα από δοκιμή και αξιολόγηση της εγκατάστασης LIMPET αναπτύχθηκαν νέα σχέδια σε συνδυασμό με διάφορες μεθόδους κατασκευής καθώς και νέα υλικά.

European Wave Energy Pilot Plant - Pico OWC

Η εγκατάσταση Pico κατασκευάστηκε ως ένα πιλοτικό Ευρωπαϊκό πρόγραμμα με τη συγχρηματοδότηση της Ευρωπαϊκής Επιτροπής. Κύριος σκοπός του προγράμματος ήταν η πραγματοποίηση της ιδέας για εκμετάλλευση της κυματικής ενέργειας για την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος που θα τροφοδοτεί το δίκτυο ενός μικρού νησιού. Επίσης το συγκεκριμένο έργο θα παρείχε τη δυνατότητα για δοκιμές του μηχανισμού power take off, κυρίως αεριοστροβίλων. Τέλος θα αποτελούσε το πρότυπο για την συνολικής μεθοδολογίας σχεδιασμού μιας παρόμοιας εγκατάστασης. Για παράδειγμα πως θα είναι η γεωμετρία της κατασκευής, ποιός είναι ο απαραίτητος εξοπλισμός, ποιά είναι η μεθοδολογία που προβλέπει την παραγόμενη ενέργεια.



Εικ.2.27.: Η εγκατάσταση Rico

(Πηγή: <https://tethys.pnnl.gov/annex-iv/sites/pico-oscillating-water-column>)

Το πρόγραμμα ξεκίνησε το 1992 στηριζόμενο από τις τοπικές επιχειρήσεις κοινής ωφέλειας για παροχή ηλεκτρισμού και η κατασκευή ολοκληρώθηκε το 1999 με τη συνεργασία του Instituto 24 Superior Tecnico (IST). Λίγο πριν ολοκληρωθεί η κατασκευή ένα ατύχημα που οφειλόταν σε πλημμύρα κατέστρεψε τον ηλεκτρολογικό εξοπλισμό, όμως η επιδιόρθωση έγινε σε σύντομο χρονικό διάστημα και έτσι το Pico ΠΣΥ τέθηκε σε πλήρη λειτουργία το καλοκαίρι του 1999. Όμως πολλά τεχνικά προβλήματα και έλλειψη χρηματοδότησης οδήγησαν στη διακοπή της κατασκευής για μερικά χρόνια. Το 2003, ο οργανισμός WavEC Offshore Renewable πήρε την ευθύνη της εγκατάστασης έχοντας ως υποστήριξη εθνική χρηματοδότηση. Οι πρώτες δοκιμές έγιναν το 2005 όπου παρουσιάστηκαν σοβαρά τεχνικά προβλήματα όπου δεν ήταν εύκολο να επιλυθούν με την παρούσα χρηματοδότηση. Όμως η ομάδα που συμμετείχε στο πρόγραμμα συνέχισε το ερευνητικό της έργο προκειμένου να βελτιωθεί η εγκατάσταση, αυξάνοντας τις ώρες λειτουργίας, τη διαθεσιμότητα και την παραγόμενη ισχύ την περίοδο 2006-2008.

Κατά το έτος 2010 μικρά τεχνικά προβλήματα καθυστέρησαν την πλήρη λειτουργία της μονάδας αλλά σταδιακά έγινε η εγκατάσταση αυτόματου και απομακρυσμένου ελέγχου. Έπειτα από επιτυχημένες δοκιμές αυτόνομης λειτουργίας μεταξύ Σεπτεμβρίου και Δεκεμβρίου 2010, επιτεύχθηκε συνολική παραγωγή 45 MWh για 1450 ώρες λειτουργίας. Το 2011 το ενδιαφέρον στράφηκε στην προετοιμασία μιας κατασκευής όπου θα τοποθετούνταν στην εγκατάσταση και θα αποτελούσε μία πλατφόρμα για δοκιμές στροβιλομηχανών, κατάλληλο για εξοπλισμό από 100 kW έως 700 kW.

Το νησί Pico είναι το μεγαλύτερο στο σύμπλεγμα των νήσων Azores, το σημείο όπου τοποθετήθηκε η συσκευή ΠΣΥ παρέχει υψηλό ενεργειακό δυναμικό λόγω του βραχώδους ανάγλυφου της περιοχής αλλά και του μεγάλου θαλάσσιου βάθους.



Εικ.2.28.: Απεικόνιση λειτουργίας της εγκατάστασης Rico
(Πηγή: <http://www.pico-owc.net/gallery/>)

Η εγκατάσταση Pico ΠΣΥ αποτελείται από ένα θάλαμο κατασκευασμένο από τσιμέντο όπου το μπροστινό του μέρος είναι μερικώς βυθισμένο στη θάλασσα. Ο θάλαμος βρίσκεται πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας και εγκλωβίζει ποσότητα αέρα η οποία συμπιέζεται ή αποσυμπιέζεται ανάλογα με τον κυματισμό (12x12m² η τομή του θαλάμου). Η συγκεκριμένη διάταξη χρησιμοποιεί μία μηχανή Wells με οδηγητικά πτερύγια, οριζόντιου άξονα που είναι συνδεδεμένη με μία γεννήτρια. Υπολογίζεται ότι η μέγιστη στιγμιαία ισχύς εξόδου είναι 560kW θεωρώντας ότι ο στρόβιλος αποδίδει περίπου στο 80%. Για την αντιμετώπιση του φαινομένου της αποκόλλησης της ροής στη μηχανή χρησιμοποιείται μία ρυθμιστική βαλβίδα ώστε να ελέγχεται η πίεση του διερχόμενου αέρα από τη μηχανή. Ένα από τα πιο σημαντικά και καινοτόμα χαρακτηριστικά της εγκατάστασης σχετίζονται με την μεταβλητή ταχύτητα του άξονα της γεννήτριας (750 έως 1500 rpm) [A26].

Πλωτές Συσκευές ΠΣΥ

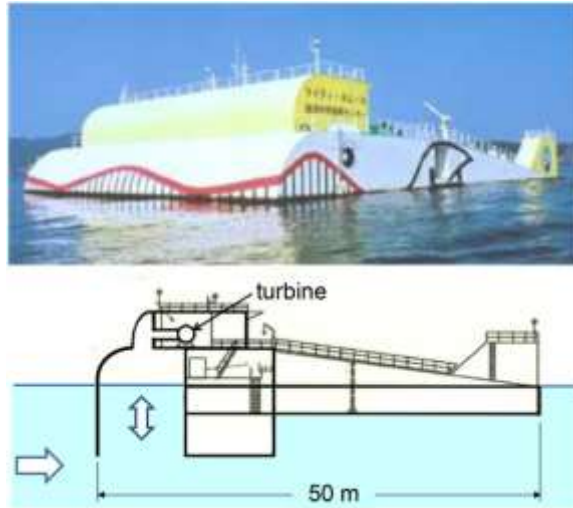
Κατά τις έρευνες που γίνονταν πριν από το 1990, ο Yoshio Masuda και η ομάδα του επινόησαν κάποιες καινούργιες έννοιες, πάνω στα πλωτά συστήματα ΠΣΥ. Όπως αυτή του **Οπίσθιου Λυγισμένου Σωλήνα** (Backward Bent Duct Buoy, BBDB). Ένα συστημα BBDB αποτελείται από ένα αγωγό σχήματος L, ένα δομοστοιχείο πλευστότητας, έναν αεροθάλαμο, ένα στρόβιλο και μία γεννήτρια. Το νερό εισέρχεται στον αγωγό μέσω ενός οπίσθιου ανοίγματος και ωθεί τον αέρα στο θάλαμο αέρα. Αυτός ο αέρας υψηλής πίεσης στρέφει έναν στρόβιλο, που παράγει ηλεκτρισμό. [A30]

Μετά από τις πρώτες κιόλας δοκιμές μοντέλων στη Ιαπωνία, στα μέσα της δεκαετίας του '80, η διάταξη του **Οπίσθιου Λυγισμένου Σωλήνα** αποτέλεσε αντικείμενο σημαντικού ενδιαφέροντος ερευνητικών αλλά και θεωρητικών μελετών, σε αρκετές χώρες τόσο στη Ευρώπη, όσο και την Ιαπωνία και την Νότιο Κορέα. Το 1ου βαθμού δοκιμάστηκε στο Galway Bay, Ιρλανδία, μεταξύ 2008 και 2011 (Εικ. 2.29). Ήταν εξοπλισμένο πρώτα με έναν στρόβιλο Wells και αργότερα με έναν αυτορυθμιζόμενο στρόβιλο δράσεως αξονικής ροής. [A21]



Εικόνα 2.29.: Η συσκευή BBDB OWC, Galway Bay, Ιρλανδία [A21]

Μια ακόμα πλωτή συσκευή ΠΣΥ, μελετήθηκε από το Κέντρο Θαλασσιών Επιστημών και Τεχνολογίας, με το όνομα “**Mighty Whale**”. Η συσκευή μήκους 50m και πλάτους 30m, είχε 3 θαλάμους αέρα τοποθετημένους στο μπροστινό μέρος, ο κάθε ένας από τους οποίους συνδεόταν με έναν αεροστρόβιλο τύπου Wells. Η συνολική ονομαστική του ισχύς άγγιζε τα 110 kW. Η συσκευή τοποθετήθηκε το 1998, κοντά στον κόλπο του Gokasho, στην Ιαπωνία και δοκιμάστηκε για αρκετά χρόνια.



Εικ.2.30 Η συσκευή Mighty Whale [A21]

Κατασκευές Ενσωματωμένες σε Κυματοθραύστη

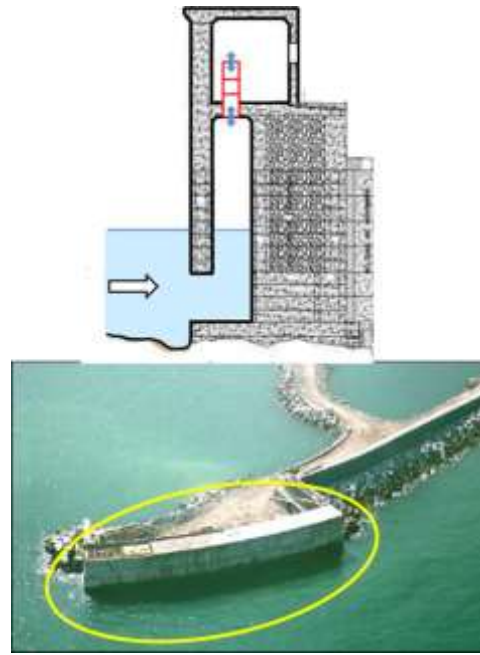
Στις τεχνολογίες της Παλλόμενης Στήλης Ύδατος (ΠΣΥ), η σταθερή δομή του συστήματος είναι το πιο σημαντικό ζήτημα, για το οποίο κρίσιμο ρόλο παίζουν ο σχεδιασμός και η κατασκευή της εγκατάστασης. Η ενσωμάτωση της δομής της εγκατάστασης σε έναν κυματοθραύστη παράκτιας ή λιμενικής προστασίας έχει πολλά πλεονεκτήματα. Όπως το κόστος κατασκευής, το οποίο είναι κοινό και για τα 2 έργα, η εύκολη πρόσβαση στο έργο, άρα και η κατασκευή της εγκατάστασης γίνεται πιο εύκολη αυτομάτως, αλλά και η συντήρηση της συσκευής.

Με βάση τα παραπάνω λοιπόν, το 1990 στην Ιαπωνία και συγκεκριμένα στο λιμάνι στην περιοχή Σακάτα (Εικ. 2.31), έγινε με επιτυχία η πρώτη προσπάθεια εγκατάστασης ΠΣΥ σε κυματοθραύστη. Με αφορμή την ιδιαίτερη διάταξη που είχε ο κυματοθραύστης εκεί, μπορούσε να φιλοξενήσει την συσκευή ΠΣΥ, ηλεκτρικό και μηχανικό εξοπλισμό. [A21]



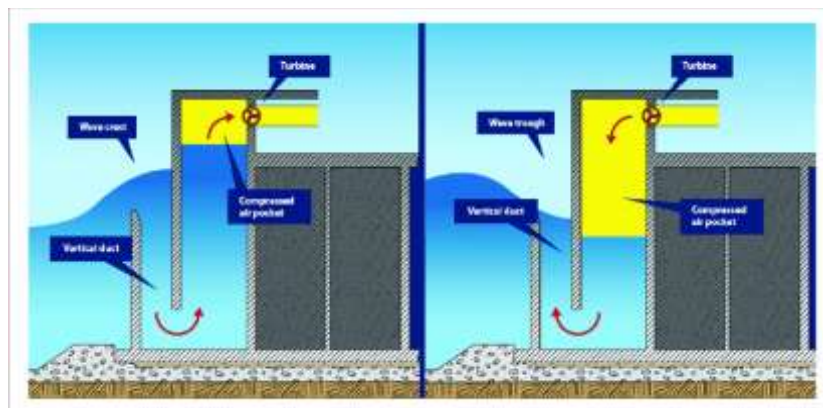
Εικ. 2.31 Συσκευή ΠΣΥ ενσωματωμένη σε κυματοθραύστη στο λιμάνι στην περιοχή Σακάτα της Ιαπωνίας 1990 [A21]

Η επιλογή της ιδέας για συσκευή ΠΣΥ σε κυματοθραύστη υιοθετήθηκε επίσης στο πλωτό δίκτυο που κατασκευάστηκε στο λιμάνι του Mutriku, στην Βόρεια Ισπανία, το διάστημα 2008 - 2010, με διάταξη που αποτελούνταν από 16 θαλάμους και 16 στροβίλους τεχνολογίας Wells, ονομαστικής ισχύος στα 18,5kW, ο καθένας. (Εικ. 2.32) Με αφορμή την εγκατάσταση αυτή, που αποτελούσε την πρώτη διάταξη πολλαπλών θαλάμων ΠΣΥ, δόθηκε και η ευκαιρία τους ερευνητές να μελετήσουν σε βάθος και πάνω σε πραγματικό έργο (και όχι στα πλαίσια εργαστηρίου), την αλληλεπίδραση των μονάδων ΠΣΥ και τον έλεγχο μιας τόσο περίπλοκης εγκατάστασης.



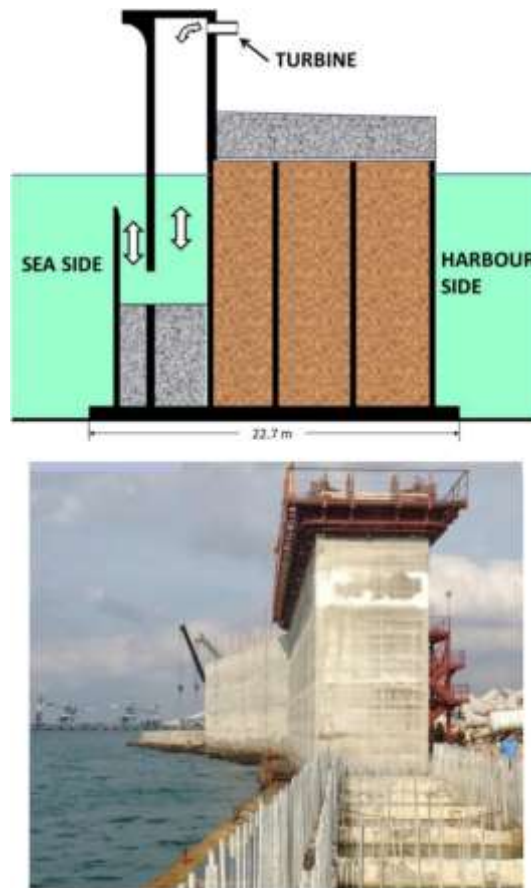
Εικ.2.32 Εγκατάσταση ΠΣΥ, πολλαπλών θαλάμων ΠΣΥ, στο λιμάνι Mutiku, Ισπανία [A21]

Μια διαφορετική γεωμετρία για σύστημα ΠΣΥ ενσωματωμένο σε κυματοθραύστη προτάθηκε το 2003 από τον ερευνητή Boccotti, η οποία και αναπτύχθηκε στην πορεία και ονομάστηκε U-OWC (U-ΠΣΥ) ή REWEC3 (Resonant Wave Energy Converter 3). Σύμφωνα με αυτή, η διατομή του θαλάμου της συσκευής είχε σχήμα U, καθώς ο θάλαμος ήταν μακρύς κατά την κατεύθυνση της κορυφής του κύματος, αλλά έφερε μικρό άνοιγμα στην προσθια κατεύθυνση. (Εικ. 2.33) Μια τέτοιου είδους διάταξης ΠΣΥ, τοποθετήθηκε το 2014 στο λιμάνι της Civitavecchia, στην Ρώμη της Ιταλίας, με 19 κυψελωτά κιβώτια (caissons), μήκους 34 m, το καθένα από τα οποία είχε 8 θαλάμους ΠΣΥ. [A29] (Εικ. 2.34)



Εικ. 2.34 Διατομή U-ΠΣΥ διάταξης [A28]

Η διαφορά της συγκεκριμένης διάταξης ΠΣΥ σε σχέση με την κλασική, έγκειται στον πρόσθετο κατακόρυφο σωλήνα, ο οποίος συνδέει την υδάτινη στήλη με την θάλασσα. Προσθήκη, η οποία επιτρέπει τον συντονισμό της ιδιοπερίοδου του θαλάμου με την περίοδο αιχμής των κυματικών ωθήσεων (peak period, T_p : η περίοδος των κυμάτων με την μεγαλύτερη ενέργεια) που δρουν στην εγκατάσταση. Με αποτέλεσμα να επιτυγχάνονται οι συνθήκες συντονισμού χωρίς τη χρήση συσκευών ελέγχου φάσης.



Εικ.2.35 Μερικώς κατασκευασμένος κυματοθραύστης στο λιμάνι της Civitavecchia, το 2014 [A21]

3. “ΚΥΜΑΤΙΚΟ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟ ΔΥΝΑΜΙΚΟ ΤΗΣ ΕΛΛΑΔΟΣ”

3.1. Εισαγωγή

Η Ελλάδα είναι κατεξοχήν μια νησιωτική χώρα, με προϊστορία στην δυνατή της σχέση με τη θάλασσα, η οποία είχε σημαντικό ρόλο τόσο στον τομέα του πολιτισμού, όσο και της οικονομίας και του τουρισμού. Το μήκος των Ελληνικών ακτογραμμών αποτελεί περίπου το 8% του συνολικού μήκους των Ευρωπαϊκών ακτογραμμών, καθώς ξεπερνάει τα 16.000 km. Εκ του οποίου μήκους, η μισή έκταση οφείλεται στο νησιωτικό μας πλούτο, με περίπου 6.000 νησιά και νησίδες. Στην Ελληνική επικράτεια ανήκουν περίπου 113.000 km² χωρικών υδάτων και ηπειρωτική υφαλοκρηπίδα έκτασης περίπου 372.000 km².

Με δεδομένο την πολλαπλή σπουδαιότητα του θαλάσσιου αυτού χώρου, η ανάπτυξη στους τομείς της θαλάσσιας επιστήμης, θα μπορούσε να αποτελέσει σημαντικό πόλο για την οικονομική και τη γενική ανάπτυξη της χώρας. Επιπλέον, περίπου το 40% - 50% του ενεργειακού ισοζυγίου της Ελλάδας εξαρτάται από ηλεκτροπαραγωγή με εισαγόμενα καύσιμα και αγορά ενέργειας από τρίτους, δηλαδή δεν αξιοποιούνται αρκετά οι ΑΠΕ. Αν λάβουμε υπόψη τους δύο παραπάνω παράγοντες, μία από τις δυνατότητες περαιτέρω αξιοποίησης του θαλάσσιου δυναμικού και μεγιστοποίησης της βιώσιμης εκμετάλλευσης των θαλάσσιων και παράκτιων περιοχών της χώρας, είναι η ενεργειακή

αξιοποίηση της κυματικής ενέργειας. Έχει αρχίσει βέβαια τα τελευταία χρόνια η ενσωμάτωση των ώριμων τεχνολογιών ΑΠΕ (αιολική, ηλιακή) στο ενεργειακό ισοζύγιο της χώρας. Με τη διερεύνηση των δυνατοτήτων προώθησης και της κυματικής ενέργειας, προβάλλει πιθανό να ενισχυθεί ακόμη περισσότερο το πλαίσιο μετασχηματισμού του ενεργειακού ισοζυγίου της χώρας, με ταυτόχρονη διασφάλιση της θαλάσσιας οικονομίας και των παράκτιων περιφερειών, χωρίς υποβάθμιση του περιβάλλοντος. [A43]

Όσον αφορά το κυματικό ενεργειακό του Αιγαίου Πελάγους, συγκριτικά με τις τιμές που εμφανίζονται στην υπόλοιπη Μεσόγειο, παρουσιάζει τις υψηλότερες τιμές, με μέσες ετήσιες τιμές κυματικής ισχύος να κυμαίνονται μεταξύ των 4-11 kW/m. Επίσης, στο Αιγαίο εντοπίζονται και πολλές θαλάσσιες περιοχές «εστιασμού» κυματικής ενέργειας ή αλλιώς “hot spots”, λόγω φαινομένων ανάκλασης και περίθλασης των κυμάτων. Γενικότερα, το τεχνικά εκμεταλλεύσιμο κυματικό δυναμικό της Ελλάδας, υπολογίζεται στις 5-9 TWh ανά έτος. Αυτό το δυναμικό σε συνδυασμό, με άλλες μορφές εκμετάλλευσης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας οι οποίες εφαρμόζεται ήδη, θα μπορούσε να εκμεταλλευτεί η Ελλάδα, προσφέροντας έτσι στην ελληνική οικονομία, πλούσιες και συνεχείς πηγές παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Σαν αποτέλεσμα θα μπορούσε να επιτευχθεί η μείωση εισαγωγής ενέργειας, ενώ ταυτόχρονα να παρέχεται υποστήριξη στο κεντρικό δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας αλλά και τροφοδότηση του δικτύου των νησιωτικών περιοχών με ηλεκτρική ενέργεια ανταποκρινόμενη στην αυξανόμενη ζήτηση και κατανάλωση. Το κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας στα νησιά είναι υψηλό, επομένως θεωρητικά υπάρχουν δυνατότητες να αποδειχθεί ανταγωνιστική η κυματική ενέργεια, αν γίνουν οι κατάλληλες τεχνικές βελτιώσεις. [A43, A44]



Εικόνα 3.1 : Ο χάρτης της Ευρώπης με σημειωμένες τις υποψήφιες περιοχές για την ανάπτυξη κυματικών μονάδων.

Στην Εικόνα 3.1. φαίνεται η εκτεταμένη ευρωπαϊκή ακτογραμμή και επισημαίνεται με διακεκομμένες γραμμές το τμήμα αυτής, που διαθέτει εκμεταλλεύσιμη κυματική ενέργεια. Το συνολικό μήκος αυτής της ακτογραμμής εκτιμάται ότι είναι τουλάχιστον 30.000 km. Σε αυτή περιλαμβάνεται και ολόκληρο το Αιγαίο Πέλαγος. Υποθέτοντας ένα αρχικά διαθέσιμο εκμεταλλεύσιμη ακτογραμμή στην Ε.Ε. 180 km (συμπεριλαμβανομένης της Ισλανδίας και της Νορβηγίας) για την ανάπτυξη διατάξεων κυματικής ενέργειας, αυτό θα αντιστοιχούσε σε μια αγορά περίπου 23.500 συσκευών με πλωτήρα (διαμέτρου 2 - 4 m). Αυτό αντιστοιχεί σε μια αγορά εργασίας 19.200 εργατοετών εξειδικευμένου τεχνικού προσωπικού, χωρίς να συμπεριλαμβάνονται η λειτουργία, η συντήρηση και η επισκευή. Για τον σχεδιασμό και την ανάπτυξη των έργων απαιτούνται επιπλέον περίπου 700 - 1000 εργατοέτη για τους μηχανικούς και τους διαχειριστές των έργων. [A45]

3.2. Μέθοδοι εκτίμησης του κυματικού δυναμικού

3.2.1. Είδη Κυματικών Δεδομένων

Για την εκτίμηση του κυματικού κλίματος μιας θαλάσσιας περιοχής είναι βασική η μελέτη πολυδιάστατων ιστογραμμάτων $f_w(\bar{W})$, όπου W είναι ένα κατάλληλο για την συγκεκριμένη εφαρμογή διάνυσμα φασματικών κυματικών χαρακτηριστικών. Στις περισσότερες περιπτώσεις εφαρμογών συνήθως για την εκτίμηση του κυματικού κλίματος χρειάζεται $\bar{W} = (H_s, T, \theta_{wave})$, όπου H_s είναι το **σημαντικό ύψος κύματος**, T η **κυματική περίοδος** και θ_{wave} η **κατεύθυνση διάδοσης** του κυματισμού.

Με σκοπό την ρεαλιστική απόδοση της εικόνας του κυματικού κλίματος στην εξεταζόμενη περιοχή, η κατασκευή των ιστογραμμάτων $f_w(\bar{W})$, απαιτεί την πραγματοποίηση ενός μεγάλου αριθμού μετρήσεων των τριών παραπάνω βασικών χαρακτηριστικών (H_s, T, θ_{wave}), ανά εποχή. Η χρονική διάρκεια κάλυψης των δεδομένων πρέπει να είναι τουλάχιστον πενταπλάσια του χρονικού διαστήματος αναφοράς, δηλαδή να υπάρχουν τιμές από τουλάχιστον πέντε ίδιες εποχές.

Για την στατιστική εκτίμηση του κυματικού κλίματος σε μια ευρεία θαλάσσια έκταση, απαιτούνται τα ακόλουθα:

- **Λήψη μετρήσεων**, για την παραγωγή κυματικών χαρακτηριστικών στην περιοχή ενδιαφέροντος, κατά την διάρκεια όλης της εξεταζόμενης περιόδου.
- **Συλλογή, ποιοτικός έλεγχος και αρχειοθέτηση των μετρήσεων** ή άλλων δεδομένων από τον οργανισμό που διενεργεί τις μετρήσεις όπου συνήθως είναι το εθνικό ωκεανογραφικό ινστιτούτο και η ΕΜΥ.
- **Στατιστική επεξεργασία** των συγκεκριμένων μετρήσεων και τέλος,
- **Παρουσίαση** των λαμβανομένων **ιστογραμμάτων** για τα κυματικά χαρακτηριστικά που ενδιαφέρουν. [A46]

Στην περίπτωση όπου σε μία ευρεία περιοχή γίνεται περιγραφή του κυματικού κλίματος, μόνο με βάση των επιτόπιων μετρήσεων που αφορούν τα κυματικά χαρακτηριστικά, υπάρχει περίπτωση να προκύψουν κάποιες ειδικές δυσκολίες. Οι **δυσκολίες** μπορεί να οφείλονται τόσο στην απαιτούμενη μακροχρόνια διάρκεια κάλυψης των μετρήσεων όσο και στην **μεγάλη γεωγραφική διασπορά** των μετρήσεων, καθώς οι κυματικές μετρήσεις κοστίζουν αρκετά, μιας και τα όργανα των μετρήσεων είναι συνήθως εγκατεστημένα σε μεγάλες αποστάσεις μεταξύ τους, ώστε να καλύπτουν ταυτόχρονα πολλές διαφορετικές περιοχές ενδιαφέροντος. Τέλος, βασική δυσκολία μπορεί να αποτελέσει η ανομοιογένεια της χωρικής συμπεριφοράς των κυματισμών χαρακτηριστικών που εμφανίζονται σε μια περιοχή.

