



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΤΜΗΜΑ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΔΠΜΣ : ΝΑΥΤΙΚΗ ΚΑΙ ΘΑΛΑΣΣΙΑ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΚΥΜΑΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ
ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΕ ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΤΗΣ ΜΕΣΟΓΕΙΟΥ
ΘΑΛΑΣΣΗΣ**

ΤΣΑΟΥΣΗ ΑΝΑΣΤΑΣΙΑ

ΑΜ 08120831

Επιβλέπων Καθηγητής

Σουκισιάν Τακβόρ, Ερευνητής ΕΛ.ΚΕ.Θ.Ε

Αθήνα, Φεβρουάριος 2023

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Περιεχόμενα

<i>ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ</i>	1
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ	4
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ.....	7
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	8
2. ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΗΣ ΚΥΜΑΤΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	9
3. ΚΥΜΑΤΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΚΑΙ ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΟΥ ΚΥΜΑΤΙΚΟΥ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ	10
<u>3.1. Κυματική Ενέργεια.....</u>	10
<u>3.2. Εκτίμηση Κυματικού Δυναμικού.....</u>	10
4. ΣΥΣΚΕΥΕΣ ΑΠΟΣΠΑΣΗΣ ΚΥΜΑΤΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	14
<u>4.1. Ταξινόμηση Κυματικών Συσκευών.....</u>	14
4.1.1. Τοποθεσία Εγκατάστασης.....	14
4.1.2. Αρχές Λειτουργίας.....	14
<u>4.2. Παραδείγματα Συσκευών Κυματικής Ενέργειας.....</u>	22
<u>Pelamis</u>	22
<u>PowerBuoy</u>	23
<u>WaveRoller</u>	24
<u>REWEC3</u>	25
<u>WaveDragon</u>	26
<u>Ceto</u>	28
<u>Penguin</u>	30
<u>Anaconda</u>	31
4. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ	32
5. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΚΑΙ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΘΗΚΑΝ	33
6. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΥΜΑΤΙΚΟΥ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΚΑΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΥΜΑΤΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΤΗ ΜΕΣΟΓΕΙΟ	35
<u>6.1. Αρχική Εκτίμηση Κυματικού Δυναμικού με χρήση Δεδομένων ERA 5</u>	35
<u>6.2. Εκτίμηση Κυματικού Δυναμικού Επιλεγμένων Περιοχών και Εύρεση Βέλτιστου Σημείου Τοποθέτησης.....</u>	37
<u>Ajaccio</u>	38
<u>Alghero</u>	44
<u>Annaba</u>	50

Benghazi.....	56
Κάσος.....	62
Hyères.....	68
Manzara del Vallo.....	74
Menorca.....	80
6.3. Τοποθέτηση των Κυματικών Μηχανών και αποτελέσματα απόδοσης.....	86
7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	92
8. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	94

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1 Κυματική Ενέργεια (Πηγή: Ντάβαλης Γεώργιος, 2016)	10
Εικόνα 2 Διάταξη των Μορίων του Νερού και Πολλαπλασιασμός Κυμάτων (Πηγή: Essentials of Oceanography 10th ed. - A. Trujillo, H. Thurman)	11
Εικόνα 3 Κατηγορίες Κυματικών Συσκευών με Βάση την Αρχή Λειτουργίας τους (Πηγή: Straume I (2010))	14
Εικόνα 4 Λειτουργία Εξασθενητή (Πηγή: www.aquaret.com).....	15
Εικόνα 5 Λειτουργία Σημειακού Απορροφητή (Πηγή: www.aquaret.com)	16
Εικόνα 6 Κίνηση των μορίων του νερού σε βαθιά και ρηγά νερά	17
Εικόνα 7 Λειτουργία Ταλαντευόμενου Μετατροπέα Νερού ((Πηγή: www.aquaret.com)	17
Εικόνα 8 Λειτουργία Μετατροπέα Ταλαντευόμενης Στήλης Νερού (Πηγή: www.aquaret.com)	18
Εικόνα 9 Λειτουργία Συσκευής Υπερχείλισης (Πηγή: www.aquaret.com).....	19
Εικόνα 10 Διαφορά Πίεσης Ανάμεσα στις Κορυφές και Κοιλιάδες του Κύματος (Πηγή: www.aquaret.com)	20
Εικόνα 11 Λειτουργία Συσκευής Διαφορικής Πίεσης (Πηγή: www.aquaret.com)	20
Εικόνα 12 Λειτουργία Συσκευής Περιστρεφόμενης Μάζας (Πηγή: www.aquaret.com)	21
Εικόνα 13 Λειτουργία Συσκευής Κυματικής Διόγκωσης (Πηγή: www.aquaret.com).....	21
Εικόνα 14 Κυματική Μηχανή Pelamis (Πηγή: EMEC: European Marine Energy Centre).....	22
Εικόνα 15 Κίνηση Pelamis ανάλογα τον κυματισμό (Πηγή: EMEC: European Marine Energy Centre)	22
Εικόνα 16 Κυματική Μηχανή PowerBuoy (Πηγή: Ocean Power Technologies)	23
Εικόνα 17 Συνολική δομή (Αριστερά), Μηχανισμός Μετατροπής (Δεξιά) (Πηγή: Ocean Power Technologies)	23
Εικόνα 18 Κυματική Μηχανή WaveRoller (Πηγή: AW-Energy).....	24
Εικόνα 19 Μορφή τροχιάς των μορίων του νερού ανάλογα με το βάθος (Πηγή: AW-Energy)	24
Εικόνα 20 Κυματική Μηχανή REWEC3 (Πηγή: Wavenergy.it)	25
Εικόνα 21 Τρόπος λειτουργίας REWEC3 (Πηγή: Wavenergy.it).....	25
Εικόνα 22 Κυματική Μηχανή WaveDragon (Πηγή: WaveDragon Technology)	26
Εικόνα 23 Τρόπος λειτουργίας WaveDragon (Τομή) (Πηγή: SCIENCEphotoLIBRARY).....	26
Εικόνα 24 Τρόπος λειτουργίας WaveDragon (Πηγή: SCIENCEphotoLIBRARY)	27
Εικόνα 25 Κυματική Μηχανή Ceto (Πηγή: Carnegie Clean Energy).....	28
Εικόνα 26 Διάταξη Ceto (Πηγή: Carnegie Clean Energy)	28
Εικόνα 27 Μοντέλα Ceto (Πηγή: Carnegie Clean Energy).....	29
Εικόνα 28 Κυματική Μηχανή Penguin (Πηγή: Wello)	30
Εικόνα 29 Διάταξη λειτουργίας Penguin (Πηγή: Wello)	30
Εικόνα 30 Κυματική Μηχανή Anaconda (Πηγή: Checkmate Seaenergy).....	31
Εικόνα 31 Τρόπος λειτουργίας Anaconda (Πηγή: Farrok, O., et al, Sustainability 2020)	31
Εικόνα 32 Μέσο ετήσιο κυματικό δυναμικό από δεδομένα ERA 5.....	35
Εικόνα 33 Μέσο εποχιακό κυματικό δυναμικό από δεδομένα ERA 5.....	35
Εικόνα 34 Επιλεγμένα σημεία ενδιαφέροντος	36
Εικόνα 35 Ajaccio	38
Εικόνα 36 Ajaccio: Μέσο Μηνιαίο Κυματικό Δυναμικό.....	38
Εικόνα 37 Ajaccio: Μέσο Εποχιακό Κυματικό Δυναμικό	39
Εικόνα 38 Ajaccio: Μέσο Ετήσιο Κυματικό Δυναμικό & Επιλογή Σημείου Τοποθέτησης Κυματικών Μηχανών	39

Εικόνα 39 Ajaccio: Εποχιακά Ροδογράμματα Σημαντικού Ύψους Κύματος	40
Εικόνα 40 Ajaccio: Εποχιακά Ροδογράμματα Ενεργειακής Περιόδου.....	41
Εικόνα 41 Ajaccio: Ετήσια Ροδογράμματα Σημαντικού Ύψους Κύματος, Ενεργειακής Περιόδου και Κυματικού Δυναμικού.....	41
Εικόνα 42 Ajaccio: Εποχιακοί Πίνακες Κατανομής Συχνότητας Εμφάνισης	42
Εικόνα 43 Ajaccio: Ετήσιος Πίνακας Κατανομής Συχνότητας Εμφάνισης	42
Εικόνα 44 Alghero	44
Εικόνα 45 Alghero: Μέσο Μηνιαίο Κυματικό Δυναμικό	44
Εικόνα 46 Alghero: Μέσο Εποχιακό Κυματικό Δυναμικό	45
Εικόνα 47 Alghero: Μέσο Ετήσιο Κυματικό Δυναμικό	45
Εικόνα 48 Alghero: Εποχιακά Ροδογράμματα Σημαντικού Ύψους Κύματος.....	46
Εικόνα 49 Alghero: Εποχιακά Ροδογράμματα Ενεργειακής Περιόδου	47
Εικόνα 50 Alghero:Ετήσια Ροδογράμματα Σημαντικού Ύψους Κύματος, Ενεργειακής Περιόδου και Κυματικού Δυναμικού.....	47
Εικόνα 51 Alghero: Εποχιακοί Πίνακες Κατανομής Συχνότητας Εμφάνισης.....	48
Εικόνα 52 Alghero: Ετήσιος Πίνακας Κατανομής Συχνότητας Εμφάνισης	48
Εικόνα 53 Annaba.....	50
Εικόνα 54 Annaba: Μέσο Μηνιαίο Κυματικό Δυναμικό.....	50
Εικόνα 55 Annaba: Μέσο Εποχιακό Κυματικό Δυναμικό	51
Εικόνα 56 Annaba: Μέσο Ετήσιο Κυματικό Δυναμικό.....	51
Εικόνα 57 Annaba: Εποχιακά Ροδογράμματα Σημαντικού Ύψους Κύματος	52
Εικόνα 58 Annaba: Εποχιακά Ροδογράμματα Ενεργειακής Περιόδου.....	53
Εικόνα 59 Annaba:Ετήσια Ροδογράμματα Σημαντικού Ύψους Κύματος, Ενεργειακής Περιόδου και Κυματικού Δυναμικού.....	53
Εικόνα 60 Annaba: Εποχιακοί Πίνακες Κατανομής Συχνότητας Εμφάνισης	54
Εικόνα 61 Annaba: Ετήσιος Πίνακας Κατανομής Συχνότητας Εμφάνισης.....	54
Εικόνα 62 Benghazi	56
Εικόνα 63 Benghazi: Μέσο Μηνιαίο Κυματικό Δυναμικό	56
Εικόνα 64 Benghazi: Μέσο Εποχιακό Κυματικό Δυναμικό	57
Εικόνα 65 Benghazi: Μέσο Ετήσιο Κυματικό Δυναμικό	57
Εικόνα 66 Benghazi: Εποχιακά Ροδογράμματα Σημαντικού Ύψους Κύματος.....	58
Εικόνα 67 Benghazi: Εποχιακά Ροδογράμματα Ενεργειακής Περιόδου	59
Εικόνα 68 Benghazi: Ετήσια Ροδογράμματα Σημαντικού Ύψους Κύματος, Ενεργειακής Περιόδου και Κυματικού Δυναμικού.....	59
Εικόνα 69 Benghazi: Εποχιακοί Πίνακες Κατανομής Συχνότητας Εμφάνισης.....	60
Εικόνα 70 Benghazi: Ετήσιος Πίνακας Κατανομής Συχνότητας Εμφάνισης	60
Εικόνα 71 Κάσος.....	62
Εικόνα 72 Κάσος: Μέσο Μηνιαίο Κυματικό Δυναμικό.....	62
Εικόνα 73 Κάσος: Μέσο Εποχιακό Κυματικό Δυναμικό.....	63
Εικόνα 74 Κάσος: Μέσο Ετήσιο Κυματικό Δυναμικό.....	63
Εικόνα 75 Κάσος: Εποχιακά Ροδογράμματα Σημαντικού Ύψους Κύματος	64
Εικόνα 76 Κάσος: Εποχιακά Ροδογράμματα Ενεργειακής Περιόδου.....	65
Εικόνα 77 Κάσος: Ετήσια Ροδογράμματα Σημαντικού Ύψους Κύματος, Ενεργειακής Περιόδου και Κυματικού Δυναμικού.....	65
Εικόνα 78 Κάσος: Εποχιακοί Πίνακες Κατανομής Συχνότητας Εμφάνισης.....	66

Εικόνα 79 Κάσος: Ετήσιος Πίνακας Κατανομής Συχνότητας Εμφάνισης.....	66
Εικόνα 80 Hyères.....	68
Εικόνα 81 Hyères: Μέσο Μηνιαίο Κυματικό Δυναμικό.....	68
Εικόνα 82 Hyères: Μέσο Εποχιακό Κυματικό Δυναμικό.....	69
Εικόνα 83 Hyères: Μέσο Ετήσιο Κυματικό Δυναμικό.....	69
Εικόνα 84 Hyères: Εποχιακά Ροδογράμματα Σημαντικού Ύψους Κύματος	70
Εικόνα 85 Hyères:: Εποχιακά Ροδογράμματα Ενεργειακής Περιόδου.....	71
Εικόνα 86 Hyères: Ετήσια Ροδογράμματα Σημαντικού Ύψους Κύματος, Ενεργειακής Περιόδου και Κυματικού Δυναμικού.....	71
Εικόνα 87 Hyères: Εποχιακοί Πίνακες Κατανομής Συχνότητας Εμφάνισης.....	72
Εικόνα 88 Hyères: Ετήσιος Πίνακας Κατανομής Συχνότητας Εμφάνισης.....	72
Εικόνα 89 Manzara del Vallo.....	74
Εικόνα 90 Manzara del Vallo: Μέσο Μηνιαίο Κυματικό Δυναμικό.....	74
Εικόνα 91 Manzara del Vallo: Μέσο Εποχιακό Κυματικό Δυναμικό.....	75
Εικόνα 92 Manzara del Vallo: Μέσο Ετήσιο Κυματικό Δυναμικό	75
Εικόνα 93 Manzara del Vallo: Εποχιακά Ροδογράμματα Σημαντικού Ύψους Κύματος.....	76
Εικόνα 94 Manzara del Vallo: Εποχιακά Ροδογράμματα Ενεργειακής Περιόδου	77
Εικόνα 95 Manzara del Vallo: Ετήσια Ροδογράμματα Σημαντικού Ύψους Κύματος, Ενεργειακής Περιόδου και Κυματικού Δυναμικού.....	77
Εικόνα 96 Manzara del Vallo: Εποχιακοί Πίνακες Κατανομής Συχνότητας Εμφάνισης.....	78
Εικόνα 97 Manzara del Vallo: Ετήσιος Πίνακας Κατανομής Συχνότητας Εμφάνισης.....	78
Εικόνα 98 Menorca	80
Εικόνα 99 Menorca: Μέσο Μηνιαίο Κυματικό Δυναμικό.....	80
Εικόνα 100 Menorca: Μέσο Εποχιακό Κυματικό Δυναμικό	81
Εικόνα 101 Menorca: Μέσο Ετήσιο Κυματικό Δυναμικό	81
Εικόνα 102 Menorca: Εποχιακά Ροδογράμματα Σημαντικού Ύψους Κύματος.....	82
Εικόνα 103 Menorca: Εποχιακά Ροδογράμματα Ενεργειακής Περιόδου.....	83
Εικόνα 104 Menorca: Ετήσια Ροδογράμματα Σημαντικού Ύψους Κύματος, Ενεργειακής Περιόδου και Κυματικού Δυναμικού.....	83
Εικόνα 105 Menorca: Εποχιακοί Πίνακες Κατανομής Συχνότητας Εμφάνισης	84
Εικόνα 106 Menorca: Ετήσιος Πίνακας Κατανομής Συχνότητας Εμφάνισης	84
Εικόνα 107 Ενεργειακός Πίνακας Απόδοσης Pelamis.....	86
Εικόνα 108 Ενεργειακός Πίνακας Απόδοσης WaveDragon	86
Εικόνα 109 Ενεργειακός Πίνακας Απόδοσης AquaBuoy.....	87

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1 Ajaccio: Χαρακτηριστικές τιμές του ύψους και της περιόδου των κυμάτων	43
Πίνακας 2 Alghero: Χαρακτηριστικές τιμές του ύψους και της περιόδου των κυμάτων	49
Πίνακας 3 Annaba: Χαρακτηριστικές τιμές του ύψους και της περιόδου των κυμάτων	55
Πίνακας 4 Benghazi: Χαρακτηριστικές τιμές του ύψους και της περιόδου των κυμάτων	61
Πίνακας 5 Κάσος: Χαρακτηριστικές τιμές του ύψους και της περιόδου των κυμάτων	67
Πίνακας 6 Hyères: Χαρακτηριστικές τιμές του ύψους και της περιόδου των κυμάτων	73
Πίνακας 7 Manzara del Vallo: Χαρακτηριστικές τιμές του ύψους και της περιόδου των κυμάτων	79
Πίνακας 8 Menorca: Χαρακτηριστικές τιμές του ύψους και της περιόδου των κυμάτων	85
Πίνακας 9 Συγκεντρωτικός Πίνακας Συντεταγμένων και Μέσης Ετήσιας Κυματικής Ισχύς.....	85
Πίνακας 10 Μέση Εποχιακή και Ετήσια Κυματική Ενέργεια ανά Περιοχή.....	88
Πίνακας 11 Ώρες και Ποσοστό Λειτουργίας Κυματικών Μηχανών ανά Περιοχή για την 5ετία	90
Πίνακας 12 Κυματική Ενέργεια (5ετίας), Ενέργεια σε Ονομαστική Λειτουργία Μηχανής (5ετίας) και Capacity Factor ανά Περιοχή	91

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η αύξηση του πληθυσμού της γης, καθώς και η συνεχής εξέλιξη του βιοτικού επιπέδου έχουν συμβάλει στην ραγδαία κατανάλωση ενέργειας για την ικανοποίηση των ανθρωπίνων αναγκών. Είναι πλέον σαφές ότι για την αντιμετώπιση της αλόγιστης εκμετάλλευσης των μη ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, που οδηγούν σε σημαντικά περιβαλλοντικά προβλήματα, αναζητούνται νέες λύσεις που δε ρυπαίνουν το περιβάλλον. Έτσι έχει στραφεί η αναζήτηση αυτή σε νέους πόρους και τεχνολογίες με αναδυόμενη τη βιομηχανία των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ). Η τεχνολογία των ΑΠΕ αποτελεί μία τεχνολογικά εφικτή λύση καθώς μετατρέπει ήδη υπάρχοντα φυσικά φαινόμενα σε χρήσιμες και αξιοποιήσιμες μορφές ενέργειας. Οι πιο συνήθεις και διαδεδομένες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας είναι η αιολική, η ηλιακή και η γεωθερμική. Ωστόσο γίνεται πλέον προσπάθεια να αξιοποιηθούν και άλλες εναλλακτικές πηγές ενέργειας όπως η ενέργεια των κυμάτων της θάλασσας. Τα κύματα αποτελούν ένα σημαντικό και ανεξάντλητο πόρο ενέργειας και μάλιστα τον μεγαλύτερο μεταξύ των ΑΠΕ. Οι ωκεανοί χαρακτηρίζονται από μεγάλη ενεργειακή πυκνότητα και η εκμετάλλευση μόλις λιγότερο του 1% του κυματικού δυναμικού θα υπερκάλυπτε την παγκόσμια ενεργειακή ζήτηση. Τα τελευταία χρόνια σημειώνονται αξιόλογες τεχνικές λύσεις μετατροπής της ενέργειας των κυμάτων. Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η ανάλυση του κυματικού δυναμικού της Μεσογείου, για τον εντοπισμό βέλτιστων θέσεων, για την τοποθέτηση κυματικών μηχανών ενέργειας. Πιο συγκεκριμένα γίνεται μία πρώτη εκτίμηση του διαθέσιμου κυματικού δυναμικού της Μεσογείου και στη συνέχεια απομονώνονται ορισμένες περιοχές με μεγάλη ενεργειακή απόδοση για την περαιτέρω έρευνα προτεινόμενης θέσης εγκατάστασης. Στην αναζήτηση των θέσεων αυτών λαμβάνονται υπόψη και κάποιες επιπλέον παράμετροι όπως είναι το βάθος εγκατάστασης και η απόσταση από την ξηρά. Τέλος γίνεται η τοποθέτηση ήδη υπάρχοντων μηχανών για αποτύπωση της μέσης ετήσιας παραγόμενης ενέργειας καθεμίας από αυτές και προτείνεται η βέλτιστη μηχανή για κάθε περιοχή ενδιαφέροντος.

2. ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΗΣ ΚΥΜΑΤΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Η ιδέα της μετατροπής της ενέργειας των ωκεανών σε χρήσιμες μορφές ενέργειας δεν είναι καινούρια. Η δυνατότητα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από τη θάλασσα έχει αναγνωριστεί από πολλά χρόνια πριν. Το πρώτο δίπλωμα ευρεσιτεχνίας στην κατασκευή της συσκευής για μετατροπή της ενέργειας των κυμάτων εκδόθηκε το 1799 στο γάλλο μηχανικό Pierre Simon Girard και στο γιο του, αλλά η συσκευή δεν κατασκευάστηκε ποτέ. Πολλές ακόμα ευρεσιτεχνίες και πλήθος τεχνολογιών επινοήθηκαν και λειτούργησαν σε μικρή κλίμακα έως τα μέσα του περασμένου αιώνα. Συγκεκριμένα από το 1855 έως το 1973 μόνο το Ηνωμένο Βασίλειο είχε καταθέσει 340 ευρεσιτεχνίες χωρίς όμως αξιόλογα αποτελέσματα. Ένα από τα πρώτα και πιο κατατοπιστικά έγγραφα σχετικά με την ενέργεια των κυμάτων παρουσιάστηκε σε συνέδριο της Αμερικανικής Εταιρείας Μηχανολόγων Μηχανικών στο Σαν Φρανσίσκο το 1892 από τον AW Stahl. Άλλες προσπάθειες για την εκμετάλλευση της ενέργειας των κυμάτων έγινε το 19^ο αιώνα στην Καλιφόρνια στο Σαν Φρανσίσκο όταν κατασκευάστηκε μία μηχανή από τον Αμερικάνο εφευρέτη Terence Duffy κάτω από μία σκεδία. Στις αρχές του 20^{ου} αιώνα ο γάλλος μηχανικός Paul Grasset, συνέλαβε μία νέα διαδικασία μετατροπής της κυματικής ενέργειας που την ονόμασε *bélier-siphon barométrique*, και τόλμησε την κατασκευή ενός πρότυπου στην ακτή, που δυστυχώς λόγω του Β' Παγκόσμιου Πολέμου αποτράπηκε από την ολοκλήρωση του έργου του. Το 1973 μετά την δραματική αύξηση του πετρελαίου και την πετρελαϊκή κρίση άρχισε να επανεξετάζεται το ενδεχόμενο εκμετάλλευσης της κυματικής ενέργειας. Πολλές χώρες ξεκίνησαν εντατικές έρευνες για την ανάπτυξη τεχνολογιών με πρωτοπόρους την Δυτική Ευρώπη και την Ιαπωνία. Παρά την εντυπωσιακή πρόοδο των τεχνολογιών και επιτευγμάτων που σημειώθηκαν απέτυχαν οι εγκαταστάσεις παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας καθώς δεν ήταν οικονομικά συμφέρουσες. Έτσι από τα μέσα της δεκαετίας του '90 και μετά επήλθε ξανά η αναγέννηση στον τομέα της κυματικής ενέργειας με την τεχνολογία να έχει προωθηθεί σε σημείο όπου η αξιόπιστη και φτηνή ηλεκτρική ενέργεια από τους ωκεανούς υλοποιείται με την κατασκευή αρκετών εγκαταστάσεων ανά τον κόσμο.

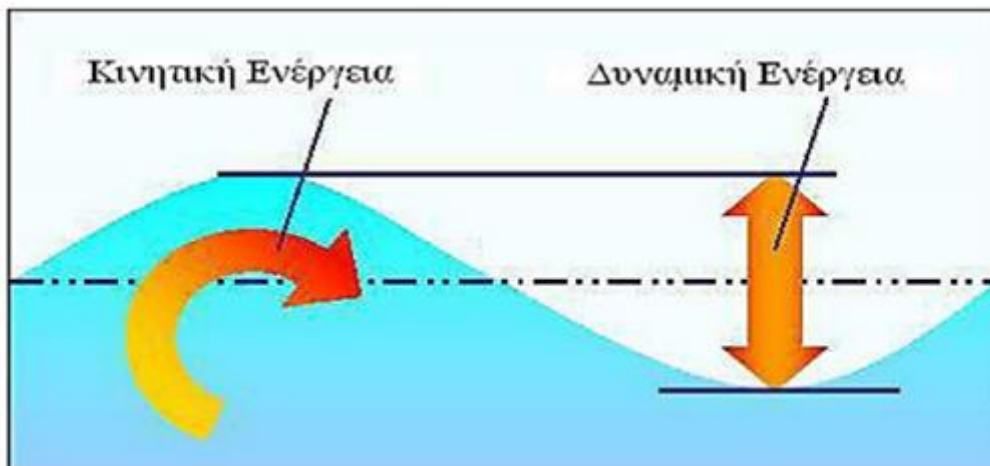
3. ΚΥΜΑΤΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΚΑΙ ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΟΥ ΚΥΜΑΤΙΚΟΥ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ

3.1. Κυματική Ενέργεια

Η διαταραχή της επιφάνειας της θάλασσας και η γέννηση των κυματισμών είναι κυρίως ανεμογενούς προέλευσης. Η κυματική ενέργεια αποτελείται από την δυναμική και κινητική ενέργεια των κυμάτων. Το μέσο διάδοσης της ενέργειας από ένα σημείο σε ένα άλλο είναι οι κυματισμοί που προκαλούνται από μία δύναμη διέγερσης (άνεμος) και εξακολουθούν να παραμένουν λόγω μιας δύναμης επαναφοράς (βαρύτητα). Τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα για την εγκατάσταση κυματικών μηχανών ενέργειας είναι ότι η κυματική ενέργεια έχει μεγάλη διάρκεια ανάπτυξης και συντήρησης των κυματισμών συγκριτικά με την μειωμένη σε διάρκεια δύναμη διέγερσης, αλλά και μικρές περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Στα μειονεκτήματα βρίσκεται η χαμηλή προβλεψιμότητα, που σε σχέση με την αιολική είναι σε μεταίχμιο στάδιο αφού οι κυματισμοί εξαρτώνται άμεσα από τον ανεμογενή παράγοντα, καθώς και η ανωριμότητα της τεχνολογίας, για την ανταπόκριση της συσκευής στο εύρος των συχνοτήτων διέγερσης και το υψηλό κόστος.

3.2. Εκτίμηση Κυματικού Δυναμικού

Μία αρχική θεωρητική εκτίμηση της κυματικής ενέργειας είναι να θεωρηθεί η θάλασσα ότι αποτελείται από απλούς αρμονικούς κυματισμούς. Η μέση κυματική ενέργεια είναι το άθροισμα της δυναμικής ενέργειας των μορίων του νερού που οφείλεται στην κατακόρυφη ταλάντωσή τους και της κινητικής ενέργειας που οφείλεται στην περιστροφική κίνηση των μορίων του νερού.



Εικόνα 1 Κυματική Ενέργεια
(Πηγή: Ντάβαλης Γεώργιος, 2016)

Η δυναμική ενέργεια των κυμάτων δίνεται από την σχέση:

$$\bar{E}_\Delta = \rho g \frac{d^2}{2} + \rho g \frac{H^2}{16}$$

Και $\bar{E}_{\Delta κ} = \rho g \frac{H^2}{16}$, είναι η "καθαρή" δυναμική ενέργεια.

Ενώ η κινητική ενέργεια δίνεται από την σχέση:

$$\overline{E_K} = \rho g \frac{H^2}{16}$$

Επομένως η συνολική ενέργεια των κυμάτων υπολογίζεται από την σχέση:

$$\overline{E} = \overline{E_A} + \overline{E_K} = \rho g \frac{H^2}{8} \text{ [J/m}^2 \text{]}$$

όπου:

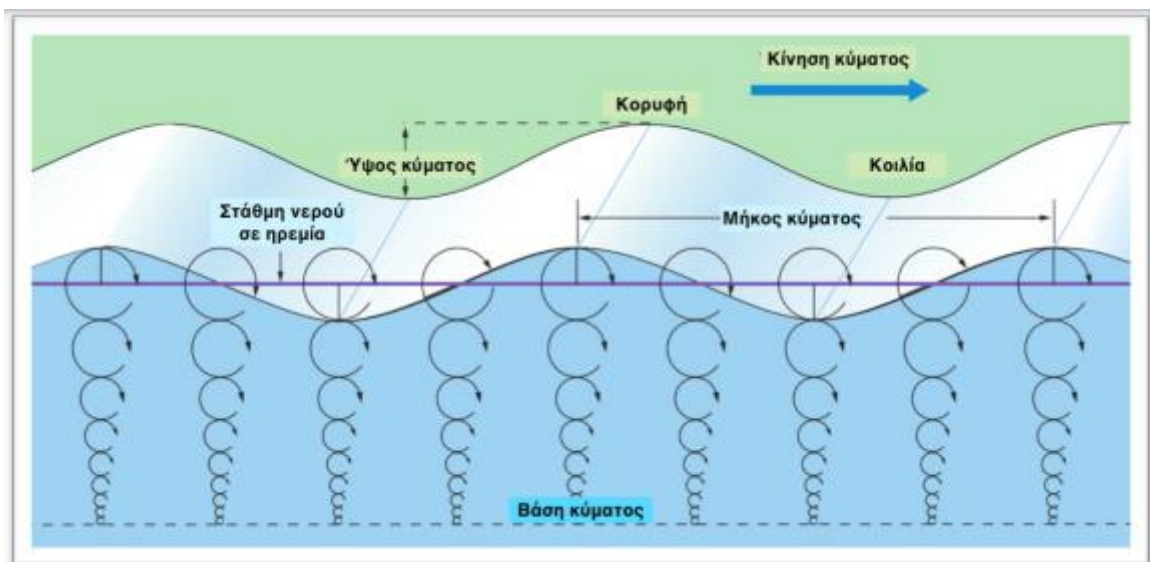
ρ : η πυκνότητα του νερού

g : η επιτάχυνση της βαρύτητας

H : το ύψος του κύματος

A : το πλάτος του κύματος $A = H/2$.

Ο συνδυασμός των δυνάμεων λόγω βαρύτητας, της έντασης της επιφάνειας της θάλασσας και της έντασης του ανέμου είναι, όπως προαναφέρθηκε, οι κύριοι παράγοντες προέλευσης των κυμάτων της θάλασσας. Το μέγεθος των κυμάτων καθορίζεται από την ταχύτητα και την φορά του ανέμου και από το βάθος και τη μορφολογία του βυθού. Για αποστάσεις μακριά από τη δύναμη διέγερσης και σε μεγάλα βάθη νερού, τα κύματα της θάλασσας έχουν ένα ημιτονοειδές σχήμα και το φαινόμενο ονομάζεται φούσκωμα. Τα σωματίδια του νερού που διεγείρονται από τον άνεμο έχουν σε κάθε θέση των ωκεανών κυκλική τροχιά με μεγαλύτερη διάμετρο στην επιφάνεια της θάλασσας και μειούμενη εκθετικά με το βάθος. Η σύζευξη αυτής της κυκλικής κίνησης είναι υπεύθυνη για το σχηματισμό ενός κύματος και του αντίστοιχου πολλαπλασιασμού του.



Εικόνα 2 Διάταξη των Μορίων του Νερού και Πολλαπλασιασμός Κυμάτων
(Πηγή: Essentials of Oceanography 10th ed. - A. Trujillo, H. Thurman)

Μήκος κύματος λ ονομάζεται η απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών κορυφών ή δύο διαδοχικών κοιλάδων. Το ύψος κύματος H είναι ανάλογο με την ένταση και τη διάρκεια του

ανέμου ενώ η περίοδος του κύματος T είναι ο χρόνος σε δευτερόλεπτα που απαιτείται για την πραγματοποίηση μίας πλήρους ταλάντωσης.

Η κυματική ισχύς συνήθως περιγράφεται ως την ενέργεια που μεταδίδεται ανά μήκος μετώπου του κύματος σε επίπεδο κάθετο στη διεύθυνση κίνησης του κύματος και είναι πολλαπλασιασμένη με μία ποσότητα c_g που αναφέρεται στην ταχύτητα ομάδας κύματος. Η σχέση που διατυπώνει την κυματική ισχύ είναι η εξής:

$$P_{\text{κύμα-μετώπου}} = c_g E = nc \frac{1}{8} \rho g H^2$$

Όπου

$$n = \frac{1}{2} \left[1 + \frac{2kd}{\sinh(2kd)} \right]$$

Και

$$c = \frac{\lambda}{T} = \frac{\omega}{k} = \sqrt{\frac{g}{k} \tanh(kd)}$$

d: το βάθος νερού

k: κυματαριθμός, $k=2\pi/\lambda$

ω : η κυκλική συχνότητα

Για μεγάλα βάθη όπου το d τείνει στο άπειρο, το n προσεγγίζει το $\frac{1}{2}$ και το $c = \sqrt{\frac{g}{k}}$, η σχέση της κυματικής ισχύς μετατρέπεται σε:

$$P_{\text{κύμα-μετώπου}} = nc \frac{1}{8} \rho g H^2 = \frac{1}{16} \rho g H^2 \sqrt{\frac{g}{k}} = \frac{1}{32\pi} \rho g^2 H^2 T$$

Ενώ για ρηγά νερά η σχέση μετατρέπεται σε:

$$P_{\text{κύμα-μετώπου}} = nc \frac{1}{8} \rho g H^2 = \frac{1}{8} \rho^3 \sqrt{g} \sqrt{d} H^2$$

Ωστόσο, η εκτίμηση του κυματικού δυναμικού σε πραγματικές καταστάσεις θάλασσας, είναι περιπλοκότερη. Μία ρεαλιστική κατάσταση θάλασσας δεν αποτελείται από απλούς αρμονικούς κυματισμούς και για αυτό χρειάζεται να συμπεριληφθεί ο παράγοντας της τυχαιότητας. Στην πραγματικότητα η θάλασσα αποτελείται από μία ομάδα κυμάτων με διαφορετικά χαρακτηριστικά (συχνότητες, μήκη κύματος, διευθύνσεις διάδοσης) και η περιγραφή της γίνεται μέσω μίας συνάρτησης κατανομής της φασματικής ενεργειακής πυκνότητας $S(f, \theta)$. Για πιο πρακτικούς λόγους συνηθίζεται να **χρησιμοποιούνται** μόνο ορισμένες φασματικές παράμετροι όπως: το σημαντικό ύψος κύματος H_{m0} ή H_s , η μέση ενεργειακή περίοδος T_e , η περίοδος κορυφής φάσματος T_p και η μέση κατεύθυνση κύματος. Η κυματική ισχύς στην περίπτωση αυτή δίνεται από τον τύπο:

$$P = \frac{\rho g^2}{64\pi} * H_{m0}^2 * T_s = \frac{\rho g^2}{64\pi} * H_{m0}^2 * T_e$$

Όπου $\frac{\rho g^2}{64\pi} \simeq 0,5 \frac{kW}{m^3s}$, πράγμα που μας δείχνει ότι η ενεργειακή ισχύς ενός ρεαλιστικού κύματος είναι περίπου η μισή από ένα αρμονικό κύμα.