Για την επίλυση των συγκεκριμένων δυσκολιών, απαραίτητη είναι η εύρεση διαφόρων εναλλακτικών τρόπων παραγωγής στατιστικών κυματικών δεδομένων, όπως:

- Οι **οπτικές παρατηρήσεις** που προέρχονται από ειδικά ωκεανογραφικά πλοία ή ακόμα και απο πλατφόρμες εξόρυξης πετρελαίου/φυσικού αερίου.
- Οι **μετρήσεις από επίγεια συστήματα κυματική μέτρησης**, αερομεταφερόμενα όργανα, όργανα εγκατεστημένα στην ξηρά, όπως είναι τα ραντάρ υψηλών συχνοτήτων και τα μικροκυματικά ραντάρ, συμβάλουν στην συγκεκριμένη διαδικασία λήψης μετρήσεων
- Οι **δορυφορικές τηλεμετρήσεις**, με την βοήθεια δορυφόρων που βρίσκονται σε τροχιά γύρω από την Γη.
- Και τέλος, η **αριθμητική ανασύνθεση**, η οποία αποτελεί μια πηγή αρκετά αξιόπιστων και χαμηλού κόστους κυματικών δεδομένων. Μέσα από την συγκεκριμένη μέθοδο γίνεται ανασύνθεση των των κυματικών χαρακτηριστικών μέσα από αριθμητικά μοντέλα

πρόβλεψης και δεδομένης της αντίστοιχης χρονικής ιστορίας του πεδίου ταχύτητας του διεγείροντος ανέμου.

Στο σημείο αυτό θα πρέπει να σημειωθεί ότι σε πολλές περιπτώσεις πραγματοποιείται συνδυασμός των παραπάνω μεθόδων για τη παραγωγή επαρκών και αξιόπιστων δεδομένων. Ωστόσο, η πηγή δεδομένων η οποία ανταποκρίνεται επαρκώς στις περισσότερες από τις προαναφερόμενες δυσκολίες είναι η μέθοδος της αριθμητικής ανασύνθεσης, με το μόνο μειονέκτημα να εντοπίζεται στην χαμηλή αξιοπιστία σε σχέση με εκείνα που προκύπτουν από κυματικές μετρήσεις οποιουδήποτε είδους. [A46]

3.2.2. Πηγές Κυματικών Δεδομένων

Όσων αφορά τα βασικά κυματικά δεδομένα, όπως είναι το κύριο ύψος, η περίοδος και η κατεύθυνση κυματισμού, ειδικότερα για τον ελληνικό θαλάσσιο χώρο προέρχονται από τις εξής πηγές.

- I. **Προγνώσεις πραγματικού χρόνου** φασματικών παραμέτρων (Real Time Wave Forecasts), όπου τα δεδομένα αυτά παρέχονται από το ΕΛΚΕΘΕ μέσω του Συστήματος ΠΟΣΕΙΔΩΝ.
- II. **Μεταγενέστερες εκτιμήσεις** (Δεδομένα Hindcasting), δηλαδή προσομοιώσεις κυματικών δεδομένων που λαμβάνονται μέσω της μεθόδου ανασύνθεσης του κυματικού κλίματος με την βοήθεια ιστορικών μετεωρολογικών δεδομένων.
- III. **Δορυφορικά δεδομένα**, από τους δορυφόρους TOPEX/Poseidon (μέχρι το 2002), ERS-1, ERS-2 και JASON (από το 2003 και μετά). Τα δεδομένα του TOPEX/Poseidon και του JASON παρέχονται από την ΕΜΥ, ενώ και άλλοι φορείς στα πλαίσια ερευνητικών δραστηριοτήτων τους κατέχουν και χρησιμοποιούν δορυφορικά δεδομένα.
- IV. **Οπτικές παρατηρήσεις** από διερχόμενα πλοία. Τα συγκεκριμένα δεδομένα συλλέγονταν συστηματικά από το 1949 και παρέχονται από το Μετεωρολογικό γραφείο της Αγγλίας. Τα στατιστικά αποτελέσματα συγκεκριμένων παρατηρήσεων αυτών για τον Ελληνικό χώρο εκδόθηκαν από το ΕΜΠ το 1992, μέσω του “Ατλαντα Ανέμου και Κύματος Βορειοανατολικής Μεσογείου Θαλάσσης”
- V. **Σημειακές κυματικές παρατηρήσεις**, οι συγκεκριμένες συλλέγονται στα πλοία ερευνητικών προγραμμάτων και με την βοήθεια διαφόρων οργάνων, όπως τα πιεσόμετρα βυθού, οι στερεοφωτογραφίες, κ.λπ. [A46, A47]

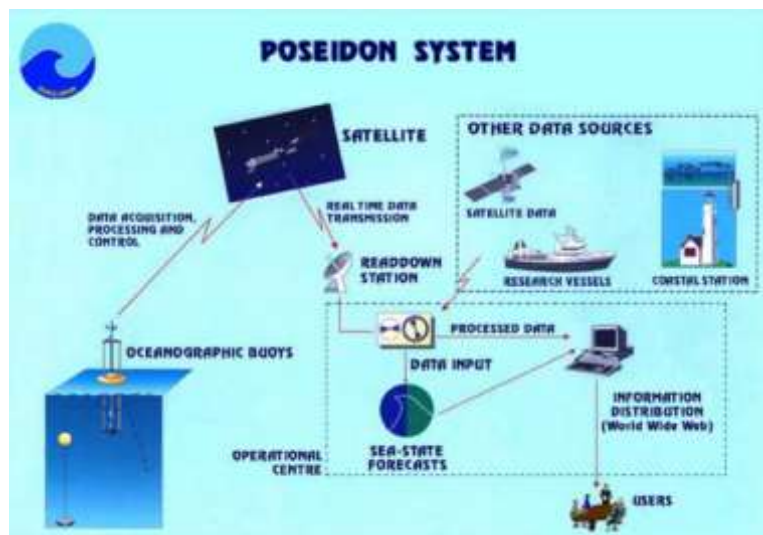
ΕΠΙΤΟΠΙΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ - ΣΥΣΤΗΜΑ “ΠΟΣΕΙΔΩΝ”

Η συγκεκριμένη μέθοδος συλλογής δεδομένων γίνεται με την χρήση του συστήματος παρακολούθησης και πρόγνωσης θαλασσών “ΠΟΣΕΙΔΩΝ”, το οποίο υλοποιήθηκε από το Ινστιτούτο Ωκεανογραφίας του ΕΛΚΕΘΕ (Ελληνικό Κέντρο Θαλάσσιων Ερευνών). Πρόκειται για ένα σύστημα το οποίο αφορά τις ελληνικές θάλασσες και μέσα από το οποίο παρέχονται πληροφορίες σχετικά με αυτές και επιτυγχάνεται παρακολούθηση και πρόγνωση κύματος. Βασίζεται σε ένα δίκτυο πλωτών μετρητικών σταθμών και σε ένα σύστημα αριθμητικών μοντέλων. Από το 1998 μέχρι και σήμερα σε καθημερινή βάση, παρέχεται πρόγνωση κύματος για όλο το Αιγαίο και το Ανατολικό Ιόνιο. Πριν από το συγκεκριμένο σύστημα, το μόνο επιχειρησιακό πρόγραμμα αποτελούσε το μετεωρολογικό δίκτυο της ΕΜΥ (Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία), το σύστημα ΝΗΡΕΑΣ.

Το σύστημα ΠΟΣΕΙΔΩΝ, όπως φαίνεται αναλυτικά και στην Εικόνα 3.2, αποτελείται το Δίκτυο Πλωτών Ωκεανογραφικών Μετρητικών Σταθμών, τα τηλεπικοινωνιακά συστήματα μεταφοράς δεδομένων σε πραγματικό χρόνο και το επιχειρησιακό κέντρο. Οι βασικές λειτουργίες του συστήματος είναι η συνεχής παρακολούθηση και μέτρηση των παραμέτρων του θαλάσσιου και

ατμοσφαιρικού περιβάλλοντος και η απομακρυσμένη μεταφορά των δεδομένων αυτών στο ΕΛΚΕΘΕ για επεξεργασία αλλά και η πρόγνωση της κατάστασης των θαλασσών με τη χρήση αριθμητικών μοντέλων. [A48, S2]

Το σύστημα ΠΟΣΕΙΔΩΝ, μέσα στο διάστημα από το 2005 έως και το 2008, αναβάθμισε τις δυνατότητές του, μέσω του συστήματος ΠΟΣΕΙΔΩΝ-II. Οι αναβαθμίσεις αυτές περιλάμβαναν την επέκταση στο δίκτυο του συστήματος, με νέους μετρικούς σταθμούς σε όλες τις Ελληνικές Θάλασσες, όπως το Ιόνιο και την Νοτιοανατολική Μεσόγειο, αλλά και την αναβάθμιση όλων των αισθητήρων, με σκοπό την βελτίωση της ποιότητας των δεδομένων. Επίσης, επεκτάθηκε το εύρος βάθους στο οποίο δινόταν η δυνατότητα για λήψη μετρήσεων και επίσης αναπτύχθηκε μια νέα πλατφόρμα βυθού, με σύστημα προειδοποίησης για Τσουνάμι. [A48, S2, A44, A50]



Εικόνα 3.2: Σχηματική απεικόνιση της λειτουργίας του συστήματος ΠΟΣΕΙΔΩΝ (Πηγή: S2)

Τα κυματικά δεδομένα των μετρητικών σταθμών είναι ουσιαστικά φασματικές παράμετροι που υπολογίζονται με τη βοήθεια των φασματικών ροπών. Το κατευθυντικό φάσμα των κυματισμών υπολογίζεται επιτόπου στον πλωτό σταθμό από τις χρονοσειρές των κινήσεων του πλωτήρα (εξαιτίας της ταλάντωσης της ελεύθερης επιφάνειας της θάλασσας), με τη βοήθεια ειδικού λογισμικού που είναι εγκατεστημένο στο υπολογιστικό σύστημα του σταθμού. Οι κυματικές μετρήσεις λαμβάνουν χώρα ανά 3 ώρες (διάστημα παύσης μετρήσεων) και για χρονικό διάστημα 17 min (διάρκεια καταγραφής). Οι βασικότερες φασματικές παράμετροι που υπολογίζονται επιτόπου στους σταθμούς είναι: (α) το σημαντικό ύψος κύματος, (β) η μέση περίοδος μηδενικής υπέρβασης, (γ) η περίοδος κορυφής φάσματος, (δ) η μέση κατεύθυνση διάδοσης των κυματισμών, (ε) η κατεύθυνση διάδοσης των κυματισμών που αντιστοιχεί στην κορυφή του φάσματος, (στ) το σημαντικό ύψος κύματος που αντιστοιχεί στο υψηλόσυχο τμήμα του φάσματος (αντιστοιχεί στους τοπικούς ανεμογενείς κυματισμούς, (ζ) το σημαντικό ύψος κύματος που αντιστοιχεί στο χαμηλόσυχο τμήμα του φάσματος (αντιστοιχεί στην αποθάλασσα), (η, θ) η μέση περίοδος μηδενικής υπέρβασης που αντιστοιχεί στο υψηλόσυχο και στο χαμηλόσυχο τμήμα του φάσματος. Αντίστοιχα στη συνέχεια παράγονται: (ι) η μέση κατεύθυνση διάδοσης των τοπικών ανεμογενών κυματισμών, (ια) η μέση κατεύθυνση διάδοσης της αποθάλασσας, (ιβ) η παράμετρος διασποράς στη φασματική περίοδο κορυφής και (ιγ) ο δείκτης μονο κατευθυντικότητας. Μέσω των φασματικών ροπών ορίζονται, επίσης, οι συντελεστές εύρους φάσματος και η κυματική κλίση

Αριθμητικά Μοντέλα Κυματικών Εκτιμήσεων

Όπως προαναφέρθηκε, οι παρατηρήσεις και οι μετρήσεις κυματικών παραμέτρων δεν είναι πάντα επαρκής και είναι περιορισμένης χρονικής διάρκειας. Αυτό αυτομάτως αυξάνει την ανάγκη για εύρεση και χρήση αξιόπιστων αριθμητικών μοντέλων εκτίμησης κυματισμών, είτε με σκοπό την πρόγνωση είτε για μεταγενέστερη εκτίμηση του κυματικού κλίματος. Τα τελευταία χρόνια γίνεται χρήση αριθμητικών μοντέλων προσομοίωσης των ανεμογενών θαλάσσιων κυματισμών από τα οποία εξάγονται κυματικά δεδομένα. Ατμοσφαιρικές παράμετροι, όπως η ταχύτητα του ανέμου, χρησιμοποιούνται για την παραγωγή δεδομένων κυματικών παραμέτρων.

Το πιο άρτιο και πιο διαδεδομένο κυματικό μοντέλο στον κόσμο είναι το μοντέλο **WAM-cycle4** ή αλλιώς **WAM**. Πρόκειται για ένα μοντέλο κύματος τρίτης γενιάς, το οποίο υπολογίζει τα φάσματα τυχαίων βραχέων κυμάτων που παράγονται από αιολική ενέργεια και είναι ένα από τα πιο δημοφιλή και καλά δοκιμασμένα μοντέλα κυμάτων. Είναι το πρώτο μοντέλο που επιλύει την εξίσωση πλήρους πυκνότητας δράσης, συμπεριλαμβανομένων των μη γραμμικών αλληλεπιδράσεων κύματος-κύματος. Χρησιμοποιείται για ερευνητικές αλλά και επιχειρησιακές εφαρμογές σε τοπικό και παγκόσμιο επίπεδο και εφαρμόζεται για την παρουσίαση και βελτίωση των κυματικών δεδομένων που λαμβάνονται από δορυφόρους.

Πιο συνοπτικά, τα κυματικά φαινόμενα που λαμβάνονται υπόψη στο συγκεκριμένο μοντέλο WAM, είναι τα εξής:

- Χρονική και χωρική κυματική διάδοση
- Δημιουργία ανεμογενών κυματισμών
- Διάθλαση κυματισμών
- Θραύση κυματισμών
- Επιδράσεις τριβής βυθού

Στην συγκεκριμένη κατηγορία, τα αποτελέσματα συγκεντρώνονται συνήθως σε μορφή Άτλαντα για μια μεγάλη γεωγραφική περιοχή, όπως για παράδειγμα τον Παγκόσμιο Ωκεανό, τις Ευρωπαϊκές θάλασσες, τη Μεσόγειο θάλασσα κ.λπ. Τα τελευταία 40 χρόνια οι Άτλαντες που έχουν εκδοθεί και περιέχουν κυματικά δεδομένα αριθμητικής ανασύνθεσης που αφορούν την Μεσόγειο θάλασσα είναι οι εξής:

- **Naval Oceanography Command Detachment: U.S. Navy Hindcast Spectral Ocean Wave Model Climatic Atlas: Mediterranean Sea, 1990.**

Τα διαθέσιμα κυματικά δεδομένα που παίρνουμε από την συγκεκριμένη πηγή, αφορούν το σημαντικό ύψος, την κατεύθυνση, την κλίση, την περίοδο κύματος αλλά και την κατευθυντικότητα, τα οποία είναι σε μορφή χρονοσειρών διάρκειας 10 ετών και πινάκων συχνότητας εμφάνισης. Η παραγωγή των συγκεκριμένων δεδομένων έγινε μέσω της χρήσης του μοντέλου SOWM (Spectral Ocean Wave Model), σε πλέγμα ανάλυσης έως και 180 ναυτικών μιλίων. Είναι ένα κυματικό μοντέλο γενικής χρήσης και χαμηλής ανάλυσης όσον αφορά τις βαθιές θάλασσες και στο οποίο δεν περιλαμβάνονται φαινόμενα όπως η διάθλαση, η περίθλαση, η ρίχωση και η τριβή του πυθμένα.

- **Weratlas, INEGI - Instituto Nacional de Engenharia e Tecnologia Industrial, Portugal, 1997.**

Για την δημιουργία του συγκεκριμένου Άτλαντα συνεργάστηκαν ερευνητικά κέντρα, εταιρείες και πανεπιστήμια από Πορτογαλία, Ιταλία, Μ. Βρετανία, Ιρλανδία, Ελλάδα

και Νορβηγία. Τα δεδομένα που παρέχει είναι από το μοντέλο WAM, με ανάλυση $3^{\circ} \times 3^{\circ}$ και αφορούν 44 σημεία σε όλη τη Μεσόγειο.

- **Eurowaves Atlas, 2001.**

Στα πλαίσια του προγράμματος MAST-3 "EUROWAVES", παρήχθησαν χρονοσειρές φασματικών παραμέτρων διάρκειας 6 ετών για το Αιγαίο Πέλαγος (ανάλυση $0,5^{\circ} \times 0,5^{\circ}$), χρησιμοποιώντας το κυματικό μοντέλο WAM-cycle 4 με ανεμολογικά δεδομένα από το ECMWF. Στα πλαίσια του Eurowaves έγιναν και συγκρίσεις των αποτελεσμάτων του μοντέλου με δεδομένα από δορυφόρους.

- **Wind and Wave Atlas of the Mediterranean Sea, Medatlas Group, 2004.**

Ο Άτλαντας αυτός αποτελεί προϊόν συνεργασίας μεταξύ ερευνητικών κέντρων και πανεπιστημίων της Γαλλίας, Ελλάδας και Ιταλίας. Για τη διόρθωση των αποτελεσμάτων του μοντέλου WAM χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από επιτόπιους σταθμούς μέτρησης στις Ιταλικές ακτές, καθώς και δορυφορικά δεδομένα από τους δορυφόρους ERS-1, ERS-2 και TOPEX/Poseidon για το ύψος κύματος και την ταχύτητα ανέμου. Παρόλα αυτά, η χαμηλή ανάλυση που παρέχεται από τον Άτλαντα αυτόν (της τάξεως των 50 km) δεν είναι πολύ ικανοποιητική για την περιγραφή του κυματικού κλίματος των ελληνικών θαλασσών. Οι διαθέσιμες χρονοσειρές των ανεμολογικών και κυματικών χαρακτηριστικών καλύπτουν την περίοδο 1992-2002. [A46, A51, A52]

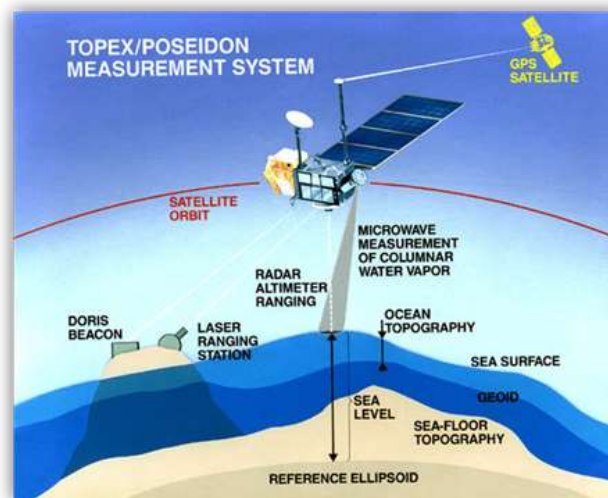
Την τελευταία εικοσαετία είναι διαθέσιμοι Άτλαντες Ανέμου και Κύματος με πεδίο αναφοράς τον Παγκόσμιο Ωκεανό που βασίζονται σε δορυφορικά δεδομένα, συχνά σε συνδυασμό με αποτελέσματα αριθμητικής ανασύνθεσης. Ένας τέτοιος Άτλαντας εκδόθηκε από τους Young, Holland (1996) και βασίζεται σε δορυφορικά δεδομένα από το δορυφόρο GEOSAT, τα οποία διορθώθηκαν με βάση επιτόπιες μετρήσεις και αποτελέσματα αριθμητικής ανασύνθεσης. Η ανάλυση των δεδομένων είναι $4^{\circ} \times 4^{\circ}$, το διάστημα κάλυψης είναι από το 1986 μέχρι το 1990 και το πεδίο μελέτης είναι ο Παγκόσμιος Ωκεανός (συμπεριλαμβάνεται η Μεσόγειος). Επιπλέον, η γαλλική εταιρεία MeteoMer σε συνεργασία με το ερευνητικό κέντρο Ifremer ανέπτυξαν το κυματικό Άτλαντα ClioSat. Η βάση δεδομένων του ClioSat προέρχεται από δορυφορικές μετρήσεις αλτιμετρίας, όπως το ύψος κύματος και η ταχύτητα του ανέμου, μετρήσεις για τις αποθάλασες καθώς και μετρήσεις για την ταχύτητα και τη κατεύθυνση του ανέμου.

ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΚΥΜΑΤΙΣΜΩΝ - ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΗ ΑΛΤΙΜΕΤΡΙΑ

Στην συγκεκριμένη κατηγορία, η μέθοδος που χρησιμοποιείται για την συλλογή των μετρήσεων ονομάζεται, **δορυφορική αλτιμετρία**. Είναι μία τεχνική που εφαρμόζεται για τη μέτρηση της απόστασης ενός δορυφόρου από τη στάθμη της θάλασσας, με τη χρήση ενός radar ή laser αλτιμέτρου. Βασίζεται στην μέτρηση του χρόνου που χρειάζεται ένας παλμός ραντάρ, για να διανύσει την απόσταση από την κεραία του δορυφόρου μέχρι την επιφάνεια του αντικειμένου (στην προκειμένη περίπτωση την επιφάνεια της θάλασσας) και πάλι πίσω στην κεραία του δορυφόρου (Εικόνα 3.3). Συνδυάζοντας αυτή την μέτρηση του χρόνου με μετρήσεις της ακριβούς θέσης του δορυφόρου τη δεδομένη χρονική στιγμή της μέτρησης, μπορούμε να υπολογίσουμε το υψόμετρο της επιφάνειας της θάλασσας ή της στάθμης της θάλασσας ως προς κάποιο ελλειψοειδές αναφοράς. Οι μετρήσεις της δορυφορικής αλτιμετρίας χρησιμοποιούνται για την παρατήρηση και μελέτη των ιδιοτήτων του θαλάσσιου περιβάλλοντος, της μεταβολής της στάθμης της θάλασσας, των μετακινήσεων των πάγων, της ταχύτητας των ανέμων, του ύψους των κυμάτων κ.ά.

Η τοπογραφία της θαλάσσιας επιφάνειας, όπως μετράται από τα δορυφορικά αλτιμέτρα, αποκαλύπτει διογκώσεις (κυρτώματα προς τα έξω) και κοιλότητες (υφέσεις) της θαλάσσιας

επιφάνειας, με ανάγλυφο που εμφανίζει διακυμάνσεις της τάξεως του 1 m από τη μέση στάθμη της θάλασσας (ΜΣΘ). Επειδή αυτές οι επιφανειακές μεταβολές εκτείνονται σε μεγάλο εύρος, δεν μπορούν να ανιχνευθούν με το ανθρώπινο μάτι. Η θαλάσσια επιφάνεια παρουσιάζει ανωμαλίες, σε σχέση με τη μέση στάθμη θάλασσας, οι οποίες "μιμούνται" την τοπογραφία του ωκεάνιου φλοιού (Εικόνα 3.3). Το σχήμα της επιφάνειας της θάλασσας καθορίζεται από την ένταση της βαρύτητας που δημιουργείται από υποθαλάσσια όρη, κορυφές, κοιλάδες και άλλες γεωλογικές δομές του πυθμένα. Όσο πιο μεγάλο είναι ένα υποθαλάσσιο όρος, τόσο μεγαλύτερη θα είναι η δύναμη της βαρύτητας. Επομένως, μάζες θαλάσσιου νερού συσσωρεύονται γύρω από τον υποθαλάσσιο όγκο, προκαλώντας μια διόγκωση στην τοπογραφία της θαλάσσιας επιφάνειας. Δεδομένα της δορυφορικής αλτιμετρίας χρησιμοποιούνται για να κατασκευαστούν βυθομετρικοί χάρτες των ωκεανών μέχρι 11 km βάθος. Υποθαλάσσιες κορυφογραμμές και βαθιά χαρακώματα διαγράφονται ευκρινώς με την αλτιμετρία από δορυφόρους. Οι βυθομετρικοί αυτοί χάρτες χρησιμοποιούνται στη θεωρία των πλακών, στην ανίχνευση και εντοπισμό κοιτασμάτων στη θάλασσα.



Εικόνα 3.3: Αρχή λειτουργίας της δορυφορικής αλτιμετρίας

Συγκεκριμένα, η κυματομορφή του ανακλώμενου παλμού έχει ένα χαρακτηριστικό σχήμα που μπορεί να περιγραφεί αναλυτικά, ενώ η ένταση του παλμού ποικίλλει με την πάροδο του χρόνου επιστροφής του παλμού. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.7, όταν η επιφάνεια της θάλασσας είναι επίπεδη κατά τη διάρκεια περιόδων ηρεμίας (πάνω), ο παλμός ανακλάται έντονα από τη στιγμή που η αιχμή του εκπεμπόμενου δορυφορικού παλμού χτυπά την επιφάνεια. Αντίθετα, όταν επικρατεί θαλασσοταραχή (κάτω), ο παλμός ανακλάται αρχικά από την κορυφή του υψηλότερου κύματος που βρίσκεται απευθείας κάτω από το δορυφόρο και μετέπειτα από τη σειρά άλλων κυματοκορυφών διαδοχικών κυμάτων, με τρόπο ώστε το πλάτος του ανακλώμενου παλμού να αυξάνεται σταδιακά. Με τον τρόπο αυτό μπορεί να εκτιμηθεί το σημαντικό ύψος των κυμάτων από την κλίση της καμπύλης που αντιπροσωπεύει το πλάτος του ανακλώμενου παλμού με την πάροδο του χρόνου κατά μήκος του ίχνους του δορυφόρου στην επιφάνεια της θάλασσας. Επιπλέον μπορεί να παραχθεί και η ταχύτητα του ανέμου από τη δύναμη του σήματος που οπισθοσκεδάζεται.

Το κύριο **πλεονέκτημα** των κυματικών αλτιμετρικών δεδομένων είναι ότι καλύπτουν συστηματικά πολύ μεγάλες εκτάσεις και παρέχουν πληροφόρηση ακόμα και σε περιοχές με ιδιαίτερα δυσμενείς καιρικές συνθήκες. Κύριο **μειονέκτημα** είναι η χαμηλή χρονική συχνότητα επισκεψιμότητας του εκάστοτε δορυφόρου πάνω από τα ίδια σημεία της θαλάσσιας επιφάνειας, από 5 έως 35 μέρες, ανάλογα με τα χαρακτηριστικά της τροχιάς του (π.χ. την κλίση της τροχιάς). Η δυσκολία αυτή παρακάμπτεται με τη συνδυασμένη χρήση αλτιμετρικών δεδομένων από διαφορετικούς δορυφόρους.

Τον πρώτο δορυφόρο με δυνατότητα πραγματοποίησης μετρήσεων με την μέθοδο της δορυφορικής αλτιμετρίας τον κατασκεύασαν και τον έθεσαν σε τροχιά οι ΗΠΑ το 1975. Ήταν ο δορυφόρος **GEOS-3** που ακολούθησε τη διαστημική αποστολή του πρώτου διαστημικού σταθμού **Skylab** το 1973, όπου είχε δοκιμαστεί πειραματικά η λειτουργική αρχή της δορυφορικής αλτιμετρίας. Το 1978, ακολούθησε η εκτόξευση ενός δεύτερου δορυφόρου με τις πρώτες πραγματικά δυνατότητες ικανής ακρίβειας και χρήσιμων δεδομένων, του **Seasat**, ο οποίος όμως λειτούργησε λιγότερο από ένα μήνα εξ αιτίας κάποιου προβλήματος στο σύστημα ηλεκτρικής τροφοδοσίας του. Η πρώτη πραγματικά επιχειρησιακή αποστολή ήταν εκείνη του δορυφόρου **Geosat** που εκτοξεύθηκε για να καλύψει κυρίως τις ανάγκες του αμερικανικού Ναυτικού, αλλά τελικά παρείχε υψηλής ακρίβειας γεωδαιτικά δεδομένα ιδιαίτερα κατά τη διάρκεια της ειδικής γεωδαιτικής αποστολής του. Η πιο καθοριστική όμως αποστολή για την συγκέντρωση μετρήσεων για τον προσδιορισμό της ωκεάνιας επιφάνειας με την μέθοδο της δορυφορικής αλτιμετρίας ήταν η αποστολή **TOPEX / POSEIDON** που ξεκίνησε το 1987. Η αποστολή πραγματοποιήθηκε από την συνεργασία του γαλλικού διαστημικού οργανισμού CNES (Centre Nationale d' Etudes Spatiales) με τη NASA και ήταν απόλυτα επιτυχής, καθώς η ποιότητα των δεδομένων, οι συνεχείς και ομοιογενείς μετρήσεις για πολλά συναπτά έτη και η επιστημονική και διεθνής συνεργασία πάνω στο πρόγραμμα συνέβαλαν στην συγκέντρωση αξιόπιστων δεδομένων για την ωκεάνια επιφάνεια σε παγκόσμιο επίπεδο.