Από την φασματική ανάλυση προκύπτει το σημαντικό ύψος κύματος

$$H_{m0}^2 = (4\sqrt{m_0})^2$$

η περίοδος κορυφής φάσματος

$$T_p = \frac{2\pi}{\omega_p}$$

με ω_p την κυκλική φασματική συχνότητα κορυφής,

και η ενεργειακή περίοδος

$$T_e = \frac{m_0}{m_{-1}}$$

Το σημαντικό ύψος κύματος και η ενεργειακή περίοδος ορίζονται σαν συναρτήσεις της φασματικής ροπής μηδενικής και αρνητικής πρώτης τάξης ($n=0,-1$):

$$m_n = \int_0^{2\pi} \int_0^\infty f^n * S(f, \theta) df d\theta$$

$$m_0 = \int_0^\infty f^0 * S(f) df$$

$$m_{-1} = \int_0^\infty f^{-1} * S(f) df$$

4. ΣΥΣΚΕΥΕΣ ΑΠΟΣΠΑΣΗΣ ΚΥΜΑΤΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

4.1. Ταξινόμηση Κυματικών Συσκευών

4.1.1. Τοποθεσία Εγκατάστασης

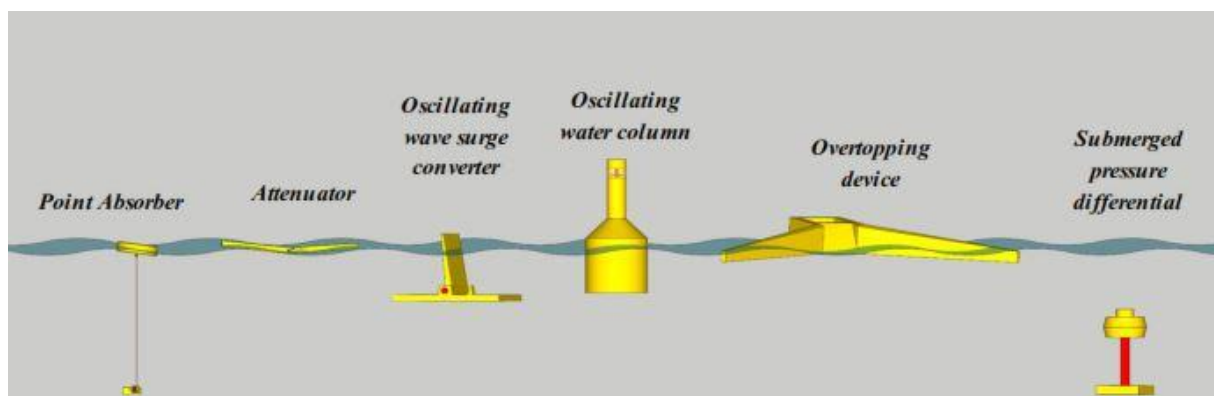
Η κατηγοριοποίηση και ταξινόμηση των κυματικών μηχανών μπορεί να γίνει με διάφορα κριτήρια.

Ως πρώτο κριτήριο διαχωρισμού των κυματικών μηχανών μπορεί να θεωρηθεί η τοποθεσία εγκατάστασης τους σε 3 κατηγορίες.

- **Επάκτιες συσκευές (Onshore):** Οι συσκευές αυτές εγκαθίστανται στις ακτογραμμές ή σε βάθη υδάτων έως 10m. Τα πλεονεκτήματα των συσκευών αυτών είναι η εύκολη συντήρηση και εγκατάσταση τους χωρίς αγκυροβολήσεις και η ευκολία στην μεταφορά της ενέργειας χωρίς υποθαλάσσια καλώδια. Τα μειονεκτήματα είναι η περιορισμένη κυματική ισχύ στις περιοχές με μικρό βάθος νερού.
- **Παράκτιες συσκευές (Coastal ή Nearshore):** Οι συσκευές αυτές εγκαθίστανται σε θάλασσες μέτριου βάθους από 20 έως 30m και συνήθως σε απόσταση έως 500 m από την ακτή. Πλεονέκτημα των συσκευών αυτών είναι ότι δέχονται κύματα με μεγαλύτερη ισχύ συγκριτικά με αυτή των επάκτιων συσκευών. Μειονέκτημα είναι η απαίτηση ενός γενικά ισόπεδου για εγκατάσταση πυθμένα από άμμο ή ιλύ για την τοποθέτηση καλωδίων μεταφοράς της ενέργειας.
- **Υπεράκτιες συσκευές (Offshore):** Οι υπεράκτιες συσκευές τοποθετούνται σε ανοιχτές θάλασσες με μεγάλα βάθη υδάτων από 40 μέτρα και πάνω. Πλεονεκτήματα είναι τα ισχυρά κυματικά επίπεδα και επομένως η μεγάλη απόδοση κυματικής ισχύς ενώ τα μειονεκτήματα είναι το σημαντικά υψηλό οικονομικό κόστος για την εγκατάσταση των μηχανών αυτών.

4.1.2. Αρχές Λειτουργίας

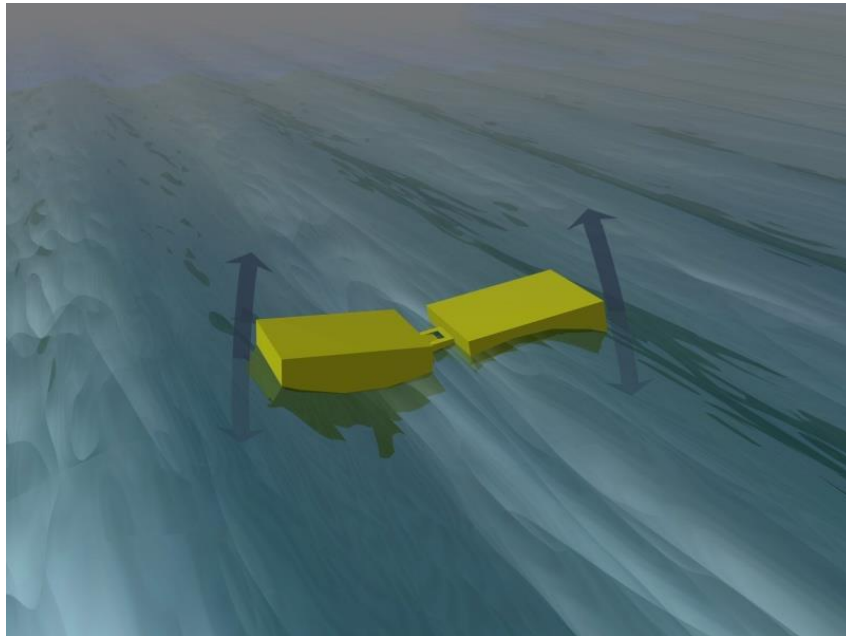
Μία άλλη μέθοδος κατηγοριοποίησης των συσκευών κυματικής ενέργειας, είναι η ταξινόμηση τους ανάλογα με τις αρχές λειτουργίας τους.



Εικόνα 3 Κατηγορίες Κυματικών Συσκευών με Βάση την Αρχή Λειτουργίας τους (Πηγή: Straume I (2010))

1. Εξασθενητές (Attenuators)

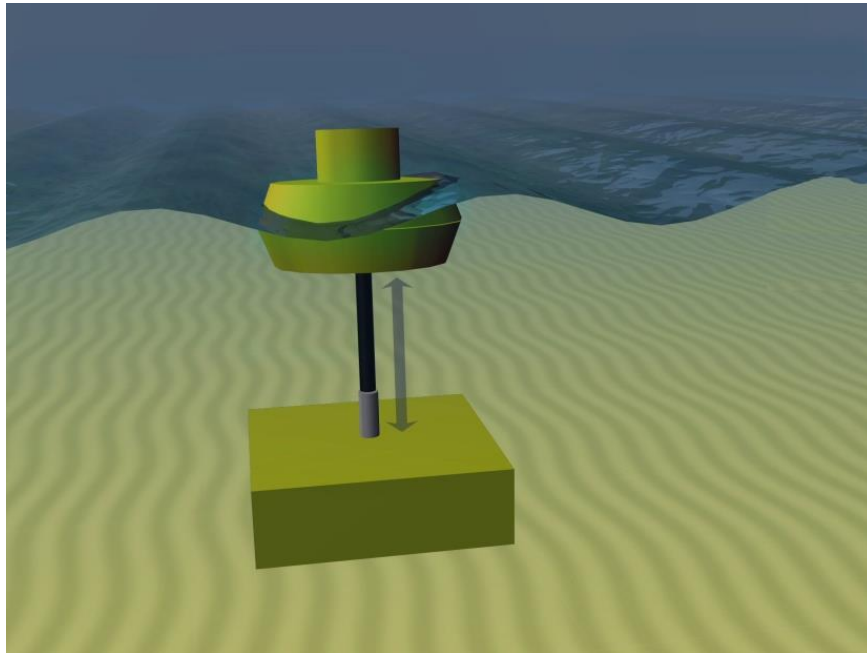
Εξασθενητές κυματισμών είναι μακρόστενες επιμήκης συσκευές που τοποθετούνται με την μεγαλύτερη πλευρά τους να είναι παράλληλα στην κατεύθυνση των κυμάτων. Είναι αρθρωτές συσκευές, συνήθως πλωτές ή βυθισμένες, και για να εκτελέσουν την επιθυμητή κίνηση πρέπει το μέτωπο του κύματος να διαδίδεται σε μία κατεύθυνση κάθετα πάνω στη συσκευή αυτή, χρησιμοποιώντας την ενέργεια του για την πρόκληση ταλάντωσης των γειτονικών τμημάτων της διάταξης της. Η συσκευή λόγω των αρθρώσεων δίνει την δυνατότητα των τμημάτων της να στρέφονται και να κάμπτονται κατά τη διέλευση των κυμάτων. Το σύστημα αυτό φέρει αντλίες στις αρθρώσεις που με την κίνηση τους συμπιέζουν υδραυλικό υγρό και δίνουν κίνηση σε υδραυλικούς κινητήρες. Σπουδαίο ρόλο παίζει η κυματική διεύθυνση και η στατιστική της κυματικής διεύθυνσης για την εγκατάσταση τέτοιου είδους συσκευών.



Εικόνα 4 Λειτουργία Εξασθενητή
(Πηγή: www.aquaret.com)

2. Σημειακοί απορροφητές (Point absorbers)

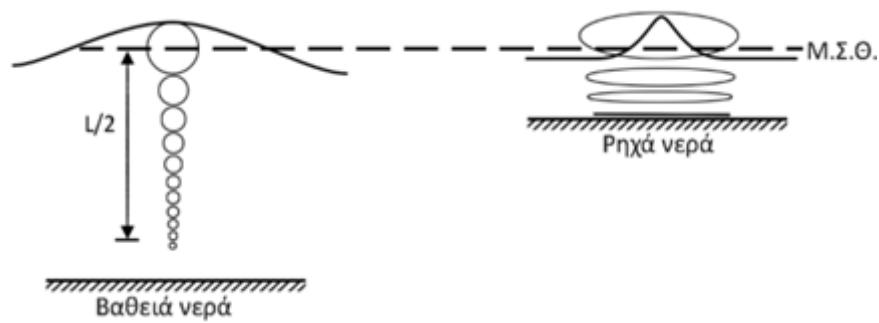
Οι σημειακοί απορροφητές σε αντίθεση με τους εξασθενητές εκμεταλλεύονται τα κύματα από όλες τις διευθύνσεις. Αποτελούνται από δύο μέρη, από τα οποία το ένα παραμένει σταθερό είτε με αγκυροβόληση είτε με έδραση λόγω του ίδιου του βάρους στον πυθμένα της θάλασσας. Το άλλο μέρος αποτελείται από ένα έμβολο που έχει την δυνατότητα να ανεβοκατεβαίνει και να ακολουθεί την ταλάντωση της ελεύθερης επιφάνειας. Το επάνω αυτό μέρος έχει μικρές διαστάσεις συγκριτικά με το μήκος των κυμάτων ώστε να απορροφά την ενέργεια κυμάτων οποιασδήποτε κατεύθυνσης και να μετατρέπει την παλινδρομική κίνηση της μάζας από τα διερχόμενα κύματα σε ηλεκτρική ενέργεια.



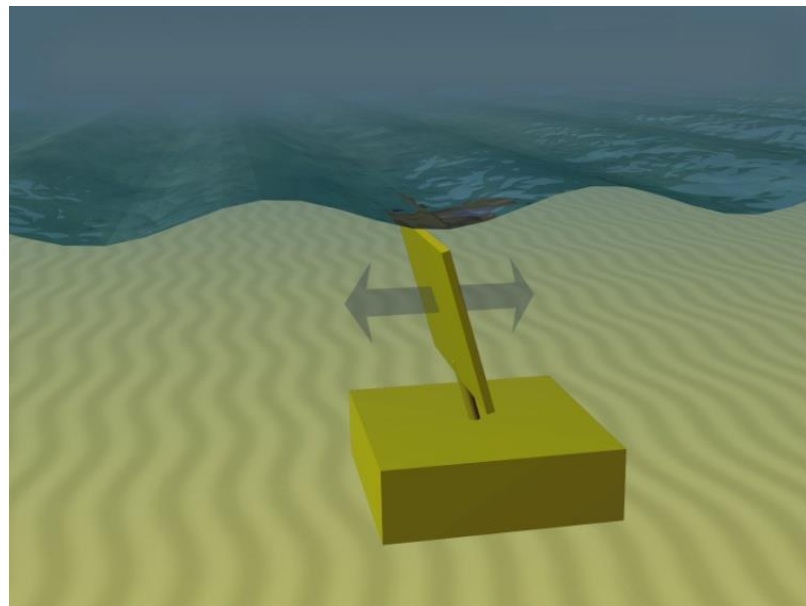
Εικόνα 5 Λειτουργία Σημειακού Απορροφητή
(Πηγή: www.aquaret.com)

3. Ταλαντευόμενοι Μετατροπείς Κύματος (Oscillating Wave Surge Converter “OWSC”)

Οι συσκευές οριζόντιας κυματικής παλινδρόμησης παράγουν ενέργεια βασιζόμενες στη κίνηση των σωματιδίων του νερού, όπου κατά το φαινόμενο της ρήγωσης οι τροχιές τους έχουν ελλειπτική μορφή. Συνήθως αποτελούνται από ένα βραχίονα που ταλαντώνεται σαν ανάστροφο εκκρεμές κατά την κίνηση των κυμάτων. Στοιχίζονται κάθετα στα επερχόμενα κύματα και είναι στην πλειοψηφία τους πακτωμένες στον πυθμένα.



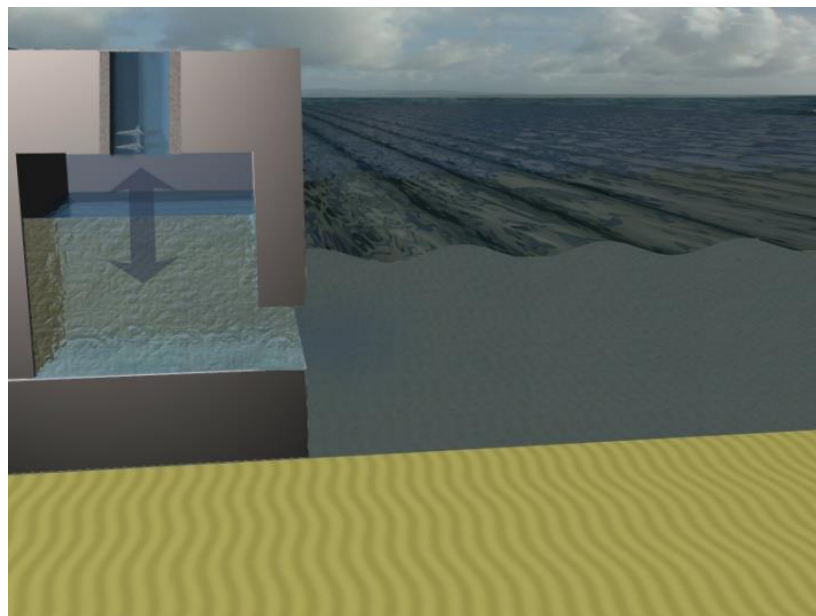
Εικόνα 6 Κίνηση των μορίων του νερού σε βαθειά και ρηχά νερά



Εικόνα 7 Λειτουργία Ταλαντευόμενου Μετατροπέα Νερού
(Πηγή: www.aquaret.com)

4. Μετατροπείς Ταλαντευόμενης Στήλης Νερού (Oscillating Water Column, OWC)

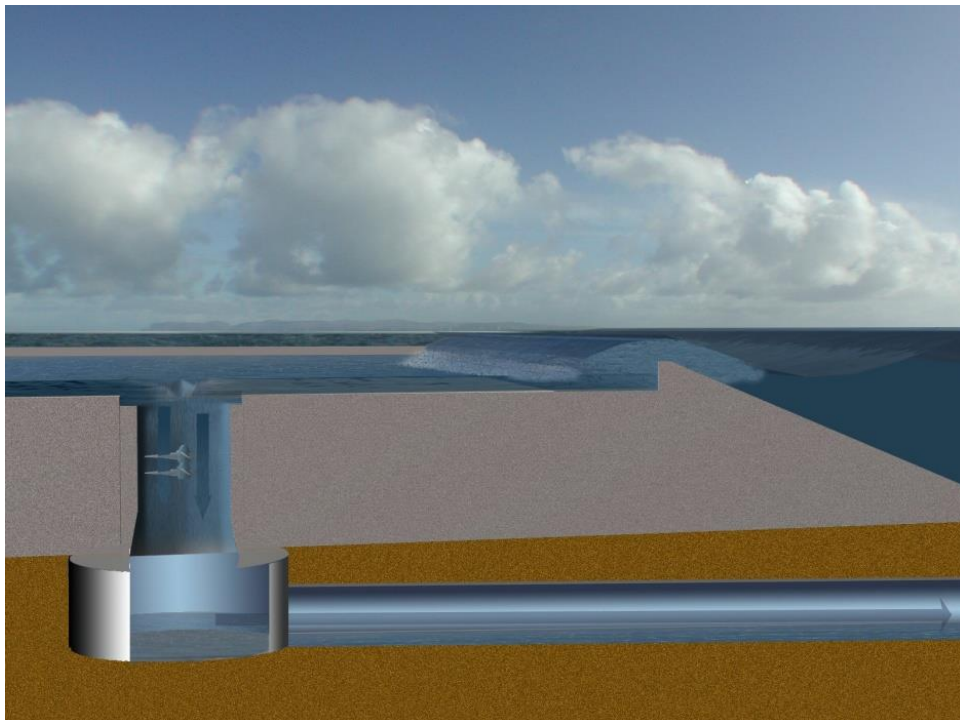
Η παλλόμενη υδάτινη στήλη αποτελείται από ένα κενό ημιβυθισμένο διαμέρισμα που επιτρέπει στα κύματα να εισέρχονται στο εσωτερικό του. Καθώς τα κύματα διαδίδονται και φτάνουν προς την ακτή, εισχωρούν μέσα στο κενό διαμέρισμα και ανεβάζουν την στάθμη του νερού. Η ανύψωση της στάθμης, αυξάνει την πίεση μέσα στον θάλαμο και οδηγεί τον ατμοσφαιρικό αέρα που υπάρχει στο εσωτερικό του διαμερίσματος να κινηθεί προς τα πάνω. Ο πεπιεσμένος αέρας εξέρχεται από μία δίοδο και διοχετεύεται μέσω ενός στενού διαδρόμου, θέτοντας σε κίνηση μία στροβιλογεννήτρια, που μετατρέπει την στροφή αυτή σε ηλεκτρική ενέργεια. Αντίστροφα, όταν η στάθμη του νερού υποχωρεί, λόγω της αποσυμπίεσης του θαλάμου, η ροή του αέρα αλλάζει κατεύθυνση και εισέρχεται μέσα στο διαμέρισμα, διατηρώντας την περιστροφή του στροβίλου. Οι συσκευές αυτές μπορεί να μην αποδίδουν πολύ μεγάλη ενέργεια και κατά την λειτουργία τους να εκπέμπουν πολύ θόρυβο, όμως έχουν πολλά προτερήματα. Τα προτερήματα αφορούν την εγκατάστασή τους, (μπορούν να τοποθετηθούν σε ήδη υπάρχουσες κατασκευές όπως λιμενοβραχίονες), τις μικρές απαιτήσεις συντήρησής τους, (η γεννήτρια δεν έρχεται σε επαφή με θαλασσινό νερό) και την απλή τεχνολογία χωρίς την χρήση ευαίσθητων οργάνων.



Εικόνα 8 Λειτουργία Μετατροπέα Ταλαντευόμενης Στήλης Νερού
(Πηγή: www.aquaret.com)

5. Συσκευές υπερύψωσης (overtopping devices)

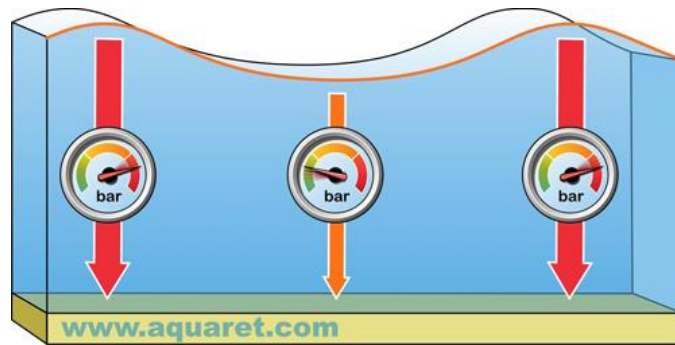
Οι συσκευές αυτές γνωστές και ως συσκευές υπερχείλισης μπορούν να εγκατασταθούν είτε στην ακτή είτε σε υπεράκτιες περιοχές. Για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας εκμεταλλεύονται τα κύματα που εισέρχονται σε μία δεξαμενή αποθήκευσης μέσω μίας ενσωματωμένης ράμπας. Το νερό που ανυψώνεται και δεσμεύεται στη δεξαμενή αυξάνει την υδροστατική πίεση, θέτοντας σε λειτουργία ένα υδροστρόβιλο, και στη συνέχεια διοχετεύεται πίσω στη θάλασσα από μία δίοδο. Σημαντικό μειονέκτημα των συσκευών αυτών είναι η διάβρωση υδροστρόβιλου από το θαλασσινό νερό και η μεγάλες διαστάσεις ώστε να μπορεί να εξασφαλιστεί μία ικανοποιητική χωρητικότητα αποθήκευσης.



Εικόνα 9 Λειτουργία Συσκευής Υπερχείλισης
(Πηγή: www.aquaret.com)

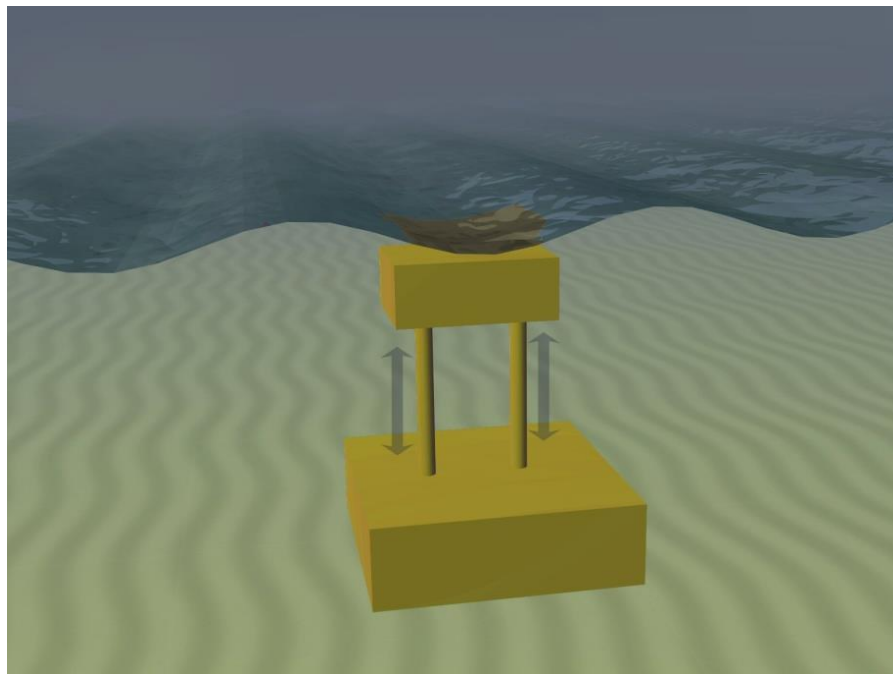
6. Συσκευές Διαφορικής Πίεσης (Submerged pressure differential devices)

Οι συσκευές διαφορικής πίεσης είναι συνήθως βυθιζόμενες και εδράζονται κοντά στην ακτή, ωστόσο μπορούν να είναι και πλωτές σε υπεράκτιες περιοχές. Η αρχή λειτουργίας τους βασίζεται στην παλλόμενη υδροδυναμική πίεση που δημιουργείται από την εναλλαγή των κορυφών και κοιλάδων του κύματος κατά την διέλευση του πάνω από τη συσκευή.



Εικόνα 10 Διαφορά Πίεσης Ανάμεσα στις Κορυφές και Κοιλάδες του Κύματος
(Πηγή: www.aquaret.com)

Η διαφορά της πίεσης ασκεί κάθετες δυνάμεις στην συσκευή και αναγκάζει την κάθετη ταλάντωση ενός εμβόλου, μετατρέποντας την κίνηση αυτή σε ηλεκτρική ενέργεια.

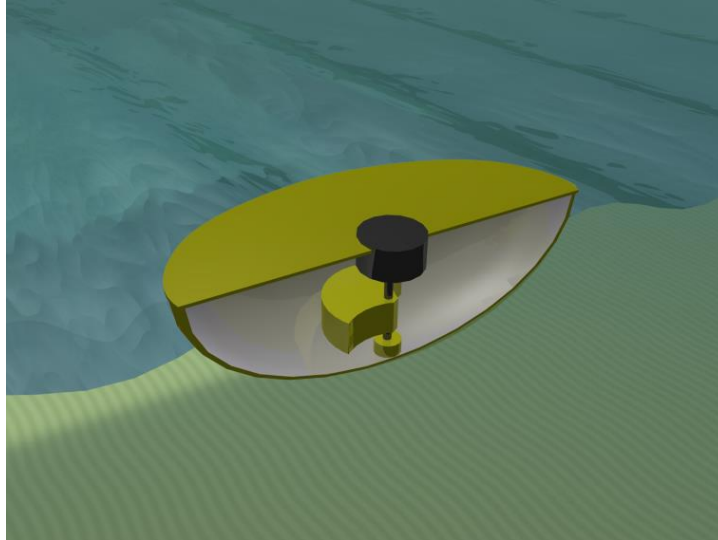


Εικόνα 11 Λειτουργία Συσκευής Διαφορικής Πίεσης
(Πηγή: www.aquaret.com)

Στην περίπτωση των πλωτών συσκευών διαφορικής πίεσης, η αυξανόμενη πίεση από την διέλευση των κυμάτων χρησιμοποιείται για την συμπίεση αέρα και μέσω μίας γεννήτριας οδηγείται στην παραγωγή ηλεκτρισμού.

7. Μετατροπείς Περιστρεφόμενης Μάζας (Rotating Mass)

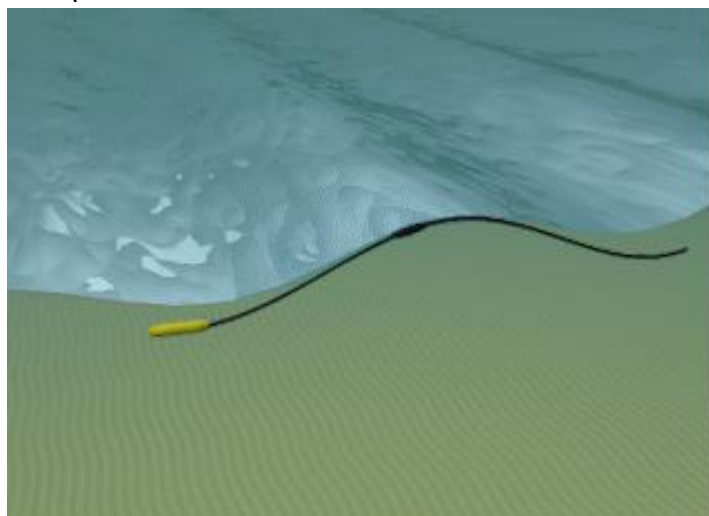
Οι συσκευές περιστρεφόμενης μάζας χρησιμοποιούν τη ταλάντωση και την κίνηση των κυμάτων για να περιστρέψουν μία έκκεντρη μάζα ή ένα γυροσκόπιο. Η περιστροφή αυτή αξιοποιείται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μέσω μίας γεννήτρια μέσα στη συσκευή.



Εικόνα 12 Λειτουργία Συσκευής Περιστρεφόμενης Μάζας
(Πηγή: www.aquaret.com)

8. Συσκευή κυματικής διόγκωσης (Bulge Wave)

Η συσκευή κυματικής διόγκωσης είναι ένας επιμήκης λαστιχένιος σωλήνας γεμάτος με νερό, και αγκυρωμένος στον πυθμένα της θάλασσας. Το νερό εισέρχεται από την είσοδο του σωλήνα, και το κύμα που διέρχεται προκαλεί διακυμάνσεις της πίεσης κατά μήκος του σωλήνα, δημιουργώντας ένα διόγκωμα. Καθώς η διόγκωση κινείται μέσα στον σωλήνα μεγαλώνει συλλέγοντας ενέργεια που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να στρέψει ένα μικρό στρόβιλο, κατά την επιστροφή του νερού στη θάλασσα, στην έξοδο του σωλήνα.



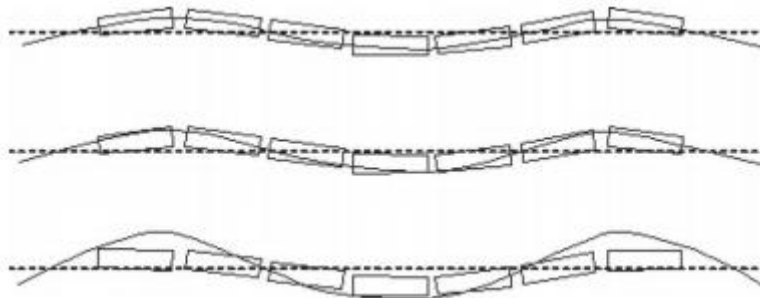
Εικόνα 13 Λειτουργία Συσκευής Κυματικής Διόγκωσης
(Πηγή: www.aquaret.com)

4.2. Παραδείγματα Συσκευών Κυματικής Ενέργειας Pelamis



Εικόνα 14 Κυματική Μηχανή Pelamis
(Πηγή: EMEC: European Marine Energy Centre)

Ο μετατροπέας κυματικής ενέργειας Pelamis ήταν από τις πρώτες μηχανές που χρησιμοποιήθηκαν και ελέχθηκαν σε φυσικό υδάτινο περιβάλλον. Κατασκευάστηκε από την εταιρεία Pelamis Wave Power, που ιδρύθηκε στο Εδιμβούργο το 1998. Πρόκειται για ένα μετατροπέα τύπου εξασθενητή, που προσδένετε στον πυθμένα υπεράκτιων περιοχών βάθους περίπου 50m, με χαλαρή αγκυροβόληση ώστε να επιτρέπει στη συσκευή να κινείται κάθετα στα κύματα. Αποτελείται από μια αρθρωτή διάταξη, με πέντε σωληνοειδή τμήματα, που συνδέονται με ελεύθερες αρθρώσεις. Η ελευθερία κίνησης των αρθρώσεων δίνει την δυνατότητα στη συσκευή να ακολουθεί μία κατά προσέγγιση ημιτονοειδή καμπύλη προσπαθώντας να συντονιστεί με τη μορφή των κυματισμών.



Εικόνα 15 Κίνηση Pelamis ανάλογα τον κυματισμό
(Πηγή: EMEC: European Marine Energy Centre)

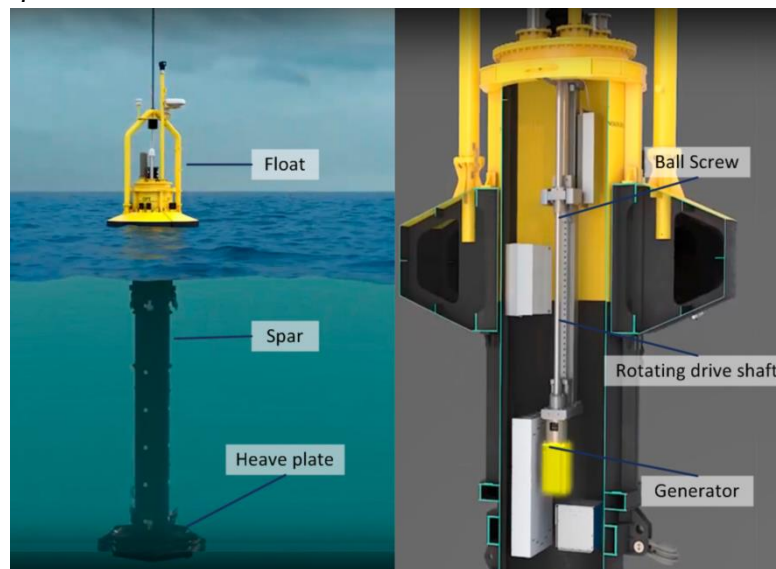
Η διάταξη είναι σχεδιασμένη να αντιδρά στην καμπυλότητα των κυμάτων αλλά όχι στο ύψος τους και έχει την δυνατότητα να αποφεύγει τον συντονισμό σε ακραίες συνθήκες που θα μπορούσαν να θέσουν σε κίνδυνο την συσκευή. Κάθε τμήμα περιέχει τον δικό του εξοπλισμό για μετατροπή της ενέργειας. Κατά την κίνηση των τμημάτων, συναντάται αντίσταση από τα εγκατεστημένα υδραυλικά έμβολα, τα οποία στέλνουν υγρά υψηλής πίεσης μέσω συσσωρευτών εξομάλυνσης στους υδραυλικούς κινητήρες που είναι συζευγμένοι με ηλεκτρογεννήτριες. Η πρώτη εγκατάσταση του Pelamis έγινε το 2004 στη περιοχή δοκιμών του Ευρωπαϊκού Κέντρου Θαλάσσιας Ενέργειας EMEC, δούλεψε για 6 μήνες και καταστράφηκε ολοσχερώς από τα κύματα. Ξαναεγκαταστήθηκε το 2008, όμως παρά την επιτυχημένη απόδοση, τεχνικές δυσλειτουργίες που προέκυψαν ανάγκασαν την απότομη απόσυρση της από την εμπορική εγκατάσταση και η εταιρεία πτώχευσε. Παρά την “αποτυχία” επιβίωσης του Pelamis στις συνθήκες, το 2017 ανέλαβε την κυριότητα της θαλάσσιας συσκευής το συμβούλιο των νήσων Orkney, το οποίο δουλεύει πάνω στην αντοχής της.

PowerBuoy



Εικόνα 16 Κυματική Μηχανή PowerBuoy
(Πηγή: Ocean Power Technologies)

Ο μετατροπέας κυματικής ενέργειας PowerBuoy ανήκει στις συσκευές σημειακών απορροφητών σε υπεράκτιες περιοχές. Κατασκευάζεται από την αμερικάνικη εταιρία Ocean Power Technologies που ιδρύθηκε το 1984. Αποτελείται από δύο μέρη όπου το ένα είναι πλωτό και συμπεριφέρεται σαν σημαδούρα ενώ το άλλο μέρος είναι ημιβυθισμένο και αγκυροβολημένο στον πυθμένα. Το ημιβυθισμένο μέρος είναι ένας στύλος ο οποίος έχει σκοπό την αύξηση των αδρανειακών δυνάμεων. Το πλωτό τμήμα από την άλλη έχει την ελευθερία ταλάντωσης κατά την επίδραση των κυμάτων ακολουθώντας την κίνηση της ελεύθερης επιφάνειας. Η διαφορά φάσης και η σχετική αυτή κίνηση ανάμεσα στα δύο μέρη του PowerBuoy από γραμμική μετατρέπεται σε περιστροφική μέσα στον στύλο της συσκευής και οδηγεί σε μία ηλεκτρογεννήτρια όπου στην συνέχεια με υποθαλάσσια καλωδίωση παρέχεται στη στεριά.



Εικόνα 17 Συνολική δομή (Αριστερά), Μηχανισμός Μετατροπής (Δεξιά)
(Πηγή: Ocean Power Technologies)

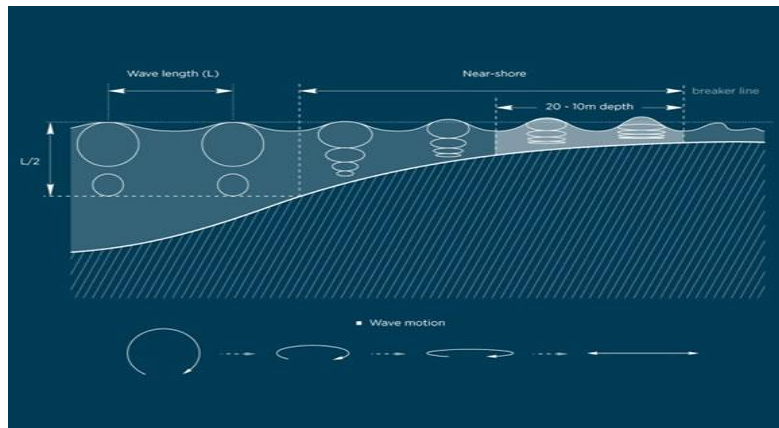
Η συσκευή έχει μπαταρίες ώστε να αποθηκεύει ενέργεια σε αυτές και να διατηρεί την αυτονομία της ακόμα και όταν το κυματικό καθεστώς εκλείπει. Σημαντικό πλεονέκτημα της συσκευής είναι ότι λόγω της αξονοσυμμετρικότητας της αλληλεπιδρά με κύματα ανεξαρτήτου κατεύθυνσης. Η αποδοτικότητα της μηχανής βασίζεται στις διαστάσεις του πλωτού τμήματος της συσκευής ώστε να μπορούν να αξιοποιούνται κύματα διαφόρων μηκών.

WaveRoller



Εικόνα 18 Κυματική Μηχανή WaveRoller
(Πηγή: AW-Energy)

Το WaveRoller είναι ένας μετατροπέας κυματικής ενέργειας που κατασκευάζεται από την εταιρεία AW-Energy και ανήκει στην κατηγορία των ταλαντευόμενων μετατροπέων κύματος. Αποτελείται από ένα βυθισμένο πτερύγιο εγκατεστημένο, σε επάκτιες και παράκτιες περιοχές, στον πυθμένα της θάλασσας. Το πτερύγιο έχει την δυνατότητα να ακολουθεί την κίνηση των μορίων του νερού στον πυθμένα που εκτελούν μία παλινδρομική οριζόντια κίνηση. Η κίνηση αυτή οφείλεται στο φαινόμενο της ρήγωσης κατά την διέλευση των κυμάτων στα ρηγά νερά. Τα μόρια του νερού σε μεγάλα βάθη διαγράφουν κυκλικές τροχιές. Όσο όμως πλησιάζουν τα κύματα την ακτή και μειώνεται το βάθος, ξεπερνώντας την κρίσιμη τιμή του μισού μήκους κύματος, οι τροχιές των μορίων του νερού γίνονται ελλειπτικές με αποτέλεσμα την οριζόντια κίνηση τους στον πυθμένα.



Εικόνα 19 Μορφή τροχιάς των μορίων του νερού ανάλογα με το βάθος
(Πηγή: AW-Energy)

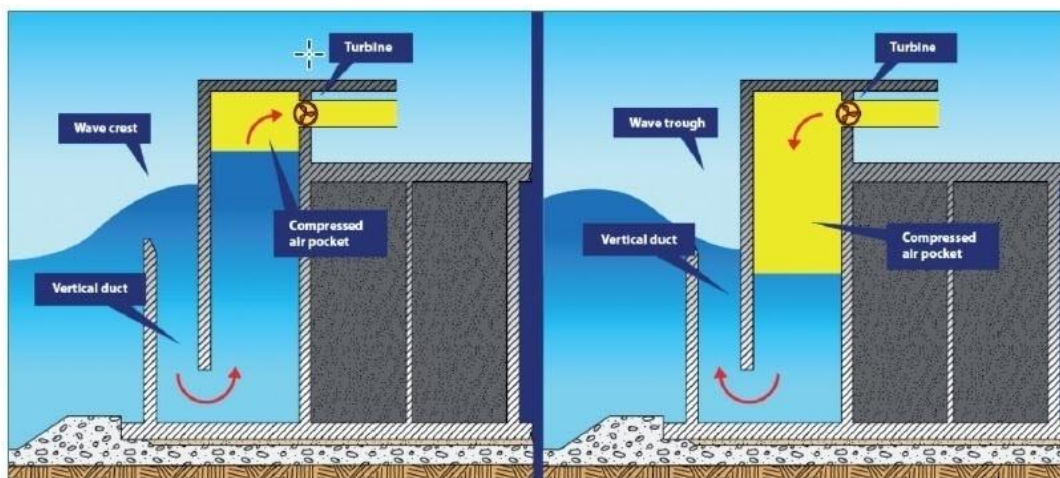
Η κινητική ενέργεια που παράγεται από το πτερύγιο του WaveRoller ενεργοποιεί υδραυλικά έμβολα, τα οποία μέσω ενός κλειστού υδραυλικού συστήματος ωθούν υδραυλικά υγρά. Τα υγρά αυτά τροφοδοτούν ένα κινητήρα που εξαναγκάζει μία γεννήτρια για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Η εγκατάσταση της WaveRoller είναι πολύ εύκολη καθώς η συναρμολόγηση του γίνεται τμηματικά. Έχει τη δυνατότητα επιπλέει χωρίς εξωτερική στήριξη και όταν προσεγγίσει το σημείο εγκατάστασης γεμίζει με νερό η βάση της και βυθίζεται στον πυθμένα για να μπει σε λειτουργία. Η διάταξη αυτή θέτει εξίσου εύκολη και τη συντήρηση του όπου επιτυγχάνεται με την απομάκρυνση του νερού από πρεσαρισμένο αέρα για την ανάδυση της συσκευής στην επιφάνεια.

REWEC3



Εικόνα 20 Κυματική Μηχανή REWEC3
(Πηγή: Wavenergy.it)

Το Resonant Wave Energy Converter 3 (REWEC3) είναι ένας μετατροπέας κυματικής ενέργειας που ανήκει στην οικογένεια των παλινδρομικών στηλών νερού (OWC) και κατασκευάζεται από την Wavenergy.it. Η συσκευή αυτή αποτελείται από μία στήλη ταλαντούμενου νερού και στο επάνω μέρος έχει μία δίοδο αέρα. Η δίοδος αυτή συνδέεται με την ατμόσφαιρα μέσω ενός μικρού αγωγού ο οποίος φιλοξενεί μία τουρμπίνα για την παραγωγή ενέργειας. Επιπλέον διαθέτει έναν μικρό αγωγό σχήματος U που χρησιμοποιείται για τη σύνδεση της στήλης νερού με την θάλασσα. Με την δράση των προσπίπτων κυμάτων, το νερό μέσα στον αγωγό σχήματος U υπόκειται σε παλινδρομική κίνηση. Η κίνηση αυτή προκαλεί εναλλάξ μία πίεση και αποσυμπίεση του αέρα στον θάλαμο και τον ωθεί μέσα στον αγωγό αέρα. Η ροή αυτή που δημιουργείται θέτει σε λειτουργία την τουρμπίνα που είναι συνδεδεμένη με μία ηλεκτρογεννήτρια για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Λόγω αυτής της συγκεκριμένης γεωμετρικής διαμόρφωσης είναι επίσης γνωστή ως στήλη νερού ταλάντωσης U (U-OWC). Η συσκευή REWEC3 κατασκευάστηκε και τέθηκε για πρώτη φορά σε λειτουργία στο λιμάνι Civitavecchia της Ιταλίας.



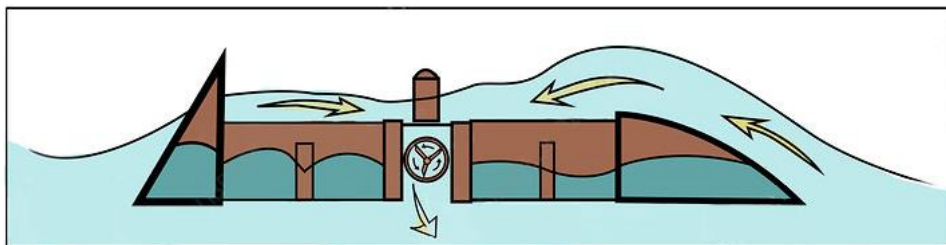
Εικόνα 21 Τρόπος λειτουργίας REWEC3
(Πηγή: Wavenergy.it)

WaveDragon

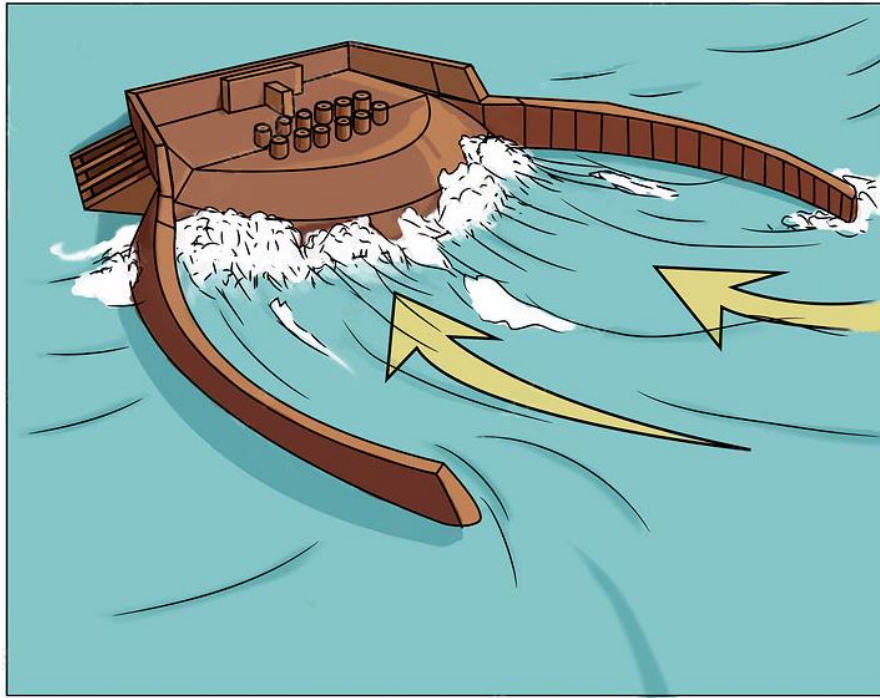


Εικόνα 22 Κυματική Μηχανή WaveDragon
(Πηγή: WaveDragon Technology)

Η συσκευή WaveDragon είναι ένας πλωτός ενεργειακός μετατροπέας, της δανέζικης εταιρίας Wave Dragon Aps, και ανήκει στην κατηγορία των συσκευών υπερπήδησης-υπερχείλισης. Η τοποθέτηση του γίνεται σε υπεράκτιες περιοχές με μεγάλη ενεργειακή πυκνότητα κυμάτων και το βέλτιστο βάθος αγκύρωσης του είναι τα 40m. Αποτελείται από μια πλατφόρμα με μία δεξαμενή μεγάλων διαστάσεων που είναι το κυρίως μέρος του, δύο ανακλαστικά φτερά, μια κεκλιμένη ράμπα, τους υδροστρόβιλους και τις ηλεκτρογεννήτριες. Τα κύματα που διαδίδονται όταν πλησιάζουν την κυματική συσκευή συγκεντρώνονται και κατευθύνονται από τα ανακλαστικά φτερά με αποτέλεσμα να οδηγούνται προς την κεκλιμένη ράμπα. Μέσω της ράμπας τα κύματα ανυψώνονται και αποθηκεύονται προσωρινά στη δεξαμενή που βρίσκεται στο κορμό της κατασκευής και πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας. Το νερό που συγκεντρώνεται δημιουργεί υδραυλική πίεση, λόγω της υψομετρικής διαφοράς της στάθμης της δεξαμενής από την στάθμη της θάλασσας και οδηγείται μέσω υδροστρόβιλων που είναι συνδεδεμένοι με ηλεκτρογεννήτριες πίσω στη θάλασσα. Οι υδροστρόβιλοι εκμεταλλεύεται την δυναμική ενέργεια του νερού της δεξαμενής μετατρέποντάς τη σε περιστροφική κίνηση. Θα πρέπει επίσης να λειτουργούν σε πολύ μεγάλο εύρος υδραυλικής πίεσης γιατί οι αυξομειώσεις της στάθμης του νερού στη δεξαμενή είναι συνεχείς.



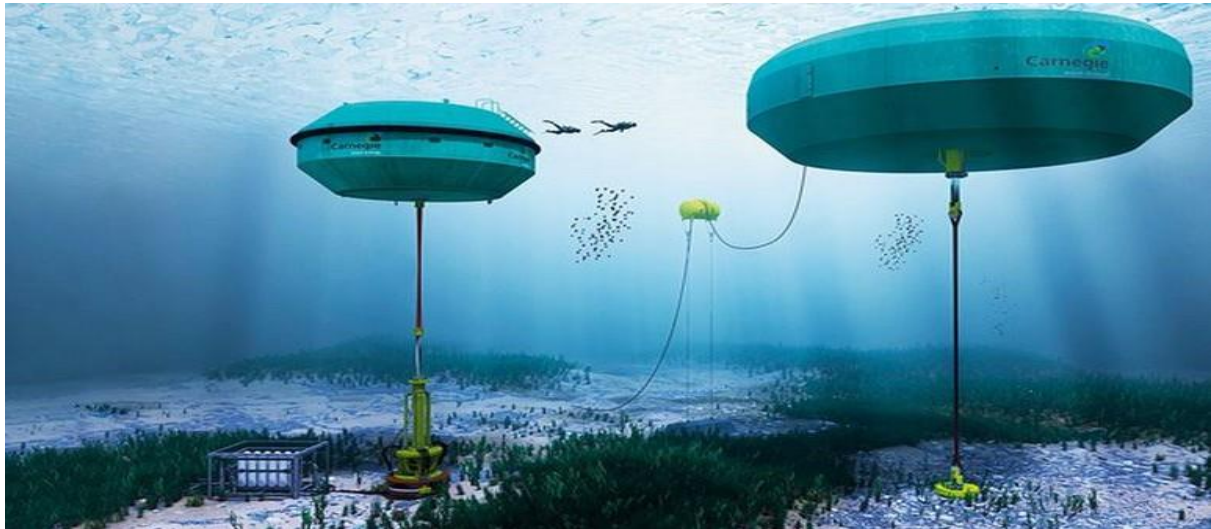
Εικόνα 23 Τρόπος λειτουργίας WaveDragon (Τομή)
(Πηγή: SCIENCEphotoLIBRARY)



Εικόνα 24 Τρόπος λειτουργίας WaveDragon
(Πηγή: SCIENCEphotoLIBRARY)

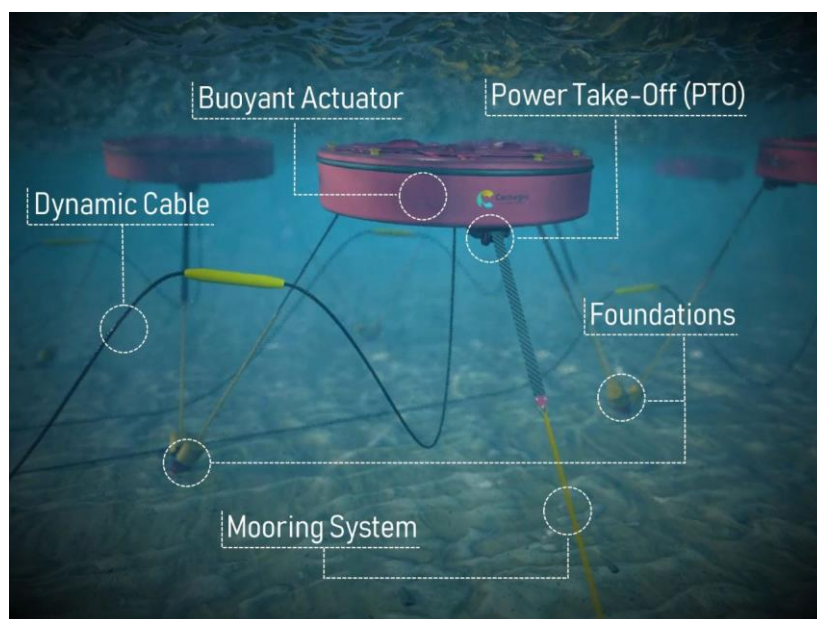
Επειδή η απόδοση της συσκευής εξαρτάται από το ύψος των κυμάτων, ο WaveDragon χρησιμοποιεί ένα σύστημα πεπιεσμένου αέρα για να πλέει στο επιθυμητό επίπεδο για να αξιοποιεί κύματα ποικίλων υψών. Στην μεγαλύτερη συγκέντρωση νερού βοηθά η διπλά καμπυλωτή ράμπα που μεγιστοποιεί την ποσότητα του νερού που υπερπηδά την συσκευή. Τέλος τα ανακλαστικά φτερά συντελούν στην εκμετάλλευση των κυμάτων μίας ευρύτερης περιοχής που σε διαφορετική περίπτωση θα χρειαζόταν να καλύψει η συσκευή αυξάνοντας τις διαστάσεις της.

Ceto



Εικόνα 25 Κυματική Μηχανή Ceto
(Πηγή: Carnegie Clean Energy)

Ο υποβρύχιος μετατροπέας κυματικής ενέργειας Ceto ανήκει στην κατηγορία των μετατροπέων διαφορικής πίεσης και κατασκευάζεται από την εταιρεία Carnegie. Ο Ceto χρησιμοποιείται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και για αφαλάτωση καθώς λειτουργεί ωθώντας θαλασσινό νερό με υψηλή πίεση στην ακτή. Αποτελείται από τέσσερα μέρη : τον ενεργοποιητή, το καλώδιο, την αντλία και το σύστημα θεμελίωσης. Ο ενεργοποιητής είναι ένας πλωτήρας βυθισμένος λίγα μέτρα κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας όπου στο άκρο του είναι συνδεδεμένο το καλώδιο που καταλήγει στην υδραυλική αντλία. Λόγω της διαφοράς πίεσης κατά την διέλευση των κυμάτων ο ενεργοποιητής εκτελεί μία κάθετη ταλάντωση. Η συμμετρικότητα του συμβάλλει στην αξιοποίηση κυμάτων όλων των κατευθύνσεων. Με τη ταλάντωση αυτή, η κυματική ενέργεια που δημιουργείται μεταφέρεται μέσω του καλωδίου στην αντλία. Η αντλία μετατρέπει την κυματική ενέργεια σε υδραυλική πίεση στέλνοντας θαλασσινό νερό στην ακτή μέσω ενός αγωγού.



Εικόνα 26 Διάταξη Ceto
(Πηγή: Carnegie Clean Energy)

Μετά από πολλά διαδοχικά εξελιγμένα μοντέλα η εταιρία ανέπτυξε το Ceto 6 , με προηγμένα χαρακτηριστικά. Ο Ceto 6 αύξησε σημαντικά τις διαστάσεις του ενεργοποιητή στα 20 μέτρα διάμετρο ώστε η απόδοση της συσκευής να βελτιωθεί, και ενσωμάτωσε την παραγωγή ισχύος στον πλωτήρα αντί της ακτής, καταργώντας την αναγκαιότητα του υδραυλικού συστήματος.



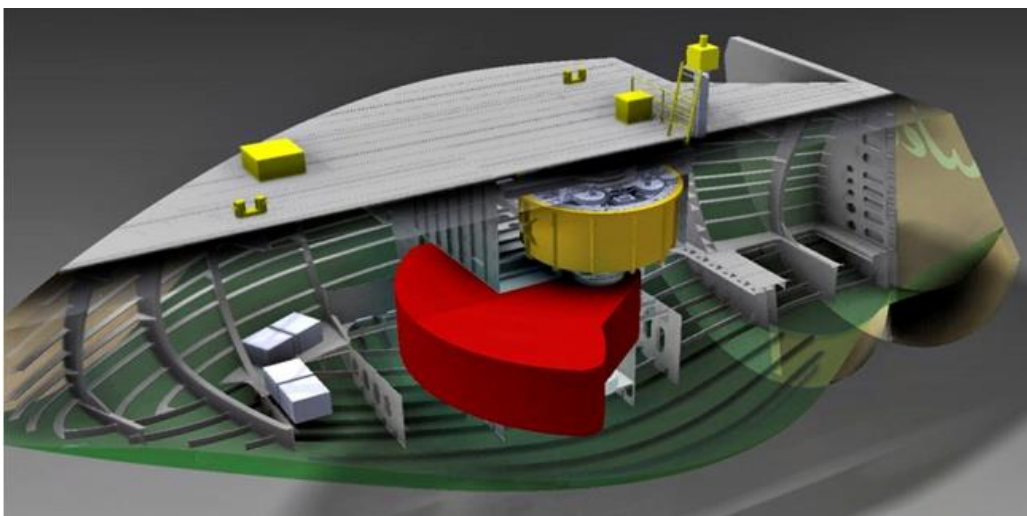
Εικόνα 27 Μοντέλα Ceto
(Πηγή: Carnegie Clean Energy)

Penguin



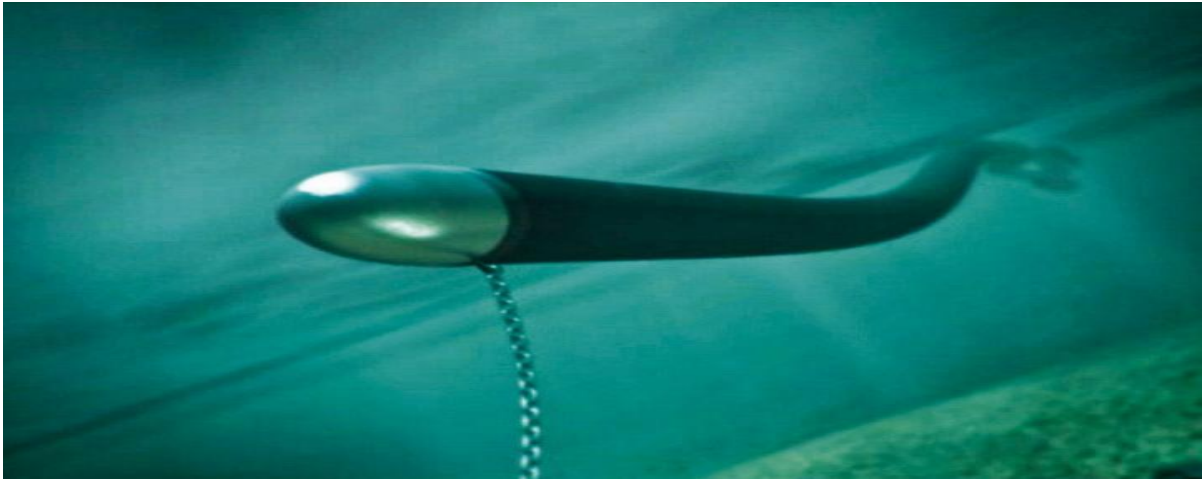
Εικόνα 28 Κυματική Μηχανή Penguin
(Πηγή: Wello)

Ο Penguin της Φινλανδικής εταιρείας Wello Oy, αναπτύσσεται από το 2008 και πρόκειται για μία συσκευή στρεφόμενης μάζας. Η συσκευή αναφέρεται σε ένα ασύμμετρο σκάφος που φιλοξενεί μία έκκεντρη στρεφόμενη μάζα και μια γεννήτρια, τοποθετημένες στον ίδιο κατακόρυφο άξονα. Η περιστροφή της έκκεντρης μάζας λόγω των κλυδωνισμών του σκάφους υπό την επίδραση των κυμάτων, παράγει μέσω της γεννήτριας ηλεκτρική ενέργεια. Η έκκεντρη μάζα στρέφεται συνεχώς λόγω της μεταβολής του άξονα από την κατακόρυφη θέση και της βαρύτητας που αναγκάζει την μάζα να κινείται προς το χαμηλότερο σημείο. Έτσι με κάθε κυματισμό αναλόγως τη συχνότητα του, η έκκεντρη μάζα εκτελεί μία πλήρη περιστροφή και αναπτύσσει την αντίστοιχη περιστροφική ταχύτητα. Για την βελτιστοποίηση της αποδοτικότητας της συσκευής υπάρχει εγκατεστημένο ένα σύστημα ελέγχου που αυξάνει τη ροπή του άξονα και επομένως αυξάνει και τη μηχανική της ισχύ. Το σύστημα αυτό ενεργεί εισάγοντας μία καθυστέρηση φάσης ανάμεσα στη θέση της έκκεντρης μάζας και την γωνία κλίσης του άξονα. Η γεννήτρια χρησιμοποιώντας την περιστροφική κίνηση παράγει ρεύμα μεταβαλλόμενης συχνότητας, λόγω των διαφορετικών περιστροφικών ταχυτήτων που αναπτύσσονται, και με τη βοήθεια ενός μετατροπέα μετασχηματίζεται σε συνεχές και εναποθέτεται μέσω υποθαλάσσιων καλωδίων στην ξηρά. Σημαντικό χαρακτηριστικό της συσκευής είναι ότι όλα τα λειτουργικά της μέρη στεγάζονται στο εσωτερικό της, συμβάλλοντας στην επιβιωσιμότητα της.



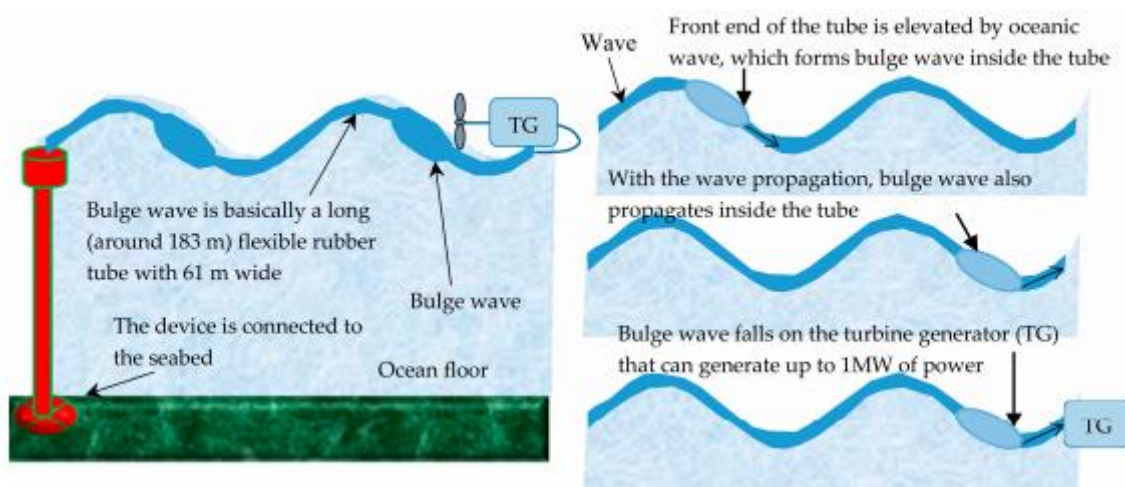
Εικόνα 29 Διάταξη λειτουργίας Penguin
(Πηγή: Wello)

Anaconda



Εικόνα 30 Κυματική Μηχανή Anaconda
(Πηγή: Checkmate Seaenergy)

Η συσκευή Anaconda είναι ένας μετατροπέας κυματικής ενέργειας που εφευρέθηκε το 2005, τα δικαιώματα της ανήκουν στην εταιρεία CheckMateSeaEnergy και υπάγεται στις κυματικές συσκευές διόγκωσης. Η Anaconda είναι ένας εύκαμπτος σωλήνας γεμάτος νερό από ελαστικό υλικό, συνήθως καουτσούκ, με επενδυμένο περίβλημα από πολυμερές για την αύξηση της αντοχής της συσκευής από διάβρωση λόγω θαλασσινού νερού. Ο σωλήνας αυτός επιπλέει κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας, προσδένεται από το αρχικό άκρο του και αγκυρώνεται στον πυθμένα. Η αγκύρωση μόνο από το ένα άκρο δίνει την ελευθερία στη συσκευή να στρέφεται και να προσανατολίζεται κάθε στιγμή με τη φορά των κυμάτων ώστε να εκτελεί την ημιτονοειδή κίνηση τους. Με τη διέλευση των κυμάτων ο σωλήνας διόγκωσης ανυψώνεται από το περιβάλλον νερό και προκαλεί διέγερση ενός κύματος διόγκωσης στο εσωτερικό του σωλήνα, σαν παλμό σε μία αρτηρία. Η συγκέντρωση ενέργειας προκύπτει από τον συντονισμό του κύματος διόγκωσης και του κύματος της θάλασσας, με την ενέργεια να αποθηκεύεται κατά μήκος του σωλήνα. Το κύμα διόγκωσης ταξιδεύει μπροστά από το κύμα της θάλασσας και αυξάνει προοδευτικά το μέγεθος του. Όταν το κύμα φτάνει στην πρύμνη της συσκευής ενεργοποιείται ένας στρόβιλος θέτοντας σε λειτουργία μία γεννήτρια για να παράξει ηλεκτρική ενέργεια.



Εικόνα 31 Τρόπος Λειτουργίας Anaconda
(Πηγή: Farrok, O., et al, Sustainability 2020)

4. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

Στην φύση συναντάται μία πληθώρα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας κάποιες εκ των οποίων είναι ο άνεμος, τα κύματα, η παλίρροια, η βιομάζα, η ωσμωτική ενέργεια κ.α. Ωστόσο η ενέργεια των κυμάτων που παράγεται λόγω βαρύτητας από την παρουσία του ανέμου αποτελεί έναν άφθονο πόρο και υπολογίζεται στα 2TW σε παγκόσμια κλίμακα (Besio, G., et al, 2016). Πολλοί ερευνητές έχουν ασχοληθεί τόσο με το ενεργειακό δυναμικό του ωκεανού, όσο και με την τοποθέτηση και την αποτελεσματικότητα που δίνει ένα εύρος μηχανών ανάλογα με την περιοχή ενδιαφέροντος. Σύμφωνα με τους (Guillou N., Chapalain G., 2018) οι οποίοι εξέτασαν την περιοχή της Δυτικής Βρετανίας στη Γαλλία, και έλαβαν υπόψη την εποχιακή και ετήσια μεταβλητότητα του κυματικού δυναμικού, υπολόγισαν μέσο ετήσιο δυναμικό της περιοχής στα 40kW ανά μέτρο. Στη συνέχεια αποτύπωσαν ότι για κάθε μία από τις τρεις κυματικές συσκευές (Pelamis, Wave Dragon, AquaBuoy) για την χρονική περίοδο 2004-2011 που προσομοιώθηκαν στην προαναφερθείσα περιοχή, εκτιμήθηκε ότι ετήσια ενέργεια κατά μέσο όρο ήταν: 1.03 GWh, 13.1 GWh, 0.39 GWh αντίστοιχα. Οι (George Lavidas, Vengatesan Venugopal, 2017) χρησιμοποίησαν δεδομένα 35 χρόνων (1980-2014) από τα αριθμητικά μοντέλα WAM3 και WAM4 για την περιοχή του Αιγαίου, όπου στη συνέχεια διασταυρώθηκαν με δεδομένα από επιτόπιες μετρήσεις (σημαδούρες - buoy) για την ακριβέστερη χωρική κατανομή του κυματικού δυναμικού. Για την ανάλυση του κυματικού δυναμικού στο Αιγαίο πέλαγος δόθηκε ιδιαίτερη σημασία στην εγκυρότητα των δεδομένων. Από την ανάλυση τους διαπιστώθηκε ότι οι περιοχές με την μεγαλύτερη ενεργειακή απόδοση εντοπίστηκαν ανατολικά και δυτικά της Κρήτης ($\approx 8 \text{ kW/m}$), όπως και σε περιοχές των Κυκλάδων (5 - 6.5 kW/m). Μετά την προσομοίωση των τριών μηχανών ενδιαφέροντος στην περιοχή, η μέγιστη εκτιμώμενη ετήσια παραγόμενη ενέργεια αποδόθηκε ανατολικά της Κρήτης, στην Κύθνο και στην Πάρο. Έτσι για τα σημεία μελέτης η μέση ετήσια παραγόμενη ενέργεια κυμαινόταν για το Pelamis στις 0.39 – 1.28 Gwh, για το WaveDragon στις 5.92 – 11.51 Gwh και για το AquaBuoy στις 0.12 – 0.23 Gwh. Μία άλλη έρευνα που έγινε για 35 χρόνια (01-01-1979 – 31-12-2013) από τους (Besio, G., et al, 2016) με χρήση του κυματικού μοντέλου WavewatchIII, δόθηκαν τα εξής αποτελέσματα κυματικού δυναμικού για τις 4 περιοχές ενδιαφέροντος: Alghero 9.49 kW/m, Manzara del Vallo 5.58 kW/m, Annaba 9.10 kW/m, Benghazi 5.97 kW/m. Σε μία πιο ευρεία ανάλυση περισσότερων περιοχών της Μεσογείου των (Dewals, B. (Ed.), 2016), με την βοήθεια του αριθμητικού μοντέλου SWAN ερευνήθηκε το εποχιακό κυματικό της δυναμικό. Τα εποχιακά δυναμικά ήταν για την Ιταλία 6 – 15 kW/m, για το νότιο Αιγαίο 7 – 12 kW/m ενώ για το βόρειο Αιγαίο 4 – 7 kW/m, για την Γαλλία 4 – 7 kW/m, για την Ισπανία 8 – 15 kW/m, για τη Λιβύη 6 – 11 kW/m και τέλος για την Τυνησία έως 12 kW/m. Εν συνεχεία για το ετήσιο κυματικό δυναμικό της ίδιας ανάλυσης (52 σημεία) ήταν για την Ελλάδα 1.71 – 5.28 kW/m, για την Ιταλία 1.02 – 8.03 kW/m, για την Ισπανία 0.93 – 7.13 kW/m, για την Γαλλία 1.16 – 2.43 kW/m, για την Τυνησία 1.69 – 6.16 kW/m, για την Λιβύη 3.24 – 6.16 kW/m (Lavidas G. et al, 2018). Τέλος οι (Liberti, L., et al, 2012) χρησιμοποιώντας δεδομένα από το μοντέλο WAM Cycle 4.5.3, παρουσίασαν ορισμένα αξιοπρόσεκτα αποτελέσματα για το μέσο ετήσιο κυματικό δυναμικό περιοχών όπως της Menorca 10.90 kW/m, της Hyères 6.47 kW/m, του Ajaccio 8.44 kW/m, του Ras Al Hilal 6.59 kW/m, του Ras Angela 9.25 kW/m, του Alghero $\approx 12 \text{ kW/m}$ και του Manzara del Vallo 6 – 7 kW/m.

5. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΚΑΙ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΘΗΚΑΝ

Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν αρχικά στη υλοποίηση της μελέτης ήταν το σημαντικό ύψος κύματος και η ενεργειακή περίοδος που παρέχονται από το ERA 5 για την Μεσόγειο για την χρονική περίοδο από το 2016 έως το 2020. Οι συντεταγμένες που οριοθέτησαν την περιοχή της Μεσογείου ήταν από -6° W έως 36.5° E και 30° S έως 46° N.

Το μοντέλο ERA 5 είναι ένα σύνολο δεδομένων αναλύσεων (Reanalysis) που συνδυάζει δορυφορικές παρατηρήσεις και αριθμητικά μοντέλα και με την μέθοδο της αφομοίωσης (data assimilation) διορθώνει, βελτιστοποιεί και παράγει πιο αξιόπιστα δεδομένα. Οι μετρήσεις και τα δεδομένα που παράγονται για το κύμα παρέχονται με χωρική ανάλυση $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ και χρονική κάλυψη ανά μία ώρα.

Η χρήση των δεδομένων του ERA 5 βοήθησε για μια πρώτη εκτίμηση του κυματικού δυναμικού συνολικά της Μεσογείου με σκοπό την εύρεση των βέλτιστων περιοχών και την απομόνωση τους, για περαιτέρω ανάλυση.

Στη συνέχεια τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για την μελέτη των επιλεγμένων περιοχών, αντλήθηκαν από τον ιστότοπο του Copernicus-CMEMS με χρονική κάλυψη 5 ετών (2015-2019) και με λεπτομερέστερη ανάλυση $1/24^{\circ}$. Το κυματικό μοντέλο που χρησιμοποιείται για την παραγωγή και συλλογή των δεδομένων στη Μεσόγειο θάλασσα βασίζεται στο αριθμητικό μοντέλο WAM Cycle 4.6.2. Το σύστημα μοντελοποίησης επιλύει ένα προγνωστικό μέρος του κυματικού φάσματος σε κατανεμημένες συχνότητες και στη συνέχεια γίνονται διορθώσεις από μετρήσεις που έχουν καταγραφεί από δορυφορικό σύστημα παρατηρήσεων σημαντικού ύψους κύματος. Το αριθμητικό μοντέλο αυτό παρέχει στιγμιαίες μετρήσεις ανά μία ώρα και αφορά μία διάσταση, την επιφάνεια της θάλασσας. Η χωρική ανάλυση ανέρχεται σε πλέγμα $0.042^{\circ} \times 0.042^{\circ}$ και σε σύστημα συντεταγμένων αναφοράς WGS 84 (EPSG 4326). Η μορφή που παρέχονται τα δεδομένα είναι NetCDF-4. Σε κάθε σημείο του πλέγματος, αντιστοιχεί μία τιμή για το σημαντικό ύψος κύματος, την κατεύθυνση του, και την ενεργειακή του περίοδο που καταγράφηκε ανά μία ώρα για τα 5 χρόνια.

Η νέα εκτίμηση του κυματικού δυναμικού έγινε στις συνολικά 8 επιλεγμένες περιοχές που απομονώθηκαν μετά την ανάλυση με τα δεδομένα του ERA 5 και υπολογίστηκε το μέσο ετήσιο, μέσο εποχιακό και μέσο μηνιαίο δυναμικό. Οι περιοχές που επιλέχθηκαν αναλύθηκαν σε χωρική κλίμακα $1^{\circ} \times 1^{\circ}$. Για την ετήσια κατανομή παρουσιάζεται η μέση τιμή του κυματικού δυναμικού για το σύνολο των δεδομένων των 5 ετών σε κάθε περιοχή. Παρόμοια για την εποχιακή κατανομή του κυματικού δυναμικού χωρίζονται τα δεδομένα στις 4 εποχές (χειμώνας – άνοιξη – καλοκαίρι – φθινόπωρο) όπου αντιστοιχούν και δίνεται μία μέση τιμή του για κάθε εποχή για τα 5 έτη ενώ για την μηνιαία δίνεται μία μέση τιμή του κυματικού δυναμικού για κάθε μήνα (12) σε κάθε περιοχή για την ίδια χρονική περίοδο. Η ανάλυση και η εκτίμηση του κυματικού δυναμικού έγινε με την βοήθεια της προγραμματιστικής γλώσσας Matlab και την χρήση των τύπων και εξισώσεων που αναφέρθηκαν στην προηγούμενη ενότητα.

$$P_i = \frac{\rho g^2}{64\pi} * H_{m_0}^2 * T_e$$

Όπου:

P: η ενέργεια ανά μονάδα κύματος

ρ : η πυκνότητα του νερού (=1025 kg/m³)

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

H_s: το σημαντικό ύψος κύματος

T_e: η ενεργειακή περίοδος

Το μέσο κυματικό δυναμικό για κάθε σημείο και για όλες τις μετρήσεις (N) σε μια συγκεκριμένη περίοδο δίνεται από τον τύπο:

$$\bar{P} = \frac{\sum_{i=1}^N P_i}{N}$$

Στη συνέχεια για την επιλογή των σημείων τοποθέτησης των κυματικών μηχανών σε κάθε περιοχή χρειάστηκε να ληφθούν υπόψη η παράμετρος του βάθους τοποθέτησης που εξασφαλίζει την σωστή αγκύρωση της εκάστοτε μηχανής, όπως και η απόσταση από την ξηρά για οικονομικούς λόγους καθώς η όσο μεγαλύτερη απόσταση από την ξηρά αυξάνει και το κόστος μεταφοράς της ενέργειας. Για να συμπεριληφθεί η βαθυμετρία χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα από τον ιστότοπο του EMODnet για κάθε μία από τις 8 περιοχές. Η τελική επιλογή των σημείων τοποθέτησης έγινε με κριτήριο το μεγαλύτερο κυματικό δυναμικό που επικρατεί στην περιοχή και με μέση τιμή βάθους τα 50m.

Τέλος για τα συνολικά 8 σημεία που διαλέχθηκαν, τοποθετήθηκαν οι κυματικές μηχανές Relamis, WaveDragon και AquaBuoy. Από τους ήδη υπάρχοντες πίνακες απόδοσης ενέργειας (power matrix) κάθε μηχανής υπολογίστηκε η μέση ετήσια και εποχιακή παραγόμενη ενέργεια σύμφωνα με το εκάστοτε δυναμικό από τον παρακάτω τύπο.

$$E = P * t$$

Όπου:

E: η παραγόμενη ενέργεια

P: η ενέργεια ανά μονάδα κύματος

t: η χρονική περίοδος σε ώρες

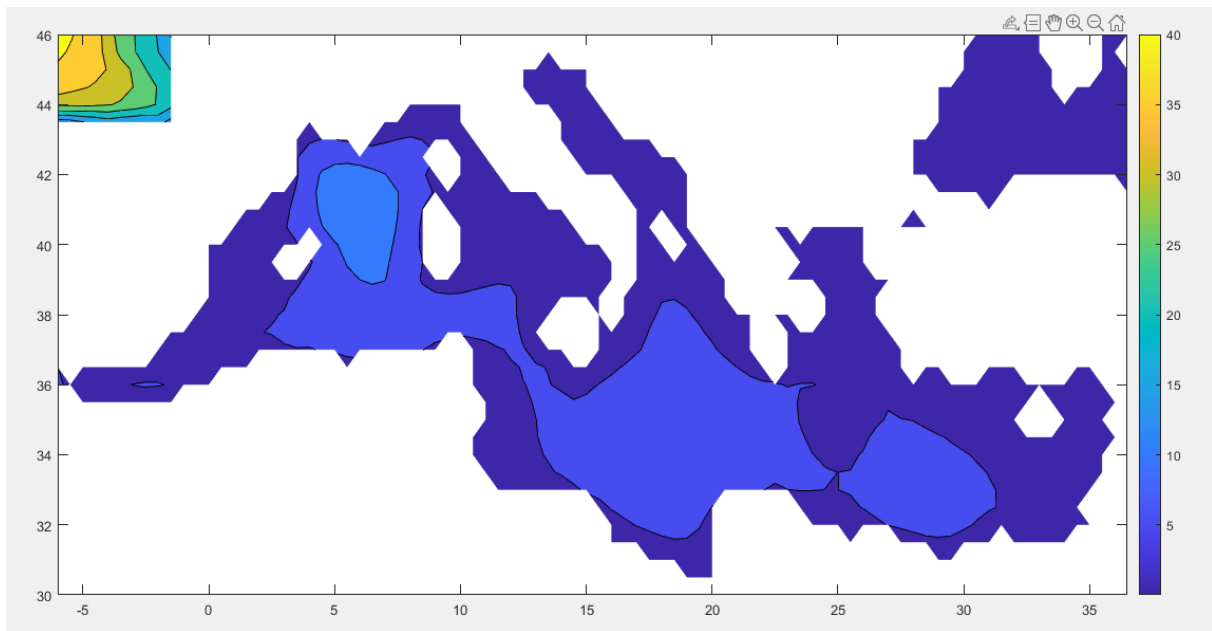
Για την καλύτερη αποτύπωση και αξιολόγηση της απόδοσης των τριών κυματικών μηχανών υπολογίστηκαν επιπλέον οι συνολικές ώρες λειτουργίας τους στο χρονικό διάστημα των 5 ετών όπως επίσης αποδόθηκε και ο συντελεστής χωρητικότητας (capacity factor) της καθεμίας αντίστοιχα.

$$CF = \frac{\text{παραγόμενη ισχύς}}{\text{μέγιστη παραγόμενη ισχύ}}$$

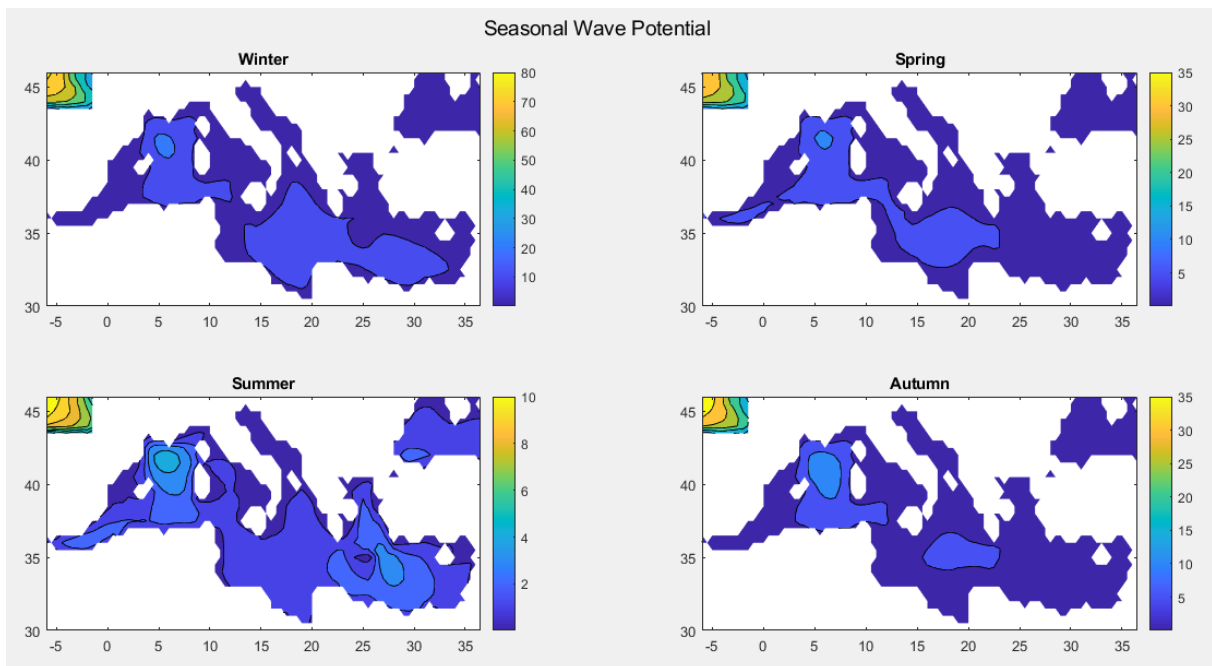
6. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΥΜΑΤΙΚΟΥ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΚΑΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΥΜΑΤΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΤΗ ΜΕΣΟΓΕΙΟ

6.1. Αρχική Εκτίμηση Κυματικού Δυναμικού με χρήση Δεδομένων ERA 5

Από την ανάλυση των δεδομένων του ERA 5 αποτυπώθηκε το κυματικό δυναμικό της περιοχής της Μεσογείου σε ετήσια και σε εποχιακή κατανομή όπως παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα

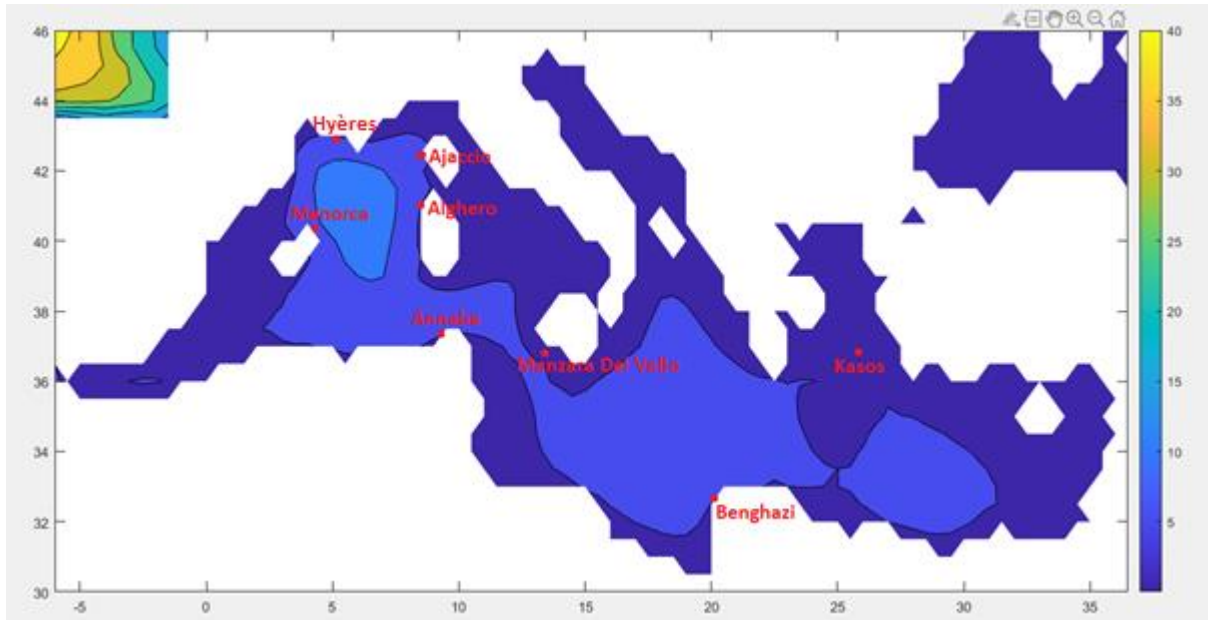


Εικόνα 32 Μέσο ετήσιο κυματικό δυναμικό από δεδομένα ERA 5



Εικόνα 33 Μέσο εποχιακό κυματικό δυναμικό από δεδομένα ERA 5

Στη συνέχεια έγινε η επιλογή 8 περιοχών που εμφάνιζαν το μεγαλύτερο δυναμικό και προτιμήθηκαν περιοχές από διάφορες χώρες και καθ' όλη την έκταση της Μεσογείου. Οι περιοχές αυτές είναι οι Ajaccio, Alghero, Annaba, Benghazi, Κάσος, Hyères, Manzara del Vallo και Menorca και παρουσιάζονται στον παρακάτω χάρτη.



Εικόνα 34 Επιλεγμένα σημεία ενδιαφέροντος

6.2. Εκτίμηση Κυματικού Δυναμικού Επιλεγμένων Περιοχών και Εύρεση Βέλτιστου Σημείου Τοποθέτησης

Μετά την πρώτη εκτίμηση του δυναμικού και την τελική επιλογή των περιοχών τοποθέτησης, με την βοήθεια των δεδομένων του Copernicus, έγινε μια αναλυτικότερη και εκτενέστερη ανάλυση για κάθε μία από τις περιοχές. Σε κάθε μεμονωμένη περιοχή που αναλύθηκε για το χρονικό διάστημα 2015-2019, αναζητήθηκε το καταλληλότερο σημείο για την εγκατάσταση της εκάστοτε κυματικής μηχανής ώστε να πληρούνται οι προϋποθέσεις του υψηλού κυματικού δυναμικού με το ιδανικότερο βάθος και απόσταση από την ξηρά. Άρα για κάθε περιοχή αποδόθηκαν τα κυματικά δυναμικά σε ετήσια και εποχιακή κατανομή, τα ροδοδιαγράμματα που αποτυπώνουν την συχνότητα εμφάνισης και μεγέθους του σημαντικού ύψους κύματος ή της ενεργειακής περιόδου σύμφωνα με την φορά της διεύθυνσης, η βαθυμετρία και η επιλογή του σημείου, και οι ενεργειακοί πίνακες απόδοσης ενέργειας του κάθε επιλεγμένου σημείου. Επιπλέον για σημαντικό ύψος κύματος και την ενεργειακή περίοδο, παρουσιάστηκαν ορισμένα σημαντικά δεδομένα που απομονώθηκαν από το σύνολο τους, όπως οι μέγιστες και ελάχιστες τιμές καθώς και κάποια στατιστικά στοιχεία, όπως η μέση τιμή, η διασπορά, η τυπική απόκλιση και ο συντελεστής μεταβλητότητας.

Η μέση τιμή είναι ο μέσος όρος ενός συνόλου δεδομένων και ορίζεται από την σχέση:

$$\mu = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |x_i|$$

Η διασπορά ορίζει το εύρος ενός συνόλου δεδομένων που απλώνεται από την μέση τιμή του και δίνεται από τη σχέση:

$$\sigma^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^2$$

Ενώ η τυπική απόκλιση ορίζει το ποσό διασποράς ενός συνόλου δεδομένων.

Τέλος ο συντελεστής μεταβλητότητας είναι ένα μέτρο σχετικής μεταβλητότητας και εκφράζει την τυπική απόκλιση των δεδομένων ως ποσοστό της μέσης τιμής τους.

$$CV = \frac{\sigma}{|\mu|} * 100\%$$

Όπου:

μ : μέση τιμή

N : συνολικός αριθμός δεδομένων

x : δεδομένα

σ^2 : διασπορά

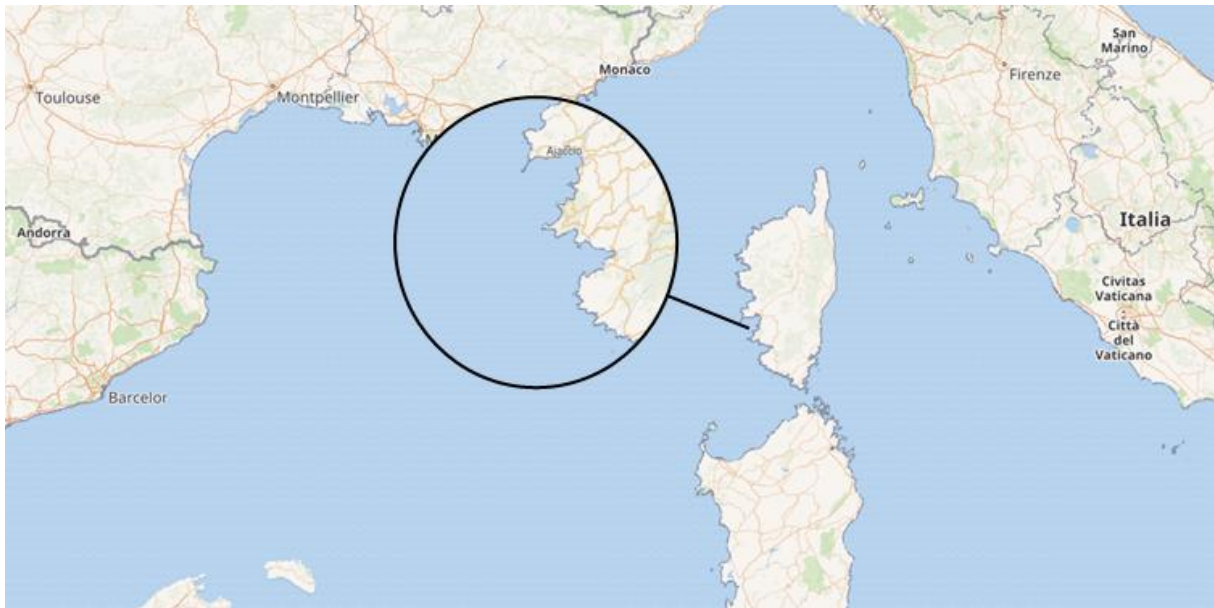
σ : τυπική απόκλιση

CV : συντελεστής μεταβλητότητας

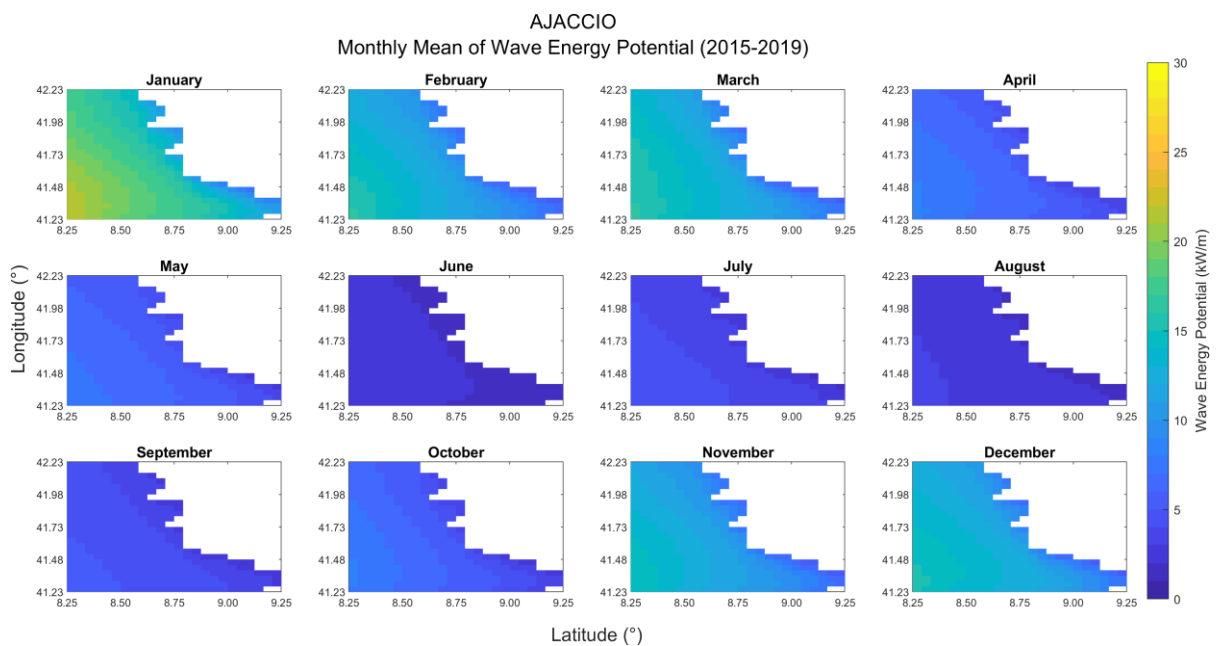
Παρακάτω στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται και σχολιάζονται τα αποτελέσματα για κάθε μία από τις 8 επιλεγόμενες περιοχές.

Ajaccio

Το Ajaccio βρίσκεται στην Κορσική της Γαλλίας και η περιοχή μελέτης του κυματικού δυναμικού ορίζεται από τις συντεταγμένες: 8.25° W έως 9.25° E και 41.23° S έως 42.23° N. Έγινε ανάλυση και αποτύπωση του κυματικού δυναμικού σε μηνιαία, εποχιακή και ετήσια κατανομή. Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης του κυματικού δυναμικού της περιοχής αυτής.

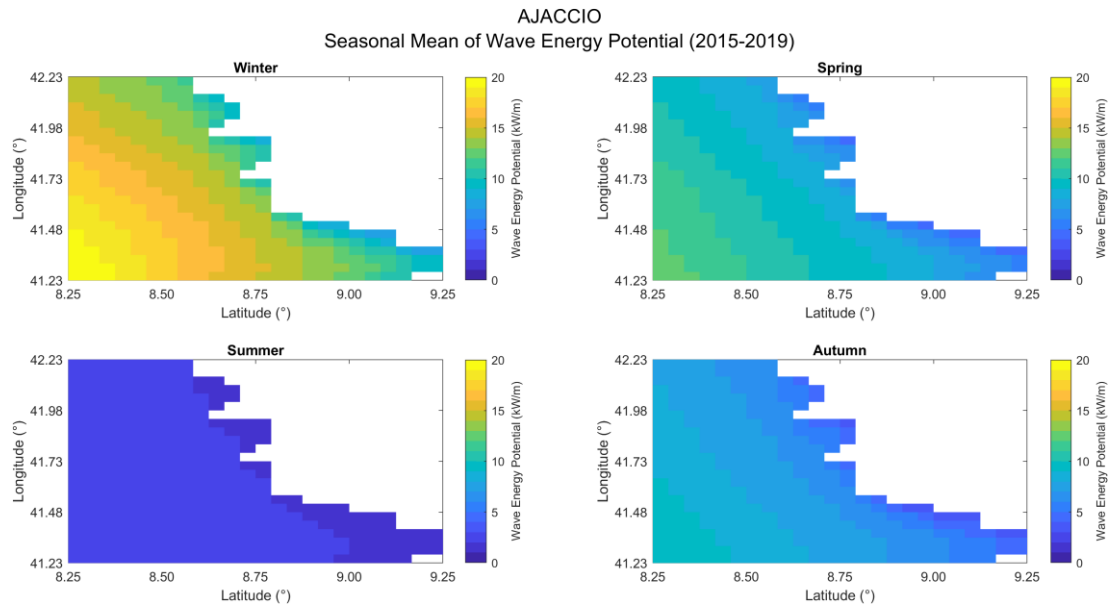


Εικόνα 35 Ajaccio



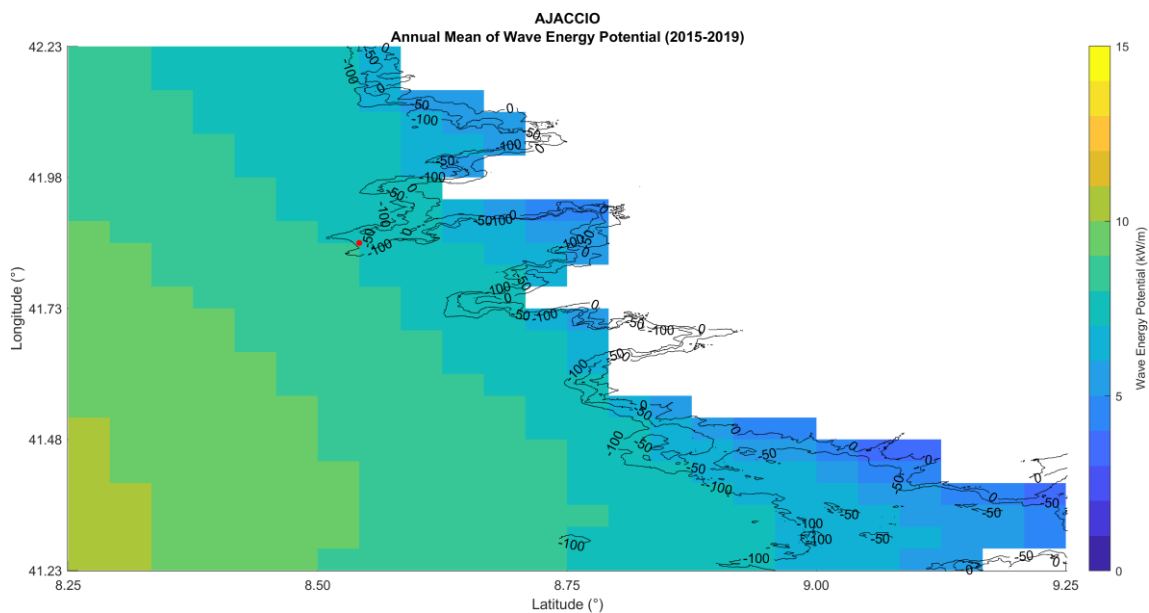
Εικόνα 36 Ajaccio: Μέσο Μηνιαίο Κυματικό Δυναμικό

Για λόγους πληρότητας παρουσιάζεται η μέση μηνιαία κυματική ισχύς για την απεικόνιση της βαθμιδωτής μεταβολής του κυματικού δυναμικού. Ωστόσο ο σχολιασμός των αποτελεσμάτων θα εστιαστεί στο μέσο εποχιακό και ετήσιο κυματικό δυναμικό.



Εικόνα 37 Ajaccio: Μέσο Εποχιακό Κυματικό Δυναμικό

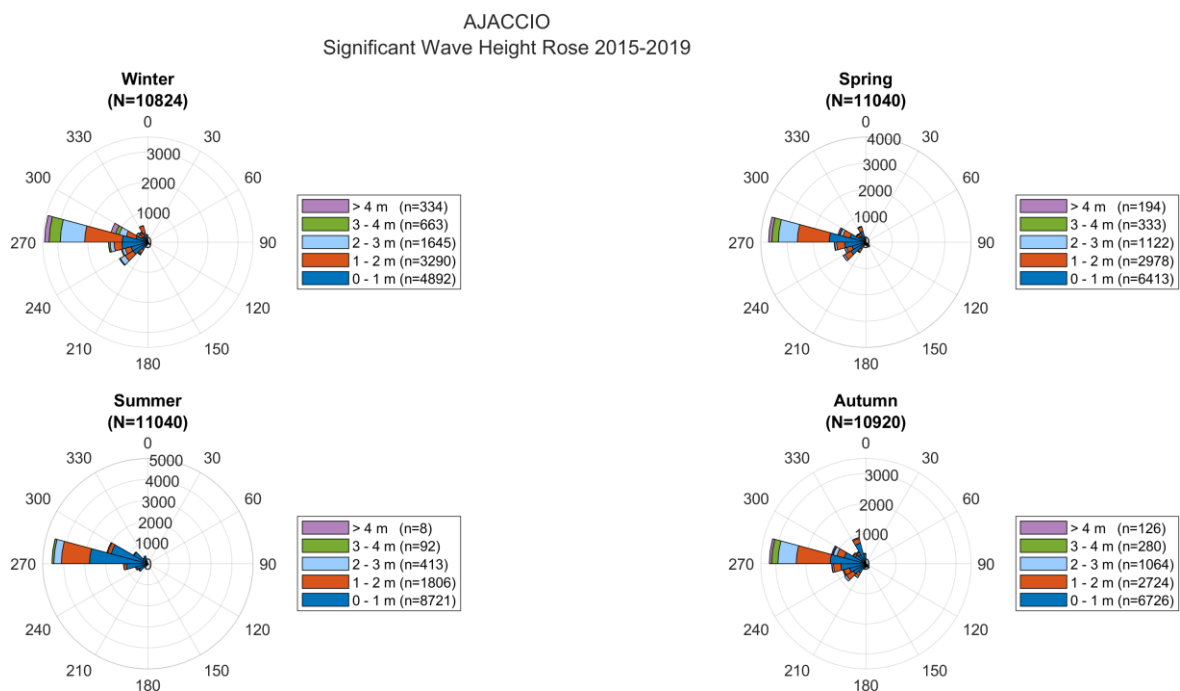
Παρατηρείται ότι κατά την χειμερινή περίοδο το κυματικό δυναμικό έχει τον πιο έντονο χαρακτήρα με τη μέση κυματική ισχύς στην περιοχή να ανέρχεται στα $\approx 16-17$ kW/m και με μέγιστη τιμή τα 20 kW/m. Κατά την περίοδο της άνοιξης παρατηρείται μία μείωση του δυναμικού γύρω στα 10-11 kW/m, ενώ το καλοκαίρι σε αντίθεση με τον χειμώνα παρουσιάζεται το χαμηλότερο κυματικό δυναμικό της περιοχής στα 3 kW/m. Τέλος το φθινόπωρο αρχίζει να υπάρχει μία σταδιακή άνοδος του κυματικού δυναμικού στα 8 kW/m.



Εικόνα 38 Ajaccio: Μέσο Ετήσιο Κυματικό Δυναμικό & Επιλογή Σημείου Τοποθέτησης Κυματικών Μηχανών

Στην ετήσια κατανομή, η μέση ετήσια τιμή του κυματικού δυναμικού εκτιμάται στα 9 kW/m. Η επιλογή του σημείου τοποθέτησης των υποψήφιων κυματικών μηχανών έγινε μετά από διερεύνηση των σημείων που απέδιδαν το μεγαλύτερο κυματικό δυναμικό σύμφωνα με την ετήσια αλλά και τις εποχιακές κατανομές, και με περιοριστικό παράγοντα την βαθυμετρία που επιθυμείται να είναι περίπου 50m. Το σημείο αυτό για την περιοχή μελέτης έχει συντεταγμένες 8.54° E και 41.85° N και βάθος στα -57m.

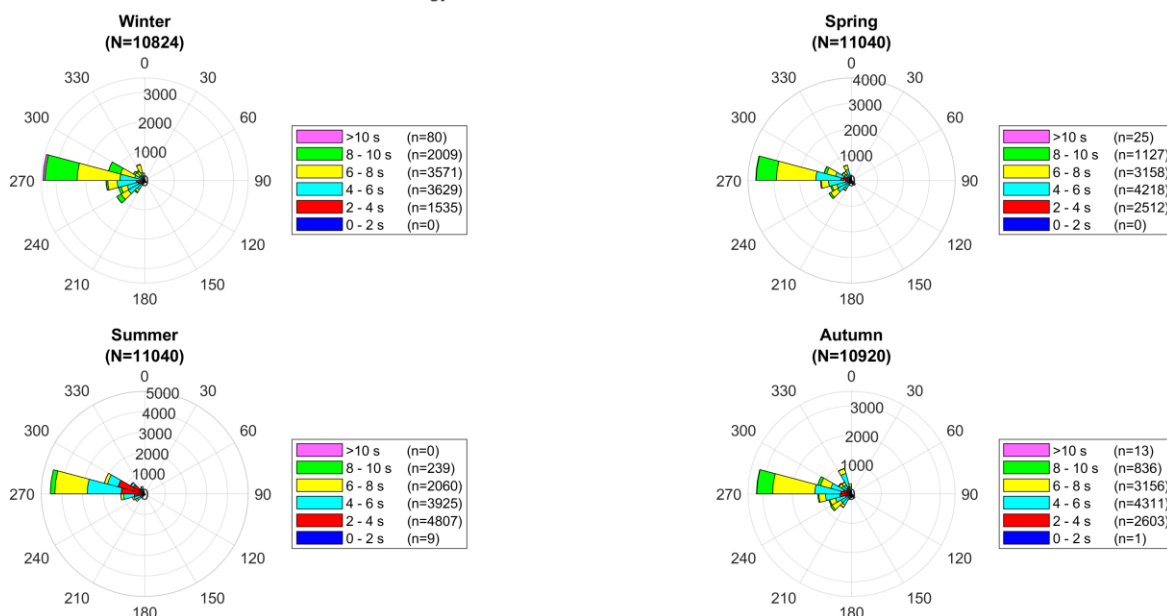
Παρακάτω για το σημείο επιλογής παρουσιάζονται τα ροδογράμματα για το σημαντικό ύψος κύματος και την ενεργειακή περίοδο σε εποχιακή κατανομή και στην συνέχεια για την ετήσια κατανομή παρουσιάζονται τα ροδογράμματα για το σημαντικό ύψος κύματος, την ενεργειακή περίοδο και το κυματικό δυναμικό αντίστοιχα.