Σε ότι αφορά τις ελληνικές θάλασσες, η χωρική και χρονική κάλυψη των δορυφορικών δεδομένων είναι περιορισμένη, καθώς το ίχνος του δορυφόρου είναι μεγάλο και πέρα από αυτό, υπάρχει δυσκολία στην μέτρηση του επιπέδου της θάλασσας, όταν στο ίχνος του δορυφόρου περιλαμβάνεται και ξηρά. Με αποτέλεσμα οι θαλάσσιες περιοχές σε απόσταση 3-5 km από την ακτή ή ακόμα και τα νησιά, να μην καλύπτονται από τον δορυφόρο. Άρα τα δεδομένα του κυματισμού που μπορούν να ληφθούν από τον δορυφόρο αφορούν την ανοιχτή θάλασσα και όχι τις περιοχές κοντά στην ακτή.

ΟΠΤΙΚΕΣ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ ΚΥΜΑΤΙΚΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ

Κατά τον υπολογισμό και την καταγραφή της συνάρτησης της ανύψωσης της επιφάνειας της θάλασσας για μια συγκεκριμένη περιοχή, τα φαινόμενα μεγέθη ορίζονται με σαφήνεια και η στατιστική τους είναι εύκολο να εξαχθεί. Στην προσπάθεια όμως να συλλέγουν δεδομένα για τις καταστάσεις θάλασσας σε παγκόσμια βάση, χρησιμοποιούνται δεδομένα που προέρχονται από τις εκτιμήσεις της τιμής των φαινομένων μεγεθών, καθώς είναι πρακτικά αδύνατη η εγκατάσταση ενός πυκνού δικτύου μετρητικών οργάνων ώστε να καλύπτεται όλη η θαλάσσια επιφάνεια της υδρογείου. Οι παρατηρήσεις αφορούν το ύψος κύματος, την περίοδο και κύρια κατεύθυνση των κυματισμών, κ.λπ. Τα μεγέθη αυτά ονομάζονται αντίστοιχα παρατηρούμενο ύψος κύματος H_v (Visual Wave Height), παρατηρούμενη περίοδος κύματος T_v (visual Wave period), παρατηρούμε η κύρια κατεύθυνση τον κυματισμό $\theta_{v, wave}$ (Visual Wave Direction), κ.λπ. Η εκτίμηση των μεγεθών αυτών γίνεται με βάση ορισμένους κανόνες αλλά, παίζουν ρόλο και υποκειμενικοί παράγοντες. Η ποσοτική συσχέτιση μεταξύ φαινομένων και παρατηρούμενων μεγεθών είναι γενικά αβέβαιη και απαιτεί ειδική συγκριτική στατιστική ανάλυση των εξαγόμενων των μετρήσεων και των παρατηρήσεων ανά περιοχή μελέτης.

Παρατηρήσεις ωκεανολογικών χαρακτηριστικών από πλοία άρχισαν να συλλέγονται από το 1854 και να αρχειοθετούνται από το Sheerman, το νεοσύστατο τότε, μετεωρολογικό γραφείο της Αγγλίας. Η κύρια πηγή των δεδομένων τους ήταν οι αναφορές που στέλνονταν από τα πλοία, οι οποίες αφορούσαν τις επικρατούσες συνθήκες ανέμου και κυματισμών αλλά και άλλων κλιματολογικών χαρακτηριστικών. Η εκτέλεση, η συλλογή και η αρχειοθέτηση παρατηρήσεων από πλοία έγινε πιο εντατική μετά το 1949, όπου και άρχισαν να γίνονται συστηματικές παρατηρήσεις υψών, κατευθύνσεων και περιόδων αλλά και μηκών κύματος, ενώ και η συνεργασία με άλλες χώρες επηρέασε σημαντικά στην εξέλιξη του συστήματος.

Ένα από τα γενικά χαρακτηριστικά των παρατηρήσεων από πλοία είναι, η αξιοπιστία των μέσων τιμών των δεδομένων. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι παρατηρήσεις γίνονται από μεγάλο πλήθος διαφορετικών ατόμων και κάτω από διαφορετικές συνθήκες, οπότε είναι λογικό να θεωρούνται τα πιθανά λάθη ως μη συστηματικά, αλλά τυχαία και άρα να αλληλοαναιρούνται σε μεγάλο βαθμό κατά την λήψη της μέσης τιμής. Επίσης, οι παρατηρήσεις από πλοία έχουν μέγιστη πυκνότητα γύρω από τις κύριες θαλάσσιες ρότες που χρησιμοποιούνται στη διεθνή ναυσιπλοΐα. Ενδεικτικό για τη χρησιμότητα και την εκτίμηση που υπάρχει διεθνώς για κυματικά δεδομένα από πλοία, είναι το γεγονός ότι από το 1967 μέχρι σήμερα εκδίδονται συνεχώς Άτλαντες που παρουσιάζουν, υπό τη μορφή ιστογραμμάτων, τα αποτελέσματα των παρατηρήσεων αυτών.

3.3. Κυματικό Ενεργειακό Δυναμικό του Αιγαίου Πελάγους

Οι Ελληνικές θάλασσες αποτελούν τις πιο κατάλληλες περιοχές της Μεσογείου, όσων αφορά την εκμετάλλευση της θαλάσσιας ενέργειας και ειδικά της κυματικής. Η Ελλάδα είναι μια χώρα με πάνω από 16.000χλμ. ακτογραμμής, συνολικά σε Αιγαίο και Ιόνιο πέλαγος, με το Αιγαίο να αποτελεί έναν ισχυρό ενεργειακό πόρο, όσων αφορά το αιολικό δυναμικό που συγκεντρώνει. Πιο συγκεκριμένα, οι Βορειοδυτικοί άνεμοι που επικρατούν στη συγκεκριμένη περιοχή, δημιουργούν κατάλληλες συνθήκες εκμετάλλευσης της κυματικής ενέργειας, μέσης ετήσιας τιμή ισχύος 4-11 kW/m. Όσων αφορά το τεχνικά εκμεταλλεύσιμο κυματικό δυναμικό, υπολογίζεται στις 5-9 TWh ετησίως, ποσό που υπολογίζεται ότι μπορεί να καλύψει περίπου το 10% της συνολικής κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα. Το θεωρητικό αυτό μέγεθος θα μπορούσε να αυξήσει τα ποσοστά ένταξης των ΑΠΕ στην συνολική παραγωγή ενέργειας. Επιπλέον, θα μπορούσε να συμβάλλει αποτελεσματικά στην ενεργειακή αυτονομία μεγάλου αριθμού νησιών, τα οποία τροφοδοτούνται κυρίως από σταθμούς ντίζελ, καθώς το υψηλό κόστος ηλεκτρικής ενέργειας στα νησιά θα καταστήσει την ενέργεια των κυμάτων ανταγωνιστική έναντι των συμβατικών παραγωγών ενέργειας. [A2]

3.3.1. Άτλαντας Ανέμου και Κύματος των Ελληνικών Θαλασσών

Η πρώτη προσπάθεια για να εκτιμηθεί η υπεράκτια κυματική ενέργεια της Ευρώπης ήταν ο “Ευρωπαϊκός Άτλαντας Κυματικής Ενέργειας” (European Wave Energy Atlas, WERATLAS), για την δημιουργία του οποίου χρησιμοποιήθηκαν μια κοινή μεθοδολογία και ομοιογενή σύνολα δεδομένων ελεγχόμενης ακρίβειας. Η χρηματοδότηση για την ανάπτυξη του, έγινε από την Ευρωπαϊκή Ένωση, το 1994. Ο συγκεκριμένος Άτλαντας περιλαμβάνει ένα σύνολο στατιστικών στοιχείων που αφορούν την κυματική ενέργεια και το θαλάσσιο κλίμα, τα οποία επιτρέπουν τον χαρακτηρισμό των υπεράκτιων κυματικών πόρων του Ατλαντικού Ωκεανού και της Μεσογείου Θάλασσας.

Η ανάγκη για την πιο έγκυρη εκτίμηση της κατάστασης του ανεμολογικού και κυματικού κλίματος των ελληνικών θαλασσών σε μακροχρόνια βάση, οδήγησαν το 2007, μετά από εκτενής έρευνα στην δημιουργία του “Άτλαντα Ανέμου και Κύματος των Ελληνικών Θαλασσών”. (Εικ.3.4) Ο συγκεκριμένος Άτλαντας αποτελεί προϊόν του προγράμματος “Επιχειρησιακό Σύστημα Παρακολούθησης και Πρόγνωσης κυματισμών με εφαρμογές στην Ελληνική Ναυσιπλοΐα (ΕΣΠΙΕΝ)”, για το οποίο συνεργάστηκαν το Ελληνικό Κέντρο Θαλάσσιων Ερευνών (ΕΛΚΕΘΕ) και το Πανεπιστήμιο Αθηνών. Πριν από τον συγκεκριμένο, ο Άτλαντας για τις ελληνικές θάλασσες ονομαζόταν “Άτλαντας Ανέμου και Κύματος της Βορειοανατολικής Μεσογείου Θαλάσσης” και είχε εκδοθεί το 1992, από το Εργαστήριο Ναυτικής Υδροδυναμικής του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου σε συνεργασία με το Γενικό Επιτελείο Ναυτικού. Σε αντίθεση με τον νέο Άτλαντα, ο οποίος βασίζεται σε επιτόπιες μετρήσεις του συστήματος ΠΟΣΕΙΔΩΝ αλλά και σε αποτελέσματα προσομοίωσης δεκαετούς διάρκειας, ο προηγούμενος Άτλαντας βασιζόταν μόνο σε οπτικές παρατηρήσεις από πλοία εθελοντικής παρατήρησης. [A46]



Εικ. 3.4: Το εξώφυλλο του Άτλαντα Ανέμου και Κύματος των Ελληνικών Θαλασσών [A46]

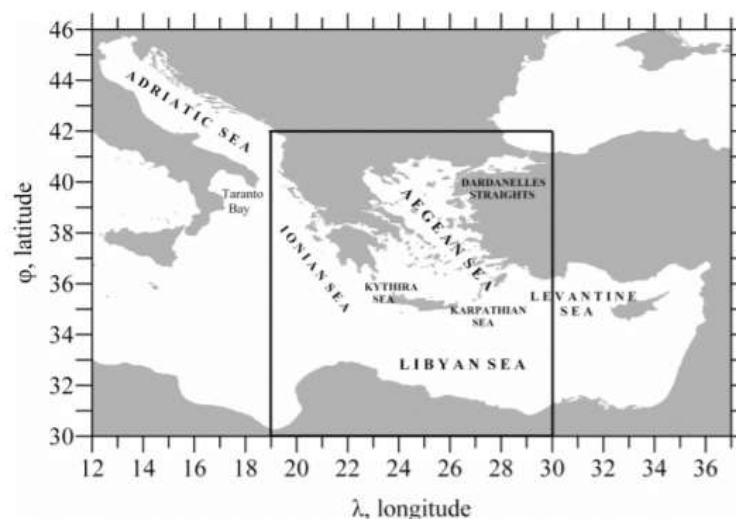
Στην πλειοψηφία τους, οι Άτλαντες που έχουν εκδοθεί μέχρι σήμερα, για διάφορες περιοχές της Υδρογείου, περιέχουν αποτελέσματα που προέρχονται είτε από μεθόδους αριθμητικής ανασύνθεσης του κυματικού και ανεμολογικού κλίματος είτε από οπτικές μετρήσεις. Ο συγκεκριμένος Άτλαντας περιέχει, για πρώτη φορά στην Ελλάδα, αποτελέσματα μετρήσεων, γεγονός που αυξάνει την αξιοπιστία του. Επίσης, τα αποτελέσματα αριθμητικής ανασύνθεσης έχουν παραχθεί από αριθμητικά μοντέλα υψηλής χωρικής και χρονικής διακριτοποίησης, έτσι ώστε οι ιδιαιτερότητες του κυματικού και ανεμολογικού καθεστώτος των ελληνικών θαλασσών να αναπαρίστανται με όσο το δυνατόν καλύτερη προσέγγιση. [A46]

Τα δεδομένα προσομοίωσης του Άτλαντα αφορούν την περιοχή που ορίζεται από τα σημεία με τις εξής συντεταγμένες:

(45,25° B , 19,00° A) , (42,25° B , 30,00° A),

(30,25° B , 19,00° A) , (30,25° B , 30,00° A), (Εικόνα 3.5)

έχουν διάρκεια δέκα ετών, από το 1994 έως και το 2004, με χρονικό βήμα τριών ωρών και με χωρική ανάλυση 0,1° x 0,1°. Τα ανεμολογικά και κυματικά δεδομένων που παρουσιάζονται αναλυτικά στον συγκεκριμένο Άτλαντα, προέρχονται από προσομοίωση, η οποία γίνεται για δώδεκα επιλεγμένα σημεία στο Αιγαίο, Ιόνιο, Καρπάθιο και Λιβυκό Πέλαγος και στη Θάλασσα της Λεβαντίνης και των Κυθέρων, υπό τη μορφή δισδιάστατων ιστογραμμάτων ανεμολογικών και κυματικών παραμέτρων. Η χωρική συμπεριφορά των παραμέτρων αυτών για ολόκληρη την περιοχή μελέτης αναπαρίσταται μέσω ισοσταθμικών καμπυλών, δηλαδή καμπυλών με σταθερή μέση τιμή μιας κυματικής ή ανεμολογικής παραμέτρου και ισοπληθών (ισοπιθανοτικών) καμπυλών χωρικής κατανομής των παραμέτρων για διαφορετικές τιμές κατωφλίου σε ετήσια και εποχιακή βάση. [A46, A53]



Εικόνα. 3.5: Η περιοχή που μελετήθηκε στα πλαίσια του
 Άτλαντα Ανέμου και Κύματος των Ελληνικών Θαλασσών (μέσα στο πλαίσιο) [A53]

Σημαντική καινοτομία του Άτλαντα αποτελεί η στατιστική παρουσίαση (υπό τη μορφή δισδιάστατων ιστογραμμάτων) μετρημένων ανεμολογικών και κυματικών παραμέτρων που ελήφθησαν από σταθμούς του δικτύου ΠΟΣΕΙΔΩΝ κατά το διάστημα 1999 - 2006. Τα αποτελέσματα του Άτλαντα που προέρχονται από αριθμητική προσομοίωση αναπαριστούν τη μέση (από στατιστική άποψη) κατάσταση των ελληνικών θαλασσών σε ό,τι αφορά τα ανεμολογικά και κυματικά τους χαρακτηριστικά. Τα αποτελέσματα αριθμητικής προσομοίωσης αποτελούν πάντα προσέγγιση της πραγματικής κατάστασης και προσφέρουν μια συνολική εικόνα του κυματικού κλίματος ευρέων θαλάσσιων περιοχών. Γι αυτό, οποιαδήποτε εστιασμένη μελέτη των τοπικών κυματικών χαρακτηριστικών μιας περιοχής δεν θα πρέπει να βασίζεται αποκλειστικά σε αυτά τα αποτελέσματα του Άτλαντα, αλλά και σε ειδικές κυματικές προσομοιώσεις ή μετρήσεις στη συγκεκριμένη περιοχή.

Αξίζει να σημειωθεί, ότι το 2004 ολοκληρώθηκε ένας άλλος Άτλαντας, που αφορούσε αποκλειστικά τη Μεσόγειο Θάλασσα και έγινε στα πλαίσια ερευνητικού προγράμματος που χρηματοδοτήθηκε από διάφορες ευρωπαϊκές πηγές (Med-Atlas Group). Ο Άτλαντας αυτός βασίζεται σε αποτελέσματα αριθμητικής ανασύνθεσης με χρήση του κυματικού μοντέλου WAM με ανάλυση πεδίου 0,25ο. Η ανάλυση αυτή, ενώ είναι κατάλληλη για τη γενική περιγραφή του ανεμολογικού και κυματικού καθεστώτος της Μεσογείου συνολικά, είναι ανεπαρκής για την αποτύπωση του αντίστοιχου καθεστώτος θαλάσσιων περιοχών με έντονο ανάγλυφο, μεγάλες και απότομες αλλαγές στη βαθυμετρία και πολλά νησιωτικά συμπλέγματα. Το κενό αυτό, σε ό,τι αφορά το ανεμολογικό και κυματικό κλίμα των ελληνικών θαλασσών, κάλυψε η έκδοση του Άτλαντα του 2007, ο οποίος χρησιμοποιεί προσομοιώσεις υψηλής χωρικής ανάλυσης 0,1ο. Τα δεδομένα αυτά σε συνδυασμό με τις μετρήσεις των ανεμολογικών και κυματικών χαρακτηριστικών, προσφέρουν μια πολύ ικανοποιητική και αξιόπιστη στατιστική εικόνα της γενικής κατάστασης των ελληνικών θαλασσών. [A46]

3.3.2. Εκτίμηση Κυματικού Δυναμικού Των Ελληνικών Θαλασσών

Εκτίμηση κυματικού δυναμικού με βάση τα στοιχεία του “Άτλαντα Ανέμου και Κυμάτων Των Ελληνικών Θαλασσών”.

Όπως αναφέρθηκε και στην προηγούμενη ενότητα (4.3.1), σχετικά με τον Άτλαντα, τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τη στατιστική επεξεργασία των δεδομένων παρουσιάζονται σε διάφορες μορφές:

A. Στη μορφή **χαρτών** του πεδίου μελέτης, στους οποίους απεικονίζεται η χωρική κατανομή ανεμολογικών και φασματικών κυματικών παραμέτρων. Στη μορφή αυτή παρουσιάζονται μόνο τα δεδομένα που προέρχονται από αριθμητική ανασύνθεση, καθόσον μόνο για τέτοιου είδους αποτελέσματα διαθέτουμε τη χωρική τους συμπεριφορά.

B. Στη μορφή **δισδιάστατων ιστογραμμάτων** από κοινού εμφάνισης ανεμολογικών και κυματικών παραμέτρων. Στη μορφή αυτή παρουσιάζονται τόσο τα δεδομένα που προέρχονται από αριθμητική ανασύνθεση (για 12 συγκεκριμένα κομβικά σημεία), όσο και τα δεδομένα των μετρήσεων (για 6 συγκεκριμένες θέσεις μετρήσεων).

Στην περίπτωση των χαρτών η παρουσίαση των αποτελεσμάτων γίνεται με:

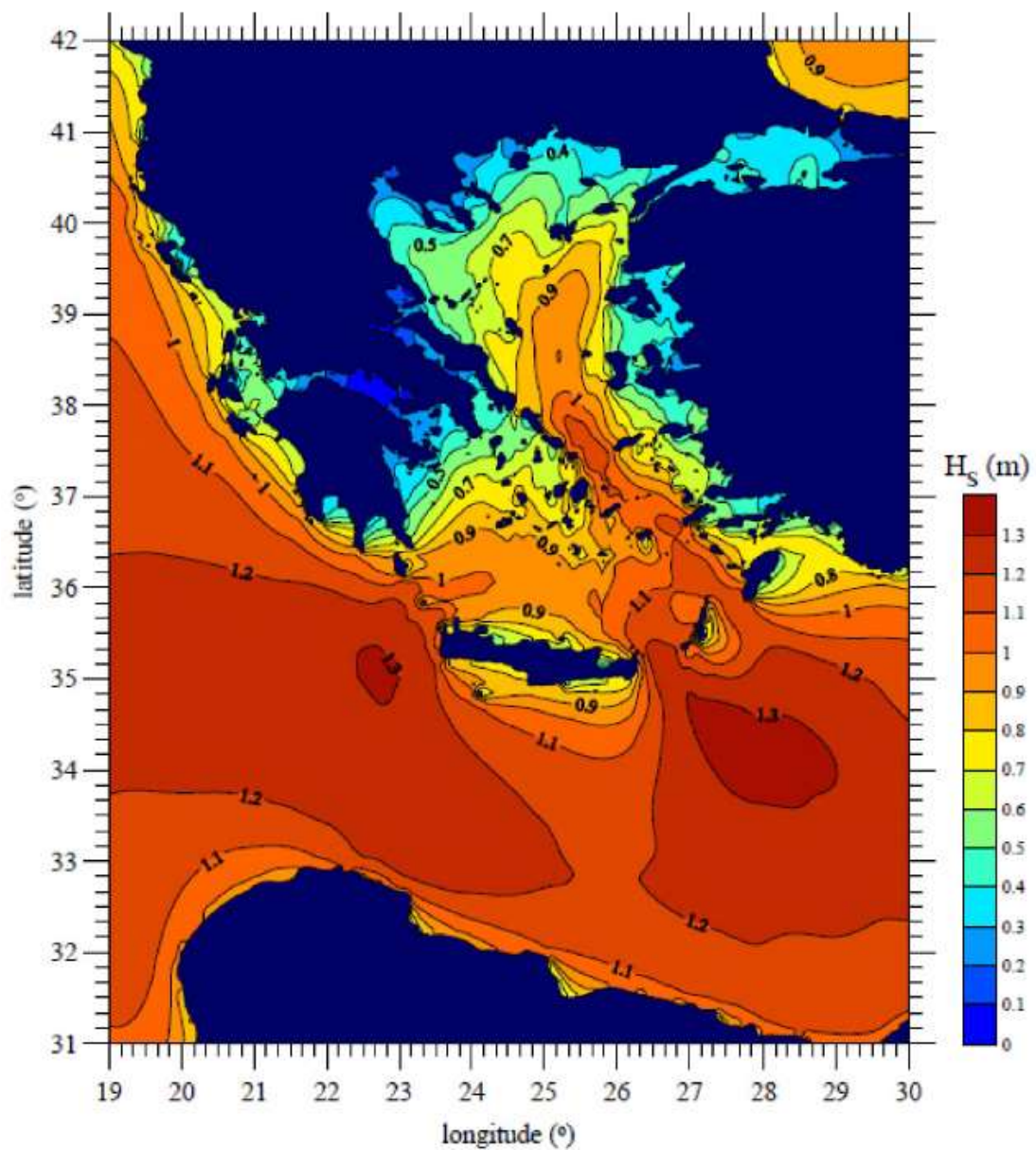
- (α) ισοσταθμικές καμπύλες,
- (β) χωρική κατανομή των τριών πιθανότερων κατευθύνσεων ανέμου και κυματικής διάδοσης,
- (γ) ισοπληθείς καμπύλες.

Όλα τα αποτελέσματα παρουσιάζονται σε ετήσια και σε εποχιακή βάση [A46].

Όσον αφορά τις μετρήσεις, πρέπει να επισημαίνουμε ότι με βάση μόνο τα μετρημένα ανεμολογικά και κυματικά δεδομένα δεν είναι εφικτό να αποκτηθεί μια συνολική και γενική εικόνα του ανεμολογικού και κυματικού καθεστώτος των ελληνικών θαλασσών. Οι ελληνικές θάλασσες είναι ανομοιογενείς ως προς τα ανωτέρω χαρακτηριστικά, τόσο χρονικά όσο και χωρικά. Γι αυτό, η ανάλυση των μετρητικών αυτών δεδομένων θα πρέπει να θεωρείται χαρακτηριστική για μια μικρή μόνο περιοχή γύρω από αυτά. Στα σημεία των μετρήσεων δεν συμπεριλαμβάνονται οι περιοχές των ελληνικών θαλασσών με το υψηλότερο κατά μέσο όρο ανεμολογικό και κυματικό δυναμικό, οι οποίες είναι τα στενά Κυθήρων-Κρήτης και Καρπάθου-Κρήτης. Αναφέρουμε χαρακτηριστικά ότι το κυματικό μοντέλο WAM του συστήματος ΠΟΣΕΙΔΩΝ, έχει δώσει προγνωστικές τιμές για το σημαντικό ύψος κύματος στις περιοχές αυτές που συχνά υπερβαίνουν τα 7 m. Δεδομένου ότι το μοντέλο WAM υποεκτιμά συστηματικά τις έντονες καταστάσεις θάλασσας, εικάζεται ότι στις εν λόγω περιοχές το πραγματικό σημαντικό ύψος κύματος μπορεί να υπερβαίνει τα 8 m [A46].

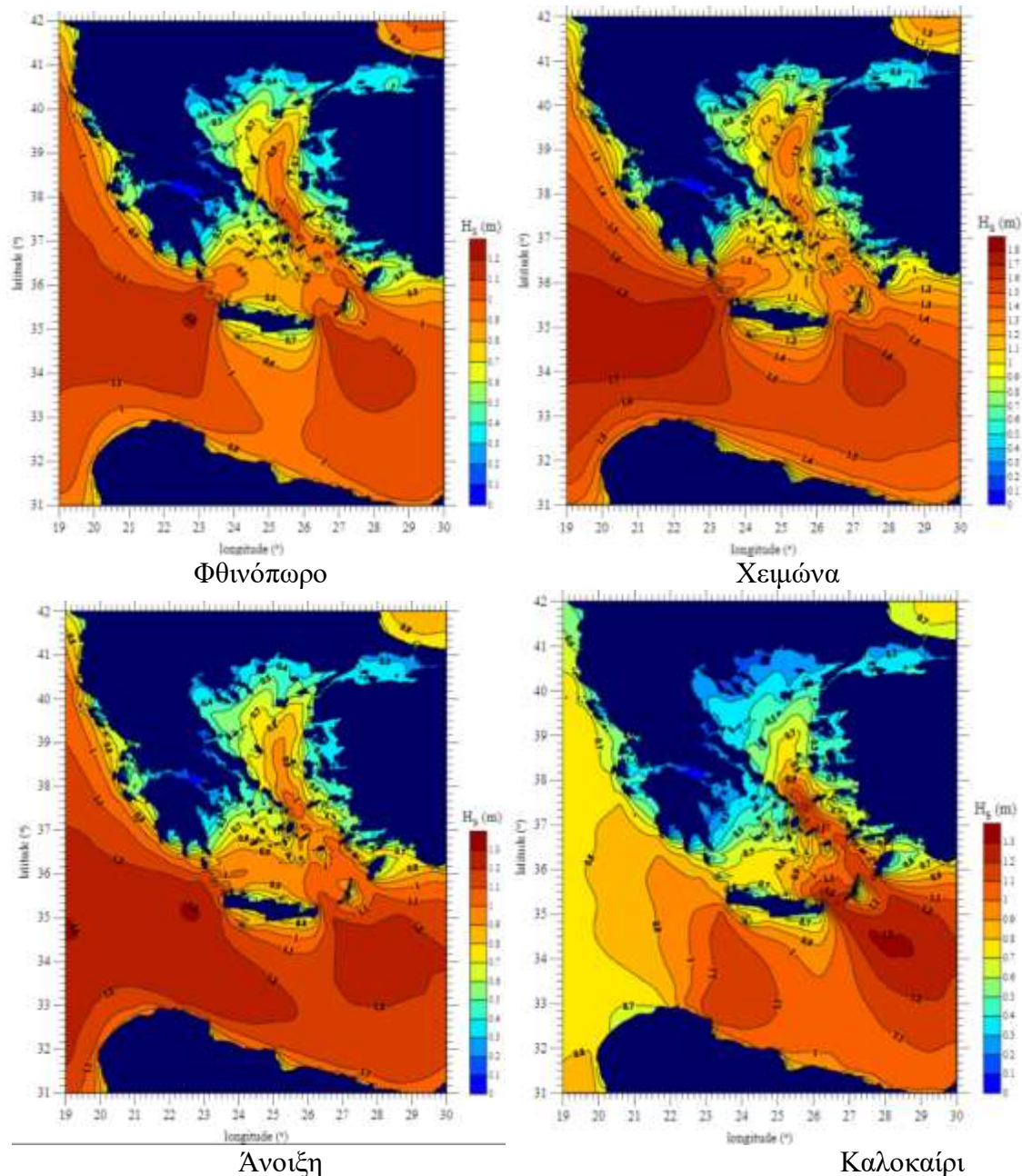
Στις εικόνες 3.5 και 3.6 απεικονίζεται η χωρική κατανομή (μέσο ισοσταθμικών καμπυλών) του μέσου σημαντικού ύψους κύματος για όλο το έτος και για κάθε εποχή ξεχωριστά. Κάθε καμπύλη αντιστοιχεί στο γεωμετρικό τόπο των σημείων που χαρακτηρίζονται από μέσο σημαντικό ύψος κύματος ίσο με την αναγραφόμενη τιμή. Στην περιοχή που βρίσκεται ανάμεσα σε δύο ισοσταθμικές καμπύλες, το σημαντικό ύψος κύματος παίρνει τιμές μεταξύ των αναγραφόμενων τιμών για κάθε καμπύλη και αναπαρίσταται με το ίδιο χρώμα, όπως φαίνεται και στη χρωματική κλίμακα στη δεξιά πλευρά του σχήματος. Από την παρατήρηση των καμπυλών για το σύνολο του έτους (Εικόνα ##) προκύπτουν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

° Η μέγιστη μέση τιμή του ύψους κύματος (H), εμφανίζεται να είναι ίση με 1,3 m, σε θαλάσσιες περιοχές νοτιοανατολικά (ΝΑ) και νοτιοδυτικά (ΝΔ) της Κρήτης, μακριά όμως από τις ακτές, άρα δεν είναι αξιοποιήσιμες για τις επάκτιες κυματικές εγκαταστάσεις που αφορούν την παρούσα εργασία. Το ίδιο ισχύει για τις αμέσως μικρότερες τιμές του H5, ίσες με 1,2, οι οποίες εντοπίζονται σε ευρύτερες θαλάσσιες περιοχές της ανοιχτής θάλασσας Δυτικά, Ανατολικά, ΝΑ και ΝΔ της Κρήτης.



Εικόνα 3.5: Ισοσταθμικές καμπύλες χωρικής κατανομής της μέσης τιμής του σημαντικού ύψους κύματος (H_s), σε ετήσια βάση. [A46]

◦ Μέσες τιμές του H ίσες με 1,1 m, εμφανίζονται κοντά στις δυτικές και ανατολικές ακτές της Κρήτης, στις θαλάσσιες περιοχές δίπλα στα νησιά Κάρπαθος, Κάσος, Κύθηρα, Κουφονήσια, Κως, Γαύδος και στο θαλάσσιο χώρο μεταξύ των νησιών Τήνου, Μυκόνου, Νάξου και Ικαρίας.



Εικόνα. 3.6: Ισοσταθμικές καμπύλες χωρικής κατανομής της μέσης τιμής του σημαντικού ύψους κύματος (H_s), σε εποχιακή βάση. [A46]

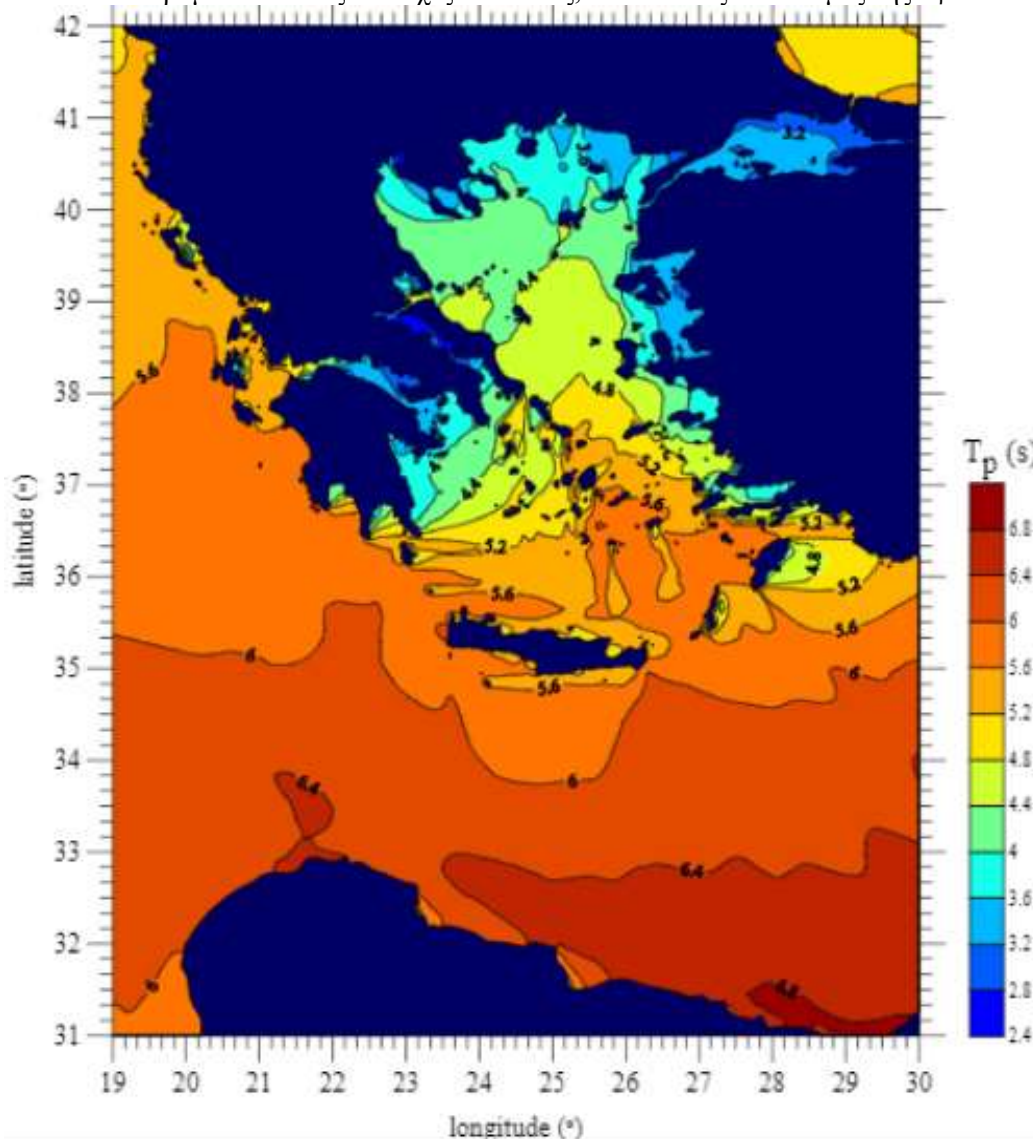
◦ Επίσης, όπως είναι αναμενόμενο, το σημαντικό ύψος κύματος μειώνεται, όσο πλησιάζουμε προς τις ακτές των νησιών. Οι υψηλότερες τιμές που διακρίνονται είναι στο 1 m, και οι οποίες εντοπίζονται στις δυτικές και ανατολικές ακτές της Κρήτης, αλλά και στις ακτές της Καρπάθου, Κάσου, Κυθήρων, Αντικυθήρων, Κουφονησίων, Γαύδου, Κω, Τήνου, Μυκόνου, στις νότιες ακτές της Ικαρίας. Αυτές οι ακτές θα μπορούσαν ίσως να θεωρηθούν καταλληλότερες για εγκατάσταση κυματικής μονάδας, μετά από μια πρώτη χονδροειδή εκτίμηση.

◦ Τα υπόλοιπα νησιά των κεντρικών και νοτίων Κυκλάδων, οι βόρειες και νότιες ακτές της Κρήτης, η Ικαρία, οι ακτές γύρω από το ακρωτήριο Μαλέας στη νότια Πελοπόννησο, οι δυτικές και βόρειες ακτές όλων των νησιών του Ιονίου και οι ΒΔ ακτές της Πελοποννήσου, θα μπορούσαν επίσης να είναι υποψήφιες για εγκατάσταση κυματικών μονάδων, μια και εμφανίζουν τις επόμενες καλύτερες τιμές, 0,9-0,8 m.

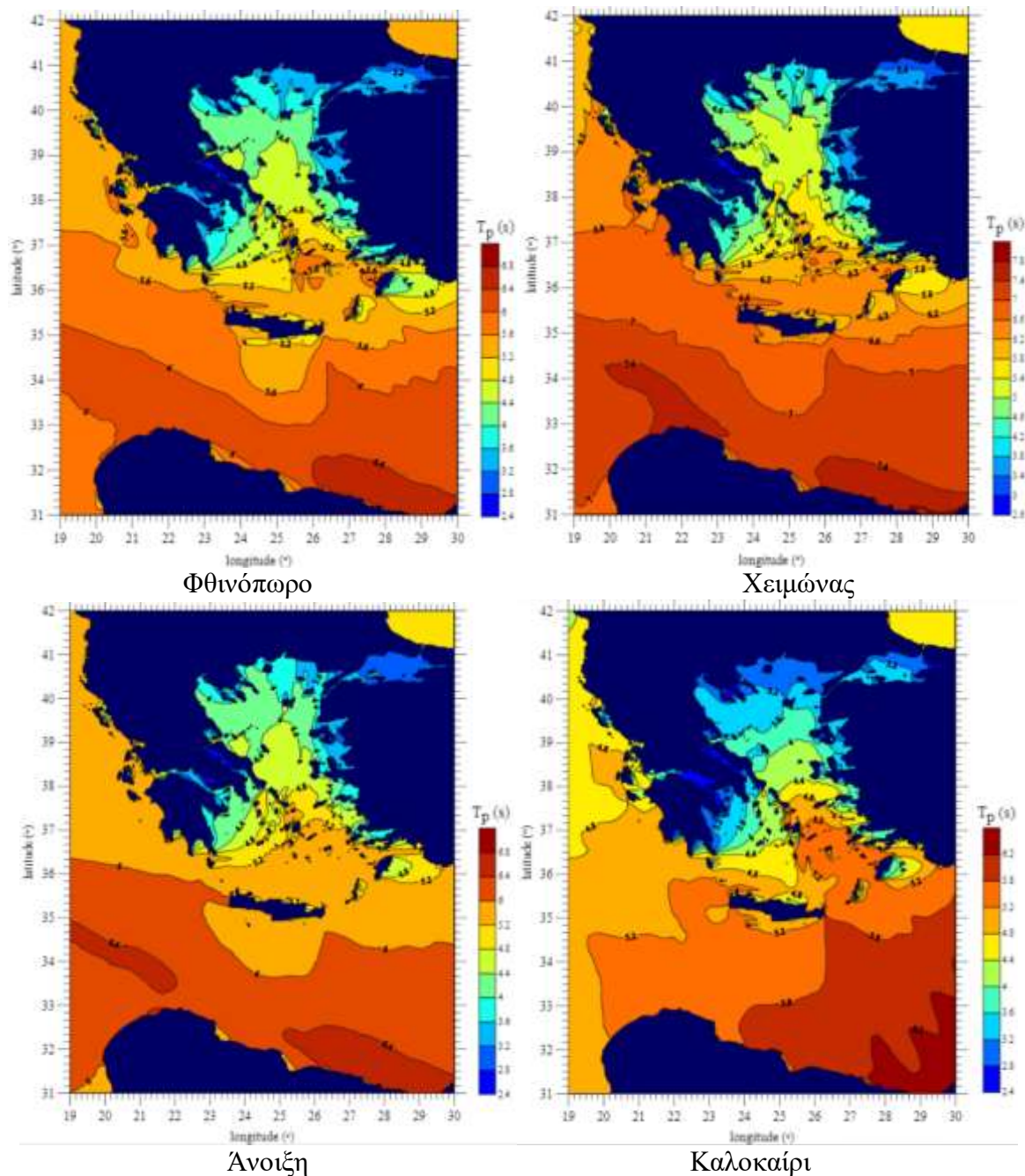
ο Οι υπόλοιπες ακτές της χώρας θεωρούνται σχετικά προφυλαγμένες από ανέμους και κύματα και δεν προσφέρονται για κυματικές εγκαταστάσεις.

Παρόμοια συμπεράσματα βγαίνουν και από την μελέτη των εποχιακών ισοσταθμικών καμπυλών, που όπως φαίνεται και στην Εικόνα ##, οι μέσες τιμές του ύψους κύματος μεταβάλλονται ανάλογα με την εποχή. Μέγιστες τιμές παρατηρούνται τον χειμώνα, με τιμή του μέσου ύψους κύματος στα 1,8 m, ενώ την άνοιξη και το καλοκαίρι μειώνεται στα 1.3 m και τέλος στα 1,2 m το φθινόπωρο.

Μια εξίσου σημαντική παράμετρος για την εκτίμηση του κυματικού δυναμικού είναι **η μέση τιμή της περιόδου κορυφής φάσματος** των κυμάτων, T_p . Στις εικόνες 3.7 και 3.8, απεικονίζεται η χωρική κατανομή (μέσω ισοσταθμικών καμπυλών) της μέσης τιμής της περιόδου, για όλο το έτος αλλά και για κάθε εποχή αντίστοιχα. Η μέγιστη ετήσια τιμή της T_p για τις θάλασσες του ελλαδικού χώρου είναι 6 s και εμφανίζεται στις δυτικές ακτές της Κρήτης, όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.7. Οι αμέσως μικρότερες τιμές (5,6 s) εμφανίζονται στο Νότιο Αιγαίο και στο Ιόνιο Πέλαγος. Μικρότερες τιμές έως 4,8 s εμφανίζονται στο κεντρικό Αιγαίο. Όσον αφορά την εποχιακή διακύμανση των τιμών, η μέγιστη τιμή της T_p , ίση με 7 s (τιμή για τα ελληνικά θαλάσσια ύδατα) τον χειμώνα, 6 s για την άνοιξη, 5,6 s για το φθινόπωρο και 5,8 s για το καλοκαίρι. Η χωρική κατανομή που αναφέρθηκε παραπάνω είναι παρόμοια και στις 4 εποχές του έτους, απλά αλλάζουν οι τιμές της T_p .



Εικόνα . 3.7: Ισοσταθμικές καμπύλες χωρικής κατανομής της μέσης τιμής της περιόδου (T_p), σε ετήσια βάση. [A46]

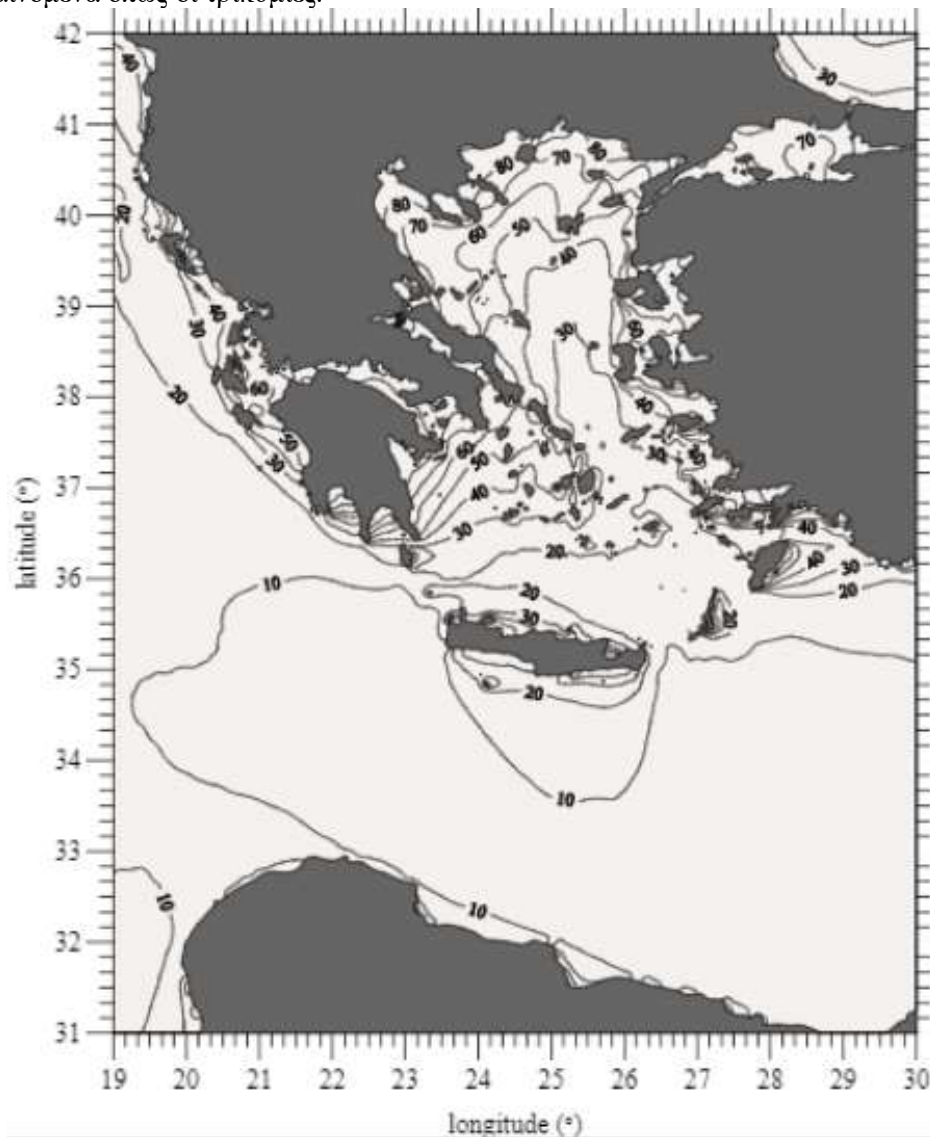


Εικόνα 3.8: Ισοσταθμικές καμπύλες χωρικής κατανομής της μέσης τιμής της περιόδου (T_p), σε ετήσια βάση. [A46]

Πέρα από τα διαγράμματα για την μέση τιμή της περιόδου κορυφής φάσματος, σημαντικές πληροφορίες παίρνουμε και από τα διαγράμματα των ισοπληθών καμπυλών της ταχύτητας ανέμου, οι οποίες αποτελούν τον γεωμετρικό τόπο των σημείων όπου η συχνότητα εμφάνισης P , συγκεκριμένου εύρους τιμών μιας παραμέτρου, έχει σταθερή τιμή. Η οποία σταθερή τιμή αναγράφεται πάνω σε κάθε καμπύλη.

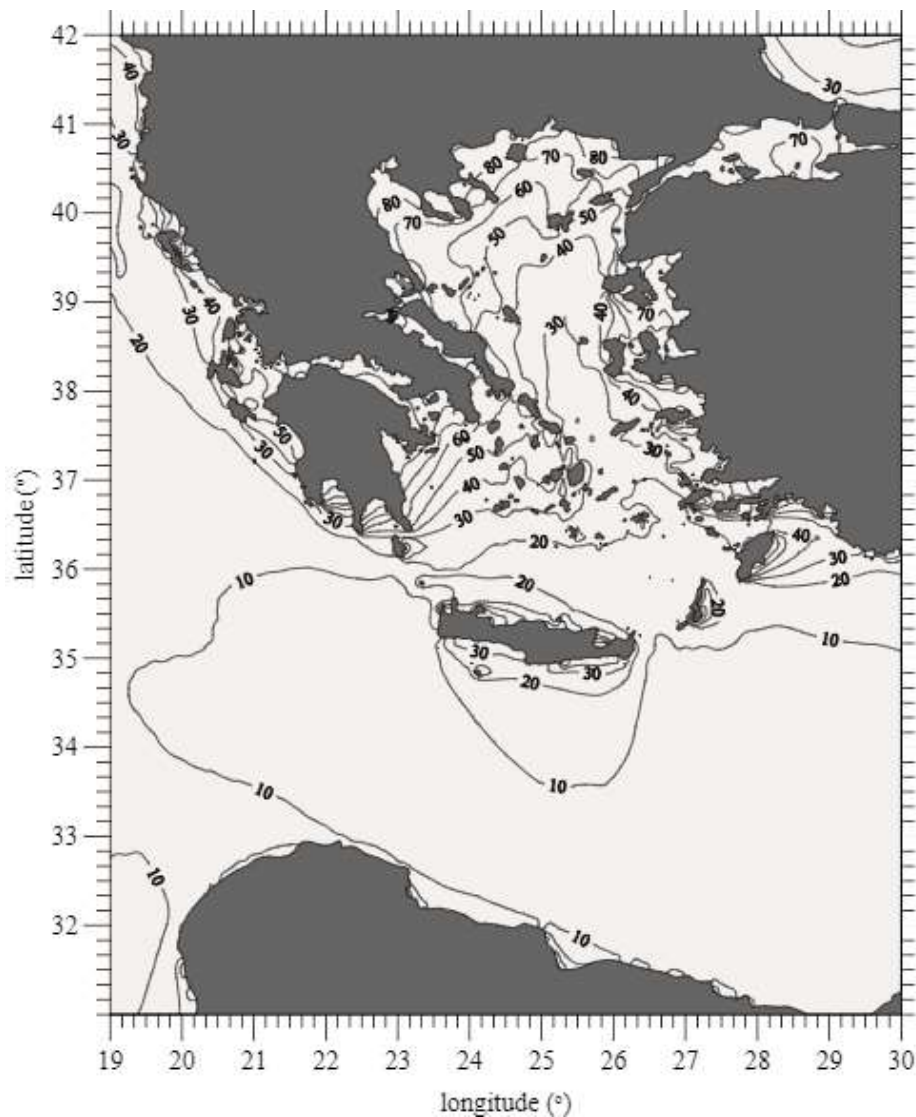
Πιο αναλυτικά στο Εικόνα 3.9, φαίνεται η χωρική κατανομή, μέσω καμπυλών ίσης σταθερής πιθανότητας P , του ενδεχομένου για εμφάνιση κύματος μέσου κυματικού ύψους, H_s μικρότερο από 0,5 m για ετήσια βάση. Οι καμπύλες που αναγράφουν υψηλά ποσοστά πιθανότητας (π.χ. 80%)

αφορούν προστατευμένες θαλάσσιες περιοχές χαμηλού κυματισμού, ενώ τα χαμηλά ποσοστά πιθανότητας, (π.χ. 10%) αφορούν θάλασσες, όπως η περιοχή στη νότια Κρήτη, όπου εμφανίζουν έντονα φαινόμενα όπως οι τρικυμίες.



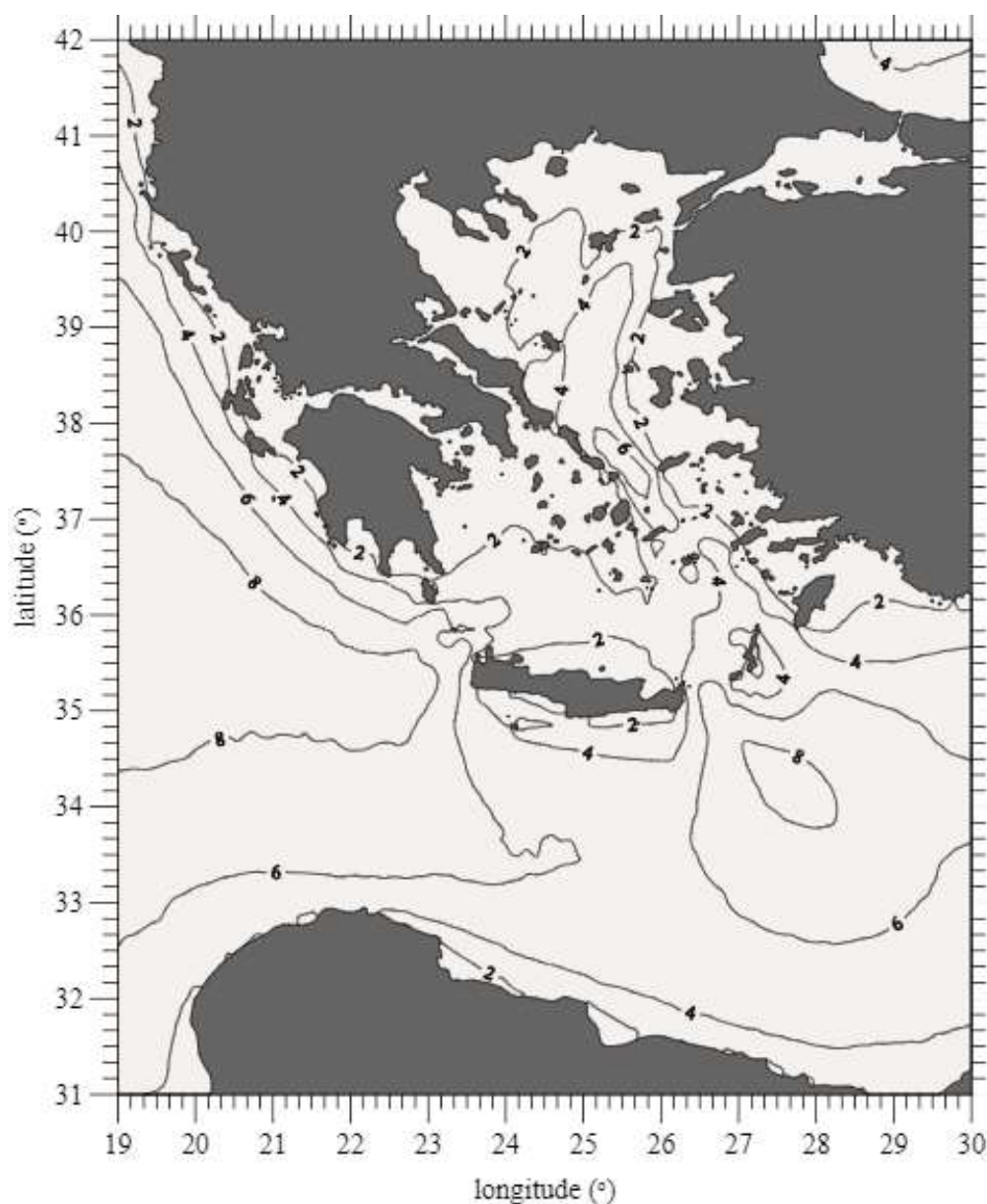
Εικόνα 3.9.: Ισοπληθείς καμπύλες σημαντικού ύψους κύματος.
Ετήσια χωρική κατανομή της $P[H_s < 0,5 \text{ m}]$ [A46]

Στην εικόνα 3.10 που ακολουθεί, απεικονίζεται η αντίστοιχη χωρική κατανομή, για το ενδεχόμενο $H_s < 1,25 \text{ m}$ για ετήσια βάση. Για το οποίο επίσης ισχύει ότι, οι καμπύλες που αναγράφουν υψηλά ποσοστά πιθανότητας (π.χ. 80%) αφορούν προστατευμένες θαλάσσιες περιοχές χαμηλού κυματισμού, ενώ τα χαμηλά ποσοστά πιθανότητας, (π.χ. 10%) αφορούν θάλασσες, όπως η περιοχή στη νότια Κρήτη, όπου εμφανίζουν έντονα φαινόμενα όπως οι τρικυμίες.