Εικόνα 39 Ajaccio: Εποχιακά Ροδογράμματα Σημαντικού Ύψους Κύματος

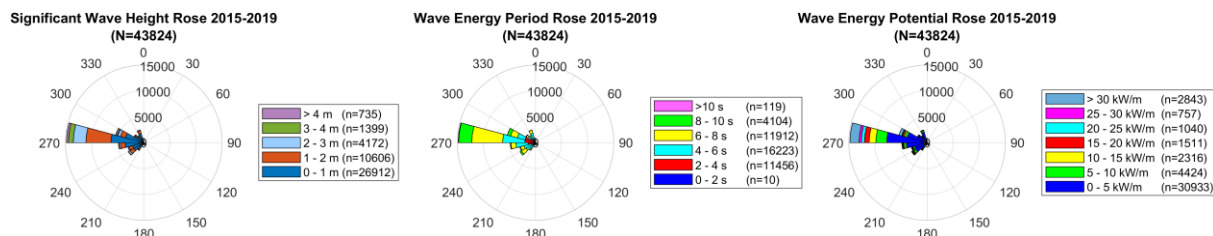
Στα ροδογράμματα του σημαντικού ύψους κύματος παρατηρείται ότι η επικρατέστερη διεύθυνση και συχνότητα εμφάνισης διάδοσης των κυμάτων είναι δυτικά και συγκεκριμένα στον τομέα των [270°, 285°]. Επίσης την χειμερινή περίοδο εμφανίζονται τα κύματα με το μεγαλύτερο ύψος και η συχνότητα εμφάνισης στην διεύθυνση των [270°, 285°] αποτελεί το 32% όλων των κυμάτων. Την άνοιξη και το φθινόπωρο τα διαγράμματα έχουν παρεμφερή κατανομή ενώ το καλοκαίρι το ύψος των κυμάτων είναι εμφανώς μικρότερο από τις υπόλοιπες εποχές.

AJACCIO
Wave Energy Period Rose 2015-2019



Εικόνα 40 Ajaccio: Εποχικά Ροδογράμματα Ενεργειακής Περιόδου

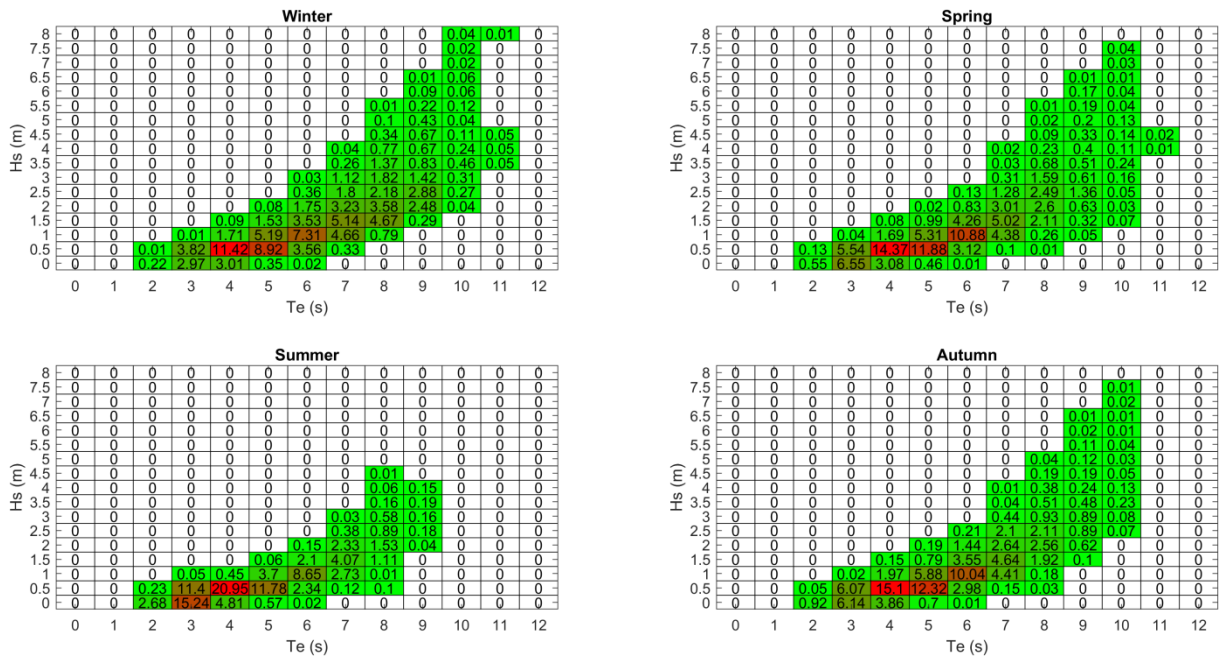
Τα ροδογράμματα της ενεργειακής περιόδου ακολουθούν την ίδια κατανομή με τα ροδογράμματα του σημαντικού ύψους κύματος για κάθε εποχή αντίστοιχα. Έτσι παρατηρείται ότι τον χειμώνα τα κύματα παρουσιάζουν τις μεγαλύτερες ενεργειακές περιόδους, ακολουθούμενος από την άνοιξη, το φθινόπωρο και τέλος το καλοκαίρι με τις μικρότερες ενεργειακές περιόδους.



Εικόνα 41 Ajaccio: Ετήσια Ροδογράμματα Σημαντικού Ύψους Κύματος, Ενεργειακής Περιόδου και Κυματικού Δυναμικού

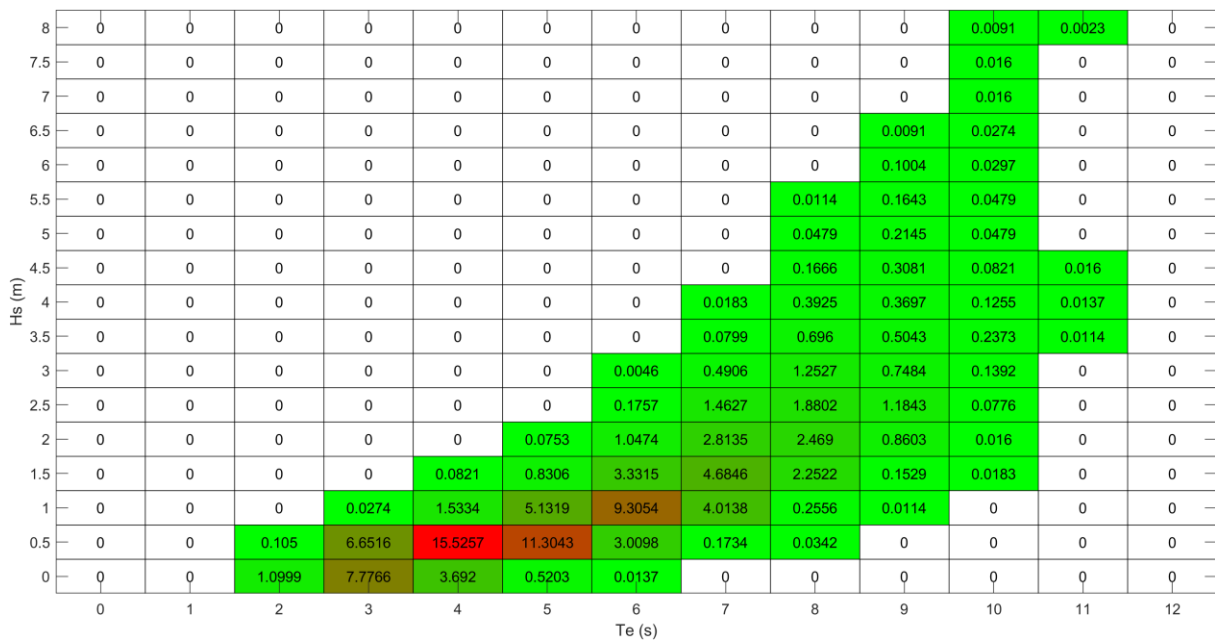
Τέλος παραπάνω παρουσιάζονται τα ετήσια ροδογράμματα σημαντικού ύψους, ενεργειακής περιόδου και δυναμικού του κύματος. Η επικρατέστερη διεύθυνση των κυμάτων παραμένει ανάμεσα στις 270° με 285° και ο μεγαλύτερος αριθμός των κυμάτων κυμαίνεται έως το 1m ύψος, ενώ η πιο συνήθης ενεργειακή περίοδος κυμαίνεται στα 4 – 6 s. Τέλος παρατηρείται ότι η επικρατέστερη κατάσταση του κυματικού δυναμικού αποδίδει έως 5 kW/m.

Εν συνεχεία δημιουργήθηκαν οι πίνακες που συνδυάζουν το σημαντικό ύψος κύματος με την ενεργειακή περίοδο και παρουσιάζουν την συχνότητα εμφάνισης των συνδυασμών αυτών σε εποχιακή και ετήσια κατανομή.



Εικόνα 42 Ajaccio: Εποχιακοί Πίνακες Κατανομής Συχνότητας Εμφάνισης

Διακρίνεται σε όλα τα διαγράμματα των τεσσάρων εποχών ότι ο συνδυασμός με την μεγαλύτερη συχνότητα εμφάνισης είναι τα κύματα με σημαντικό ύψος κύματος εύρους 0.25 – 0.75 m και ενεργειακή περίοδο 3.5 - 4.5 s. Είναι ακόμα εμφανές ότι τον χειμώνα εμφανίζονται κύματα με μεγαλύτερη ποικιλία συνδυασμών σημαντικού ύψους κύματος και ενεργειακής περιόδου ενώ το καλοκαίρι περιορίζονται πολύ οι συνδυασμοί αυτοί.



Εικόνα 43 Ajaccio: Ετήσιος Πίνακας Κατανομής Συχνότητας Εμφάνισης

Τέλος το ετήσιο διάγραμμα κατανομής παρουσιάζει τους συνολικούς συνδυασμούς σημαντικού ύψους και ενεργειακής περιόδου κύματος και την συχνότητα εμφάνισης τους στο σύνολο των 5 ετών που μελετώνται. Ο συνδυασμός με τη μεγαλύτερη συχνότητα εμφάνισης παραμένει ο ίδιος που είδαμε και στην επιμέρους εποχιακή κατανομή. Όπως παρουσιάζεται και στον πίνακα παρακάτω το μέγιστο σημαντικό ύψος κύματος που καταγράφηκε ήταν 8.032 m και η μέγιστη ενεργειακή περίοδος 10.895 s, ενώ τα ελάχιστα ήταν 0.064 m και 1.66 s αντίστοιχα.

Υψος Κύματος					
Μέση Τιμή	Διασπορά	Τυπική Απόκλιση	Min	Max	cv (%)
1.0587	0.9091	0.9534	0.064	8.032	90.05384

Περίοδος					
Μέση Τιμή	Διασπορά	Τυπική Απόκλιση	Min	Max	cv (%)
5.4242	3.1664	1.7794	1.66	10.895	32.80484

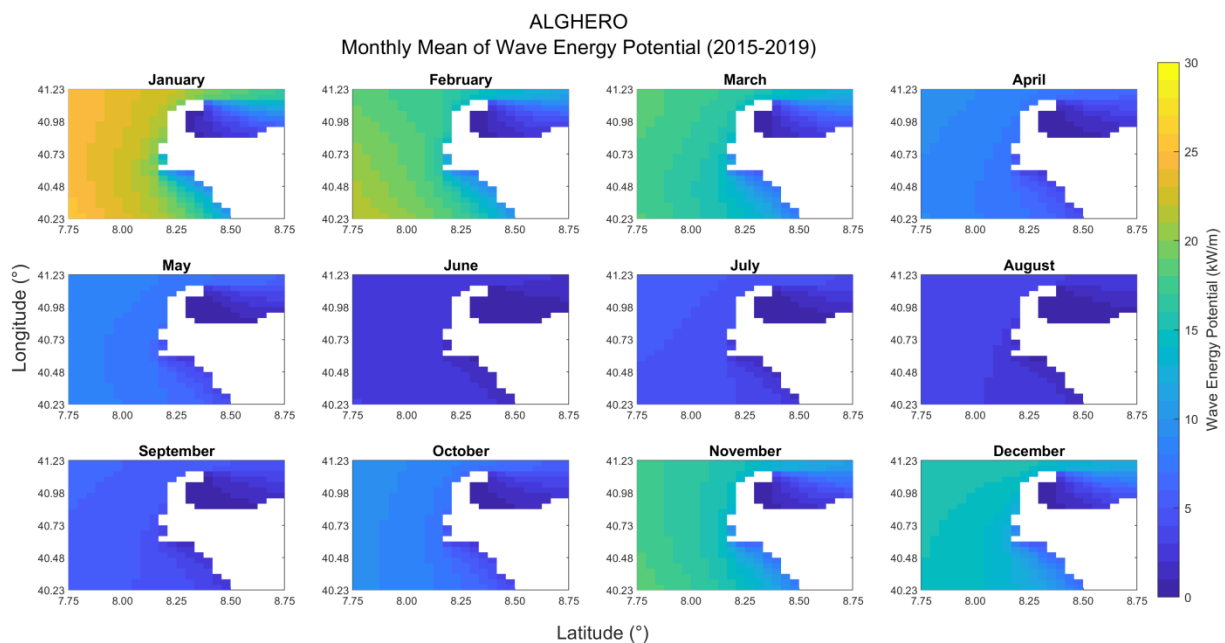
Πίνακας 1 Ajaccio: Χαρακτηριστικές τιμές του ύψους και της περιόδου των κυμάτων

Alghero

Το Alghero βρίσκεται στο βορειοδυτικό τμήμα της Σαρδηνίας της Ιταλίας και η περιοχή μελέτης του κυματικού δυναμικού ορίζεται από τις συντεταγμένες: 7.75° W έως 8.75° E και 40.23° S έως 41.23° N. Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης του κυματικού δυναμικού της περιοχής αυτής σε μηνιαία, εποχιακή και ετήσια κατανομή.

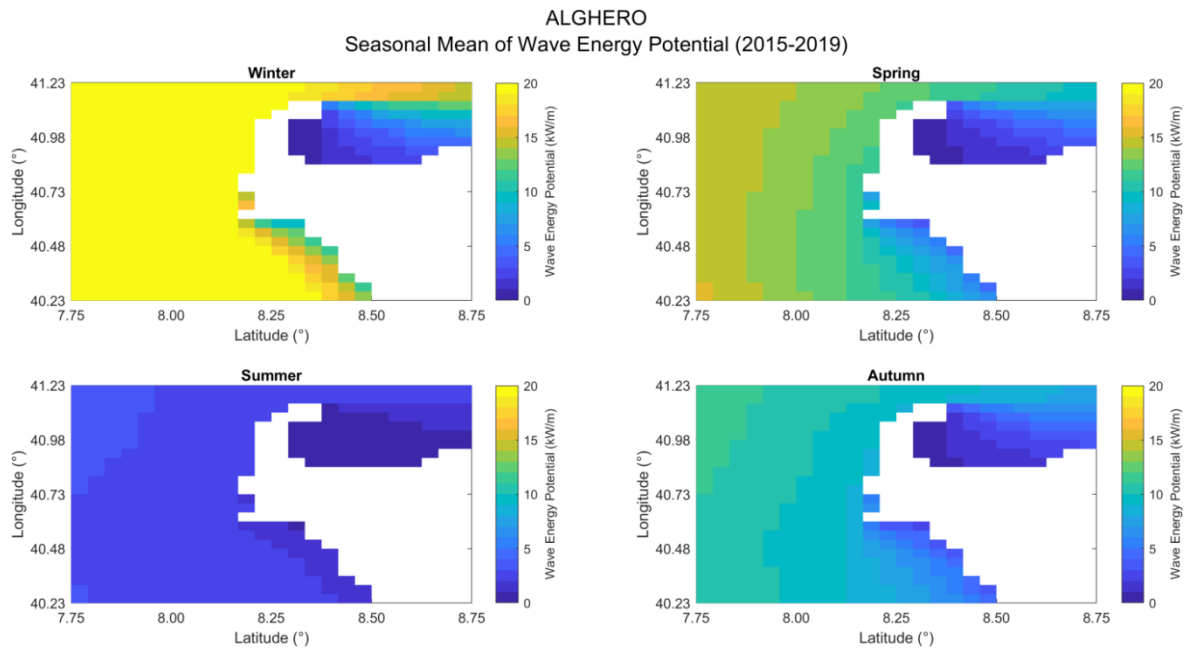


Εικόνα 44 Alghero



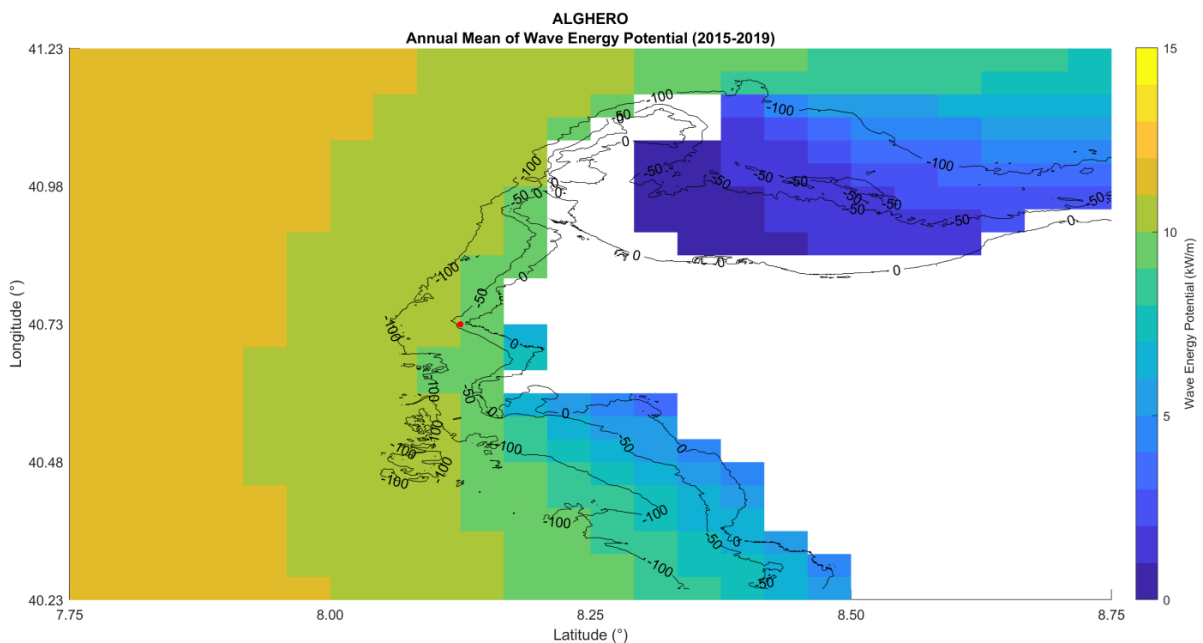
Εικόνα 45 Alghero: Μέσο Μηνιαίο Κυματικό Δυναμικό

Για λόγους πληρότητας παρουσιάζεται η μέση μηνιαία κυματική ισχύς για την απεικόνιση της βαθμιδωτής μεταβολής του κυματικού δυναμικού. Ωστόσο ο σχολιασμός των αποτελεσμάτων θα εστιαστεί στο μέσο εποχιακό και ετήσιο κυματικό δυναμικό.



Εικόνα 46 Alghero: Μέσο Εποχιακό Κυματικό Δυναμικό

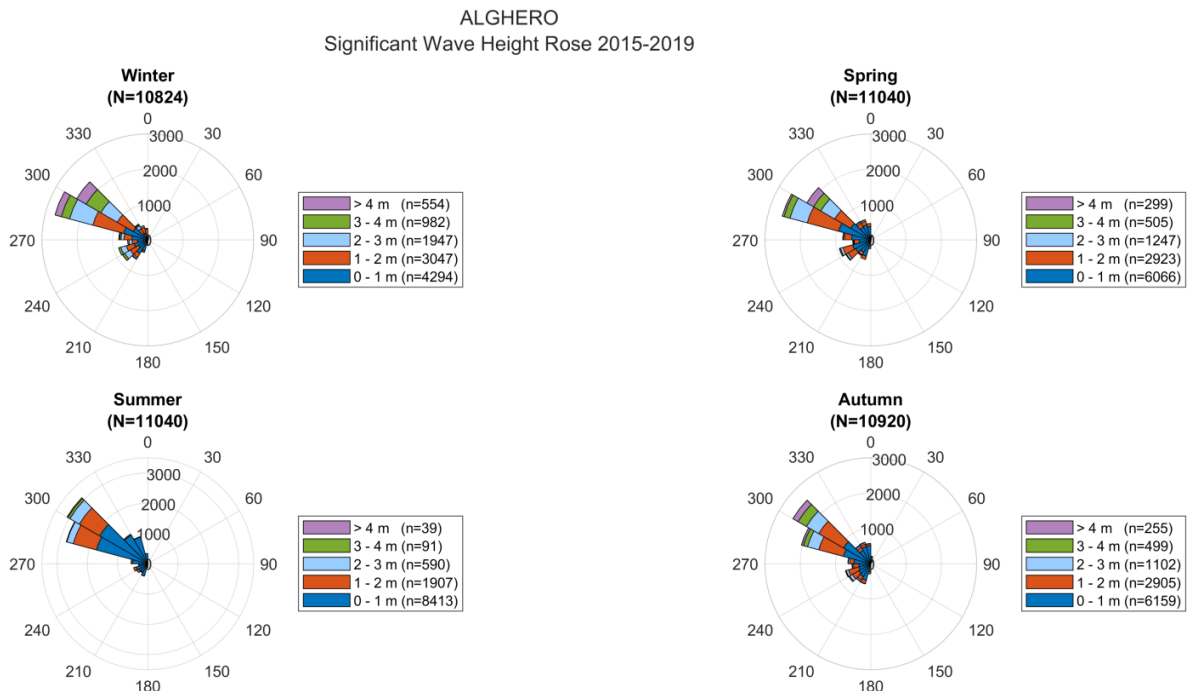
Κατά την χειμερινή περίοδο εμφανίζεται το υψηλότερο κυματικό δυναμικό, με την κυματική ισχύ να υπολογίζεται στα 20 kW/m καθ' όλη την έκταση της περιοχής μελέτης. Η κυματική ισχύς παρουσιάζει μείωση κατά την περίοδο της άνοιξης με μέση τιμή τα 14 kW/m, ενώ η μείωση αυτή του κυματικού δυναμικού διαδέχεται το καλοκαίρι όπου παρατηρείται το χαμηλότερο κυματικό δυναμικό της περιοχής στα 3 kW/m. Τέλος την φθινοπωρινή περίοδο συναντάται μία προοδευτική αύξηση του κυματικού δυναμικού στα 10-11 kW/m.



Εικόνα 47 Alghero: Μέσο Ετήσιο Κυματικό Δυναμικό

Στην ετήσια κατανομή, η μέση ετήσια τιμή του κυματικού δυναμικού εκτιμάται στα 11 kW/m. Η επιλογή του σημείου τοποθέτησης των κυματικών μηχανών έγινε ώστε να πληρείται το υψηλό κυματικό δυναμικό καθώς και οι προδιαγραφές και απαιτήσεις των κυματικών μηχανών για αγκύρωση σε βάθος περίπου 50m. Το σημείο αυτό για την περιοχή μελέτης έχει συντεταγμένες 8.125° E και 40.729° N και βάθος στα -46m ενώ το δυναμικό του εκτιμάται στα 10 - 11 kW/m.

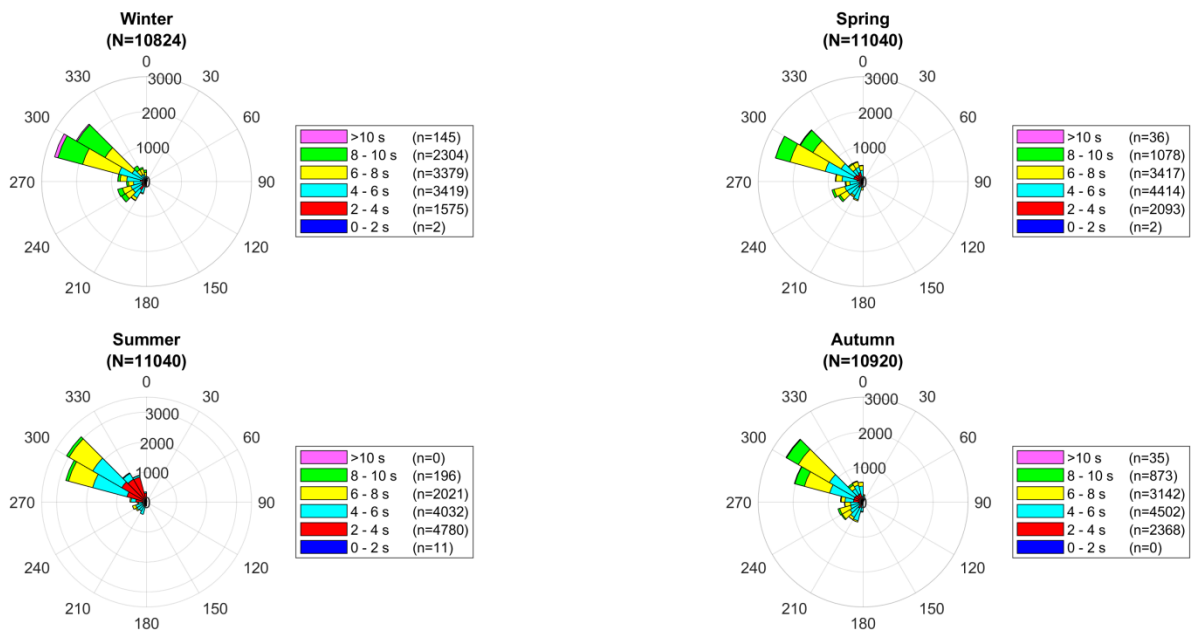
Παρακάτω για το σημείο επιλογής παρουσιάζονται τα ροδογράμματα για το σημαντικό ύψος κύματος και την ενεργειακή περίοδο σε εποχιακή και ετήσια κατανομή, όπως και το ροδογράμμα για την ετήσια κατανομή του κυματικού δυναμικού.



Εικόνα 48 Alghero: Εποχιακά Ροδογράμματα Σημαντικού Ύψους Κύματος

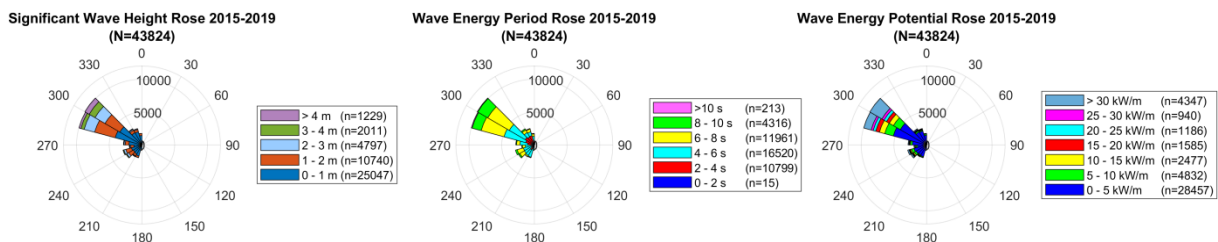
Στα ροδογράμματα του σημαντικού ύψους κύματος παρατηρείται ότι η πλειονότητα της συχνότητας εμφάνισης και διάδοσης των κυμάτων έχει διεύθυνση βορειοδυτικά στον τομέα των [285°, 315°]. Κατά την χειμερινή περίοδο εμφανίζονται τα περισσότερα κύματα με το μεγαλύτερο ύψος. Η επικρατέστερη διεύθυνση είναι στις [285°, 300°] και αποτελεί το 24% όλων των κυμάτων ενώ το ποσοστό εμφάνισης των κυμάτων στον τομέα με διεύθυνση [300°, 315°] αποτελεί το 20%. Την άνοιξη επικρατέστερη διεύθυνση παραμένει αυτή των [285°, 300°] και ακολουθείτε από την διεύθυνση [300°, 315°], με μία μικρή μείωση του αριθμού των συνολικών κυμάτων που εμφανίζονται στις διευθύνσεις αυτές. Σε αντίθεση το καλοκαίρι και το φθινόπωρο αλλάζει η επικρατέστερη διεύθυνση εμφάνισης των κυμάτων στις [300°, 315°]. Τέλος είναι καλό να αναφερθεί η σημαντική μείωση του ύψους των κυμάτων που παρατηρήθηκαν την καλοκαιρινή περίοδο συγκριτικά με τις υπόλοιπες τρεις εποχές.

ALGHERO
Wave Energy Period Rose 2015-2019



Εικόνα 49 Alghero: Εποχικά Ροδογράμματα Ενεργειακής Περιόδου

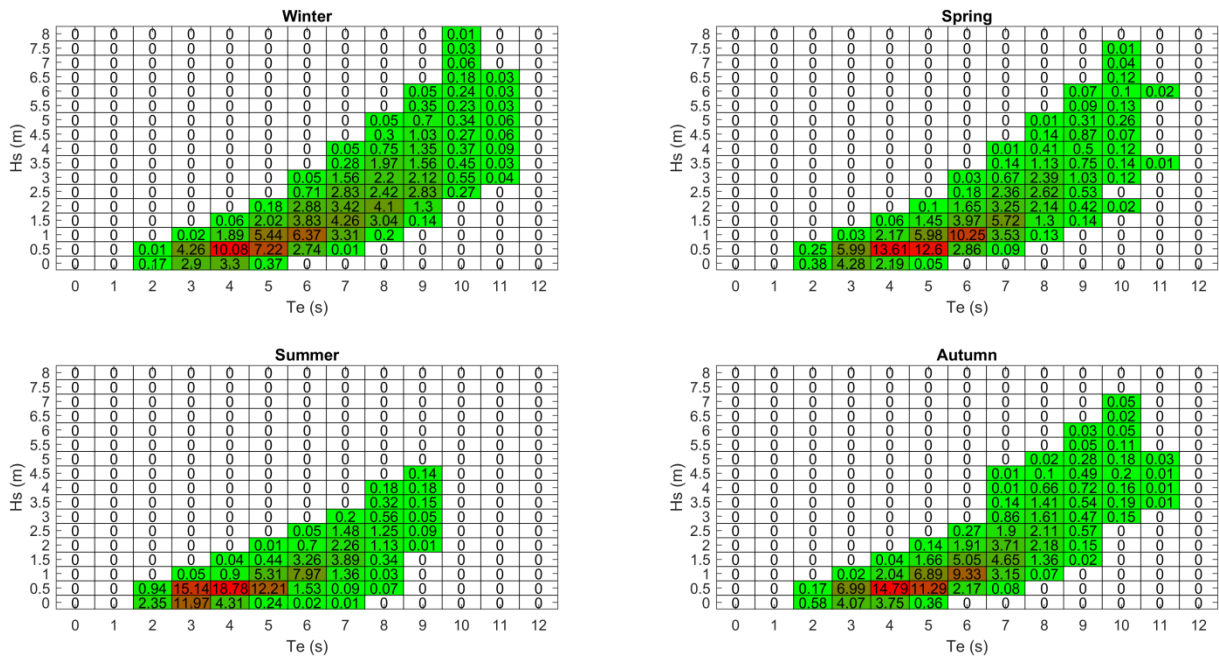
Στα ροδογράμματα της ενεργειακής περιόδου παρατηρείται η ίδια κατανομή με τα ροδογράμματα του σημαντικού ύψους κύματος για κάθε εποχή. Έτσι κατά την περίοδο του χειμώνα εμφανίζονται οι μεγαλύτερες ενεργειακές περιόδους στην διεύθυνση των $[285^\circ, 300^\circ]$, ενώ την καλοκαιρινή περίοδο οι μικρότερες ενεργειακές περιόδους με επικρατέστερη την διεύθυνση των $[300^\circ, 315^\circ]$. Την άνοιξη και το φθινόπωρο οι ενεργειακές περιόδους έχουν παρόμοια ενεργειακή κατανομή με διαφορά την κύρια διεύθυνση εμφάνισης των κυμάτων στις $[285^\circ, 300^\circ]$ και $[300^\circ, 315^\circ]$ αντίστοιχα.



Εικόνα 50 Alghero:Ετήσια Ροδογράμματα Σημαντικού Ύψους Κύματος, Ενεργειακής Περιόδου και Κυματικού Δυναμικού

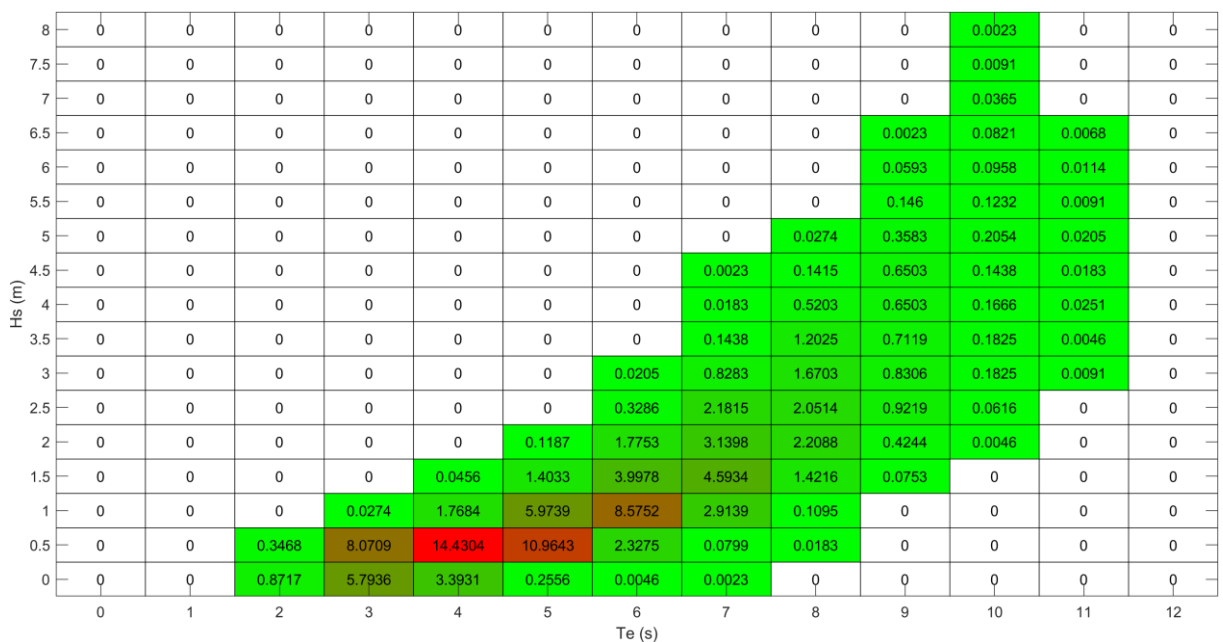
Στα ετήσια ροδογράμματα σημαντικού ύψους, ενεργειακής περιόδου και δυναμικού του κύματος η επικρατέστερη διεύθυνση των κυμάτων πλέον βρίσκεται ανάμεσα στις 285° και 315° με ποσοστό εμφάνισης 46% των συνολικών κυμάτων. Ο μεγαλύτερος αριθμός των κυμάτων κυμαίνεται έως το 1m ύψος με ποσοστό 57%, ενώ η πιο συνήθης ενεργειακή περίοδος κυμαίνεται στα 4 – 6 s με ποσοστό 38%. Τέλος παρατηρείται ότι η επικρατέστερη κατάσταση του κυματικού δυναμικού αποδίδει έως 5 kW/m με ποσοστό επικράτησης 65%.

Εν συνεχεία δημιουργήθηκαν οι πίνακες που συνδυάζουν το σημαντικό ύψος κύματος με την ενεργειακή περίοδο και παρουσιάζουν την συχνότητα εμφάνισης των συνδυασμών αυτών σε εποχιακή και ετήσια κατανομή.



Εικόνα 51 Alghero: Εποχιακοί Πίνακες Κατανομής Συχνότητας Εμφάνισης

Διακρίνεται σε όλα τα διαγράμματα των τεσσάρων εποχών ότι ο συνδυασμός με την μεγαλύτερη συχνότητα εμφάνισης είναι τα κύματα με σημαντικό ύψος κύματος εύρους 0.25 – 0.75 m και ενεργειακή περίοδο 3.5 - 4.5 s. Είναι επίσης χαρακτηριστικό το εύρος των συνδυασμών σημαντικού ύψους κύματος και ενεργειακής περιόδου όπου κατά την περίοδο του χειμώνα, της άνοιξης και του φθινοπώρου είναι μεγάλο συγκριτικά με το καλοκαίρι όπου το εύρος των συνδυασμών αυτών περιορίζεται κατά πολύ, λόγω των μικρών υψών κύματος και ενεργειακών περιόδων.



Εικόνα 52 Alghero: Ετήσιος Πίνακας Κατανομής Συχνότητας Εμφάνισης

Τέλος στο ετήσιο διάγραμμα κατανομής παρουσιάζονται οι συνολικοί συνδυασμοί σημαντικού ύψους και ενεργειακής περιόδου κύματος και η συχνότητα εμφάνισης τους στο σύνολο των 5 ετών που μελετώνται. Ο συνδυασμός με τη μεγαλύτερη συχνότητα εμφάνισης παραμένει ο ίδιος που είδαμε και στην επιμέρους εποχιακή κατανομή με ποσοστό 14.43%. Περαιτέρω πληροφορίες για το σημαντικό ύψος κύματος και την ενεργειακή περίοδο παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα. Χαρακτηριστικές τιμές αποτελούν το μέγιστο σημαντικό ύψος κύματος που ήταν 7.776 m και η μέγιστη ενεργειακή περίοδος 11.309 s, ενώ τα ελάχιστα ήταν 0.073 m και 1.602 s αντίστοιχα.

Ύψος Κύματος					
Μέση Τιμή	Διασπορά	Τυπική Απόκλιση	Min	Max	cv (%)
1.1848	1.1348	1.0653	0.073	7.766	89.91391
Περίοδος					
Μέση Τιμή	Διασπορά	Τυπική Απόκλιση	Min	Max	cv (%)
5.4834	3.2539	1.8038	1.602	11.309	32.89565

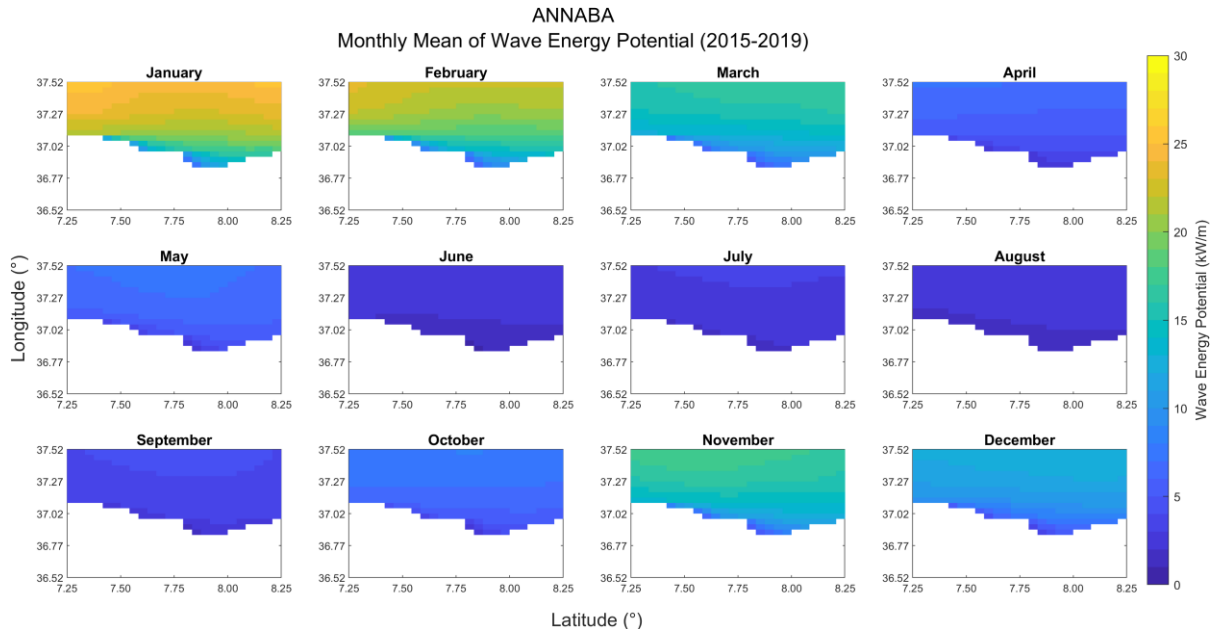
Πίνακας 2 Alghero: Χαρακτηριστικές τιμές του ύψους και της περιόδου των κυμάτων

Annaba

Η Annaba βρίσκεται στο βορειοανατολικό άκρο της Αλγερίας κοντά στην Τυνησία και η περιοχή μελέτης του κυματικού δυναμικού ορίζεται από τις συντεταγμένες: 7.25° W έως 8.25° E και 36.52° S έως 37.52° N. Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης του κυματικού δυναμικού της περιοχής αυτής σε μηνιαία, εποχιακή και ετήσια κατανομή.

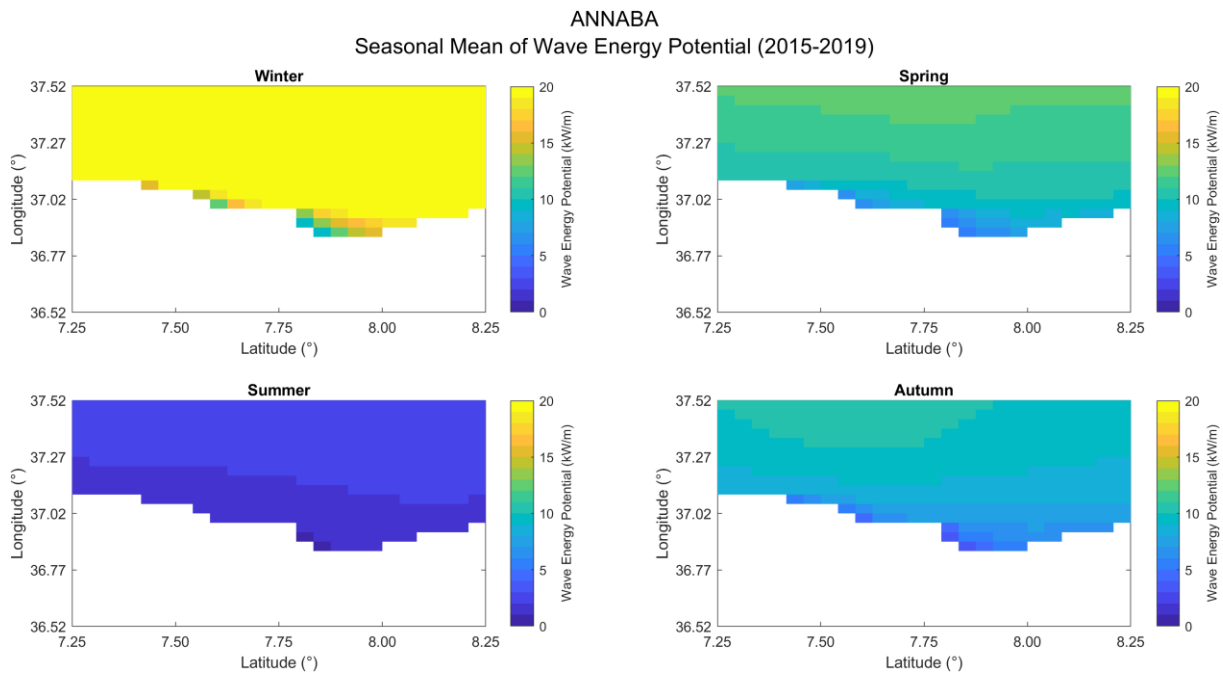


Εικόνα 53 Annaba



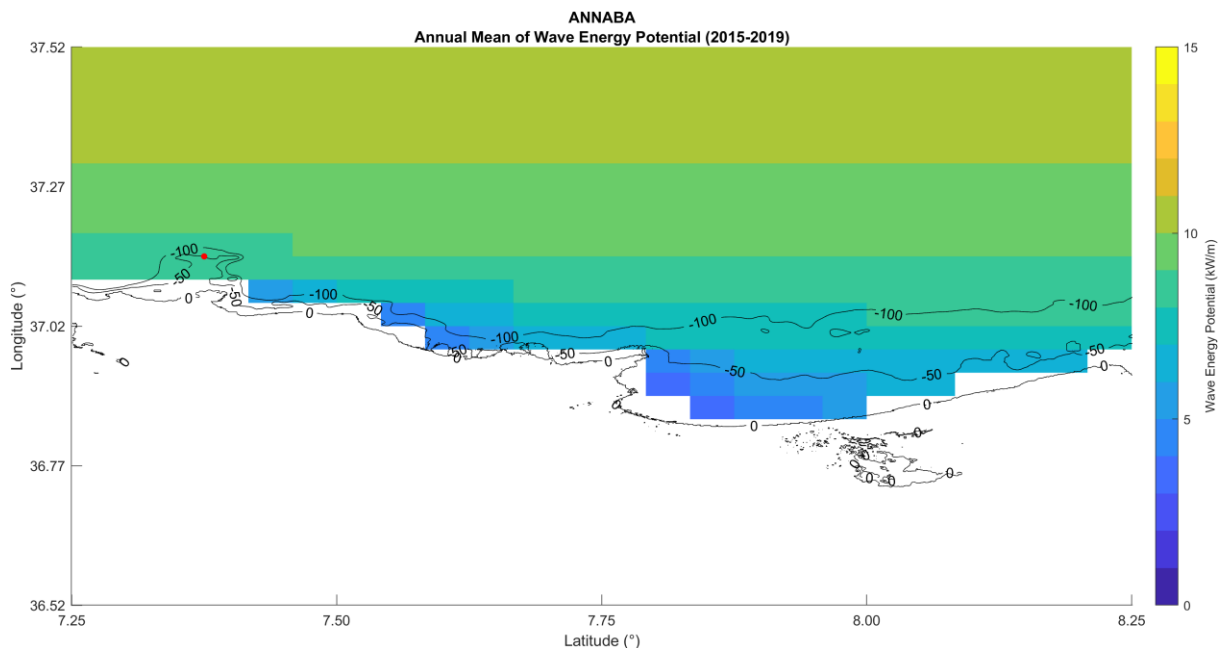
Εικόνα 54 Annaba: Μέσο Μηνιαίο Κυματικό Δυναμικό

Για λόγους πληρότητας παρουσιάζεται η μέση μηνιαία κυματική ισχύς για την απεικόνιση της βαθμωτής μεταβολής του κυματικού δυναμικού. Ωστόσο ο σχολιασμός των αποτελεσμάτων θα εστιαστεί στο μέσο εποχιακό και ετήσιο κυματικό δυναμικό.



Εικόνα 55 Annaba: Μέσο Εποχιακό Κυματικό Δυναμικό

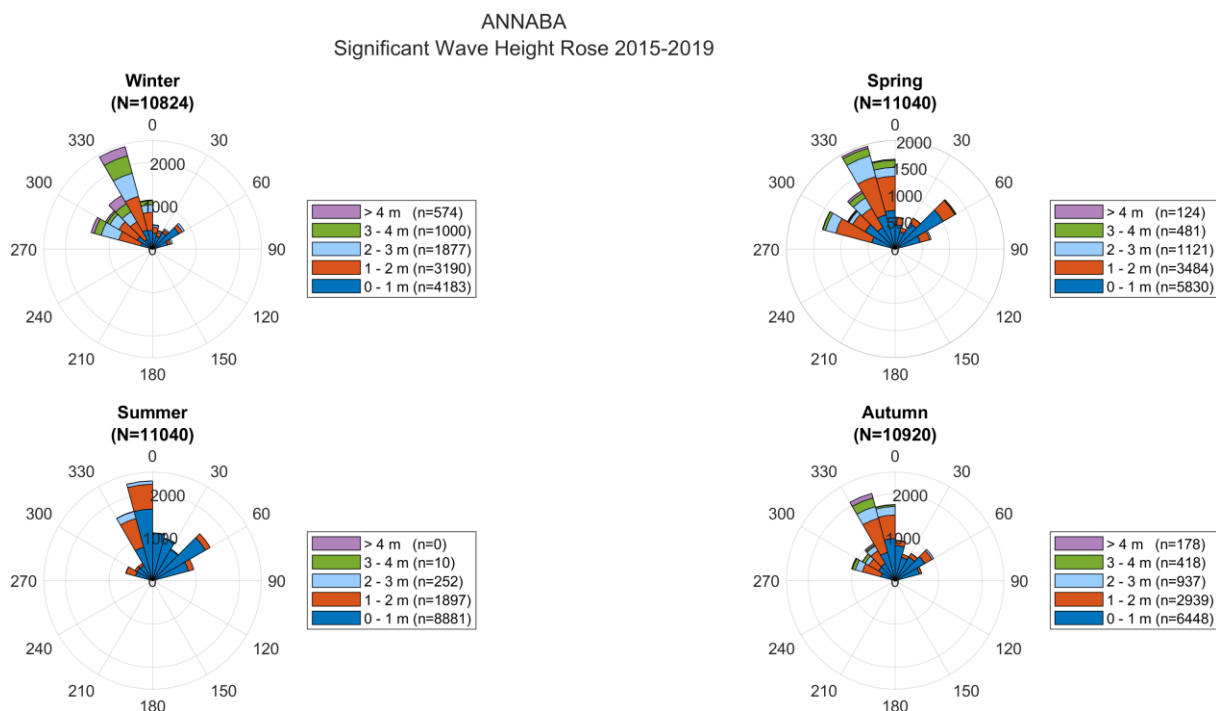
Στην παραπάνω εικόνα που απεικονίζεται η εποχιακή μέση κυματική ισχύς παρατηρείται ότι κατά την χειμερινή περίοδο το κυματικό δυναμικό είναι αυξημένο και η κυματική ισχύς φτάνει τα 20 kW/m καθ' όλη την έκταση της περιοχής μελέτης. Εν συνεχεία οι επόμενες εποχές που διαδέχονται τον χειμώνα σημειώνουν κυματική ισχύ που υπολογίζεται στα $\approx 11-12$ kW/m για την άνοιξη, 2-3 kW/m για το καλοκαίρι και 9-10 kW/m για το φθινόπωρο.



Εικόνα 56 Annaba: Μέσο Ετήσιο Κυματικό Δυναμικό

Όπως παρατηρείται η μέση ετήσια κυματική ισχύς μετά την ανάλυση των δεδομένων υπολογίστηκε στα 9-11 kW/m. Στη συνέχεια αφού συμπεριλήφθηκε η βαθυμετρία της περιοχής περιορίστηκαν τα σημεία που είναι κατάλληλα για την τοποθέτηση των μηχανών, και η τελική επιλογή του σημείου έγινε σε βάθος περίπου 50m. Οι συντεταγμένες του σημείου τοποθέτησης των μηχανών έχει συντεταγμένες 7.375° E και 37.146° N και η μέση κυματική ισχύ είναι 9 kW/m.

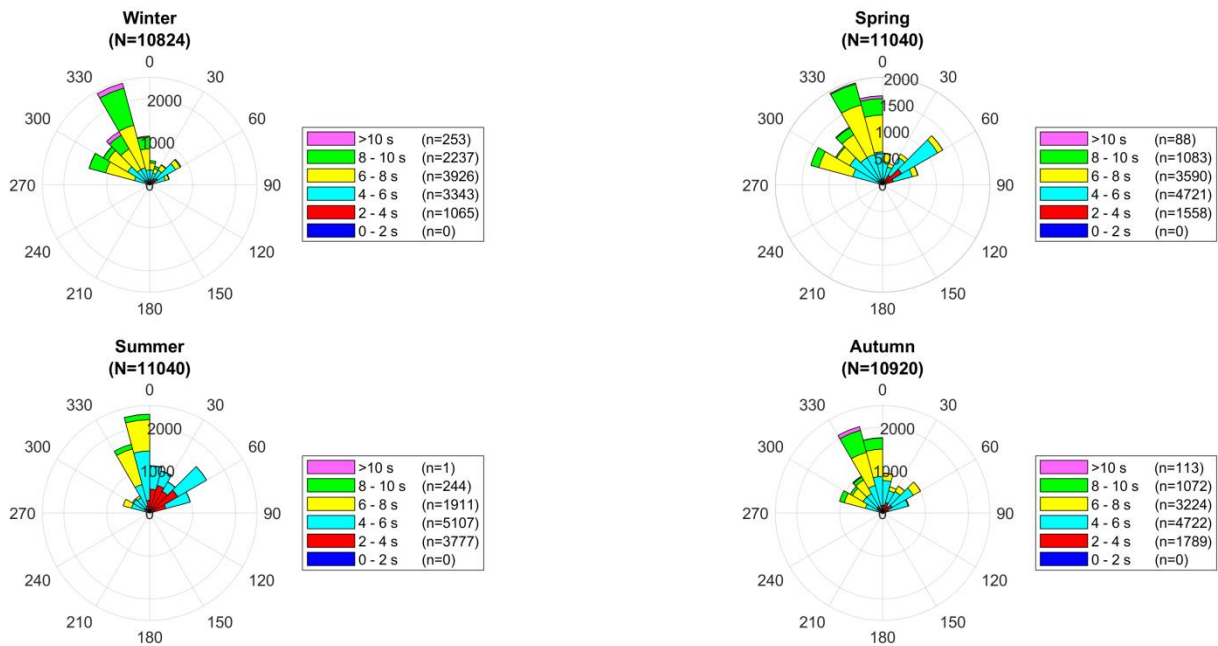
Παρακάτω για το σημείο επιλογής παρουσιάζονται τα ροδογράμματα για το σημαντικό ύψος κύματος και την ενεργειακή περίοδο σε εποχιακή και ετήσια κατανομή, όπως και το ροδόγραμμα για την ετήσια κατανομή του κυματικού δυναμικού.



Εικόνα 57 Annaba: Εποχιακά Ροδογράμματα Σημαντικού Ύψους Κύματος

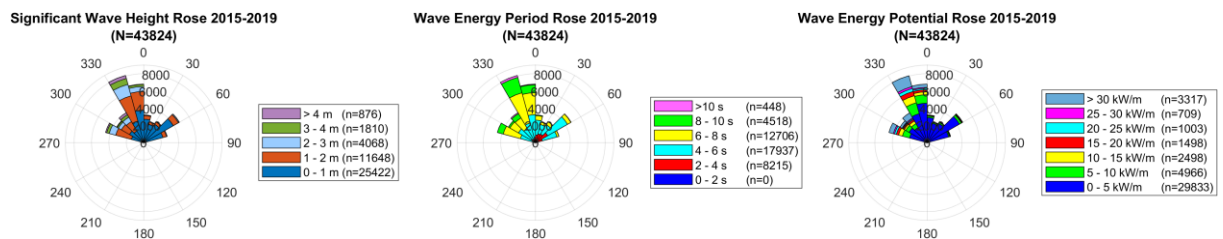
Στα ροδογράμματα του σημαντικού ύψους κύματος παρατηρείται ότι η πλειονότητα της συχνότητας εμφάνισης και διάδοσης των κυμάτων έχει διεύθυνση βορειοδυτικά στον τομέα των $[330^\circ, 0^\circ]$. Κυρίαρχη διεύθυνση μετάδοσης είναι ο τομέας των $[330^\circ, 345^\circ]$ για όλες τις εποχές εκτός από το καλοκαίρι που κυρίαρχη είναι αυτή των $[345^\circ, 0^\circ]$. Είναι εμφανές ότι ανάμεσα στις εποχές υπάρχει μεγάλη ποικιλία διευθύνσεων διάδοσης των κυμάτων, εντοπισμένες σε όλο το εύρος του βόρειου ημισφαιρίου. Κατά την χειμερινή περίοδο παρατηρείται επίσης έντονη κυματική δραστηριότητα με μεγάλο ποσοστό κυμάτων να φτάνουν σε μεγάλο ύψος, συγκριτικά με τις υπόλοιπες εποχές που είναι εμφανώς μειωμένη η παρουσία υψηλών κυμάτων.

ANNABA
Wave Energy Period Rose 2015-2019



Εικόνα 58 Annaba: Εποχικά Ροδογράμματα Ενεργειακής Περιόδου

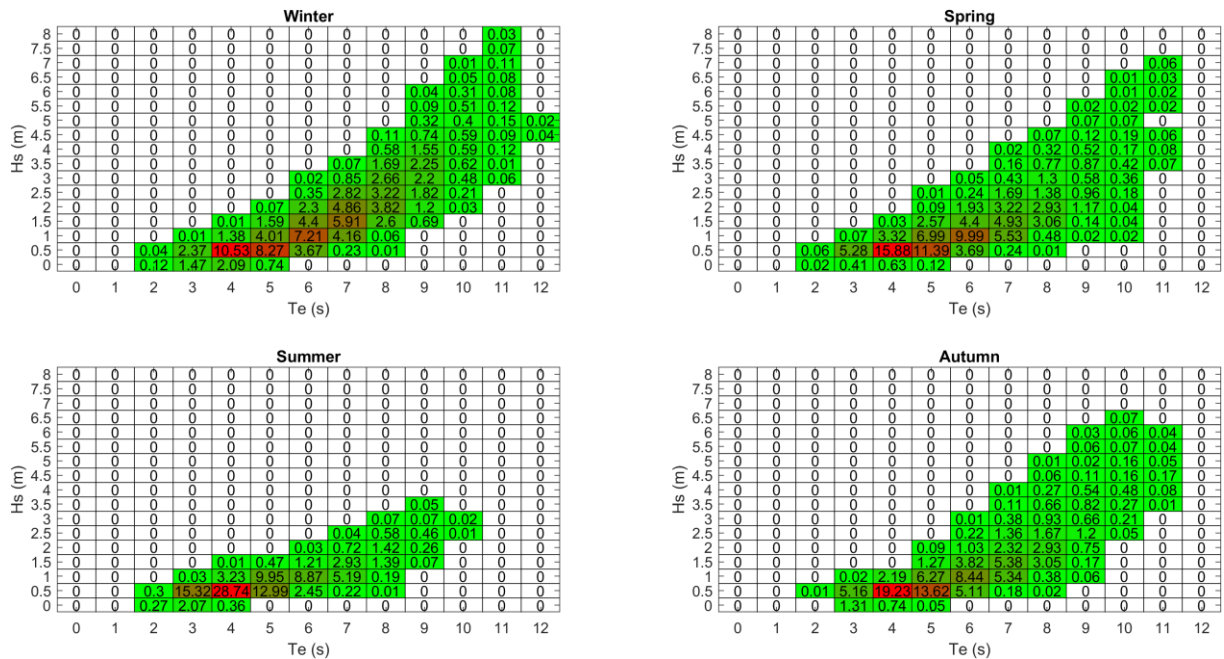
Η κατανομή των ροδογραμμάτων της ενεργειακής περιόδου ακολουθούν την ίδια διαμόρφωση με τα ροδογράμματα του σημαντικού ύψους κύματος σε κάθε εποχή αντίστοιχα. Η επικρατέστερη ενεργειακή περίοδος είναι αυτή των 6 – 8 s για τον χειμώνα με συχνότητα εμφάνισης 36% των συνολικών κυμάτων, ενώ για τις υπόλοιπες εποχές η ενεργειακή περίοδος που επικρατεί είναι στα 4 - 6 s. Συγκεκριμένα για την άνοιξη το ποσοστό εμφάνισης των κυμάτων με περίοδο 4 – 6 s αποτελεί το 43%, για το καλοκαίρι το 46% και για το φθινόπωρο το 43%.



Εικόνα 59 Annaba:Ετήσια Ροδογράμματα Σημαντικού Ύψους Κύματος, Ενεργειακής Περιόδου και Κυματικού Δυναμικού

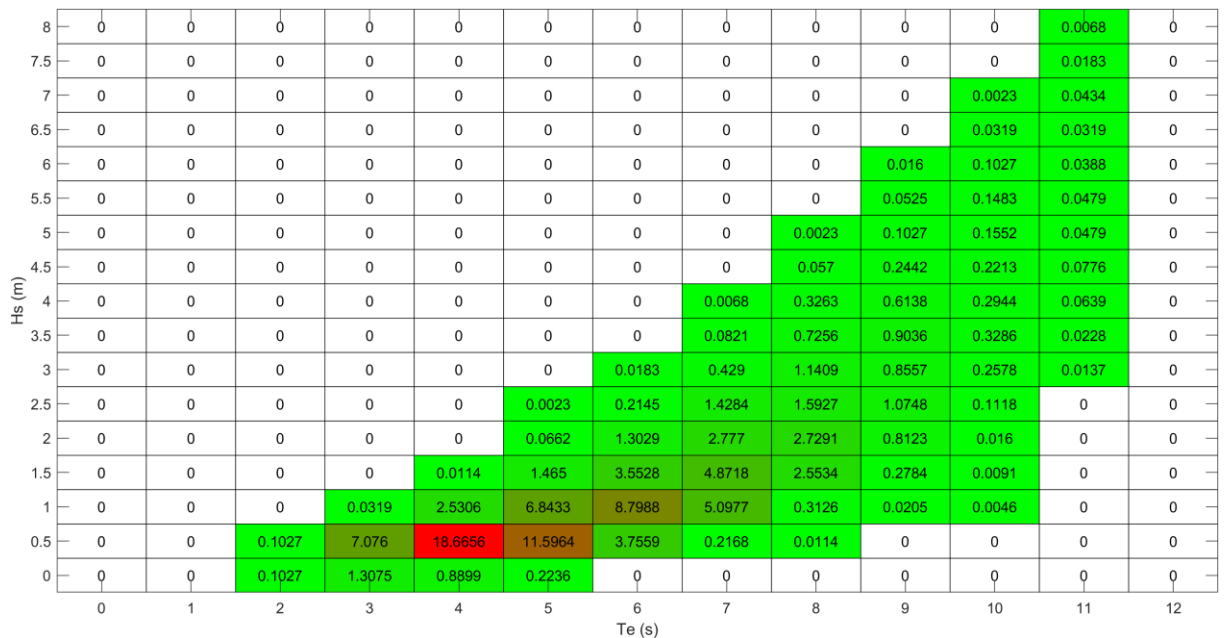
Στα ετήσια ροδογράμματα σημαντικού ύψους, ενεργειακής περιόδου και δυναμικού του κύματος η επικρατέστερη διεύθυνση των κυμάτων βρίσκεται ανάμεσα στις 330° και 345° με ποσοστό εμφάνισης 18% των συνολικών κυμάτων, ενώ για την διεύθυνση [345°, 0°] το ποσοστό εμφάνισης των κυμάτων είναι 16%. Το πιο σύνηθες ύψος κυμάτων που εμφανίζεται κυμαίνεται έως το 1 m ύψος με ποσοστό 58%, ενώ η πιο συνήθης ενεργειακή περίοδος κυμαίνεται στα 4 – 6 s με ποσοστό 41%. Τέλος παρατηρείται ότι η επικρατέστερη κατάσταση του κυματικού δυναμικού αποδίδει έως 5 kW/m με ποσοστό επικράτησης 68%.

Στη συνέχεια δημιουργήθηκαν οι πίνακες που συνδυάζουν το σημαντικό ύψος κύματος με την ενεργειακή περίοδο και παρουσιάζουν την συχνότητα εμφάνισης των συνδυασμών αυτών σε εποχιακή και ετήσια κατανομή.



Εικόνα 60 Annaba: Εποχιακοί Πίνακες Κατανομής Συχνότητας Εμφάνισης

Όσον αφορά τους εποχιακούς πίνακες κατανομής της συχνότητας εμφάνισης, ο επικρατέστερος συνδυασμός σημαντικού ύψους κύματος και ενεργειακής περιόδου έχει τιμές εύρους 0.25 – 0.75 m και 3.5 - 4.5 s αντίστοιχα.



Εικόνα 61 Annaba: Ετήσιος Πίνακας Κατανομής Συχνότητας Εμφάνισης

Τέλος στο ετήσιο διάγραμμα κατανομής, ο συνδυασμός με τη μεγαλύτερη συχνότητα εμφάνισης παραμένει ο ίδιος που είδαμε και στις εποχιακές κατανομές παραπάνω με ποσοστό

18.67%. Περαιτέρω πληροφορίες για το σημαντικό ύψος κύματος και την ενεργειακή περίοδο παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα για το σύνολο των 5 ετών που μελετώνται.. Χαρακτηριστικές τιμές αποτελούν το μέγιστο σημαντικό ύψος κύματος που ήταν 8.408 m και η μέγιστη ενεργειακή περίοδος 11.483 s, ενώ τα ελάχιστα ήταν 0.111 m και 2.01 s αντίστοιχα.

Ύψος Κύματος					
Μέση Τιμή	Διασπορά	Τυπική Απόκλιση	Min	Max	cv (%)
1.169	0.9246	0.9615	0.111	8.408	82.24979
Περίοδος					
Μέση Τιμή	Διασπορά	Τυπική Απόκλιση	Min	Max	cv (%)
5.675	3.0303	1.7408	2.01	11.483	30.67489

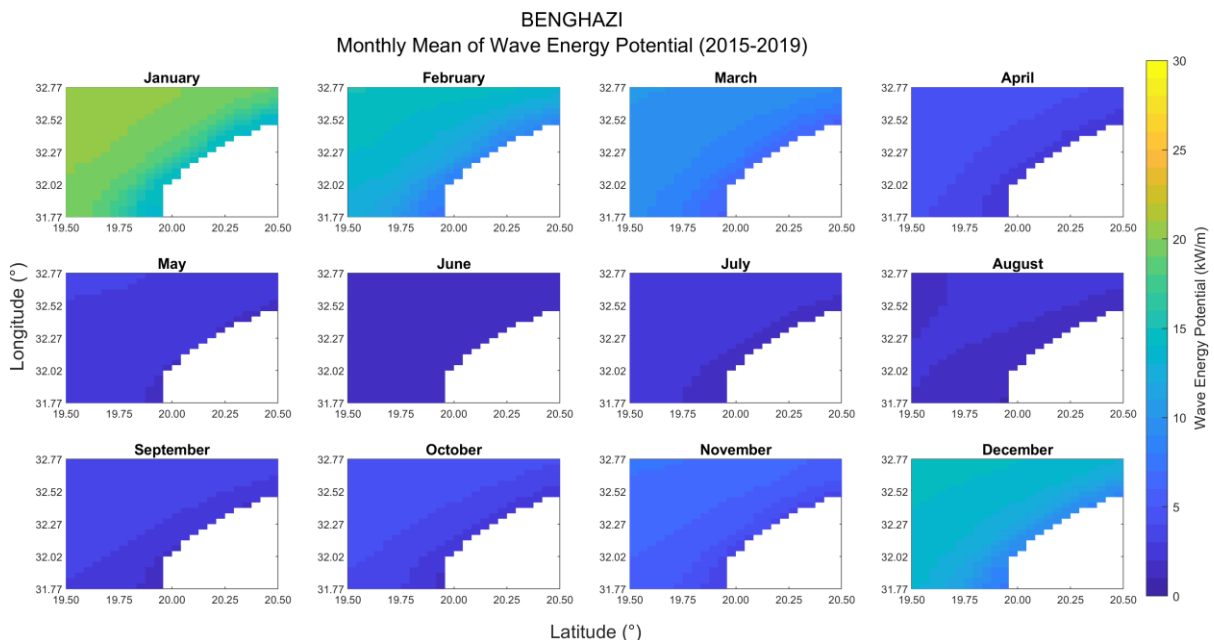
Πίνακας 3 Αηθαα: Χαρακτηριστικές τιμές του ύψους και της περιόδου των κυμάτων

Benghazi

Η Benghazi βρίσκεται στην Λιβύη κοντά στον κόλπο της Σύρτης και η περιοχή μελέτης του κυματικού δυναμικού ορίζεται από τις συντεταγμένες: 19.5° W έως 20.5° E και 31.77° S έως 32.77° N. Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης του κυματικού δυναμικού της περιοχής αυτής σε μηνιαία, εποχιακή και ετήσια κατανομή.