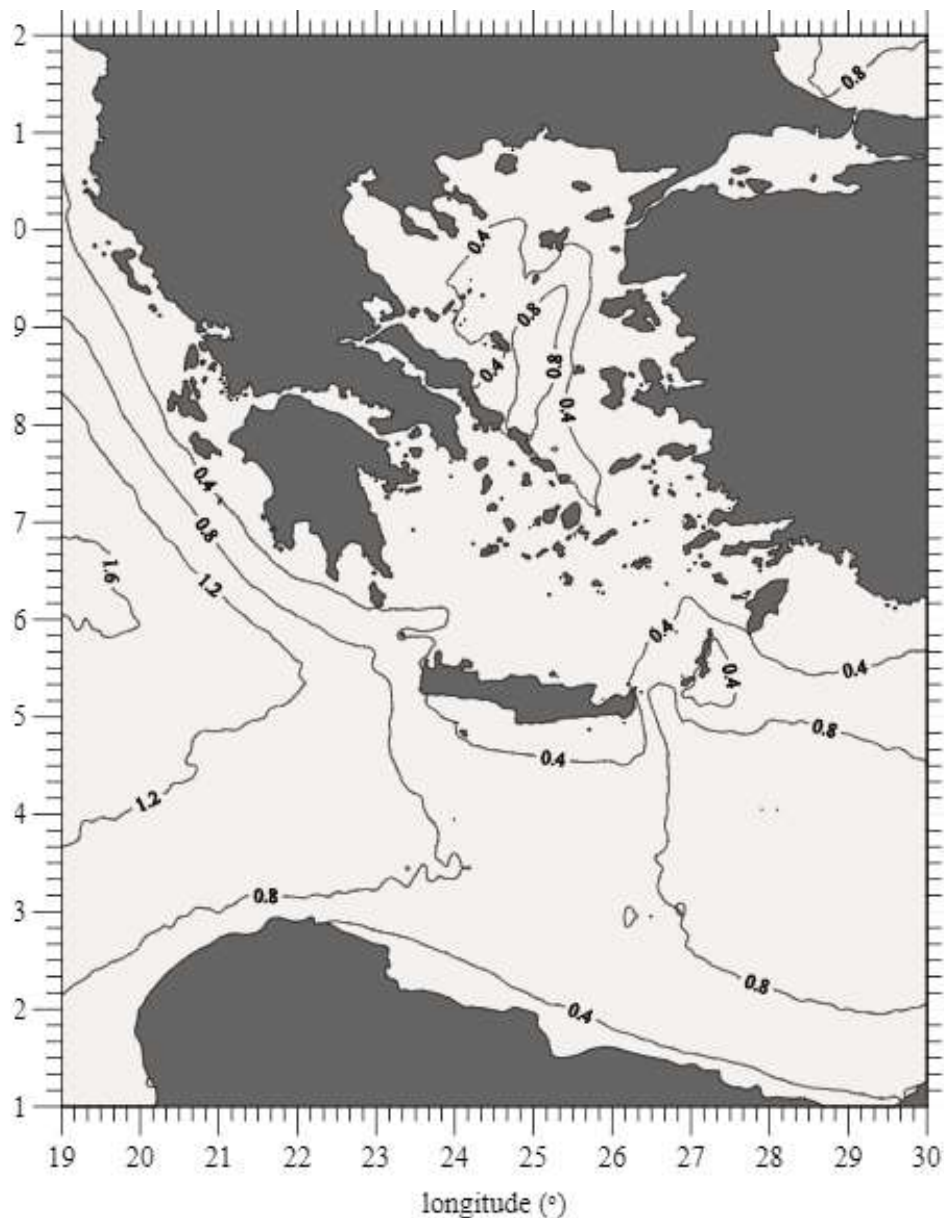
Εικόνα 3.10.: Ισοπληθείς καμπύλες σημαντικού ύψους κύματος.
Ετήσια χωρική κατανομή της P [$H_s < 1,25$ m] [A46]

Στην συνέχεια, υπάρχει η εικόνα 3.11, όπου απεικονίζονται οι ισοπληθείς καμπύλες σημαντικού ύψους κύματος για το ενδεχόμενο $H_s < 2,5$ m, για ετήσια βάση. Στο συγκεκριμένο παρατηρούνται πιο χαμηλές τιμές πιθανοτήτων, με τις μεγαλύτερες τιμές να είναι στο 8%, οι οποίες και αφορούν θαλάσσιες περιοχές της Ελλάδος με υψηλό κυματικό δυναμικό, όπως είναι οι περιοχές **δυτικά και ανατολικά της Κρήτης**. Ωστόσο, πιθανότητα 6%, εμφανίζεται και στη περιοχή μεταξύ των νησιών **Άνδρου, Τήνου, Μυκόνου και Ικαρίας**.



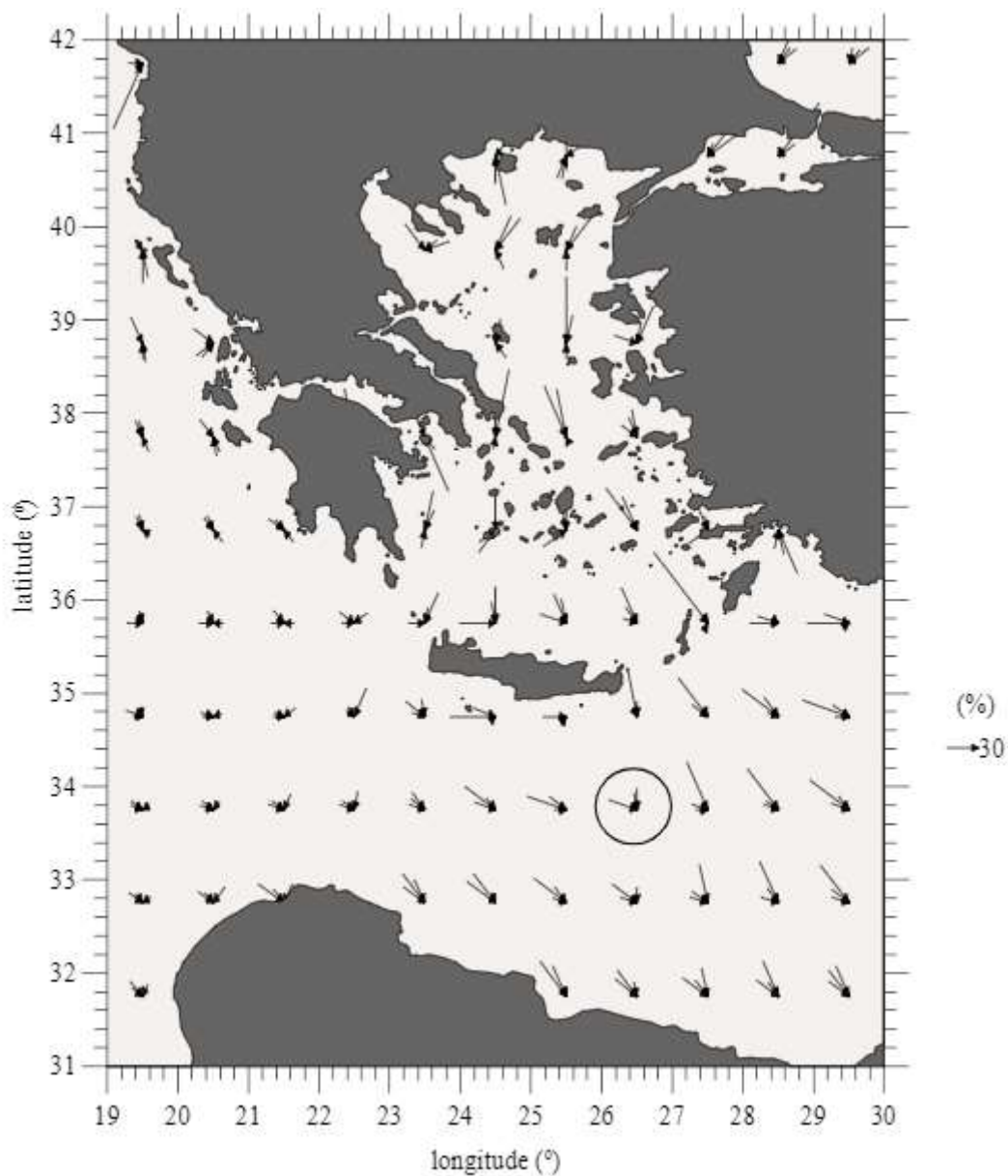
Εικόνα 3.11.: Ισοπληθείς καμπύλες σημαντικού ύψους κύματος.
Ετήσια χωρική κατανομή της P [Hs<2,5 m] [A46]

Όσον αφορά τις ισοπληθείς καμπύλες σημαντικού ύψους, είναι σημαντικό να μελετηθεί και ο χάρτης στον οποίο φαίνονται εκείνες που αφορούν την πιθανότητα εμφάνισης κυμάτων σημαντικού ύψους μεγαλύτερου από τα 4 m, σε ετήσια βάση. Όπου, η πιθανότητα αν και είναι μικρή, της τάξεως των 0,5 - 1 %, εντοπίζεται στην **περιοχή των Βόρειων Κυκλάδων**.



Εικόνα 3.12.: Ισοπληθείς καμπύλες σημαντικού ύψους κύματος.
Ετήσια χωρική κατανομή της P [Hs<4 m] [A46]

Τέλος, σημαντική παράμετρος για την εκτίμηση του κυματικού δυναμικού σε κάποιο συγκεκριμένο σημείο, είναι και η παράμετρος της κατεύθυνσης διάδοσης του κύματος. Στην εικόνα 3.12 που ακολουθεί, απεικονίζεται ο χάρτης κατευθυντικότητας κύματος, στο οποίο τα βέλη δείχνουν την κατεύθυνση από την οποία διαδίδονται τα κύματα. Το μήκος τους αντιστοιχεί στην συχνότητα εμφάνισης κυματισμών (%) που διαδίδονται από την αντίστοιχη κατεύθυνση. Έχουν ληφθεί υπόψη κυματισμοί με σημαντικό ύψος μεγαλύτερο του 1 μέτρου.



Εικόνα 3.13.: Χάρτης κατευθυντικότητας κύματος [$H_s < 1$ m] [A46]

4. “ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΚΑΙ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΘΗΚΑΝ”

4.1. Στάδια Της Μελέτης

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η διερεύνηση των δυνατοτήτων εγκατάστασης επάκτιας κατασκευής για την αξιοποίηση της κυματικής ενέργειας σε νησί του Αιγαίου Πελάγους. Για την ολοκλήρωση της μελέτης ακολουθήθηκαν τα εξής στάδια:

1. Μελέτη των διαθέσιμων τεχνολογιών κυματικής ενέργειας, για την τελική επιλογή εκείνων που αποτελούν τις πιο ιδανικές για την περίπτωση μας.

2. Συγκέντρωση όλων των απαραίτητων στοιχείων για την εκτίμηση του κυματικού δυναμικού στις Ελληνικές θάλασσες και πιο συγκεκριμένα για την περιοχή του Αιγαίου Πελάγους. Από την μελέτη των στοιχείων αυτών προκύπτουν ορισμένες νησιωτικές περιοχές, που εμφανίζουν τις υψηλότερες τιμές κυματικού δυναμικού.
3. Ακολουθεί επεξεργασία αριθμητικών μετρήσεων. Οι επιλεγμένες περιοχές αυτές συγκρίνονται μεταξύ τους και στο τέλος, προτείνεται μια περιοχή που θεωρείται καταλληλότερη για την εγκατάσταση της επάκτιας συσκευής.
4. Προτάσεις για την περαιτέρω διερεύνηση των δυνατοτήτων υλοποίησης της κατασκευής.

Στην συνέχεια ακολουθεί αναλυτική παρουσίαση όλων των σταδίων της μελέτης

4.2. Επιλογή Παράκτιας Κυματικής Συσκευής

Η μελέτη των διαθέσιμων τεχνολογιών κυματική ενέργειας έγινε στο 2ο Κεφάλαιο της παρούσας εργασίας. Αρχικά αναφέρθηκαν οι κατηγορίες των διαθέσιμων τεχνολογιών και ακολούθησε συνοπτική παρουσίασή τους. Από την μελέτη των συγκεκριμένων τεχνολογιών καταλήγουμε τα εξής συμπεράσματα:

Παρατηρήθηκε ότι ανάλογα με την απόσταση της εγκατάστασης από την ακτή, τα συστήματα εκμετάλλευσης της κυματικής ενέργειας διακρίνονται σε επάκτια, παράκτια και υπεράκτια. Όπου τα **επάκτια** είναι σταθερά ή ενσωματωμένα στην ακτογραμμή συστήματα με τα ακόλουθα πλεονεκτήματα: εύκολη πρόσβαση, εγκατάσταση, συντήρηση και σύνδεση με το ηλεκτρικό δίκτυο. Δεν χρειάζονται αγκυροβολήσεις ούτε υποθαλάσσια ηλεκτρικά καλώδια. Ενέχουν πολύ μικρότερο κίνδυνο καταστροφής του εξοπλισμού (λόγω των κυματισμών) κατά τα στάδια εγκατάστασης και λειτουργίας. Για ορισμένα από αυτά, για την εγκατάστασή τους απαιτούνται κυρίως έργα Πολιτικού Μηχανικού, με εξειδίκευση στα λιμενικά έργα, τεχνογνωσία που υπάρχει στη χώρα μας, λόγω των πολλών νησιών και λιμανιών που διαθέτει. Το μειονέκτημα ωστόσο, των επάκτιων συστημάτων είναι ότι αξιοποιούν κυματικό δυναμικό πολύ μικρότερης ισχύος. Μέρος όμως αυτής της απώλειας μπορεί να ανακτηθεί, με κατάλληλη επιλογή του σημείου εγκατάστασης. Για παράδειγμα, υπάρχουν σημεία στην ακτή όπου ενισχύεται η δράση των κυμάτων, όπως απόκρημνα ακρωτήρια, σχηματισμοί βράχων, κυματοθραύστες κ.ά.

Ως διάταξη, η **Παλλόμενη Στήλη Ύδατος (ΠΣΥ)** είναι ίσως το πιο μελετημένο και το καλύτερο που αναπτύχθηκε από όλα τα συστήματα. Σε λειτουργία στη ξηρά, έχει αποδείξει την αξιοπιστία, που είναι απαραίτητη για μια βιώσιμη μονάδα και δεν υπάρχει λόγος να πιστεύουμε ότι αυτή η αξιοπιστία δεν μπορεί να μεταφερθεί σε άλλες πλατφόρμες. Όσων αφορά το κομμάτι της κατασκευής των ΠΣΥ, παρατηρούμε τα πλεονέκτημα σε πρακτικό επίπεδο, όπως τα ελάχιστα κινούμενα μέρη (μόνο ο αεροστρόβιλος), δεν υπάρχουν κινούμενα μέρη στο νερό, με αποτέλεσμα την εύκολη διατήρησή της αλλά και η χρήση του αεροστρόβιλου εξαλείφει την ανάγκη για κιβώτια ταχυτήτων. Επίσης η συγκεκριμένη διάταξη είναι προσαρμόσιμη και μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε σταθερή σε κάποια ακτογραμμή, είτε πλωτή σε υπεράκτια περιοχή. Ωστόσο, παρουσιάζει και κάποια μειονεκτήματα όπως είναι η μειωμένη απόδοση μιας διάταξης ΠΣΥ όταν λειτουργεί εκτός της ζώνης συντονισμού των συχνοτήτων, για την αποφυγή του οποίου απαιτείται κατάλληλος σχεδιασμός. Τέλος, ο θόρυβος που παράγει ο αεροστρόβιλος μπορεί να δημιουργήσει πρόβλημα, για το οποίο συνιστάται προσοχή στην τοποθεσία εγκατάστασης και χρήση ηχοαπορροφητικών υλικών.

Αν και δεν είναι συγκεκριμένα για τα συστήματα ΠΣΥ, ο κύριος περιορισμός στην πρόσληψη των γεννητριών ισχύος κυμάτων στην εμπορική λειτουργία είναι το κόστος της ενέργειας, το οποίο

αντιμετωπίζετε. Ο συνδυασμός της δημόσιας στήριξης σε αρχικό στάδιο και η δέσμευση της βιομηχανίας για βελτίωση της ανταγωνιστικότητας, δείχνουν ότι τα ΠΣΥ θα αποτελέσουν βασικό μέρος στην παραγωγή ενέργειας στο μέλλον. [A24]

Όσον αφορά τις σταθερές επάκτιες ΠΣΥ κατασκευές με θάλαμο αέρα, έχουν μελετηθεί και αναπτυχθεί αρκετά. Θα μπορούσαν να θεωρηθούν ως πρότυπες μονάδες επίδειξης, με ταυτόχρονη παραγωγή ηλεκτρισμού. Χαρακτηριστικές είναι οι περιπτώσεις της μονάδας στο νησί Pico στην Πορτογαλία (λειτουργήσε από το 1999 έως το 2016) και της μονάδας LIMPET στην Σκωτία (λειτουργήσε από το 2000 έως το 2013). Οι μονάδες αυτές και ο εξοπλισμός τους διατηρήθηκαν για πολλά χρόνια και έδειξαν την ικανότητα επιβίωσης αυτών των τεχνολογιών ακόμη και κάτω από πολύ αντίξοες συνθήκες. Επειδή οι κυματικές συνθήκες στις Ελλάδα είναι πολύ πιο ήπιες από τα σημεία του Ατλαντικού που αυτές δοκιμάστηκαν, οι προδιαγραφές κατασκευής τους θα είναι λιγότερο υψηλές από την άποψη των φορτίων σχεδιασμού, άλλα θα έχουν μικρότερο κόστος κατασκευής και συντήρησης και μικρότερη καταπόνηση των υλικών.

Οι ενσωματωμένες σε κυματοθραύστη ΠΣΥ κατασκευές, όπου ο θάλαμος του αέρα είναι ενσωματωμένος εντός του κυματοθραύστη, έχουν δοκιμαστεί αρκετά και είναι πολλά υποσχόμενες. Αποτελούν εύκολη λύση για σταθερές μονάδες ΠΣΥ, από οικονομική, κατασκευαστική και λειτουργική άποψη. Δεν είναι όμως όλοι οι κυματοθραύστες κατάλληλοι για αυτήν την εφαρμογή, αλλά εξαρτάται από την τοποθεσία και τον προσανατολισμό τους σε σχέση με τα εισερχόμενα κύματα. Το θετικό στοιχείο είναι ότι οι γεωμετρίες στήλης σχήματος U (λέγονται U-OWC) που προτάθηκαν από τον Boccotti, εφαρμόστηκαν στην Ιταλία, στο λιμάνι της Ρώμης, όπου εμφανίζεται παρόμοιο κυματικό δυναμικό με αυτό στην Ελλάδα. Η εφαρμογή αυτή αποτελεί την πρώτη πλήρη μονάδα εκμετάλλευσης κυματικής ενέργειας στη Μεσόγειο Θάλασσα και μια από τις μεγαλύτερες στον κόσμο. Επομένως είναι πολύ πιθανό να αποτελεί μια καλή εφαρμογή και για την Ελλάδα.

Άρα, συνοψίζοντας, οι προτεινόμενες κατασκευές είναι δύο:

- Η σταθερή επάκτια ΠΣΥ κατασκευή, με θάλαμο αέρα
- Η ενσωματωμένη σε κυματοθραύστη ΠΣΥ κατασκευή

Η δεύτερη λύση προτείνεται σε περίπτωση που σχεδιάζεται επέκταση ή νέα κατασκευή κυματοθραύστη σε λιμάνι ή άλλο προστατευόμενο χώρο και είναι και εκείνη η οποία επιλέγεται στην παρούσα εργασία.

4.3. Επιλογή Νησιωτικών Περιοχών Βάση Του Κυματικού Δυναμικού

Όπως αναλύθηκε και περαιτέρω στο Κεφάλαιο 3, η Ελλάδα είναι μια χώρα με σχετικά υψηλό κυματικό δυναμικό συγκριτικά με τις υπόλοιπες της Μεσογείου. Οι ιδιαίτερες συνθήκες αλλά και η τοπογραφία του Αιγαίου συμβάλλουν στην ανάπτυξη αξιοποιήσιμων κυματισμών. Η ενέργεια από τους οποίους κυματισμούς, θα μπορούσε να εκμεταλλευτεί και καλύψει τόσο τοπικές ανάγκες σε παράκτιες περιοχές, νησιά όσο και να εκμεταλλευτεί αυτό το είδος της ενέργειας συμπληρωματικά με άλλες ΑΠΕ.

Ο μεγάλος αριθμός νησιών στο Αιγαίο πέλαγος, περιορίζει την ροή κυματικής ενέργειας. Έτσι η αναζήτηση περιοχών με αξιόλογο κυματικό δυναμικό πρέπει να γίνει με ιδιαίτερη προσοχή. Η περιοχή πρέπει να είναι εκτεθειμένη στην ανοικτή θάλασσα, ώστε να διαθέτει σημαντικό κυματικό δυναμικό και επίσης πρέπει να διατίθενται αξιόπιστα κυματικά δεδομένα. Άρα, είναι σημαντικό να υπάρχει μεγάλη απόσταση του σημείου μελέτης από την κοντινότερη ακτή.

Στην συγκεκριμένη εργασία, η επιλογή της κυματικής συσκευής προς μελέτη, όπως αναφέρθηκε και στην προηγούμενη ενότητα, είναι η διάταξη ΠΣΥ ενσωματωμένη σε κυματοθραύστη. Παράγοντας που προσθέτει ακόμα ένα κριτήριο στην επιλογή της περιοχής προς μελέτη, που είναι η ύπαρξη κυματοθραύστη. Ωστόσο, πέρα από την ύπαρξη του κυματοθραύστη,

βασικό κριτήριο αποτελεί και ο προσανατολισμός του σε σχέση με την διάδοση των κυματισμών. Με βάση την εικόνα 4.1, που παρουσιάζεται στην παράγραφο §3.3.2, στο οποίο απεικονίζεται ο χάρτης κατευθυντικότητας κύματος στην Ελλάδα, παρατηρούμε ότι οι βασικοί και με μεγαλύτερη ένταση άνεμοι που επικρατούν στο Αιγαίο, είναι Βορειοανατολικοί και Βορειοδυτικοί. Οπότε, ο Βόρειος προσανατολισμός στην αναζήτηση του κυματοθραύστη προς μελέτη, είναι βασικός παράγοντας.

Στο κεφάλαιο 3, έγινε μια παρουσίαση των πηγών κυματικών δεδομένων για τον Ελληνικό θαλάσσιο χώρο και πιο συγκεκριμένα έγινε μια ανάλυση των δεδομένων που μπορούν να αντληθούν από τον «Άτλαντα Ανέμου και Κυμάτων των Ελληνικών Θαλασσών». Με βάση τα στοιχεία λοιπόν, το συγκεκριμένου Άτλαντα, οι πιο υψηλές τιμές σημαντικού ύψους κύματος, με μέση ετήσια τιμή, $H_s=1\text{ m}$, σημειώνονται στις **δυτικές και ανατολικές ακτές της Κρήτης και στις ακτές των νησιών της Καρπάθου, Κάσου, Κυθήρων, Αντικυθήρων, Κουφονησιών, Γαύδου, Κω, Τήνου, Μυκόνου αλλά και στις νότιες ακτές της Ικαρίας και της Ρόδου**. Αυτές οι περιοχές, μέσα από μια πρώτη εκτίμηση, θα μπορούσαν να θεωρηθούν καταλληλότερες για εγκατάσταση κυματικής μονάδας.

Τα υπόλοιπα νησιά των κεντρικών και νοτίων Κυκλάδων, οι βόρειες και νότιες ακτές της Κρήτης όπως και η Ικαρία, θα μπορούσαν επίσης να είναι υποψήφιες για εγκατάσταση κυματικών μονάδων, μια και εμφανίζουν τις επόμενες πιο υψηλές τιμές H_s , 0,8-0,9 m. Οι υπόλοιπες ακτές της χώρας θεωρούνται σχετικά προφυλαγμένες από ανέμους και κύματα και δεν προτείνονται για κυματικές εγκαταστάσεις.

Οπότε με βάση και τα παραπάνω τα νησιά του Αιγαίου πελάγους στα οποία υπάρχουν λιμάνια με κυματοθραύστη, ο οποίος να ικανοποιεί τα κριτήρια του βόρειου προσανατολισμού και το να είναι εκτεθειμένος στη ανοιχτή θάλασσα, χωρίς κάποιο μεγάλο φυσικό εμπόδιο μπροστά είναι με ονοματική σειρά κατάταξης, τα λιμάνια (Εικόνα ##):

- της Ευδήλου στην Ικαρία,
- του Ηρακλείου στην Κρήτη,
- στο Καρλόβασι της Σάμου,
- στα Πηγάδια της Καρπάθου,
- στο Φρύ της Κάσου,
- του Μονολίθου στη Σαντορίνη,
- του παλιού λιμανιού της Μυκόνου,
- του Πλατανιά στα Χανιά
- του Ρεθύμνου στην Κρήτη



Εικόνα 4.1.: Δορυφορική εικόνα της Ελλάδος με επισυμάνσεις στα λιμάνια προς επεξεργασία

4.4. Αριθμητικών Δεδομένων και Διαδικασία Επεξεργασίας Τους

Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για την υλοποίηση της συγκεκριμένης εργασίας, δόθηκαν από το Ινστιτούτο Ωκεανογραφίας του ΕΛΚΕΘΕ, προέρχονται από το Ευρωπαϊκό Κέντρο Μεσοπρόθεσμων Μετεωρολογικών Προβλέψεων (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts - ECMWF) και συγκεκριμένα φέρουν μετρήσεις του προγράμματος Era-Interim Reanalysis. Οι μετρήσεις αφορούν την περιοχή μελέτης μας, που είναι αρχικά όλη Ελληνική θαλάσσια περιοχή και η οποία διακριτοποιηθεί μέσω ενός πλέγματος διαστάσεων $0.125^\circ \times 0.125^\circ$. Σε κάθε κόμβο του πλέγματος έχει υπολογιστεί μια συγκεκριμένη τιμή για κάθε μέγεθος ανά 6 ώρες και για μια συνολική χρονική περίοδο 35 ετών (1979-2014). Τα δεδομένα που έχουμε για τα συγκεκριμένα κομβικά σημεία του πλέγματος αφορούν το σημαντικό ύψος κύματος, την περίοδο αλλά και την διεύθυνση κύματος.

Σε κάθε περίπτωση λιμανιού, επιλέχθηκε το κοντινότερο σημείο στο λιμάνι με ακρίβεια συντεταγμένων ενός δεκαδικού ψηφίου. Έπειτα από τα δεδομένα που είχαμε επιλέχθηκε το κοντινότερο σε αυτό, σημείο του πλέγματος για την λήψη των δεδομένων προς επεξεργασία. Μέσω της χρήσης του προγράμματος MatLab και έπειτα από κατάλληλους υπολογισμούς, υπολογίστηκαν οι μέσες ετήσιες τιμές του σημαντικού ύψους κύματος (H_s) και της περιόδου (T_p), και τέλος η μέση τιμή της κυματικής ενέργειας σε kW/m .

5. ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ

5.1. Ανάλυση και Σχολιασμός Των Επιλεγμένων Νησιωτικών Περιοχών

Ευδήλος, Ικαρία

Η **Ικαρία** είναι ένα Ελληνικό νησί του ανατολικού Αιγαίου και ανήκει στην ομώνυμη περιφερειακή ενότητα Ικαρίας. Πρωτεύουσα και επίνειο του νησιού είναι ο Άγιος Κήρυκος στη νοτιοανατολική ακτή της νήσου, ενώ δεύτερος αναπτυσσόμενος λιμένας είναι ο Ευδήλος στη βόρεια ακτή. Μετά από εκτενή μελέτη στο χάρτη της Ικαρίας, (Εικ. 5.1) εντοπίστηκαν 3 λιμάνια με κυματοθραύστη, εκείνο στο **Μαγγανίτη**, τον **Ευδήλο** και τον **Άγιο Κήρυκο**. Τα λιμάνια στον Άγιο Κήρυκο και το Μαγγανίτη χρειάστηκε να απορριφθούν λόγω της τοποθεσίας τους, στο Νότιο τμήμα του νησιού, άρα και κατ επέκταση ο προσανατολισμός του κυματοθραύστη είναι Νότιος. οπότε το λιμάνι της Ικαρίας που επιλέγεται προς μελέτη είναι εκείνο του **Ευδήλου**.



Εικόνα 5.1.: Χάρτης Ικαρίας,(αριστερά), Δορυφορική εικόνα του νησιού της Ικαρίας, με σημάση στα λιμάνια με κυματοθραύστη (δεξιά)

Το λιμάνι του Ευδήλου (Εικ. 5.2), βρίσκεται στον Δήμο Ευδήλου, ο οποίος καταλαμβάνει το κεντρικό τμήμα του νησιού. Ο Δήμος Ευδήλου περιλαμβάνει έξι δημοτικά διαμερίσματα, έχει συνολικό πληθυσμό 2.831 κατοίκους και έκταση 78,8 τ.Χλμ.. Ο συγκεκριμένος λιμένας βρίσκεται στο Δημ. Διαμέρισμα της Ευδήλου στο οποίο διαμένουν 762 μόνιμοι κάτοικοι (με βάση απογραφή που έγινε το 2011).

Σε σχέση με τη λειτουργία του λιμένα, το Λιμάνι του Ευδήλου εξυπηρετεί το μεγαλύτερο κομμάτι της επιβατικής και εμπορικής κίνησης του νησιού. Πιο αναλυτικά, ο μέσος αριθμός επιβατικών πλοίων που έχει εισέλθει στο λιμάνι για τα τελευταία 2 χρόνια είναι 320, ενώ εμπορικών πλοίων 156. Ο μέσος χρόνος παραμονής τους για το συγκεκριμένο χρονικό διάστημα, υπολογίζεται στα 37' στην περίπτωση των επιβατικών πλοίων, ενώ 24 ώρες για τα επιβατικά.

Σχετικά με την μορφολογία του κυματοθραύστη που βρίσκεται στο λιμάνι του Ευδήλου, (37°37'59.07"B 26°10'53.26"A) έχει προσανατολισμό Β και μήκος 460 m.

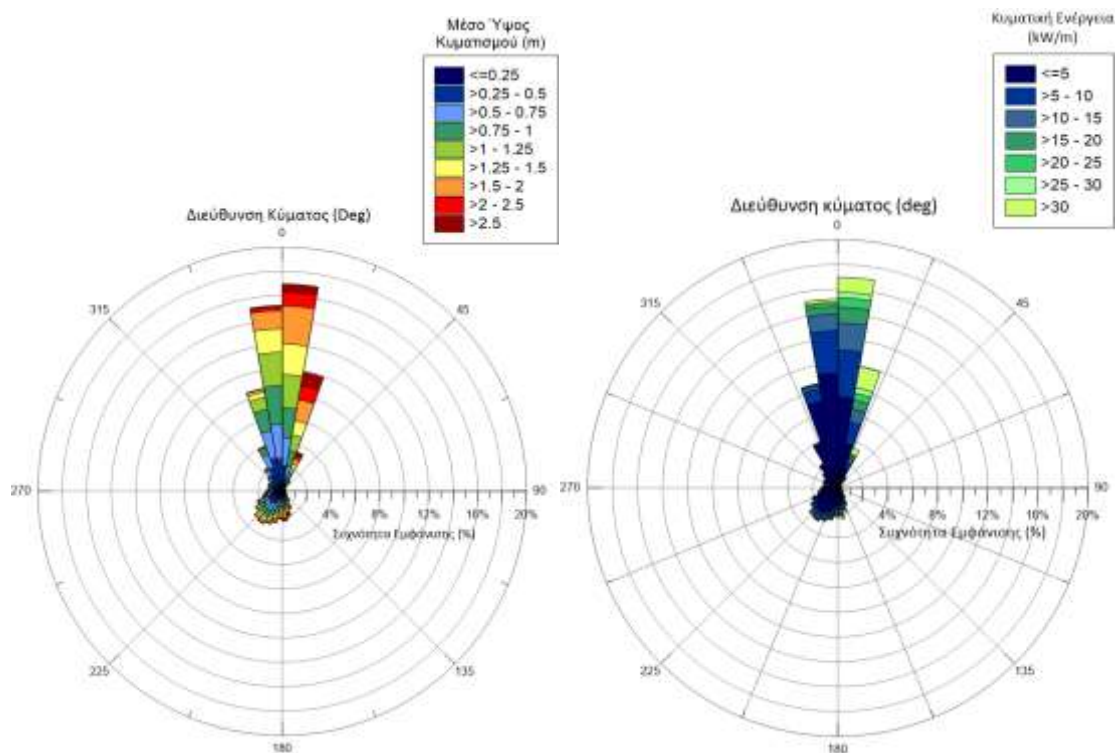


Εικόνα 5.2.: Δορυφορική εικόνα του λιμένα στον Εύδηλο

Μετά από την επεξεργασία των μετρήσεων παρήχθησαν τα δεδομένα, που φαίνονται και στον πίνακα 5.1. Τα δεδομένα αυτά αφορούν τις μέσες ετήσιες και εποχιακές τιμές του ύψους, της ταχύτητας και της ενέργειας των κυμάτων που φτάνουν στο λιμάνι του Ευδήλου, και συγκεκριμένα το σημείο που μελετήθηκε για την παραγωγή των συγκεκριμένων δεδομένων έχει τις εξής συντεταγμένες, $35^{\circ}30' \text{ B}$, $27^{\circ}00' \text{ A}$.

Λιμάνι Ευδήλου	Μέση Ετήσια Τιμή	Χειμώνας	Άνοιξη	Καλοκαίρι	Φθινόπωρο	Ελάχιστο	Μέγιστο
Μέσο Κυματικό Ύψος (m)	0,9143	1,1808	0,8095	0,8638	0,8989	0,0543	5,2792
Μέση Κυματική Περίοδος (s)	4,275	4,8309	4,2164	4,1962	4,3393	1,8431	8,7076
Μέση Κυματική Ενέργεια (kW/m)	7,0468	11,8017	5,5469	4,902	6,6007	0,0064	242,6836

Πίνακας 5.1.: Σχετικές μέσες τιμές για το λιμάνι του Ευδήλου



Εικόνα 5.3: Ροδογράμματα σημαντικού ύψους (αριστερά) και ενέργειας κύματος (δεξιά) για το λιμάνι του Ευδήλου

Ενώ, για τον υπολογισμό της μέσης διεύθυνσης του κύματος χρειάστηκε να παραχθούν τα ακόλουθα δυο ροδογράμματα του σημαντικού ύψους και ενέργειας κύματος (Σχήμα 5.3). Στα οποία παρατηρείται ότι η κύρια διεύθυνση του κυματισμού στο λιμάνι του Ευδήλου είναι Β, με μέγιστο καταγεγραμμένο σημαντικό ύψος κύματος 5,279 m και μέγιστη ενέργεια κύματος 242,684 kW/m.

Ηράκλειο, Κρήτη

Το **Ηράκλειο** (Εικόνα 5.4) είναι η μεγαλύτερη πόλη της Κρήτης με 140.730 κατοίκους (απογραφή 2011), ενώ ο Δήμος Ηρακλείου, όπως προέκυψε με το πρόγραμμα Καλλικράτης, είναι ο τέταρτος πολυπληθέστερος της χώρας με 173.993 κατοίκους. Το Ηράκλειο αποτελεί σημαντικό λιμάνι στη Μεσόγειο θάλασσα, καθώς παρέχει δρομολόγια από και προς τον Πειραιά, τη Σαντορίνη, τη Μύκονο, την Ίο, τη Σητεία, την Κάρπαθο, τη Ρόδο και άλλα νησιά. Ο λιμένας Ηρακλείου (Εικόνα 5.5) επελέγη για το 2019 ως υποψήφιος για το βραβείο leading port of Europe του παγκόσμιου θεσμού world travel awards και κατετάγη 8ος και πρώτος ελληνικός λιμένας. Δεδομένο που μας οδηγεί στο συμπέρασμα για την έντονη κινητικότητα τόσο επιβατικών όσο και εμπορικών πλοίων στο συγκεκριμένο λιμάνι, με τα πρώτα να ανέρχονται στα 1593 και τα δεύτερα στα 200 κατά μέσο όρο για τα τελευταία 2 χρόνια, με μέσο χρόνο παραμονής στο λιμάνι την μια ώρα.



Εικόνα 5.4: Απεικόνιση Κρήτης, με επισήμανση στο λιμάνι του Ηρακλείου



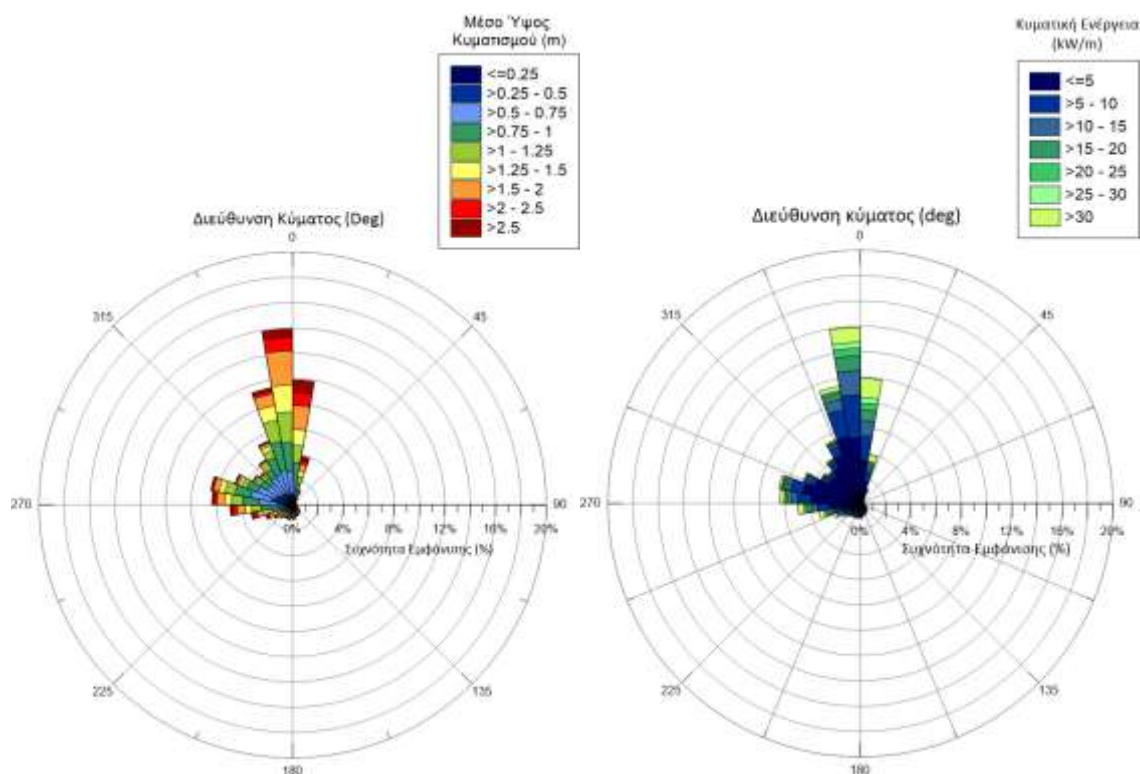
Εικόνα 5.5: Χάρτης της πόλης του Ηρακλείου

Σχετικά με την μορφολογία του κυματοθραύστη που βρίσκεται στο λιμάνι του Ηρακλείου, ($35^{\circ}20'54.77''$ B , $25^{\circ}8'37.79''$ A) έχει προσανατολισμό Βόρειο και μήκος 2.018 μέτρα. Τα σχετικά δεδομένα που παρήχθησαν, αφορούν το σημείο με συντεταγμένες $35^{\circ}30'$ B, $25^{\circ}10'$ A και φαίνονται στον εξής πίνακα 5.2.

Λιμάνι Ηρακλείου	Μέση Ετήσια Τιμή	Χειμώνας	Άνοιξη	Καλοκαίρι	Φθινόπωρο	Ελάχιστο	Μέγιστο
Μέσο Κυματικό Ύψος (m)	1,0346	1,3696	0,9647	0,9333	0,9847	0,0834	5,0934
Μέση Κυματική Περίοδος (s)	4,7915	5,5414	4,7938	4,5556	4,8302	2,0874	9,9355
Μέση Κυματική Ενέργεια (kW/m)	8,9831	15,8985	7,6078	5,5313	7,8162	0,0149	224,9893

Πίνακας 5.2.: Σχετικές μέσες τιμές για το λιμάνι του Ηρακλείου

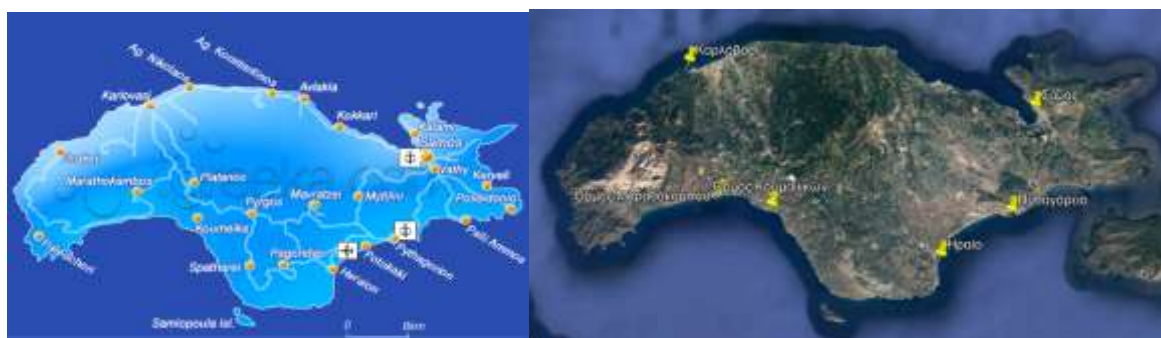
Στο λιμάνι του Ηρακλείου (Εικόνα 5.6), η επικρατούσα διεύθυνση του κυματισμού είναι ΒΔ. Το μέγιστο καταγεγραμμένο σημαντικό ύψος κύματος προέρχεται από την ΒΒΔ κατεύθυνση και είναι 5,093 m, η μέγιστη τιμή της ενέργειας κύματος είναι 224,989, ενώ επικρατούν και αρκετοί Δ κυματισμοί με τιμές πάνω από 2m και 30 kW/m.



Εικόνα 5.6.: Ροδόγραμμα σημαντικού ύψους (αριστερά) και ενέργειας κύματος (δεξιά) για το λιμάνι του Ηρακλείου

Καρλόβασι, Σάμος

Η **Σάμος** (Εικόνα 5.7) είναι ελληνικό νησί του ανατολικού Αιγαίου, και ανήκει στον ομώνυμο νομό Σάμου. Σύμφωνα με την απογραφή του 2011, έχει 32.974 κατοίκους. Πρωτεύουσα του νησιού είναι η Σάμος, με 6.251 κατοίκους, ενώ συμπρωτεύουσα είναι το **Καρλόβασι** με 6.869.



Εικόνα 5.7.: Χάρτης Σάμου (αριστερά), Δορυφορική εικόνα του νησιού της Σάμου με επισημάνσεις στα λιμάνια με κυματοθραύστη (δεξιά)

Όπως φαίνεται και στην δορυφορική απεικόνιση στην εικόνα 5.7 τα λιμάνια με κυματοθραύστη που εντοπίζονται στο νησί της Σάμου είναι 6, στο **Καρλόβασι**, **Βαθύ (Σάμος)**, **Όρμο Μαραθοκάμπου**, **Όρμο Κουμαιίκων**, **Ηραίο** και στο **Πυθαγόρειο**. Λόγω Νότιου προσανατολισμού απορρίπτονται τα λιμάνια σε Όρμο Μαραθοκάμπου, Όρμο Κουμαιίκων, Ηραίο

και στο Πυθαγόρειο, ενώ το λιμάνι στην πόλη της Σάμου επίσης απορρίπτεται λόγω του ότι βρίσκεται σε αρκετά προστατευμένη από τους ανέμους περιοχή. Καταλήγοντας, το λιμάνι το οποίο θα μελετηθεί στο νησί της Σάμου, είναι αυτό στο **Καρλόβασι**.

Αναφορικά με την λειτουργία του λιμένα, το Λιμάνι του Καρλοβασίου εξυπηρετεί το ένα κομμάτι της επιβατικής και εμπορικής κίνησης του νησιού, δεν είναι όμως το βασικό. Πιο αναλυτικά, ο μέσος αριθμός επιβατικών πλοίων που έχει εισέλθει στο λιμάνι τα τελευταία 2 χρόνια είναι 536, ενώ εμπορικών πλοίων 85. Ο μέσος χρόνος παραμονής τους για το συγκεκριμένο χρονικό διάστημα, υπολογίζεται στη μια ώρα στην περίπτωση των επιβατικών πλοίων, ενώ 3 ώρες για τα επιβατικά.

Μορφολογικά παρατηρούνται δυο κυματοθραύστες στο συγκεκριμένο λιμάνι της Σάμου, (Εικόνα 5.8). ένας μεγάλος ($37^{\circ}47'51.79''\text{B}$, $26^{\circ}40'46.73''\text{A}$) με ΒΒΔ προσανατολισμό και μήκους 704 m και ένας μικρότερος 215 m ($37^{\circ}47'49.51''\text{B}$, $26^{\circ}41'13.85''\text{A}$) με Δ προσανατολισμό, λεπτομερής απεικόνιση φαίνεται στα παρακάτω αρχιτεκτονικά σχέδια (Εικόνα 5.9).

Επιπλέον για να παραχθούν τα κατάλληλα δεδομένα, μελετήθηκε το σημείο με συντεταγμένες $37^{\circ}50' \text{ B}$, $26^{\circ}40' \text{ A}$ και τα οποία παρουσιάζονται στον εξής πίνακα 5.3.

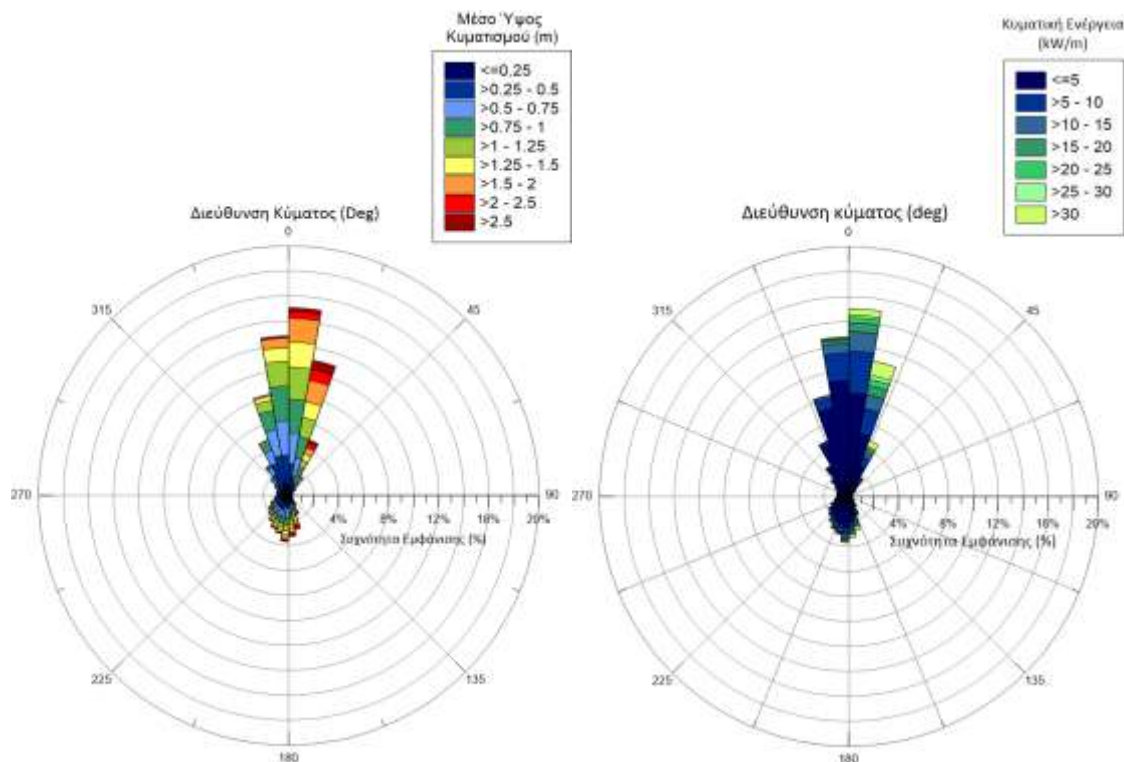
Λιμάνι Καρλόβασι	Μέση Ετήσια Τιμή	Χειμώνας	Άνοιξη	Καλοκαίρι	Φθινόπωρο	Ελάχιστο	Μέγιστο
Μέσο Κυματικό Ύψος (m)	0,8107	1,0523	0,7189	0,7754	0,783	0,0513	5,0483
Μέση Κυματική Περίοδος (s)	4,0265	4,5403	3,9771	3,9841	4,0598	1,6442	8,3762
Μέση Κυματική Ενέργεια (kW/m)	5,4809	9,3551	4,3815	3,7869	4,9436	0,0049	213,4694

Πίνακας 5.3: Σχετικές μέσες τιμές για το λιμάνι στο Καρλόβασι, Σάμου



Εικόνα 5.8.: Δορυφορική εικόνα με το λιμάνι στο Καρλόβασι, Σάμου

Εικόνα 5.9: Αρχιτεκτονικά σχέδια για το λιμάνι στοαργλόβαςι



Εικόνα 5.10.: Ροδόγραμμα σημαντικού ύψους (αριστερά) και ενέργειας κύματος (δεξιά) για το λιμάνι στο Καρλόβασι

Με βάση τα αποτελέσματα από τα ροδογράμματα σημαντικού ύψους και ενέργειας (Εικόνα 5.10), για τον λιμάνι στο Καρλόβασι, φαίνεται ότι η κύρια κατεύθυνση του κυματισμού είναι Β με μέγιστο καταγεγραμμένο ύψος 5,048 m και μέγιστη ενέργεια κύματος 213,469 kW/m

Πηγάδια, Κάρπαθος

Η **Κάρπαθος** (Εικόνα. 5.11) είναι το δεύτερο σε έκταση νησί του ελληνικού νησιωτικού συμπλέγματος της Δωδεκανήσου (μετά τη Ρόδο). Έχει έκταση 302,152 τ.χλμ., μήκος ακτών 160 χλμ. και συνολικό πληθυσμό 6.226 κατοίκους (απογραφή 2011). Βρίσκεται στη μέση του Καρπάθιου πελάγους μεταξύ Ρόδου και Κρήτης και έχει πρωτεύουσα τα Πηγάδια (ή Κάρπαθο) (2.788 κάτοικοι).

Όπως φαίνεται και στην εικόνα ##, τα λιμάνια με κυματοθραύστη στο νησί είναι δύο, τα **Πηγάδια** και το **Διαφάνι**. Η περίπτωση του δεύτερου λιμανιού θα απορριφθεί, καθώς ο κυματοθραύστης στο Διαφάνι παρουσιάζει Δ-ΝΔ προσανατολισμό. Επίσης, όπως φαίνεται και από την Εικόνα 5.11 (δεξιά), η απόσταση του λιμένα στο Διαφάνι από την κοντινότερη ακτή που είναι το νησί της Ρόδου είναι μικρή (περίπου 50 χλμ), ενώ το λιμάνι στα Πηγάδια απέχει από το νησί της Ρόδου περίπου στα 70 χλμ. Οπότε συγκρίνοντας τις δύο αυτές αποστάσεις και με βασικό κριτήριο επιλογής κυματοθραύστη, το κατά πόσο εκτεθειμένο είναι στην ανοιχτή θάλασσα, το λιμάνι στο Διαφάνι θεωρείται περισσότερο “προστατευμένο” και επομένως, επιλέγεται προς μελέτη το λιμάνι στα Πηγάδια.

Τα **Πηγάδια** αποτελούν το κεντρικό λιμάνι της νήσου Καρπάθου και βρίσκονται στη νοτιοανατολική πλευρά του νησιού, στον κόλπο του Βρόντη. Εξυπηρετεί κατά μέσο όρο ετησίως 266 επιβατικά πλοία και 112 εμπορικά. Ο μέσος χρόνος παραμονής τους για το συγκεκριμένο

χρονικό διάστημα, υπολογίζεται στα 40' στην περίπτωση των επιβατικών πλοίων, ενώ 22 ώρες για τα επιβατικά.



Σχήμα 5.11.: Χάρτης Καρπάθου (αριστερά), Δορυφορική εικόνα του νησιού της Καρπάθου με επισημάνσεις στα λιμάνια με κυματοθραύστη (δεξιά)

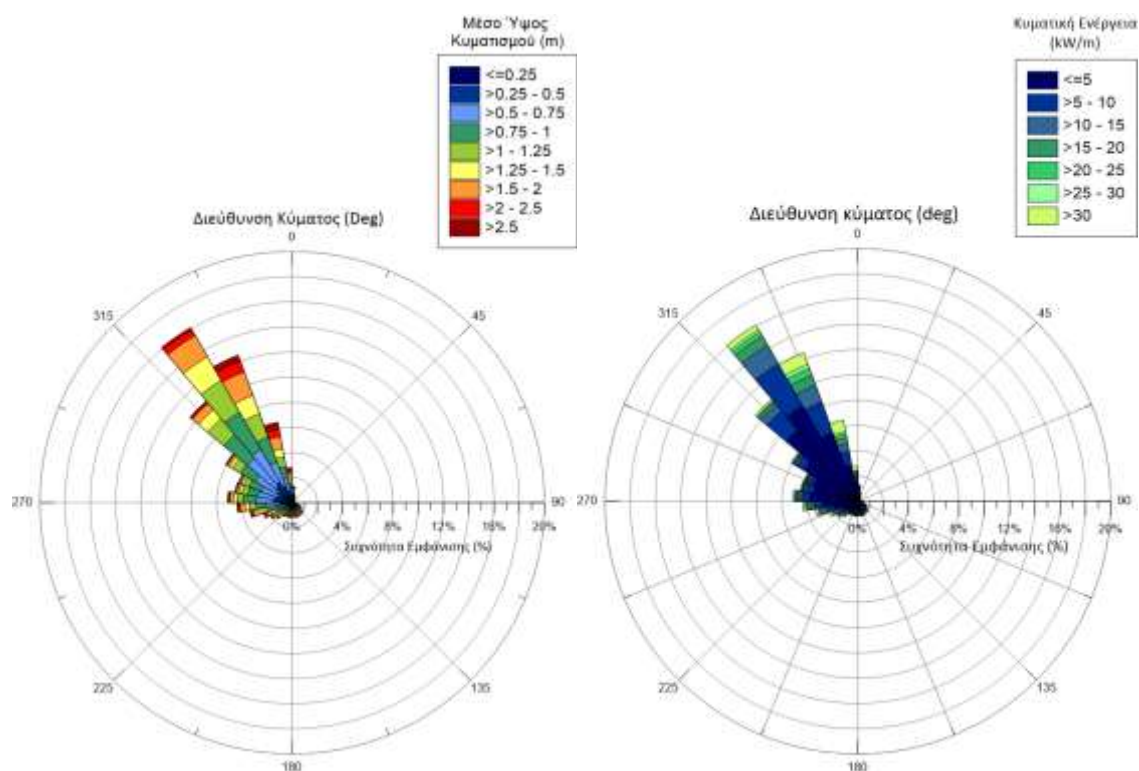
Στο συγκεκριμένο λιμάνι παρατηρούμε ότι υπάρχουν δύο κυματοθραύστες (Εικόνα 5.12), ο αριστερός ($35^{\circ}30'36.00''\text{B}$, $27^{\circ}12'39.82''\text{A}$) έχει Β προσανατολισμό και μήκος 300 m, ενώ ο δεξιός ($35^{\circ}30'37.10''\text{B}$, $27^{\circ}12'53.04''\text{A}$), έχει ΒΑ προσανατολισμό και μήκος 200 m (Εικόνα 5.12). Για την παραγωγή των παρακάτω δεδομένων (πίνακας 5.4), πάρθηκαν μετρήσεις για το σημείο $35^{\circ}30'\text{B}$, $27^{\circ}20'\text{A}$.