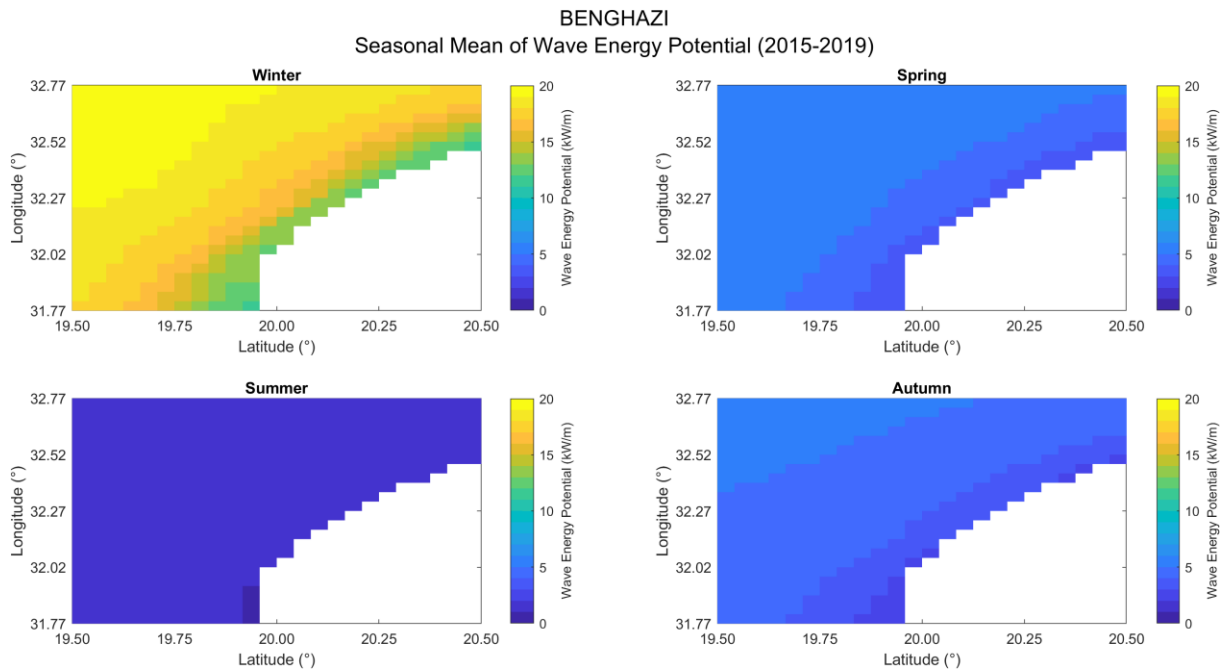


Εικόνα 62 Benghazi



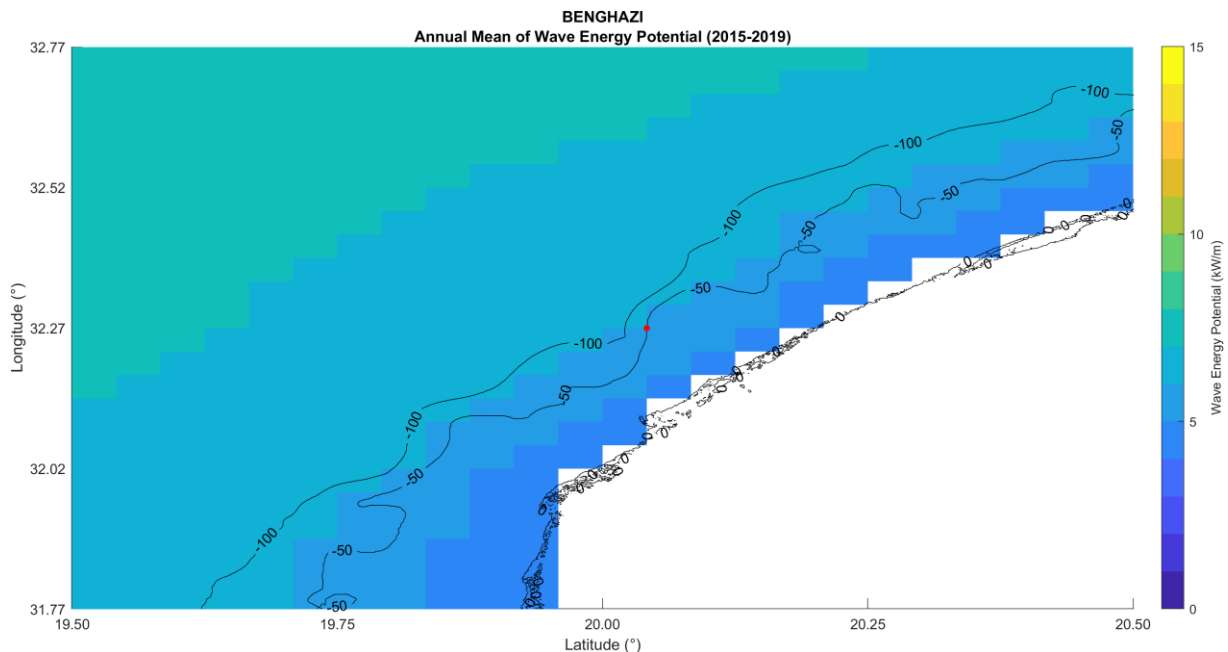
Εικόνα 63 Benghazi: Μέσο Μηνιαίο Κυματικό Δυναμικό

Για λόγους πληρότητας παρουσιάζεται η μέση μηνιαία κυματική ισχύς για την απεικόνιση της βαθμιδωτής μεταβολής του κυματικού δυναμικού. Ωστόσο ο σχολιασμός των αποτελεσμάτων θα εστιαστεί στο μέσο εποχιακό και ετήσιο κυματικό δυναμικό.



Εικόνα 64 Benghazi: Μέσο Εποχιακό Κυματικό Δυναμικό

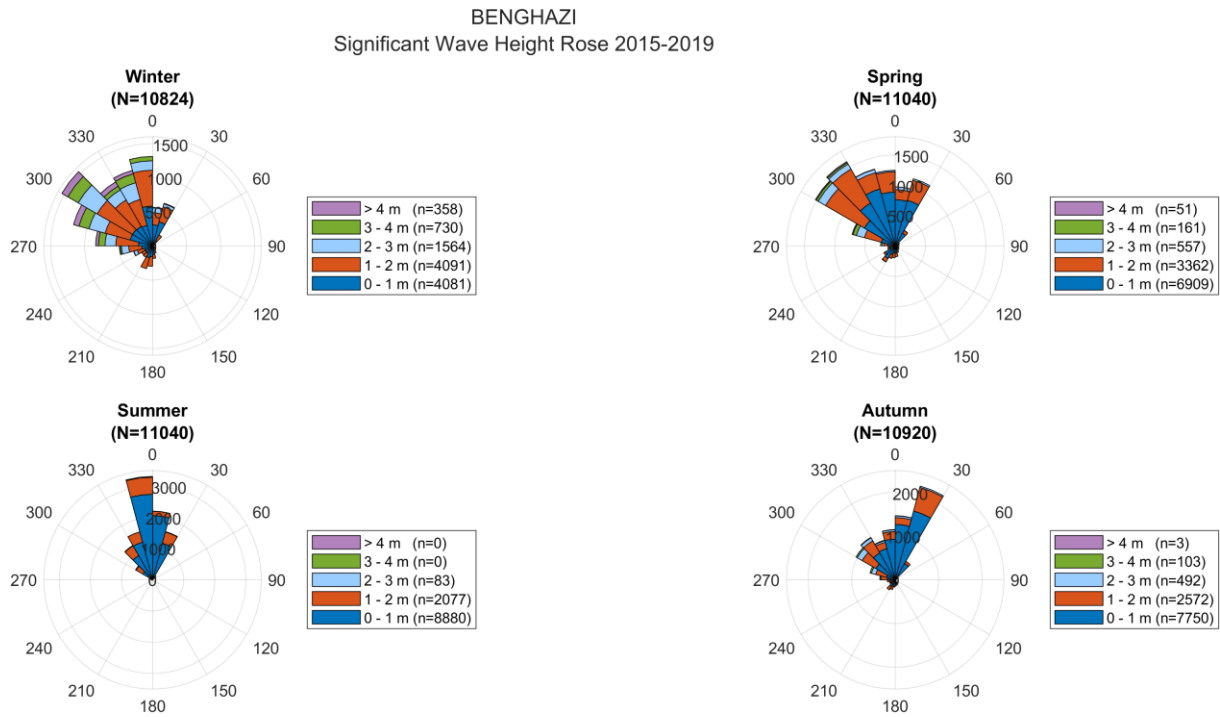
Για την περιοχή μελέτης Benghazi παρατηρείται μεγάλη μεταβλητότητα του κυματικού δυναμικού ανάμεσα στο χειμώνα και στις υπόλοιπες περιοχές. Συγκεκριμένα η μέση κυματική ισχύς κατά την χειμερινή περίοδο κυμαίνεται στα ≈ 18 kW/m ενώ για τις υπόλοιπες περιοχές πέφτει κατακόρυφα. Έτσι για την άνοιξη η κυματική ισχύς υπολογίζεται στα 5-6 kW/m, το καλοκαίρι στα 2 kW/m και το φθινόπωρο στα 5 kW/m.



Εικόνα 65 Benghazi: Μέσο Ετήσιο Κυματικό Δυναμικό

Η μεγάλη μεταβλητότητα της μέσης εποχιακής ισχύς έχει ως αποτέλεσμα την μειωμένη μέση ετήσια κυματική ισχύ που εκτιμάται στα 7 kW/m. Για την αναζήτηση του βέλτιστου σημείου τοποθέτησης των κυματικών μηχανών και λαμβάνοντας υπόψη την βαθυμετρία της περιοχής, επιλέχθηκε το σημείο με συντεταγμένες 20.042° E και 32.271° N, μέση κυματική ισχύ στα 7 kW/m και βάθος 48m.

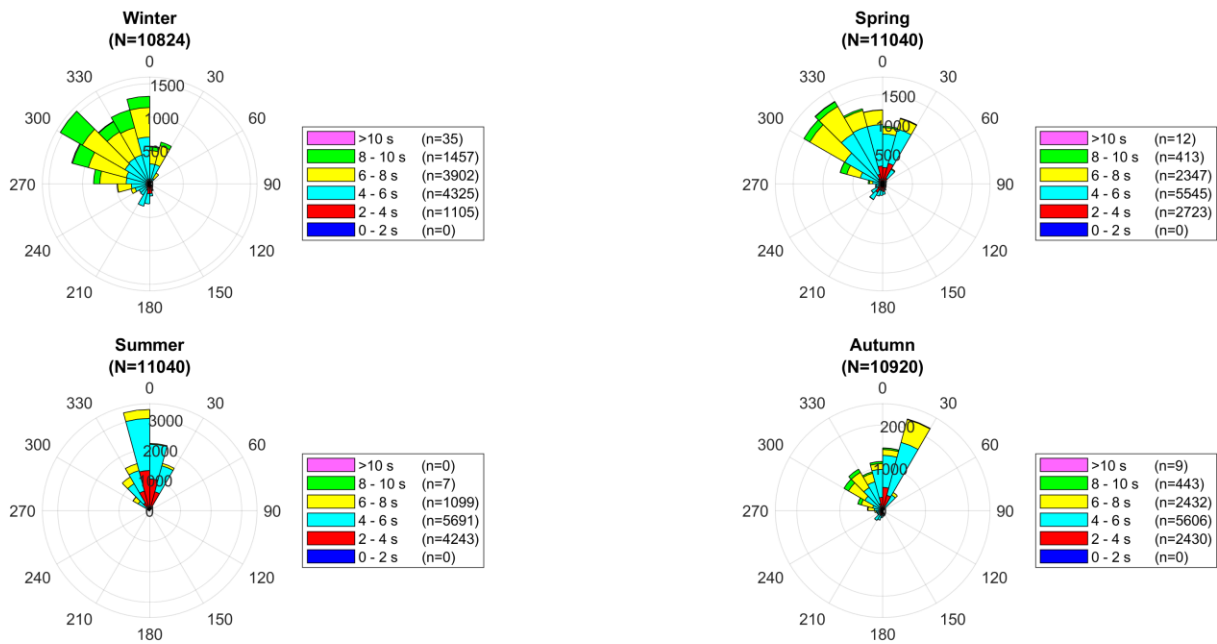
Παρακάτω για το σημείο επιλογής παρουσιάζονται τα ροδογράμματα για το σημαντικό ύψος κύματος και την ενεργειακή περίοδο σε εποχιακή και ετήσια κατανομή, όπως και το ροδόγραμμα για την ετήσια κατανομή του κυματικού δυναμικού.



Εικόνα 66 Benghazi: Εποχιακά Ροδογράμματα Σημαντικού Ύψους Κύματος

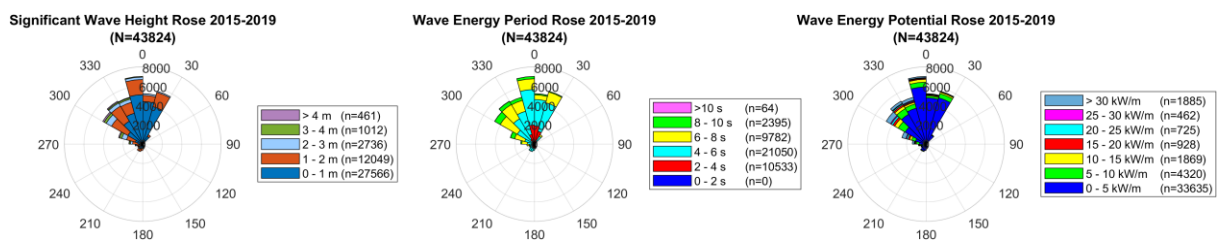
Όσον αφορά τα ροδογράμματα παρουσιάζουν εξίσου μία μεγάλη ποικιλομορφία στην εποχιακή τους κατανομή. Διακρίνεται ότι οι κυρίαρχες διευθύνσεις διάδοσης των κυμάτων διαφέρουν ανάλογα την εποχή. Έτσι για τον χειμώνα ο κυρίαρχος τομέας διεύθυνσης των κυμάτων είναι στις $[285^\circ, 0^\circ]$, για την άνοιξη στις $[300^\circ, 30^\circ]$, για το καλοκαίρι στις $[345^\circ, 0^\circ]$ και για το φθινόπωρο στις $[15^\circ, 30^\circ]$. Επίσης τον χειμώνα υπάρχει μία πιο έντονη κυματική δραστηριότητα με μεγάλο ποσοστό εμφάνισης κυμάτων υψηλού σημαντικού ύψους συγκριτικά με τις υπόλοιπες εποχές. Συγκεκριμένα τον χειμώνα μοιράζονται τα ποσοστά εμφάνισης για κύματα διάφορων υψών ενώ για όλες τις υπόλοιπες εποχές τα μεγαλύτερα ποσοστά κυμάτων εστιάζονται στα ύψη $0 - 1$ m.

BENGAZI
Wave Energy Period Rose 2015-2019



Εικόνα 67 Benghazi: Εποχικά Ροδογράμματα Ενεργειακής Περιόδου

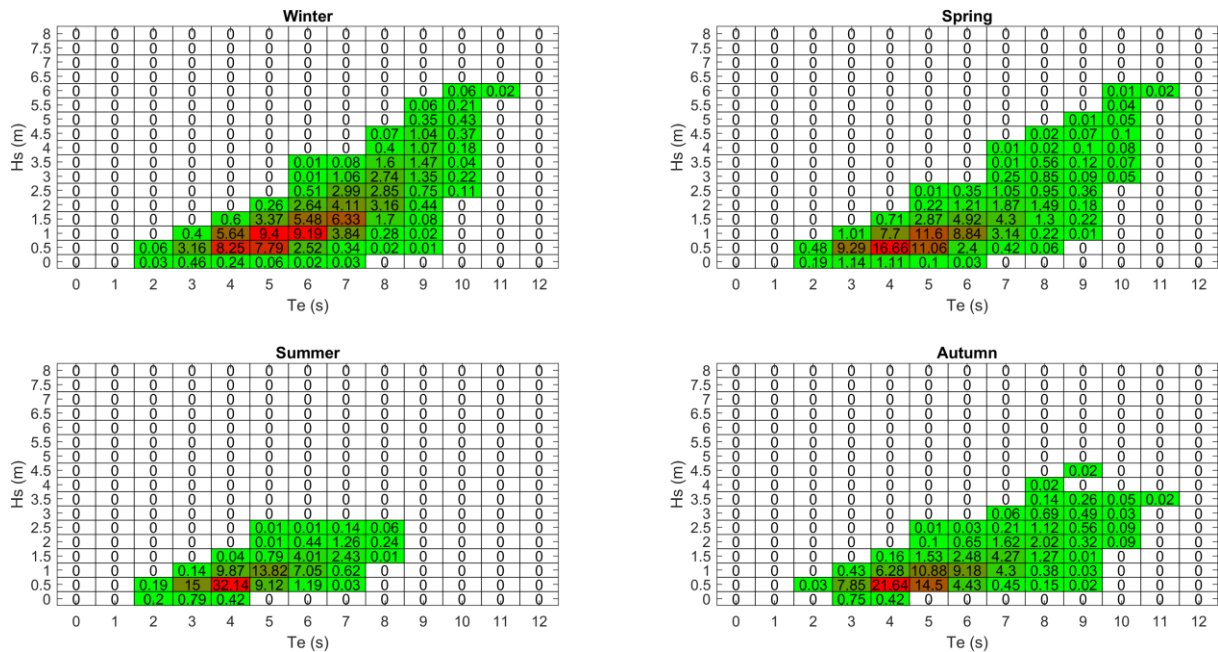
Όπως και στα ροδογράμματα του σημαντικού ύψους κύματος, έτσι και τα ροδογράμματα της ενεργειακής περιόδου παρουσιάζουν για τον χειμώνα πιο ισχυρή δραστηριότητα. Ενδιαφέρον παρουσιάζει η ενεργειακή περίοδος των 6 – 8 s όπου τον χειμώνα έχει μία αυξημένη εμφάνιση με ποσοστό 14%. Ωστόσο η επικρατέστερη ενεργειακή περίοδος όλων των εποχών είναι αυτή των 4 – 6 s.



Εικόνα 68 Benghazi: Ετήσια Ροδογράμματα Σημαντικού Ύψους Κύματος, Ενεργειακής Περιόδου και Κυματικού Δυναμικού

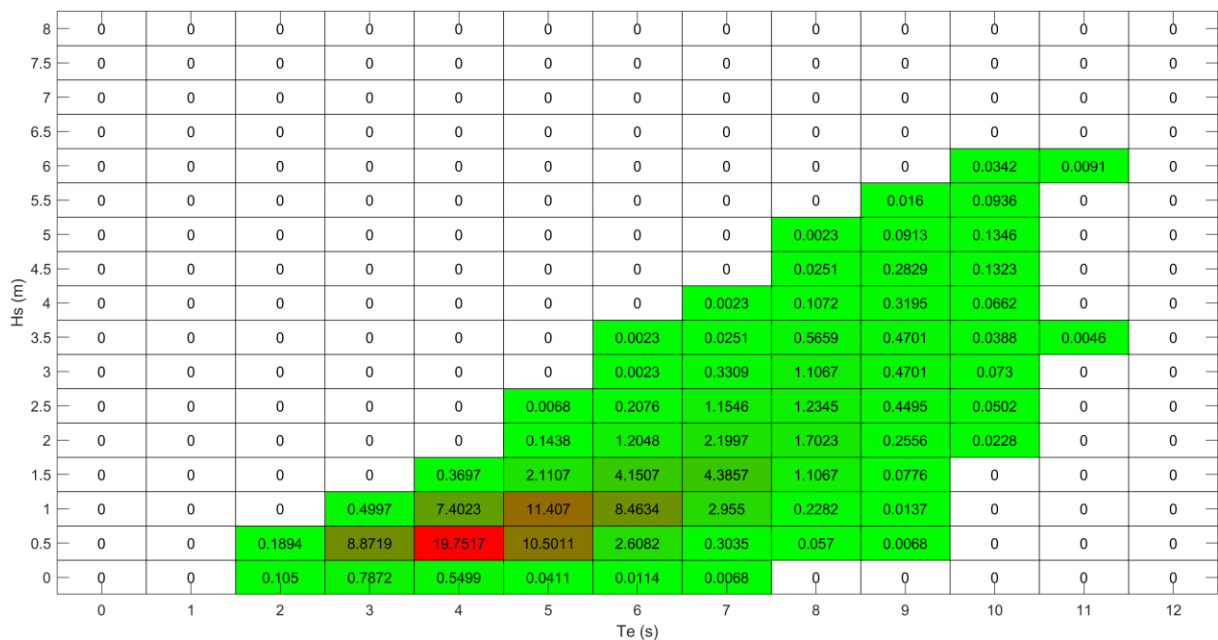
Στην ετήσια κατανομή των ροδογραμμάτων του σημαντικού ύψους, της ενεργειακής περιόδου και του δυναμικού του κύματος η επικρατέστερη διεύθυνση των κυμάτων είναι αυτή των $[345^\circ, 0^\circ]$ και αποτελεί το 16% των συνολικών κυμάτων. Παρατηρείται ότι το συνηθέστερο ύψος κύματος για την περίοδο μελέτης είναι έως 1 m με ποσοστό εμφάνισης 63%, η συνηθέστερη ενεργειακή περίοδος είναι 4 – 6 s με ποσοστό 48% και το επικρατέστερο κυματικό δυναμικό 5 kW/m με ποσοστό 77%.

Στη συνέχεια δημιουργήθηκαν οι πίνακες που συνδυάζουν το σημαντικό ύψος κύματος με την ενεργειακή περίοδο και παρουσιάζουν την συχνότητα εμφάνισης των συνδυασμών αυτών σε εποχιακή και ετήσια κατανομή.



Εικόνα 69 Benghazi: Εποχιακοί Πίνακες Κατανομής Συχνότητας Εμφάνισης

Στους εποχιακούς πίνακες κατανομής της συχνότητας εμφάνισης παρατηρείται ότι για όλες τις εποχές εκτός του χειμώνα ο συνδυασμός με την υψηλότερη συχνότητα εμφάνισης είναι τα κύματα με σημαντικό ύψος κύματος εύρους 0.25 – 0.75 m και ενεργειακή περίοδο 3.5 - 4.5 s. Σε αντίθεση διακρίνεται πως στην περίπτωση του χειμώνα ο επικρατέστερος συνδυασμός ποικίλει σε ένα εύρος και με μικρή διαφορά υπερσιχύει αυτός με σημαντικό ύψος κύματος εύρους 0.75 – 1.25 m και ενεργειακή περίοδο 4.5 - 5.5 s.



Εικόνα 70 Benghazi: Ετήσιος Πίνακας Κατανομής Συχνότητας Εμφάνισης

Ο συνδυασμός σημαντικού ύψους και ενεργειακής περιόδου κύματος με τη μεγαλύτερη συχνότητα εμφάνισης στο ετήσιο διάγραμμα κατανομής της, είναι τα κύματα εύρους 0.25 – 0.75 m και ενεργειακή περίοδο 3.5 - 4.5 s με ποσοστό 19.75%. Περαιτέρω πληροφορίες για το σημαντικό ύψος κύματος και την ενεργειακή περίοδο παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα. Χαρακτηριστικές τιμές αποτελούν το μέγιστο σημαντικό ύψος κύματος που ήταν 6.091 m και η μέγιστη ενεργειακή περίοδος 11.128 s, ενώ τα ελάχιστα ήταν 0.091 m και 2.047 s αντίστοιχα.

Ύψος Κύματος					
Μέση Τιμή	Διασπορά	Τυπική Απόκλιση	Min	Max	cv (%)
1.0465	0.5758	0.7588	0.091	6.091	72.50836
Περίοδος					
Μέση Τιμή	Διασπορά	Τυπική Απόκλιση	Min	Max	cv (%)
5.2147	2.3144	1.5213	2.047	11.128	29.1733

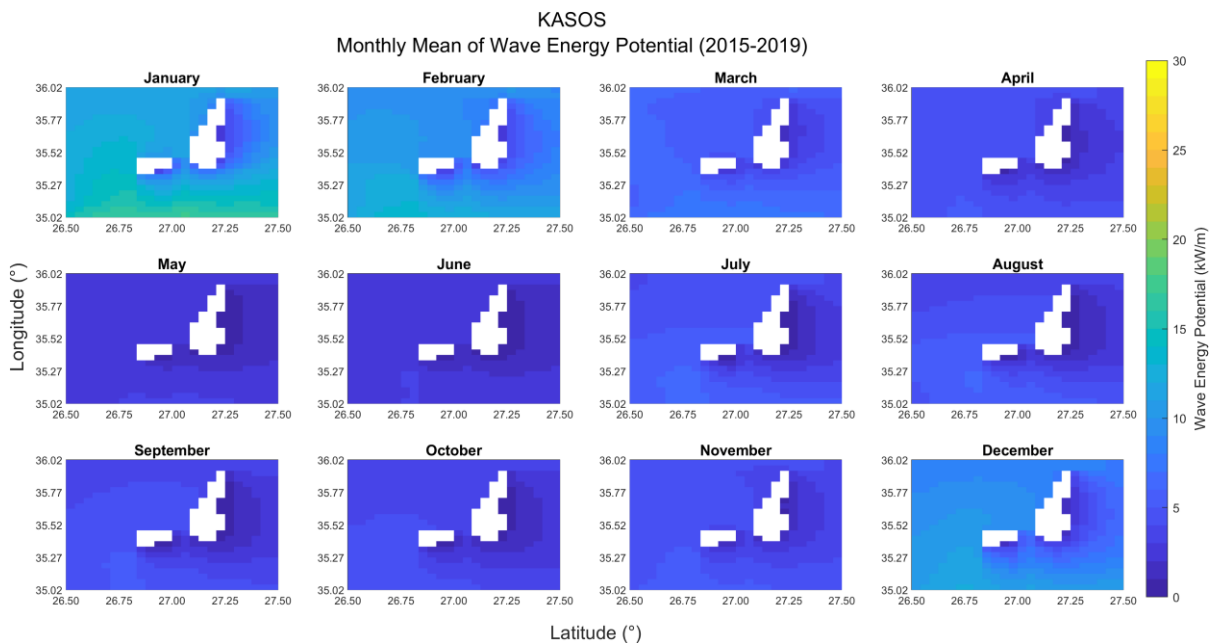
Πίνακας 4 Benghazi: Χαρακτηριστικές τιμές του ύψους και της περιόδου των κυμάτων

Κάσος

Η Κάσος υπάγεται στα Δωδεκάνησα και βρίσκεται στο νοτιοανατολικό μέρος της Ελλάδας, ανάμεσα στην Κρήτη και στην Κάρπαθο. Η περιοχή μελέτης του κυματικού δυναμικού ορίζεται από τις συντεταγμένες: 26.5° W έως 27.5° E και 35.02° S έως 36.02° N. Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης του κυματικού δυναμικού της περιοχής αυτής σε μηνιαία, εποχιακή και ετήσια κατανομή.

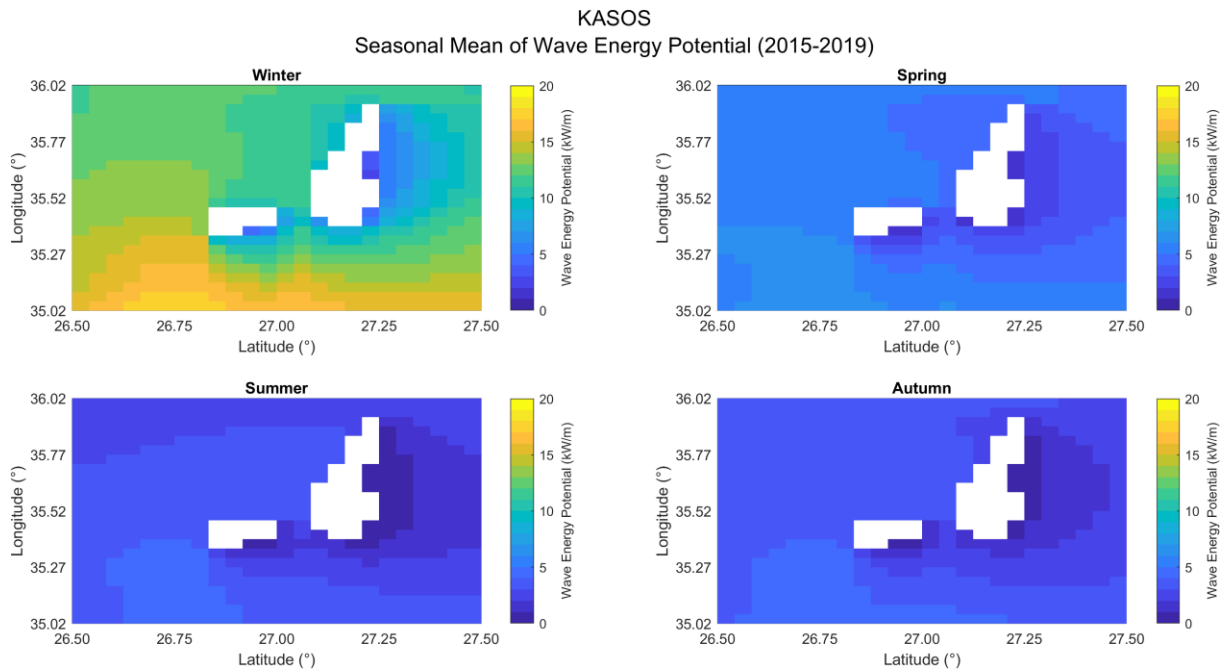


Εικόνα 71 Κάσος



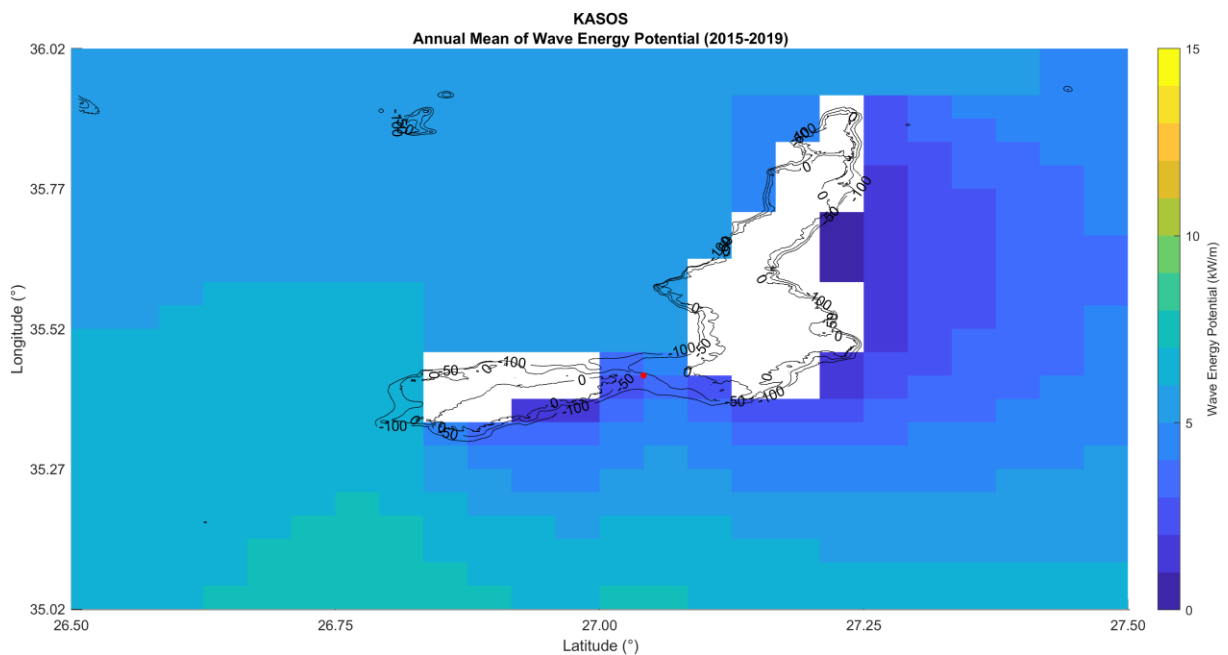
Εικόνα 72 Κάσος: Μέσο Μηνιαίο Κυματικό Δυναμικό

Για λόγους πληρότητας παρουσιάζεται η μέση μηνιαία κυματική ισχύς για την απεικόνιση της βαθμιδωτής μεταβολής του κυματικού δυναμικού. Ωστόσο ο σχολιασμός των αποτελεσμάτων θα εστιαστεί στο μέσο εποχιακό και ετήσιο κυματικό δυναμικό.



Εικόνα 73 Κάσος: Μέσο Εποχιακό Κυματικό Δυναμικό

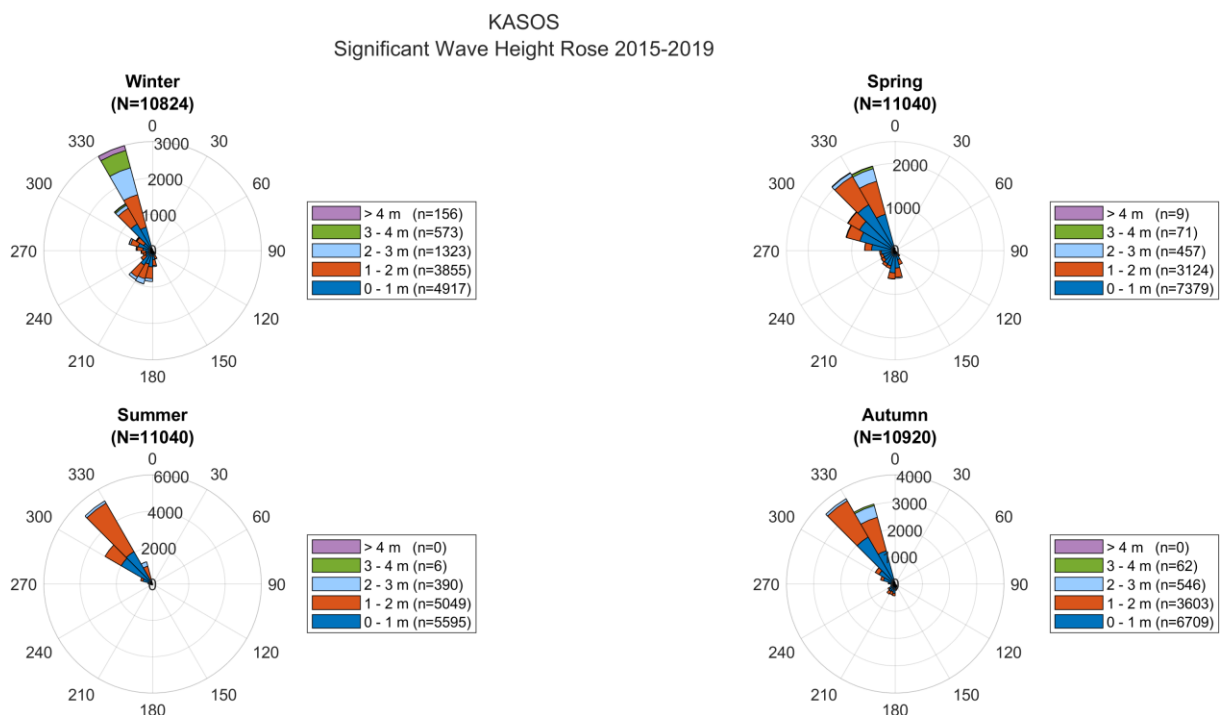
Παρατηρείται ότι στην περιοχή μελέτης η μέση εποχιακή κατανομή της κυματικής ισχύς καλύπτει ένα μεγάλο εύρος τιμών, επομένως δεν μπορεί να χαρακτηριστεί εξ' ολοκλήρου η περιοχή από μία μόνο τιμή. Ενδεικτικά το εύρος της κυματικής ισχύς για κάθε εποχή, αντιστοιχεί στα 9 – 15 kW/m για τον χειμώνα, 4 – 7 kW/m για την άνοιξη και 2 – 5 kW/m το καλοκαίρι και το φθινόπωρο. Διαπιστώνεται ότι τον χειμώνα το κυματικό δυναμικό είναι εμφανώς αυξημένο συγκριτικά με την άνοιξη που υπάρχει μία πτώση περίπου στα μισά kW/m και εν συνεχεία το καλοκαίρι και το φθινόπωρο όπου το κυματικό δυναμικό είναι ελάχιστο.



Εικόνα 74 Κάσος: Μέσο Ετήσιο Κυματικό Δυναμικό

Το εύρος τιμών της μέσης ετήσιας κυματικής ισχύς ορίζεται στα 4 – 7 kW/m. Λόγω της έντονης βαθυμετρίας και της απότομης κλίσης του υποθαλάσσιου πρανού, η επιλογή του σημείου τοποθέτησης των κυματικών μηχανών περιορίστηκαν σημαντικά. Έτσι το καταλληλότερο σημείο επιλογής ορίστηκε από τις συντεταγμένες 27.042 ° E και 35.438 ° N με βάθος -54 m, όπου το κυματικό δυναμικό είναι αρκετά μειωμένο με τιμή στα 4 – 5 kW/m.