Λιμάνι Κάρπαθος	Μέση Ετήσια Τιμή	Χειμώνας	Άνοιξη	Καλοκαίρι	Φθινόπωρο	Ελάχιστο	Μέγιστο
Μέσο Κυματικό Ύψος (m)	0,9775	1,2418	0,9234	0,9613	0,892	0,0659	5,3042
Μέση Κυματική Περίοδος (s)	4,0265	5,3631	4,7086	4,5731	4,6653	1,9978	9,5585
Μέση Κυματική Ενέργεια (kW/m)	7,7502	13,1696	6,8866	5,6581	6,091	0,0092	249,1761

Πίνακας 5.4: Σχετικές μέσες τιμές για το λιμάνι στα Πηγάδια Καρπάθου



Εικόνα 5.12: Δορυφορική εικόνα με το λιμάνι των Πηγαδιών στην Κάρπαθο



Εικόνα 5.13.: Ροδογράμματα σημαντικού ύψους (αριστερά) και ενέργειας κύματος (δεξιά) για το λιμάνι Στα Πηγάδια της Καρπάθου

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα από τα ροδογράμματα σημαντικού ύψους και ενέργειας κύματος (Εικόνα 5.13), φαίνεται ότι η κύρια κατεύθυνση κυματισμού στο λιμάνι των Πηγαδιών, είναι ΒΔ, με μέγιστο καταγεγραμμένο σημαντικό ύψος κύματος 5,304 m και μέγιστη ενέργεια κύματος 249,176 kW/m που προέρχεται από ΒΒΔ κατεύθυνση. Επίσης επικρατούν και κυματισμοί Δ που χαρακτηρίζονται από σημαντικό ύψος κύματος μεταξύ 2-2,5 m, η εμφάνιση των οποίων είναι ποσοστιαία πολύ μικρότερη (4-5%) σε σχέση με τους ΒΒΔ κυματισμούς (16-18%).

Φρύ, Κάσος

Η **Κάσος** (Εικ. 5.14) είναι ελληνικό νησί του νότιου Αιγαίου και το νοτιότερο από τα Δωδεκάνησα. Βρίσκεται ανάμεσα στην Κρήτη και στην Κάρπαθο. Έχει έξι χωριά την Αγία Μαρίνα, το Αρβανιτοχώρι, τον Εμπορείο, την Παναγία, το Πόλι και το Φρυ, το οποίο είναι και η πρωτεύουσα του νησιού. Συνολικά οι κάτοικοι στο νησί με βάση την απογραφή του 2011, είναι 1.084, ενώ στην πρωτεύουσα 335.



Εικόνα 5.14.: Χάρτης Κάσου (αριστερά), Δορυφορική εικόνα του νησιού της Κάσου με επισημάνσεις στο λιμάνι του Φρυ (δεξιά)

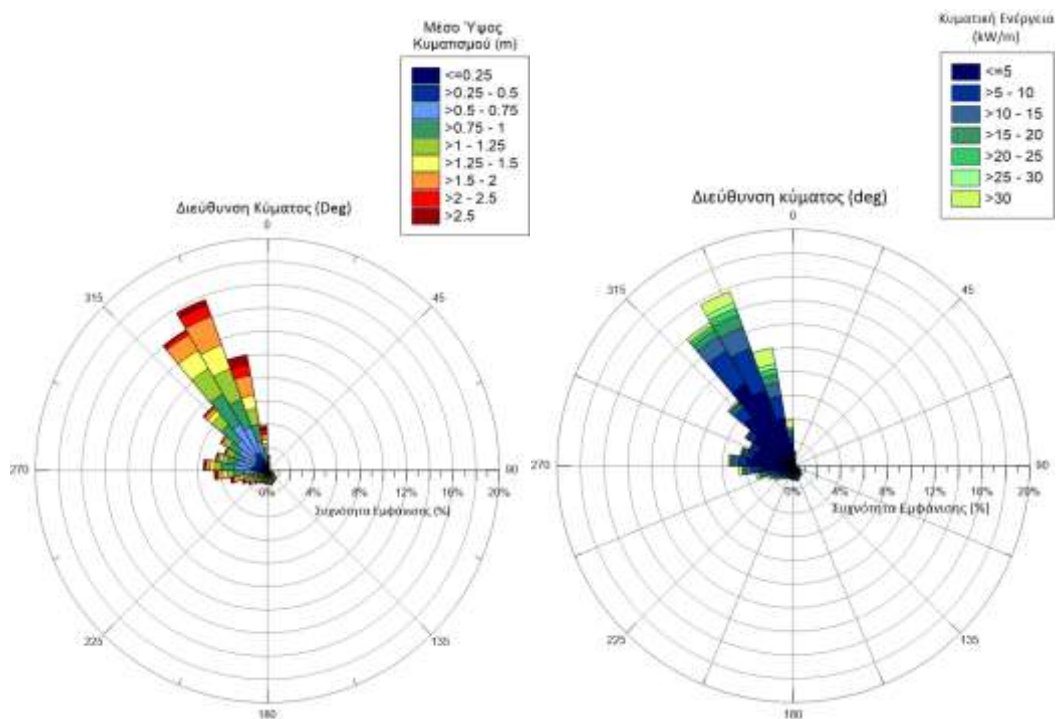
Λόγω της μικρής της έκτασης, η Κάσος δεν διαθέτει άλλο λιμάνι πάρε από αυτό στο **Φρυ**, το οποίο διαθέτει έναν αρκετά μεγάλο κυματοθραύστη ($35^{\circ}25'16.18''\text{B}$, $26^{\circ}55'25.32''\text{A}$) με προσανατολισμό Β-ΒΑ (Εικόνα 5.15) και μήκος 660 m. Επιπλέον για να παραχθούν τα κατάλληλα δεδομένα, μελετήθηκε το σημείο με συντεταγμένες $35^{\circ}30' \text{ N}$, $27^{\circ}00' \text{ E}$ και τα οποία παρουσιάζονται στον εξής πίνακα 5.5.

Λιμάνι Κάσου (Φρυ)	Μέση Ετήσια Τιμή	Χειμώνας	Άνοιξη	Καλοκαίρι	Φθινόπωρο	Ελάχιστο	Μέγιστο
Μέσο Κυματικό Ύψος (m)	1,0136	1,283	0,9503	1,0008	0,9321	0,0633	5,2924
Μέση Κυματική Περίοδος (s)	4,7493	5,4215	4,759	4,6297	4,7356	2,0283	9,5253
Μέση Κυματική Ενέργεια (kW/m)	8,4593	14,1883	7,4075	6,2989	6,8134	0,0085	248,8153

Πίνακας 5.5: Σχετικές μέσες τιμές για το λιμάνι Φρυ



Εικόνα 5.15: Αεροφωτογραφία στην οποία φαίνεται το λιμάνι του Φρυ



Εικόνα 5.16: Ροδόγραμμα σημαντικού ύψους (αριστερά) και ενέργειας κύματος (δεξιά) για το λιμάνι στο Φρυ

Για το λιμάνι στο Φρυ (Εικόνα 5.16), παρατηρούμε ότι η κύρια κατεύθυνση του κυματισμού είναι ΒΑ. Το σημαντικό ύψος είναι κυρίως 0,9 - 1,5 m, με μέγιστο 5,292 m, ενώ η ενέργεια κύματος είναι κυρίως από 10 - 15 kW/m, ενώ το μέγιστο που έχει καταγραφεί είναι 248,815 kW/m, από ΒΒΑ κατεύθυνση.

Μονόλιθος, Σαντορίνη

Η **Σαντορίνη** βρίσκεται στο νότιο Αιγαίο πέλαγος, στο νησιωτικό σύμπλεγμα των Κυκλάδων, με 15.250 κατοίκους (απογραφή 2011). Το τμήμα του νησιού που εμφανίζει τους εντονότερους κυματισμούς, είναι όλη η ΒΑ πλευρά, που ξεκινάει από την περιοχή Μπαξέδες και καταλήγει στο Μονόλιθο (Εικόνα 5.17). Το οποίο επιβεβαιώνεται και από το γεγονός της ύπαρξης λιμένων με κυματοθραύστη μόνοσε αυτή τη μεριά του νησιού, όπως φαίνεται και στην δεξιά εικόνα 5.17. Πιο

αναλυτικά παρατηρούμε ότι τα λιμάνια που πληρούν την προϋπόθεση του κυματοθραύστη είναι εκείνα **στους Μπαξέδες, στον Έξω Γιαλό και στον Μονόλιθο**.



Εικόνα 5.17: Χάρτης Σαντορίνης (αριστερά), Δορυφορική εικόνα του νησιού της Σαντορίνης με επισημάνσεις στα λιμάνια με κυματοθραύστη (δεξιά)

Μετά από μελέτη και των τριών αυτών λιμένων, παρατηρούμε ότι και τα τρία πληρούν τα κριτήρια και διαθέτουν ιδανικούς κυματοθραύστες με Β προσανατολισμό. Ωστόσο, το λιμάνι που επιλέχθηκε να μελετηθεί είναι αυτό του **Μονολίθου**, καθώς τα υπόλοιπα 2 βρίσκονται σε τουριστικές περιοχές, όπως το λιμάνι του Έξω Γιαλού που βρίσκεται κοντά στο Ημεροβίγλι, που αποτελεί σημαντικό τουριστικό θέρετρο της Σαντορίνης.

Το λιμάνι του Μονολίθου, βρίσκεται στον οικισμό του Μονολίθου, ο οποίος κατοικείται από 500 άτομα. Στον συγκεκριμένο οικισμό και μάλιστα αρκετά κοντά στο λιμάνι βρίσκεται το αεροδρόμιο της Σαντορίνης αλλά και σε επίσης πολύ κοντινή απόσταση βρίσκεται ο σταθμός παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας του νησιού. Δεδομένο που εξασφαλίζει στην υλοποίηση του έργου, τη διασύνδεση της επάκτιας κυματικής συσκευής με το ηλεκτρικό δίκτυο.

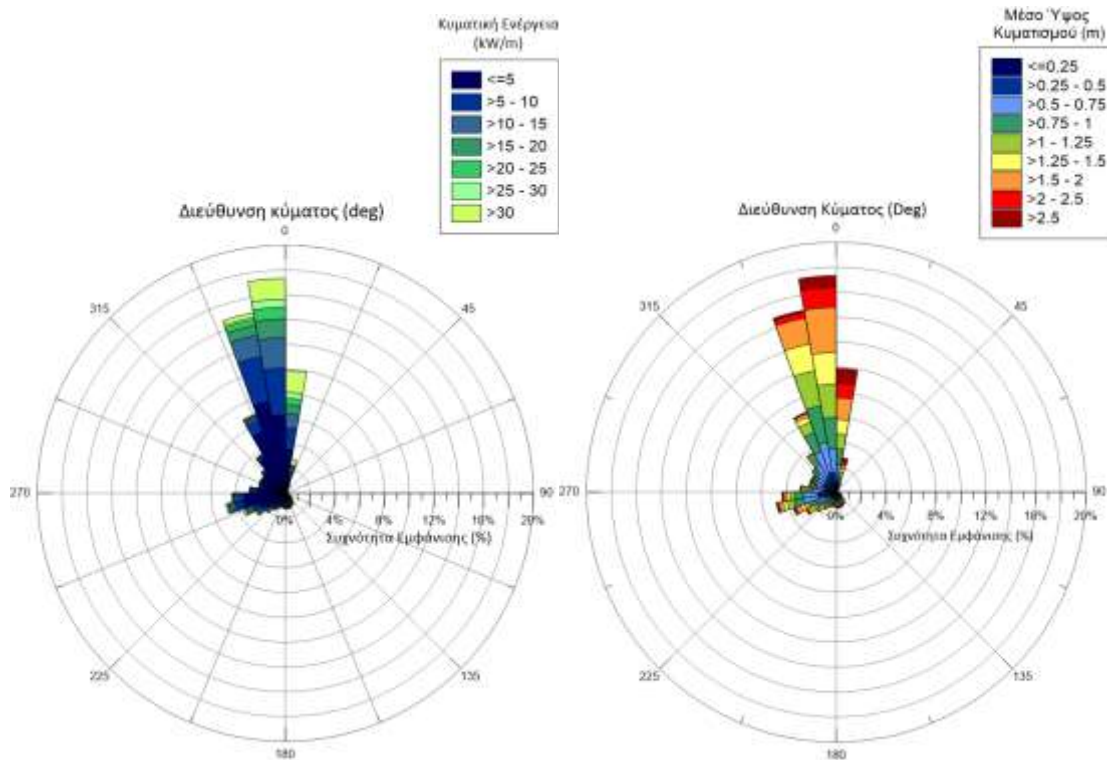
Μορφολογικά, παρατηρούνται 2 κυματοθραύστες, οι οποίοι προστατεύουν μια μικρή μαρίνα πλοιαρίων (Εικόνα 5.18). Συγκεκριμένα ο βόρειος κυματοθραύστης ($36^{\circ}24'49.75''\text{B}$, $25^{\circ}29'4.06''\text{A}$) παρατηρείται να έχει Β προσανατολισμό και έχει μήκος 220 m, ενώ νοτιότερα παρατηρούμε τον δεύτερο κυματοθραύστη ($36^{\circ}24'31.25''\text{B}$, $25^{\circ}29'14.17''\text{A}$) με ΝΑ προσανατολισμό και μήκος 150 m. Η διάταξη των κυματοθραυστών και ο ακριβής προσανατολισμός τους φαίνονται και στα αρχιτεκτονικά σχέδια στην Εικόνα. Στα πλαίσια της συγκεκριμένης μελέτης επιλέχθηκε ο πρώτος κυματοθραύστης, λόγω του Β προσανατολισμού του και συγκεκριμένα για την παραγωγή των κυματικών δεδομένων που παρουσιάζονται στον πίνακα 5.6, χρησιμοποιήθηκε το σημείο με συντεταγμένες, $36^{\circ}30'\text{B}$, $25^{\circ}50'\text{A}$.



Εικόνα 5.18: Δορυφορική εικόνα στην οποία φαίνεται το λιμάνι του Μονολίθου

Λιμάνι Μονολίθου	Μέση Ετήσια Τιμή	Χειμώνας	Άνοιξη	Καλοκαίρι	Φθινόπωρο	Ελάχιστο	Μέγιστο
Μέσο Κυματικό Ύψος (m)	1,0085	1,2769	0,9154	0,9752	0,9737	0,0683	5,0721
Μέση Κυματική Περίοδος (s)	4,6068	5,2096	4,5791	4,5073	4,6589	1,9449	8,6464
Μέση Κυματική Ενέργεια (kW/m)	8,3764	13,5914	6,8717	6,2431	7,6135	0,0109	220,705

Πίνακας 5.6: Σχετικές μέσες τιμές για το λιμάνι του Μονολίθου

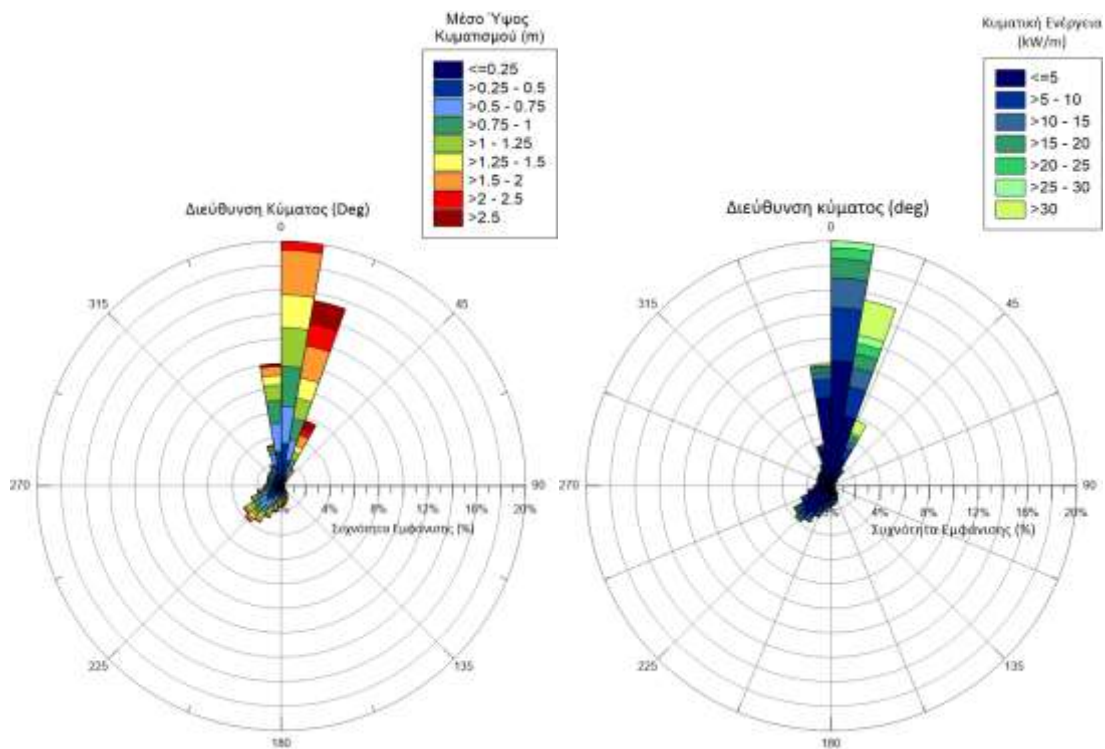


Εικόνα 5.19: Ροδoγράμματα σημαντικού ύψους (αριστερά) και ενέργειας κύματος (δεξιά) για το λιμάνι στο Μονόλιθο

Παρατηρώντας τα ροδoγράμματα ύψους και ενέργειας κύματος, συμπεραίνουμε πως στο λιμάνι του Μονόλιθου ο κυματισμός που επικρατεί (17%) είναι ΒΒΔ κατεύθυνσης και υπάρχει και ένα μικρό ποσοστό της τάξεως του 4% από ΝΝΔ ανέμους. Το μέγιστο καταγεγραμμένο σημαντικό ύψος είναι 5,072 m, ενώ η μέγιστη ενέργεια κύματος 220,705 kW/m, από την ΒΒΑ κατεύθυνση.

Λιμάνι Μυκόνου	Μέση Ετήσια Τιμή	Χειμώνας	Άνοιξη	Καλοκαίρι	Φθινόπωρο	Ελάχιστο	Μέγιστο
Μέσο Κυματικό Ύψος (m)	0,9621	1,2677	0,8486	0,8534	0,9776	0,055	5,5129
Μέση Κυματική Περίοδος (s)	4,3922	4,9973	4,3238	4,2381	4,505	1,8415	9,0324
Μέση Κυματική Ενέργεια (kW/m)	8,3872	14,1679	6,4395	5,3253	8,3493	0,0068	274,5077

Πίνακας 5.7: Σχετικές μέσες τιμές για το παλιό λιμάνι στη Χώρα Μυκόνου



Εικόνα 5.22.: Ροδογράμματα σημαντικού ύψους (αριστερά) και ενέργειας κύματος (δεξιά) για το παλιό λιμάνι στη Χώρα Μυκόνου

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα από τα ροδογράμματα σημαντικού ύψους και ενέργειας κύματος (Εικόνα 5.22), φαίνεται ότι η κύρια κατεύθυνση κυματισμού στο παλιό λιμάνι της Χώρας Μυκόνου, είναι ΒΒΑ, με μέγιστο καταγεγραμμένο σημαντικό ύψος κύματος 5,5129 m και μέγιστη ενέργεια κύματος 274,5077 kW/m που προέρχεται από Β κατεύθυνση. Επίσης υπάρχουν και κυματισμοί ΝΔ κατεύθυνσης που χαρακτηρίζονται από σημαντικό ύψος κύματος μεταξύ 0,75-1,25 m, η εμφάνιση των οποίων είναι ποσοστιαία πολύ μικρότερη (4%) σε σχέση με τους ΒΒΑ κυματισμούς (20%).

Στο συγκεκριμένο σημείο θα πρέπει να αναφερθεί πως με βάση τα ροδογράμματα παρατηρούνται να επικρατούν Β κυματισμοί, ωστόσο παρατηρούμε ότι το λιμάνι της Μυκόνου έχει Δ προσανατολισμό, κάτι το οποίο δεν μας δίνει ακριβής εικόνα για το κυματικό δυναμικό κοντά στον

κυματοθράυστη. Η αστοχία στο συγκεκριμένο σημείο ωφείλεται στην επιλογή του σημείου το οποίο επιλέχθηκε για παραγωγή των μέσων τιμών σημαντικού ύψους κύματος, της μέσης περιόδου και της μέσης κατεύθυνσης κυματισμού και για το οποίο παράχθηκαν τα ροδογράμματα. Για μεγαλύτερη ακρίβεια λοιπόν, στον υπολογισμό του κυματικού δυναμικού στο λιμάνι της Μυκόνου στην συγκεκριμένη περίπτωση χρειάζονται επιτόπιες μετρήσει πολύ κοντά στον κυματοθραύστη.

Πλατανιάς, Χανιά

Ο Πλατανιάς είναι παραθαλάσσιος οικισμός του νομού Χανίων, που βρίσκεται 12 χιλιόμετρα δυτικά των Χανίων (Εικόνα 5.23). Ανήκει διοικητικά στον Δήμο Πλατανιά, του οποίου ο πληθυσμός, σύμφωνα με την απογραφή του 2011, ανέρχεται σε 979 κατοίκους.



Εικόνα 5.23: Χάρτης Χανίων (αριστερά), Δορυφορική εικόνα του νησιού της Κρήτης με επισημάνσεις στο λιμάνι του Πλατανιά (δεξιά)

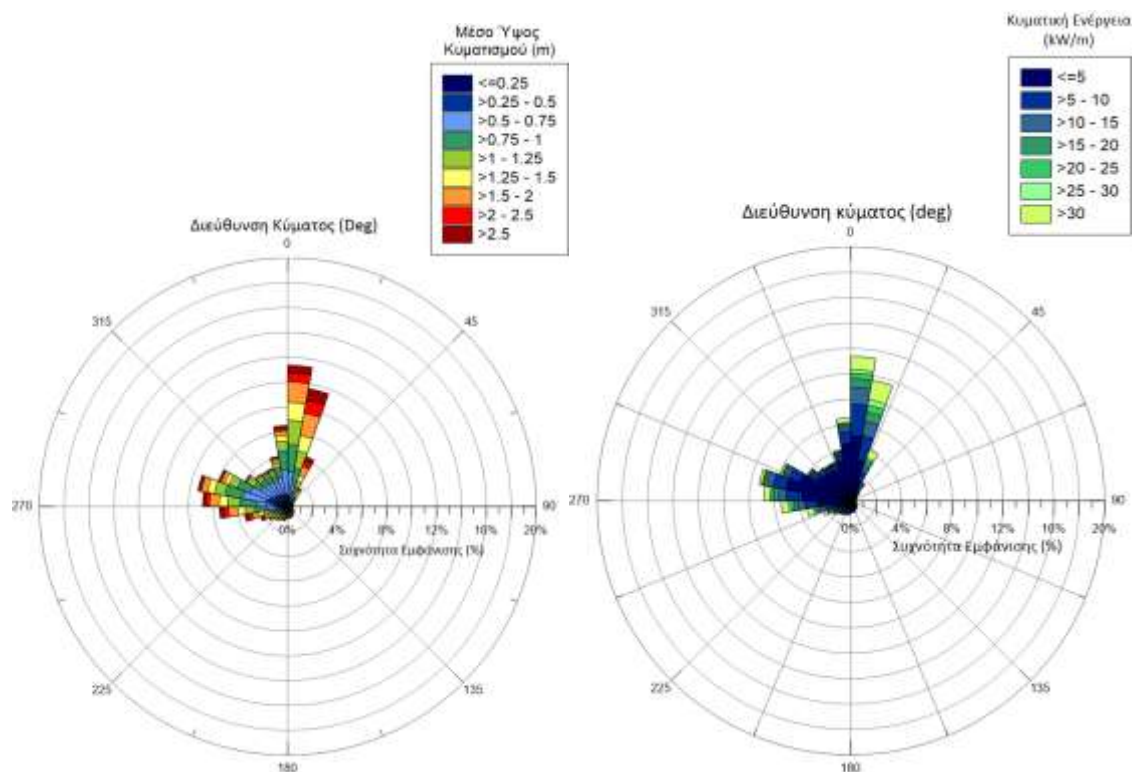
Μορφολογικά, παρατηρούνται 2 κυματοθραύστες, οι οποίοι προστατεύουν μια μικρή μαρίνα πλοιαρίων (Εικόνα 5.24). Συγκεκριμένα ο μεγάλος κυματοθραύστης ($35^{\circ}31'13.75''\text{B}$, $23^{\circ}54'41.72''\text{A}$) έχει τη μορφή σχήματος “Γ” με προσανατολισμό Δ και Β, έχει μήκος 210 m, ενώ νοτιότερα παρατηρούμε το δεύτερο κυματοθραύστη ($35^{\circ}31'11.52''\text{B}$, $23^{\circ}54'44.88''\text{A}$) με Α προσανατολισμό και μήκος 120 m. Η διάταξη των κυματοθραυστών και ο ακριβής προσανατολισμός τους φαίνονται και στα αρχιτεκτονικά σχέδια στην Εικόνα 5.25. Στα πλαίσια της συγκεκριμένης μελέτης επιλέχθηκε ο πρώτος κυματοθραύστης, λόγω του Β-Δ προσανατολισμού του αλλά και λόγω μεγέθους και συγκεκριμένα για την παραγωγή των κυματικών δεδομένων που παρουσιάζονται στον πίνακα 5.8, χρησιμοποιήθηκε το σημείο με συντεταγμένες, $35^{\circ}40' \text{ N}$, $24^{\circ}00' \text{ E}$.



Εικόνα 5.24: Δορυφορική εικόνα από το λιμάνι του Πλατανιά

Λιμάνι Πλατανιάς	Μέση Ετήσια Τιμή	Χειμώνας	Άνοιξη	Καλοκαίρι	Φθινόπωρο	Ελάχιστο	Μέγιστο
Μέσο Κυματικό Ύψος (m)	1,0247	1,4264	0,9711	0,8236	0,9933	0,078	5,2098
Μέση Κυματική Περίοδος (s)	4,8207	5,6418	4,8356	4,4935	4,8738	2,1574	10,9023
Μέση Κυματική Ενέργεια (kW/m)	9,2329	17,541	7,7747	4,3426	8,2376	0,0149	277,2615

Πίνακας 5.8: Σχετικές μέσες τιμές για το παλιό λιμάνι στον Πλατανιά Χανίων



Εικόνα 5.25.: Ροδόγραμμα σημαντικού ύψους (αριστερά) και ενέργειας κύματος (δεξιά) για το λιμάνι στον Πλατανιά Χανίων

Στο συγκεκριμένο λιμάνι με βάση τα ροδογράμματα που παρήχθησαν (Εικόνα 5.25) παρατηρούμε ότι, η επικρατούσα διεύθυνση του κυματισμού είναι BBA (12%). Το μέγιστο καταγεγραμμένο σημαντικό ύψος κύματος προέρχεται από την Β κατεύθυνση και είναι 5,209 m, ενώ η μέγιστη τιμή της ενέργειας κύματος είναι 277,2615 kW/m. Επιπλέον παρατηρούνται και Δ κυματισμοί με τιμές σημαντικού ύψους κύματος στα 2 m σε ποσοστό 7% ενώ η καταγεγραμμένη ενέργεια στην συγκεκριμένη περίπτωση είναι και 10 - 15 kW/m, σε ποσοστό επίσης 7%.

Ρέθυμνο, Κρήτη

Το **Ρέθυμνο** είναι πρωτεύουσα του ομώνυμου νομού της Κρήτης. Είναι η τρίτη μεγαλύτερη πόλη της Κρήτης μετά το Ηράκλειο και τα Χανιά, της οποίας ο πληθυσμός ανέρχεται στους 34.300 κατοίκους. Στην Παλιά Πόλη, βρίσκεται το παλαιό Ενετικό λιμάνι του Ρεθύμνου, το οποίο πλέον λειτουργεί ως τόπος πρόσδεσης για μικρές ψαρόβαρκες, υπάρχει όμως και μαρίνα.



Εικόνα 5.26: Χάρτης Ρεθύμνου (αριστερά), Δορυφορική εικόνα του νησιού της Κρήτης με επισημάνσεις στο λιμάνι του Ρεθύμνου (δεξιά)

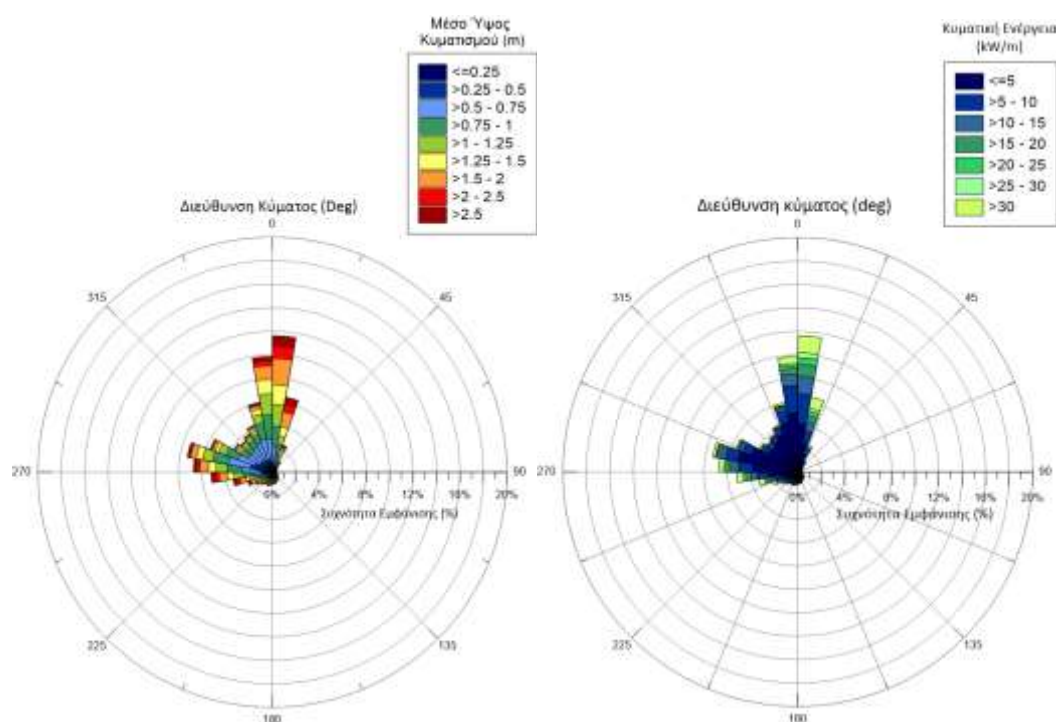
Η μαρίνα του Ρεθύμνου (εικόνα 5.27) που εξυπηρετεί ακτοπλοϊκά δρομολόγια, με επιβατικά και εμπορικά πλοία, με τα πρώτα να υπολογίζονται κατά μέσο όρο ετησίως στα 120 και χρόνο παραμονής στην μαρίνα τις 24 ώρες, ενώ τα δεύτερα στα 60, με μέσο χρόνο αναμονής τις 20 ώρες. Ωστόσο, στο Ρέθυμνο υπάρχει προς το παρόν σύνδεση με πλοίο μόνο τους καλοκαιρινούς μήνες.



Εικόνα 5.27: Δορυφορική εικόνα από το λιμάνι του Ρεθύμνου

Λιμάνι Ρεθύμνου	Μέση Ετήσια Τιμή	Χειμώνας	Άνοιξη	Καλοκαίρι	Φθινόπωρο	Ελάχιστο	Μέγιστο
Μέσο Κυματικό Ύψος (m)	1,0179	1,3876	0,9598	0,8632	0,9748	0,0761	5,06
Μέση Κυματική Περίοδος (s)	4,7805	5,5801	4,7984	4,4778	4,8225	2,0039	10,607
Μέση Κυματική Ενέργεια (kW/m)	8,867	16,376	7,5374	4,7381	7,7389	0,0121	257,642

Πίνακας 5.9: Σχετικές μέσες τιμές για το παλιό λιμάνι στο Ρέθυμνο



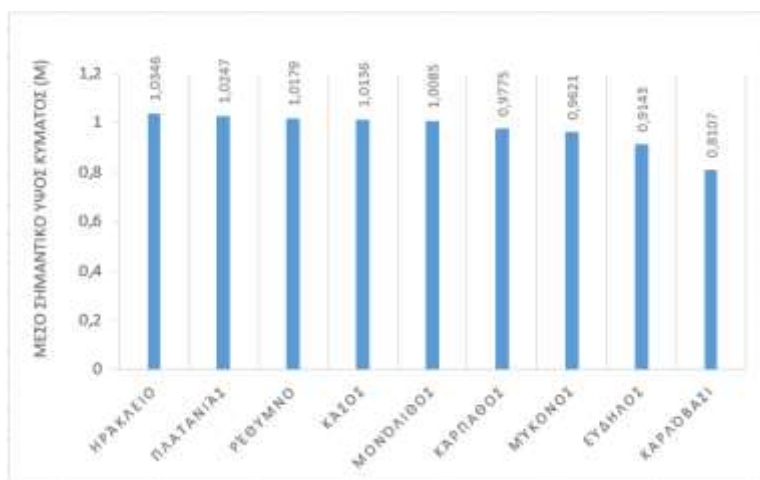
Εικόνα 5.28: Ροδόγραμμα σημαντικού ύψους (αριστερά) και ενέργειας κύματος (δεξιά) για το λιμάνι στο Ρέθυμνο

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα από τα ροδογράμματα σημαντικού ύψους και ενέργειας κύματος (Εικόνα 5.28), φαίνεται ότι η κύρια κατεύθυνση κυματισμού στη μαρίνα του Ρεθύμνου, είναι Β, με μέγιστο καταγεγραμμένο σημαντικό ύψος κύματος 5,006 m και μέγιστη ενέργεια κύματος 257,642 kW/m που προέρχεται από Β κατεύθυνση. Επίσης υπάρχουν και κυματισμοί ΒΔ κατεύθυνσης που χαρακτηρίζονται από σημαντικό ύψος κύματος μεταξύ 0,75-1,25 m, η εμφάνιση των οποίων είναι ποσοστιαία πολύ μικρότερη (6-8%) σε σχέση με τους ΒΒΑ κυματισμούς (12%).

5.2. Σύγκριση Αποτελεσμάτων Έρευνας - Τελική Επιλογή Λιμανιού

Συγκρίνοντας τα δεδομένα για το μέσο σημαντικό ύψος, τη μέση περίοδο αλλά και τη μέση κυματική ενέργεια κύματος, που προέκυψαν κατόπιν επεξεργασίας των επιτόπιων

μετρήσεων για το κάθε λιμάνι δημιουργήθηκαν τα παρακάτω διαγράμματα στηλών από τα οποία βγαίνουν τα εξής συμπεράσματα.



Εικόνα 5.29: Μέση τιμή σημαντικού ύψους κύματος για όλα τα λιμάνια μελέτης (κατά φθίνουσα σειρά)

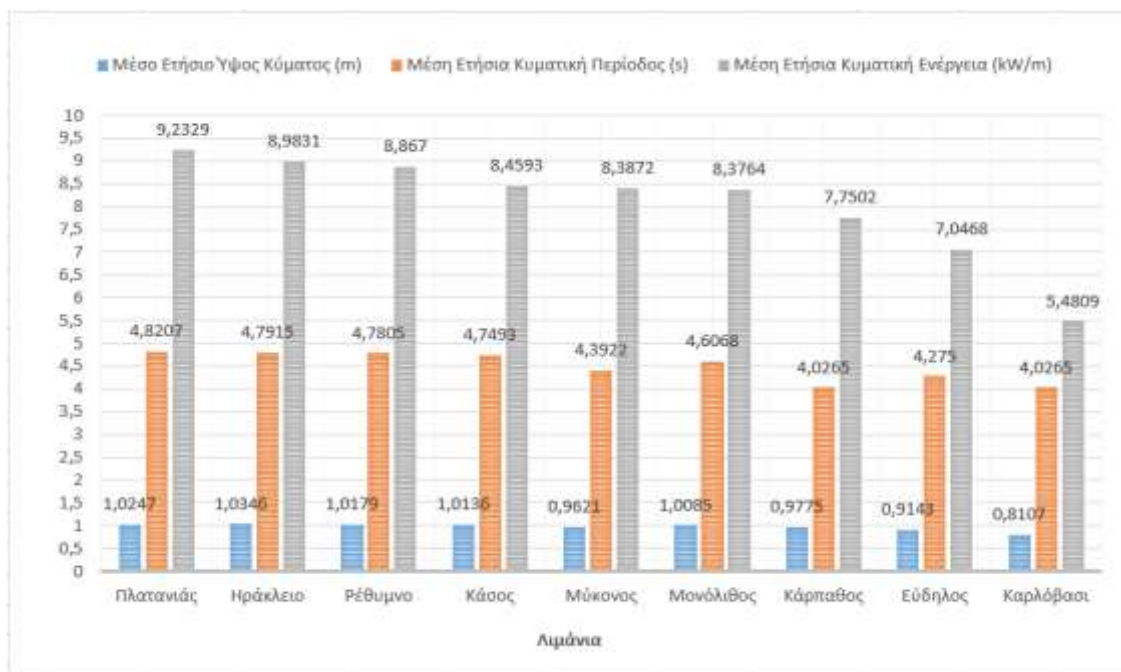
- Με βάση τα δεδομένα που λαμβάνουμε από τον “Άτλαντα Ανέμων και Κυμάτων Των Ελληνικών Θαλασσών”, οι υψηλότερες τιμές που διακρίνονται είναι στο 1 m, και οι οποίες εντοπίζονται στις δυτικές και ανατολικές ακτές της Κρήτης, αλλά και στις ακτές της Καρπάθου, Κάσου, Κυθήρων, Αντικυθήρων, Κουφονησίων, Γαύδου, Κω, Τήνου, Μυκόνου, στις νότιες ακτές της Ικαρίας. Γεγονός που επιβεβαιώνεται και στα αποτελέσματα των δεδομένων που παρήχθησαν στην συγκεκριμένη εργασία, καθώς όπως φαίνεται και στην εικόνα ##, τα λιμάνια που παρουσιάζουν μέσο ετήσιο σημαντικό ύψος κύματος πάνω από 1m, είναι εκείνα του **Ηρακλείου, Πλατανιά, Ρεθύμνου, Κάσου και Μονολίθου (Σαντορίνη)**. Η μέγιστη μέση τιμή ύψους κύματος εμφανίζεται στο λιμάνι του **Ηρακλείου**, στα 1,0346 m και ακολουθεί το λιμάνι του **Πλατανιά** με, 1,0247 m.



Εικόνα 5.30: Μέση κυματική περίοδος για όλα τα λιμάνια μελέτης (κατά φθίνουσα σειρά)

- Παρόμοια συμπεράσματα βγαίνουν και από τη μελέτη των μέσων ετήσιων τιμών για την κυματική περίοδο, που όπως φαίνεται και στην Εικόνα 5.30, τα λιμάνια της Κρήτης, της

Κάσου και του Μονολίθου παρουσιάζουν τις μεγαλύτερες τιμές. Ωστόσο, η μέγιστη τιμή εντοπίζεται στο λιμάνι του **Πλατανιά**, στα 4,8207 s, ενώ δεύτερη μεγαλύτερη τιμή εμφανίζει το λιμάνι του **Ηρακλείου**, στα 4,7915.



Εικόνα 5.31: Συγκεντρωτικός πίνακας για τις μέσες ετήσιες τιμές του ύψους, της περιόδου και της ενέργειας κύματος για τα λιμάνια μελέτης (κατά φθίνουσα σειρά της κυματικής ενέργειας)

- Συγκεντρωτικά, στην εικόνα 5.31 παρουσιάζονται οι τιμές του μέσου σημαντικού ύψους, της περιόδου αλλά και της ενέργειας των κυμάτων, για όλα τα λιμάνια που μελετήθηκαν.

Άρα συνοψίζοντας τη διαδικασία επιλογής της τελικής τοποθεσίας στο Αιγαίο για την επάκτια κυματική συσκευή, τα λιμάνια της Κρήτης είναι εκείνα που εμφανίζουν τους εντονότερους κυματισμούς. Εκείνο όμως, που παρουσιάζει μεγαλύτερο κυματικό δυναμικό είναι το λιμάνι του **Πλατανιά** στα Χανιά και είναι και αυτό που προτείνεται από τη συγκεκριμένη εργασία. Ωστόσο, πριν από οποιαδήποτε τελική απόφαση θα πρέπει να προηγηθούν επιτόπιες μετρήσεις πολύ κοντά στο συγκεκριμένο λιμάνι, για μεγαλύτερη ακρίβεια των αποτελεσμάτων. Όπως επίσης και μια μελέτη περιβαλλοντικών επιπτώσεων αλλά και μια κοινωνικοοικονομική έρευνα για την ευρύτερη περιοχή του Πλατανιά.

6. Μελλοντικές Προτάσεις Έρευνας

Σχετικά με την πρόταση στην οποία κατέληξε η συγκεκριμένη έρευνα, για ενσωμάτωση κυματικής συσκευής Παλλόμενης Στήλης Ύδατος στο λιμάνι του Πλατανιά, παρουσιάζονται δυο βασικά μειονεκτήματα. Το πρώτο αφορά την λειτουργία της κυματικής συσκευής και το δεύτερο τις υποδομές του κυματοθραύστη στο λιμάνι του Πλατανιά. Αρχικά, όσον αφορά την εγκατάσταση της κυματικής συσκευής, στην παράγραφο 1.4, στα μειονεκτήματα των κυματικών συσκευών

εντοπίστηκε ο πιθανός έντονος θόρυβος που παράγει ο βραχύονας κατά την περιστροφή του. Λόγω του ότι η περιοχή στην οποία βρίσκεται το λιμάνι του Πλατανιά είναι τουριστική, για την αποφυγή πρόκλησης προβλημάτων, θα πρότεινα την χρήση ειδικών ηχοαπορροφητικών υλικών, για την ελαχιστοποίηση των θορύβων.

Ένω σε ότι αφορά τις υποδομές εγκατάστασης της κυματικής συσκευής στο λιμάνι και συγκεκριμένα τον κυματοθραύστη του, παρατηρείται μια σχετικά μικρή και ασταθής διάταξη, αποτελούμενη από ογκόλιθους και άμμο, το οποίο είναι λογικό καθώς για την χρήση που γίνεται στο συγκεκριμένο λιμάνι την παρούσα περίοδο, είναι ικανοποιητική. Ωστόσο, στα πλαίσια της υλοποίησης της εγκατάστασης της κυματικής επάκτιας συσκευής ενσωματωμένη στον συγκεκριμένο κυματοθραύστη θα πρότεινα την αναδόμηση και κατά κύριο την επέκταση του ίδιου του κυματοθραύστη όσον αφορά το μήκος του. Με σκοπό την δημιουργία μεγαλύτερου μήκους μετώπου στο οποίο θα μπορεί να εγκατασταθεί και μια μεγαλύτερη μονάδα κυματικής συσκευής ή συνδιασμός πολλών, και άρα να επιτύχουμε την δημιουργία μεγαλύτερου ποσού ενέργειας.

7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [A1] Vosough, A. (2011). Wave energy. *International Journal of Multidisciplinary Sciences and Engineering*, 2(7), 60-63.
- [A2] Clément, A., McCullen, P., Falcão, A., Fiorentino, A., Gardner, F., Hammarlund, K., ... & Pontes, M. T. (2002). Wave energy in Europe: current status and perspectives. *Renewable and sustainable energy reviews*, 6(5), 405-431.
- [A3] Drew, B., Plummer, A. R., & Sahinkaya, M. N. (2009). A review of wave energy converter technology.
- [A4] Olson, C. F. (2007). U.S. Patent No. 7,245,041. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- [A5] Antonio, F. D. O. (2010). Wave energy utilization: A review of the technologies. *Renewable and sustainable energy reviews*, 14(3), 899-918.
- [A6] López, I., Andreu, J., Ceballos, S., de Alegría, I. M., & Kortabarria, I. (2013). Review of wave energy technologies and the necessary power-equipment. *Renewable and sustainable energy reviews*, 27, 413-434.
- [A7] Tarrant, K., & Meskell, C. (2016). Investigation on parametrically excited motions of point absorbers in regular waves. *Ocean Engineering*, 111, 67-81.
- [A8] Xie, J., & Zuo, L. (2013). Dynamics and control of ocean wave energy converters. *International Journal of Dynamics and Control*, 1(3), 262-276.

- [A9] Κατσαούνης Γ. (2010). Σημειακοί απολήπτες και συστήματα ελέγχου κίνησης. Waveplam Εθνικό Ίδρυμα Ερευνών
- [A10] Xie, J., & Zuo, L. (2013). Dynamics and control of ocean wave energy converters. *International Journal of Dynamics and Control*, 1(3), 262-276.
- [A11] Frigaarda, P., Tedda, J., Kofoeda, J. P., & Friis-Madsenb, E. (2006). 3 years experience with energy production on the Nissum Bredning Wave Dragon Proto Type.
- [A12] Clément, A., McCullen, P., Falcão, A., Fiorentino, A., Gardner, F., Hammarlund, K., ... & Pontes, M. T. (2002). Wave energy in Europe: current status and perspectives. *Renewable and sustainable energy reviews*, 6(5), 405-431.
- [A13] Enferad, E., & Nazarpour, D. (2013). Ocean's Renewable Power and Review of Technologies: Case Study Waves. *New Dev. Renew. Energy*, 273-300.
- [A14] Kofoed, J. P., Frigaard, P., Friis-Madsen, E., & Sørensen, H. C. (2006). Prototype testing of the wave energy converter wave dragon. *Renewable energy*, 31(2), 181-189.
- [A15] Poullikkas, A. (2014). Technology prospects of wave power systems. *Electronic Journal of Energy & Environment*, 2(1), 47-69.
- [A16] Lehmann, M., Elandt, R., Pham, H., Ghorbani, R., Shakeri, M., & Alam, M. R. (2013, September). An artificial seabed carpet for multidirectional and broadband wave energy extraction: Theory and Experiment. In *Proceedings of 10th European Wave and Tidal Energy Conference*.
- [A17] Koola, P. M., & Ibragimov, A. (2003, September). The dynamics of wave carpet-a novel deep water wave energy design. In *Oceans 2003. Celebrating the Past... Teaming Toward the Future* (IEEE Cat. No. 03CH37492) (Vol. 4, pp. 2288-2293). IEEE.
- [A18] Lehmann, M., Elandt, R., Shakeri, M., & Alam, R. (2014). The wave carpet: development of a submerged pressure differential wave energy converter. In *30th Symposium on Naval Hydrodynamics* (pp. 2-7).
- [A19] Heller, V., Chaplin, J. R., Farley, F. J. M., Hann, M. R., & Hearn, G. E. (2000, August). Physical model tests of the anaconda wave energy converter. In *Proc. 1st IAHR European Congress*.
- [A20] Evans, D. V., & Porter, R. (1995). Hydrodynamic characteristics of an oscillating water column device. *Applied Ocean Research*, 17(3), 155-164.
- [A21] Falcão, A. F., & Henriques, J. C. (2016). Oscillating-water-column wave energy converters and air turbines: A review. *Renewable Energy*, 85, 1391-1424.
- [A22] Iturrioz, A., Guanche, R., Lara, J. L., Vidal, C., & Losada, I. J. (2015). Validation of OpenFOAM® for oscillating water column three-dimensional modeling. *Ocean Engineering*, 107, 222-236.
- [A23] Brusca, S., Cucinotta, F., Galvagno, A., Lanzafame, R., Mauro, S., & Messina, M. (2015). Oscillating water column wave energy converter by means of straight-bladed Darrieus turbine. *Energy Procedia*, 82, 766-773.
- [A24] Heath, T. V. (2012). A review of oscillating water columns. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 370(1959), 235-245.

- [A25] Soukissian, T., Denaxa, D., Karathanasi, F., Prospathopoulos, A., Sarantakos, K., Iona, A., ... & Mavrakos, S. (2017). Marine renewable energy in the Mediterranean Sea: status and perspectives. *Energies*, 10(10), 1512.
- [A26] Falcão, A. D. O. (2000, December). The shoreline OWC wave power plant at the Azores. In *Fourth European Wave Energy Conference*, Aalborg, Denmark, Dec (pp. 4-6).
- [A27] Falcão, A. F., Henriques, J. C., & Cândido, J. J. (2012). Dynamics and optimization of the OWC spar buoy wave energy converter. *Renewable energy*, 48, 369-381.]
- [A28] Sannino, G., & Pisacane, G. (2017). Ocean energy exploitation in Italy: ongoing R&D activities. Position paper/September 2017.
- [A29] Arena, F., Malara, G., & Romolo, A. (2015). A U-OWC wave energy converter in the Mediterranean Sea: Preliminary results on the monitoring system of the first prototype. *Renewable Energy Offshore*; Guedes Soares, C., Ed.; Taylor & Francis Group: London, UK, 417-421.
- [A30] Imai, Y., Toyota, K., Nagata, S., & Mamun, M. A. (2010). Duct extension effect on the primary conversion of a wave energy converter 'backward bent duct buoy'. *J. OTEC*, 15, 33-35.
- [A31] Gunn, K., & Stock-Williams, C. (2012). Quantifying the global wave power resource. *Renewable Energy*, 44, 296-304.
- [A32] Aderinto, T., & Li, H. (2018). Ocean wave energy converters: Status and challenges. *Energies*, 11(5), 1250.
- [A33] Soukissian, T., Fytilis, D., & Gizari, N. (2016). Θαλάσσιο αιολικό και κυματικό δυναμικό σε περιοχές των ελληνικών θαλασσών από επιτόπιες μετρήσεις.
- [A34] Περιοχές κυματικής ενέργειας για παραγωγή ηλεκτρισμού και η χωροθέτηση τους στο Αιγαίο Εμμανουήλ Κ. Οικονόμου
- [A35] Soukissian, T., Gizari, N., & Chatzinaki, M. (2011). Wave potential of the Greek seas. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, 143, 203-213.
- [A36] Gunn, K., & Stock-Williams, C. (2012). Quantifying the global wave power resource. *Renewable Energy*, 44, 296-304.
- [A37] Aquaret, "Κύματα -Ευρωπαϊκός Χάρτης Πόρων", <http://www.aquaret.com/>, (2012).
- [A38] Δεληκαράογλου Δ., Δεληκαράογλου Σ., "Χαρτογράφηση του ελληνικού θαλάσσιου χώρου στα πλαίσια ενός σχεδίου δράσης με αντικείμενο την ολοκληρωμένη θαλάσσια πολιτική - Η συνεισφορά των αλτιμετρικών γεωδαιτικών δορυφόρων", 11ο Εθνικό Συνέδριο Χαρτογραφίας (XEE 2010), Ναύπλιο - Άργος, Δεκ., σ. 495-518, (2010).
- [A39] GENI - Global Energy Network Institute, "Ocean Energy in Europe", <http://www.geni.org/globalenergy/library/renewable-energy-resources/world/europe/ocean-europe/index.shtml> (2017).
- [A40] Thorpe, T. W. (1999). A brief review of wave energy. London: Harwell Laboratory, Energy Technology Support Unit.

- [A41] Thorpe, T. (2004). Wave energy. In 2004 Survey of Energy Resources (pp. 401-417). Elsevier Science.
- [A42] Drew, B., Plummer, A. R., & Sahinkaya, M. N. (2009). A review of wave energy converter technology.
- [A43] GENI - Global Energy Network Institute, "Ocean Energy in Europe", <http://www.geni.org/globalenergy/library/renewable-energy-resources/world/europe/ocean-europe/index.shtml> (2017).
- [A44] Soukissian, T. H., & Chronis, G. (2000). Poseidon: A marine environmental monitoring, forecasting and information system for the Greek seas. *Mediterranean Marine Science*, 1(1), 71-78.
- [A45] Xiros, N. I., & Dhanak, M. R. (2016). Ocean Wave Energy Conversion Concepts. In *Springer Handbook of Ocean Engineering* (pp. 1117-1146). Springer, Cham.
- [A46] Σουκισιάν, Τ., Χατζηνάκη, Μ., Κορρές, Γ., Παπαδόπουλος, Α., Κάλλος, Γ., Αναδρανιστάκης, Ε., "2007: Άτλας Ανέμου και Κύματος των Ελληνικών Θαλασσών", Εκδ. Ελληνικό Κέντρο Θαλασσιών Ερευνών, 300 σελ. (2007).
- [A47] Soukissian, T. H., Prospathopoulos, A. M., & Diamanti, C. (2002). Wind and wave data analysis for the Aegean Sea-preliminary results. *The Global atmosphere and ocean system*, 8(2-3), 163-189.
- [A48] Μπαλόπουλος Ε., Σουκισσιάν Τ., (2008). "Ινστιτούτο Ωκεανογραφίας του Ελληνικού Κέντρου Θαλάσσιων Ερευνών", Τεχνικά Χρονικά, Σεπτ.-Οκτωβ.
- [A49] Soukissian, T. H., Chronis, G. T., & Nittis, K. (1999). POSEIDON: OPERATIONAL MONITORING SYSTEM FOR GREEK SEAS-Dr Takvor H Soukissian, Dr Georges Th Chronis, and Dr Konstantinos Nittis (National Centra for Marine Research, Athens) describe the. *Sea Technology*, 40(7), 31-38.
- [A50] Chronis, G. T., Poulos, S., & Soukissian, T. H. (1998). POSEIDON: marine environmental, monitoring, forecasting and information system for Greek Waters. In *IEEE Oceanic Engineering Society. OCEANS'98. Conference Proceedings* (Cat. No. 98CH36259) (Vol. 3, pp. 1529-1530). IEEE.
- [A51] Χριστόπουλος, Σ., Σολομωνίδης, Χ., Christopoulos, S., & Solomonidis, C. (2016). Εκτίμηση κυματικών παραμέτρων με τη χρήση αριθμητικών μοντέλων και μετρήσεων πεδίου.