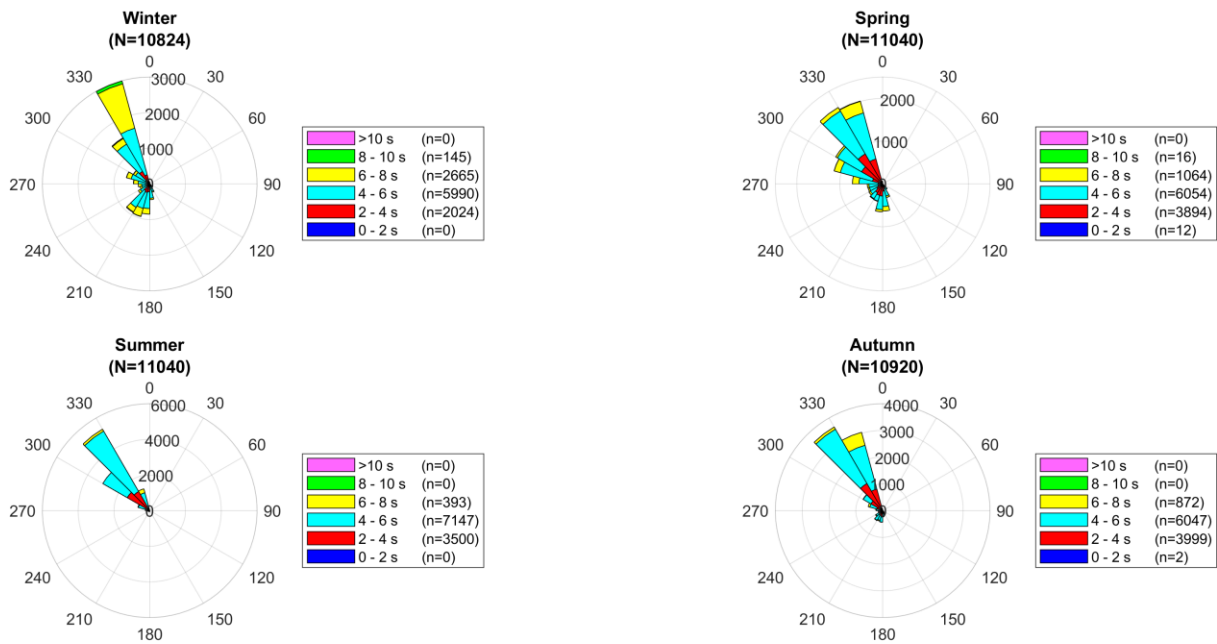
Παρακάτω για το σημείο επιλογής παρουσιάζονται τα ροδογράμματα για το σημαντικό ύψος κύματος και την ενεργειακή περίοδο σε εποχιακή και ετήσια κατανομή, όπως και το ροδόγραμμα για την ετήσια κατανομή του κυματικού δυναμικού.



Εικόνα 75 Κάσος: Εποχιακά Ροδογράμματα Σημαντικού Ύψους Κύματος

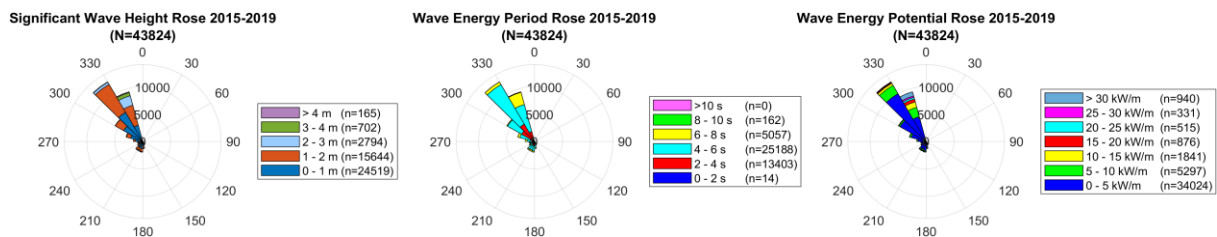
Σύμφωνα με τα ροδογράμματα του σημαντικού ύψους κύματος παρατηρείται ότι η πλειονότητα της συχνότητας εμφάνισης και διάδοσης των κυμάτων έχει διεύθυνση στον τομέα των [315°, 345°]. Ο τομέας διεύθυνσης [330°, 345°] κατά την χειμερινή περίοδο αποτελεί τον τομέα με το μεγαλύτερο ποσοστό εμφάνισης ύψους 28%. Επιπλέον είναι η διεύθυνση όπου εμφανίζονται τα περισσότερα κύματα με το μεγαλύτερο σημαντικό ύψος. Συγκεκριμένα τα κύματα με ύψος έως 1 m αποτελούν το 22%, από 1 – 2 m το 31%, από 2 – 3 m το 24%, από 3 – 4 m το 18% ενώ τα κύματα με ύψος μεγαλύτερο των 4 m το 5% για το πλήθος κυμάτων (3000) της διεύθυνσης [330°, 345°]. Κατά την περίοδο της άνοιξης οι επικρατέστερες διευθύνσεις είναι δύο και βρίσκονται στον τομέα των [315°, 345°]. Τα ύψη των κυμάτων που αντιστοιχούν σε 3 μέτρα και πάνω πλέον είναι αρκετά μικρότερα με σε πλήθος και μειώνονται σημαντικά κατά την καλοκαιρινή και φθινοπωρινή περίοδο. Τέλος η διεύθυνση που κυριαρχεί κατά τις εποχές του καλοκαιριού και φθινοπώρου εστιάζεται στον τομέα [315°, 330°].

KASOS
Wave Energy Period Rose 2015-2019



Εικόνα 76 Κάσος: Εποχιακά Ροδογράμματα Ενεργειακής Περιόδου

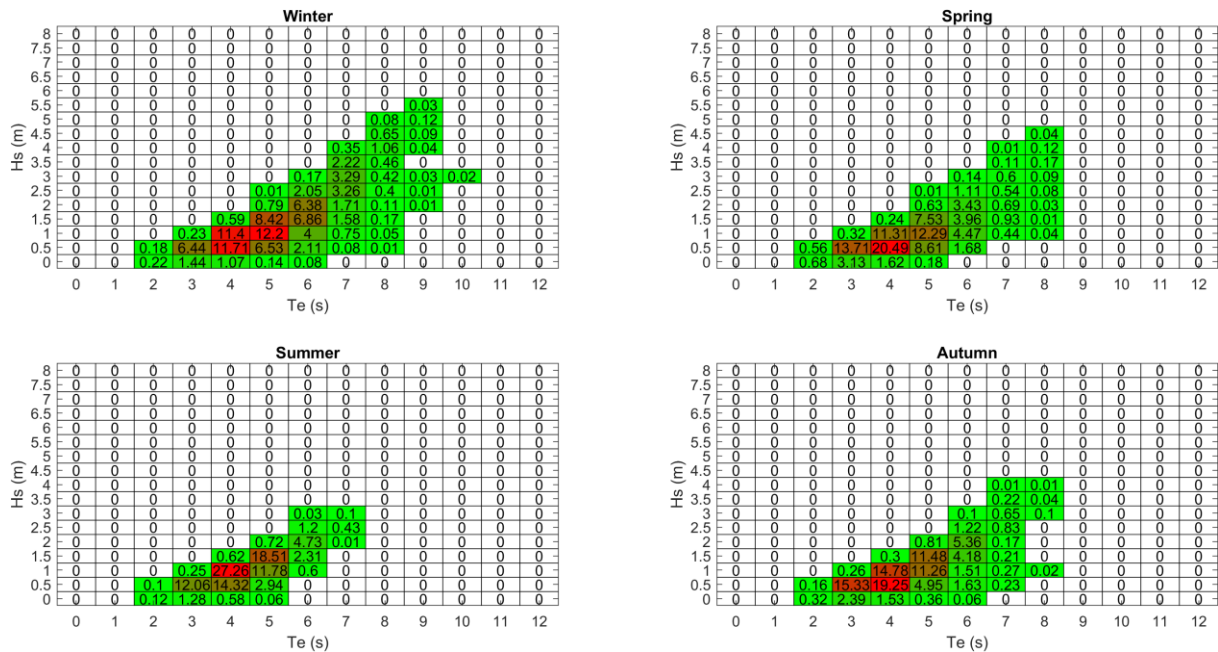
Τα ροδογράμματα της ενεργειακής περιόδου εμφανίζουν μια παρόμοια κατανομή των περιόδων, όπως συμβαίνει και με τα ύψη στα ροδογράμματα του σημαντικού ύψους κύματος. Έτσι για την περίοδο του χειμώνα τα περισσότερα κύματα με τις μεγαλύτερες ενεργειακές περιόδους εμφανίζονται στην διεύθυνση των [330°, 345°]. Ενδεικτικά η κατανομή του ποσοστού εμφάνισης των κυμάτων στη διεύθυνση των [330°, 345°], για κύματα από 2 – 4 s είναι το 9%, από 4 – 6 s το 46%, από 6 – 8 s το 42% και από 8 – 10 s το 3%. Κύματα με ενεργειακή περίοδο έως 2 s είναι μηδενικά για τις εποχές του χειμώνα και του καλοκαιριού ενώ κύματα με ενεργειακή περίοδο από 8 s και άνω είναι μηδενικά για τις εποχές του καλοκαιριού και του φθινοπώρου. Γενικά διαπιστώνεται ότι το καλοκαίρι οι ενεργειακές περιόδοι δεν καλύπτουν μεγάλο εύρος.



Εικόνα 77 Κάσος: Ετήσια Ροδογράμματα Σημαντικού Ύψους Κύματος, Ενεργειακής Περιόδου και Κυματικού Δυναμικού

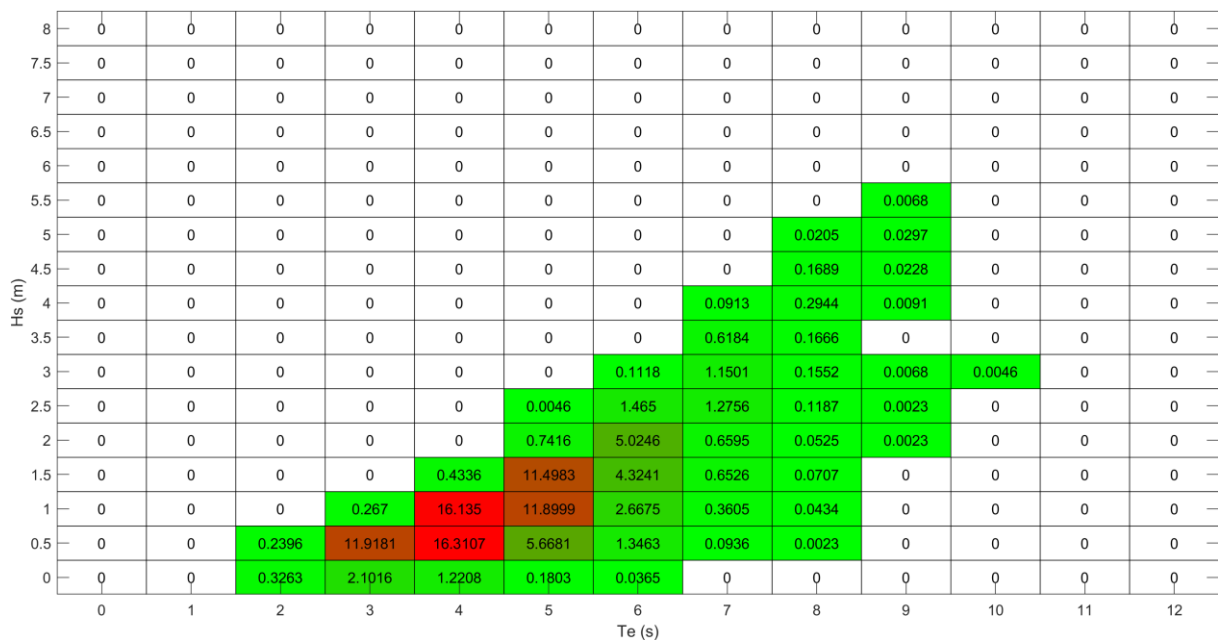
Τέλος η κατανομή των ετήσιων ροδογραμμάτων προσεγγίζει περισσότερο σχηματικά την κατανομή του φθινοπώρου. Παρατηρείται ότι παρόλο που η επικρατέστερη διεύθυνση διάδοσης είναι ο τομέας των [315°, 330°] με ποσοστό εμφάνισης 30%, τα κύματα με το υψηλότερο ύψος κύματος, ενεργειακή περίοδο και κυματική ισχύ είναι στην αμέσως επόμενη διεύθυνση των [330°, 345°].

Στη συνέχεια δημιουργήθηκαν οι πίνακες που συνδυάζουν το σημαντικό ύψος κύματος με την ενεργειακή περίοδο και παρουσιάζουν την συχνότητα εμφάνισης των συνδυασμών αυτών σε εποχιακή και ετήσια κατανομή.



Εικόνα 78 Κάσος: Εποχιακοί Πίνακες Κατανομής Συχνότητας Εμφάνισης

Στους εποχιακούς πίνακες κατανομής της συχνότητας εμφάνισης παρατηρείται ότι ο συνδυασμός με την μεγαλύτερη συχνότητα εμφάνισης διαφέρει για κάθε εποχή. Ειδικότερα για τον χειμώνα ο επικρατέστερος συνδυασμός είναι τα κύματα με σημαντικό ύψος κύματος εύρους 0.75 – 1.25 m και ενεργειακή περίοδο 4.5 - 5.5 s, την άνοιξη και το φθινόπωρο ο κυρίαρχος συνδυασμός είναι [0.25 – 0.75 m, 3.5 - 4.5 s] και το καλοκαίρι ο συνδυασμός [0.75 – 1.25 m, 3.5 - 4.5 s].



Εικόνα 79 Κάσος: Ετήσιος Πίνακας Κατανομής Συχνότητας Εμφάνισης

Τελικά ο συνδυασμός σημαντικού ύψους και ενεργειακής περιόδου κύματος με τη μεγαλύτερη συχνότητα εμφάνισης στο ετήσιο διάγραμμα κατανομής είναι τα κύματα εύρους 0.25 – 0.75 m και ενεργειακή περίοδο 3.5 - 4.5 s με ποσοστό 16.31%. Περαιτέρω πληροφορίες για το σημαντικό ύψος κύματος και την ενεργειακή περίοδο παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα. Χαρακτηριστικές τιμές αποτελούν το μέγιστο σημαντικό ύψος κύματος που ήταν 5.3 m και η μέγιστη ενεργειακή περίοδος 9.77 s, ενώ τα ελάχιστα ήταν 0.063 m και 1.588 s αντίστοιχα.

Ύψος Κύματος					
Μέση Τιμή	Διασπορά	Τυπική Απόκλιση	Min	Max	cv (%)
1.0404	0.4577	0.6766	0.063	5.3	65.03268
Περίοδος					
Μέση Τιμή	Διασπορά	Τυπική Απόκλιση	Min	Max	cv (%)
4.6422	1.2162	1.1028	1.588	9.77	23.75598

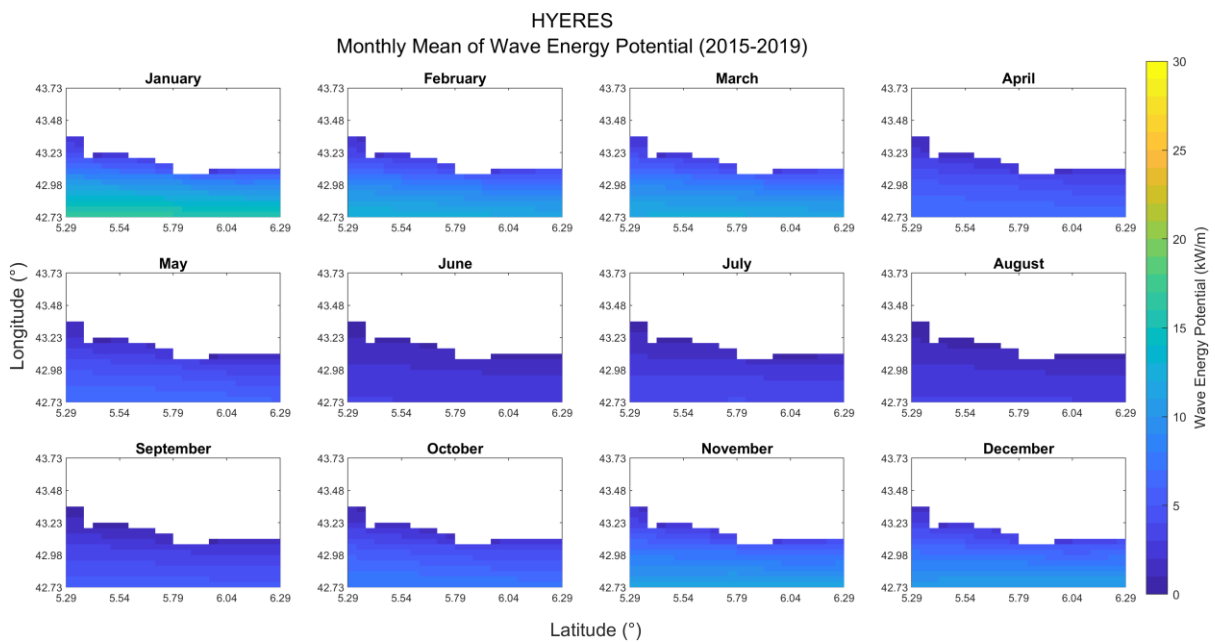
Πίνακας 5 Κάσος: Χαρακτηριστικές τιμές του ύψους και της περιόδου των κυμάτων

Hyères

Το Hyères βρίσκεται στο νοτιοανατολικό άκρο της Γαλλίας κοντά στην Τουλόν και η περιοχή μελέτης του κυματικού δυναμικού ορίζεται από τις συντεταγμένες: 5.29° W έως 6.29° E και 42.73° S έως 43.73° N. Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης του κυματικού δυναμικού της περιοχής αυτής σε μηνιαία, εποχιακή και ετήσια κατανομή.

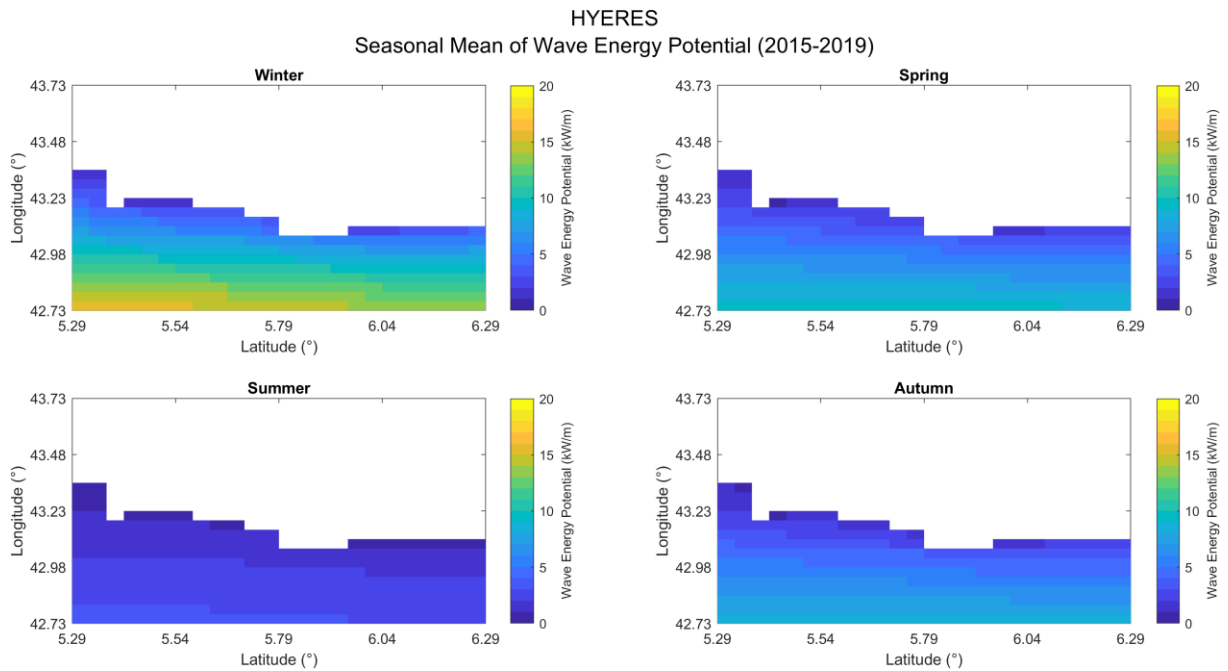


Εικόνα 80 Hyères



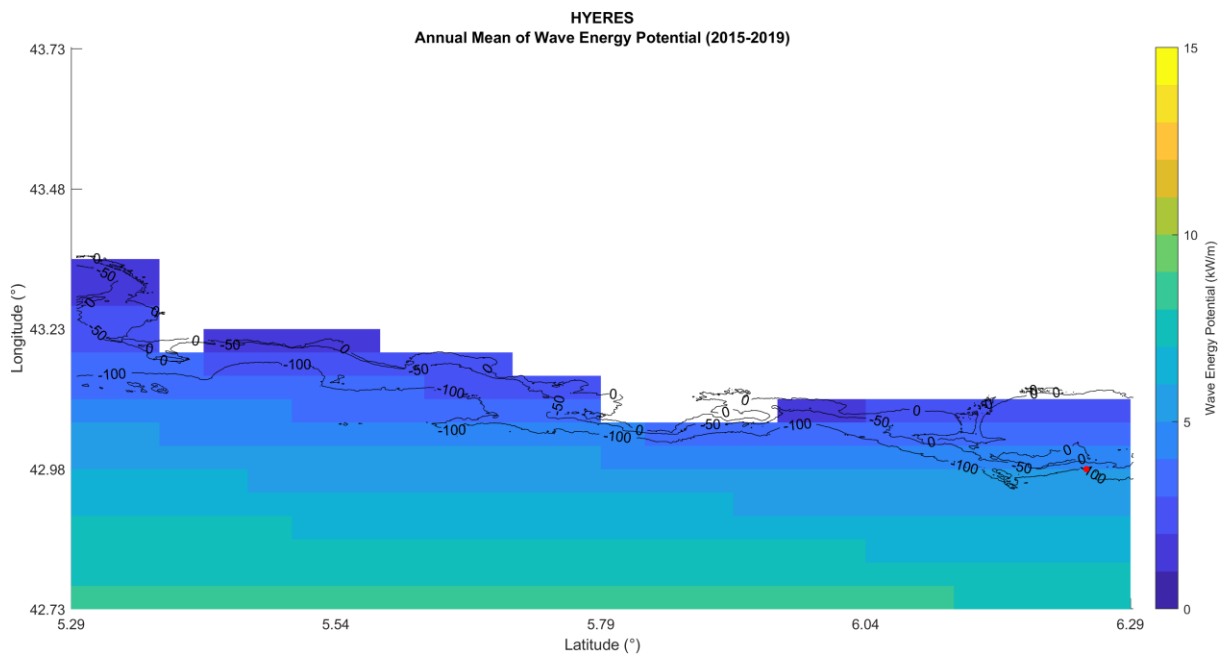
Εικόνα 81 Hyères: Μέσο Μηνιαίο Κυματικό Δυναμικό

Για λόγους πληρότητας παρουσιάζεται η μέση μηνιαία κυματική ισχύς για την απεικόνιση της βαθμιδωτής μεταβολής του κυματικού δυναμικού. Ωστόσο ο σχολιασμός των αποτελεσμάτων θα εστιαστεί στο μέσο εποχιακό και ετήσιο κυματικό δυναμικό.



Εικόνα 82 Ηγères: Μέσο Εποχιακό Κυματικό Δυναμικό

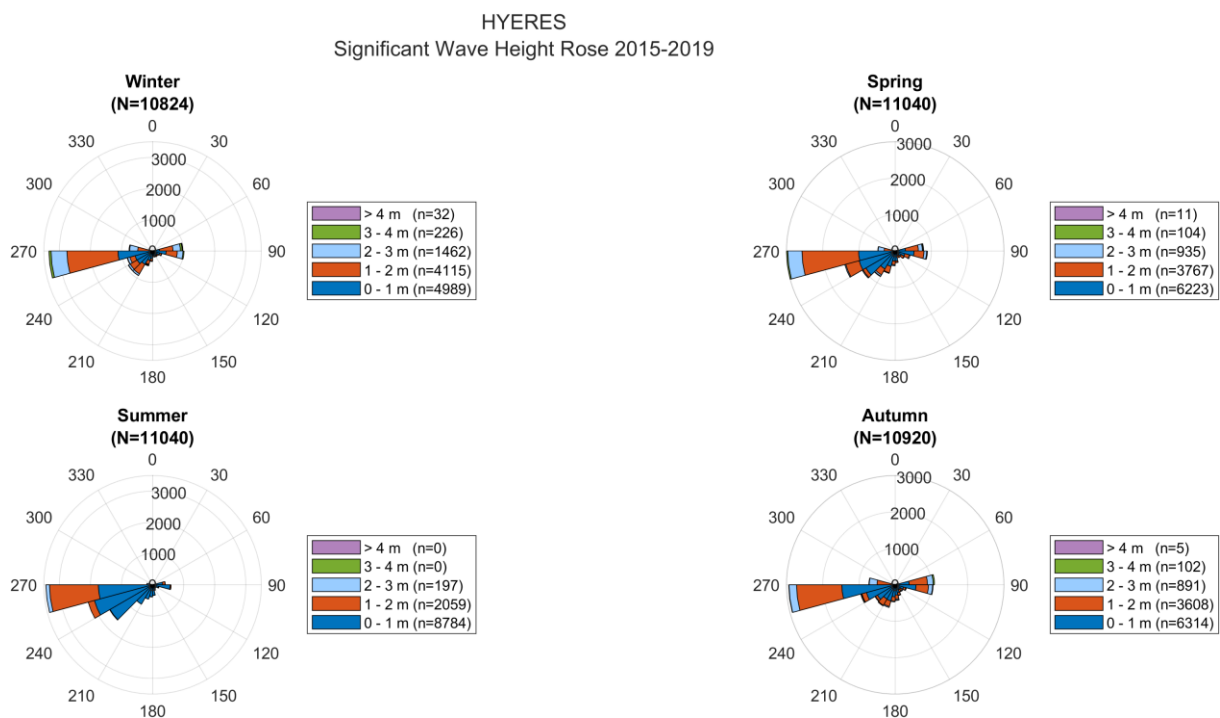
Στα σχήματα της μέσης εποχιακής κατανομής της κυματικής ισχύς παρατηρείται μία διαβάθμιση του κυματικού δυναμικού σε ένα ευρύ φάσμα τιμών. Επομένως η περιοχή μελέτης για την περίοδο του χειμώνα παρουσιάζει ισχύ που αντιστοιχεί στα 7 – 15 kW/m, την άνοιξη μειώνεται στα 5 – 10 kW/m, διαδοχικά, το καλοκαίρι ακολουθεί μία περαιτέρω μείωση στα 2 – 4 kW/m ενώ τέλος το φθινόπωρο υπάρχει μία αύξηση στα 5 – 9 kW/m.



Εικόνα 83 Ηγères: Μέσο Ετήσιο Κυματικό Δυναμικό

Η διαβάθμιση των τιμών του κυματικού δυναμικού εμφανίζεται και στην μέση ετήσια κατανομή της κυματικής ενέργειας. Το εύρος των τιμών ορίζεται στις 4 – 9 kW/m. Συμπεριλαμβάνοντας τη βαθυμετρία επιλέχθηκε το κατάλληλο σημείο τοποθέτησης των μηχανών με το υψηλότερο δυνατό κυματικό δυναμικό. Το σημείο ορίστηκε από τις συντεταγμένες 6.25 ° E και 42.99 ° N με βάθος -59 m, και με κυματικό δυναμικό στις 6 kW/m.

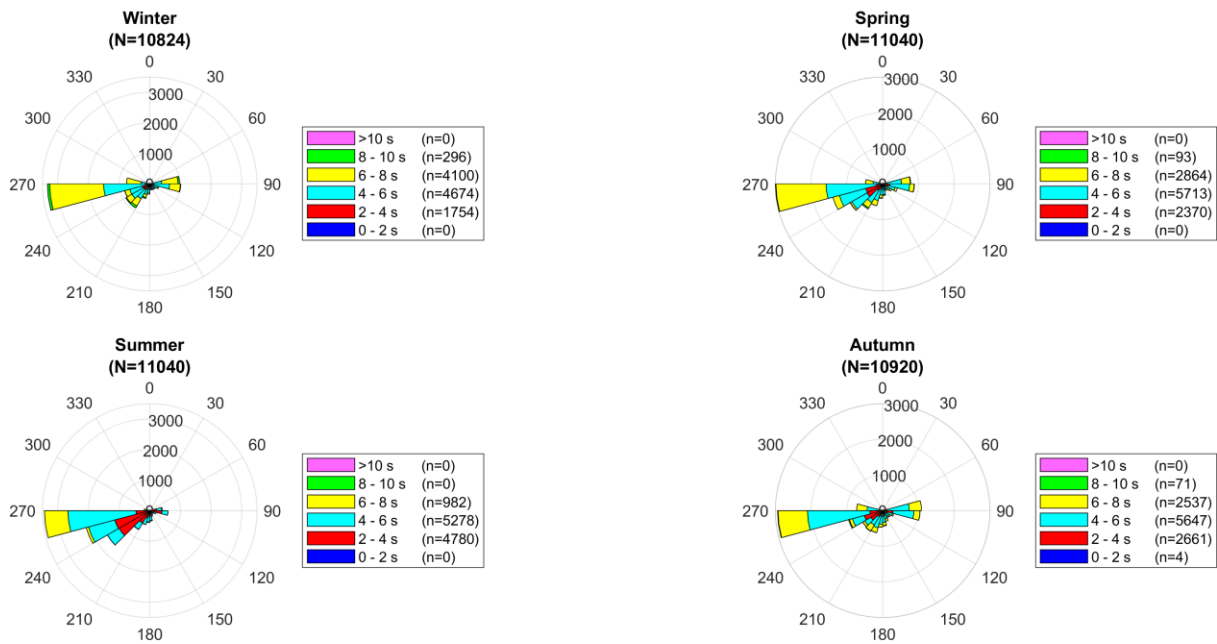
Παρακάτω για το σημείο επιλογής παρουσιάζονται τα ροδογράμματα για το σημαντικό ύψος κύματος και την ενεργειακή περίοδο σε εποχιακή και ετήσια κατανομή, όπως και το ροδόγραμμα για την ετήσια κατανομή του κυματικού δυναμικού.



Εικόνα 84 Hyères: Εποχιακά Ροδογράμματα Σημαντικού Ύψους Κύματος

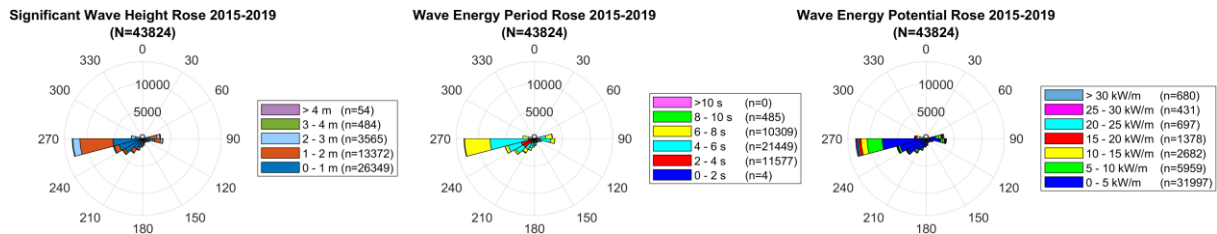
Για το σημείο που επιλέχθηκε παραπάνω, για τα ροδογράμματα του σημαντικού ύψους κύματος που υπολογίστηκαν φαίνεται πως η κυρίαρχη διεύθυνση μετάδοσης των κυμάτων είναι στη δυτική μεριά, στον τομέα των [255°, 270°] για όλες τις εποχές. Τα ποσοστά εμφάνισης των κυμάτων στη διεύθυνση αυτή για κάθε εποχή είναι τα εξής: για το χειμώνα και το καλοκαίρι είναι 31%, ενώ για την άνοιξη και το φθινόπωρο είναι 27%. Το ύψος των κυμάτων που υπερिशύει σε όλες τις εποχές είναι έως 1 m και εκτός από το καλοκαίρι, εμφανίζονται επίσης κύματα με μεγάλα ύψη, 3 m και άνω, αλλά σε μειωμένο ποσοστό.

HYERES
Wave Energy Period Rose 2015-2019



Εικόνα 85 Hyères:: Εποχικά Ροδογράμματα Ενεργειακής Περιόδου

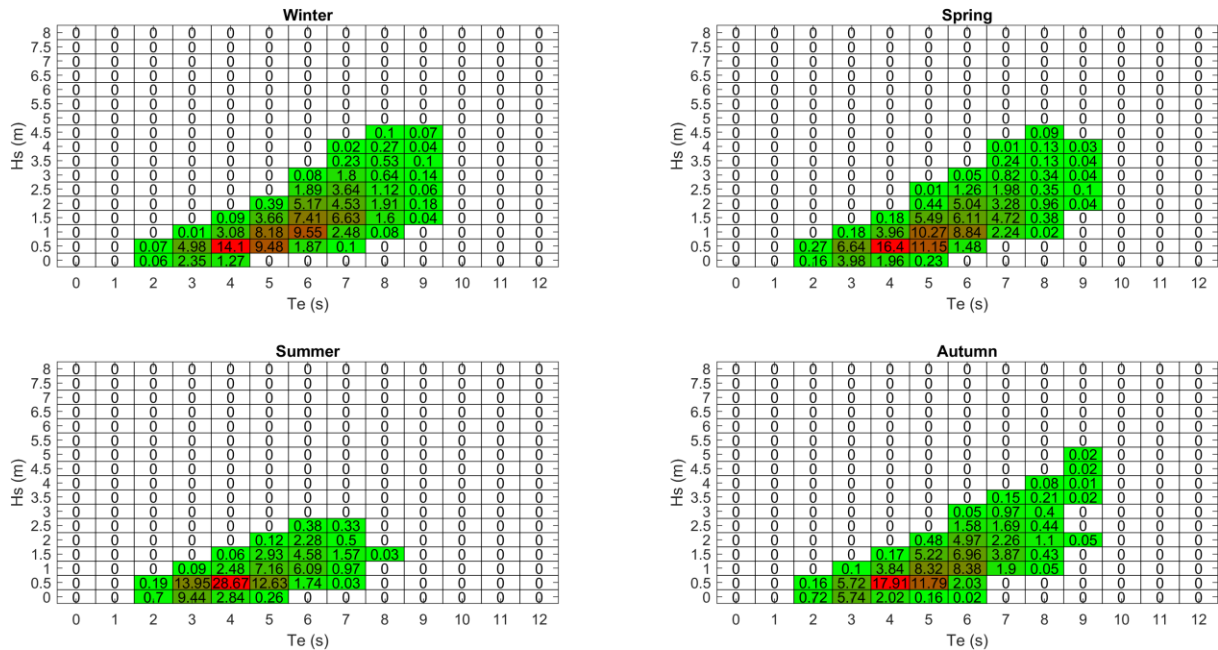
Για τα ροδογράμματα της ενεργειακής περιόδου διαπιστώνεται ότι η πιο συνήθης περίοδος των κυμάτων είναι 4 – 6 s για όλες τις εποχές. Διακρίνεται επίσης ότι το φθινόπωρο εμφανίζονται ελάχιστα κύματα με περίοδο έως 2 s ενώ τις υπόλοιπες εποχές είναι ανύπαρκτα, όπως το ίδιο συμβαίνει και με το καλοκαίρι που σταματούν να παρατηρούνται κύματα με περίοδο άνω των 8 s.



Εικόνα 86 Hyères: Ετήσια Ροδογράμματα Σημαντικού Ύψους Κύματος, Ενεργειακής Περιόδου και Κυματικού Δυναμικού

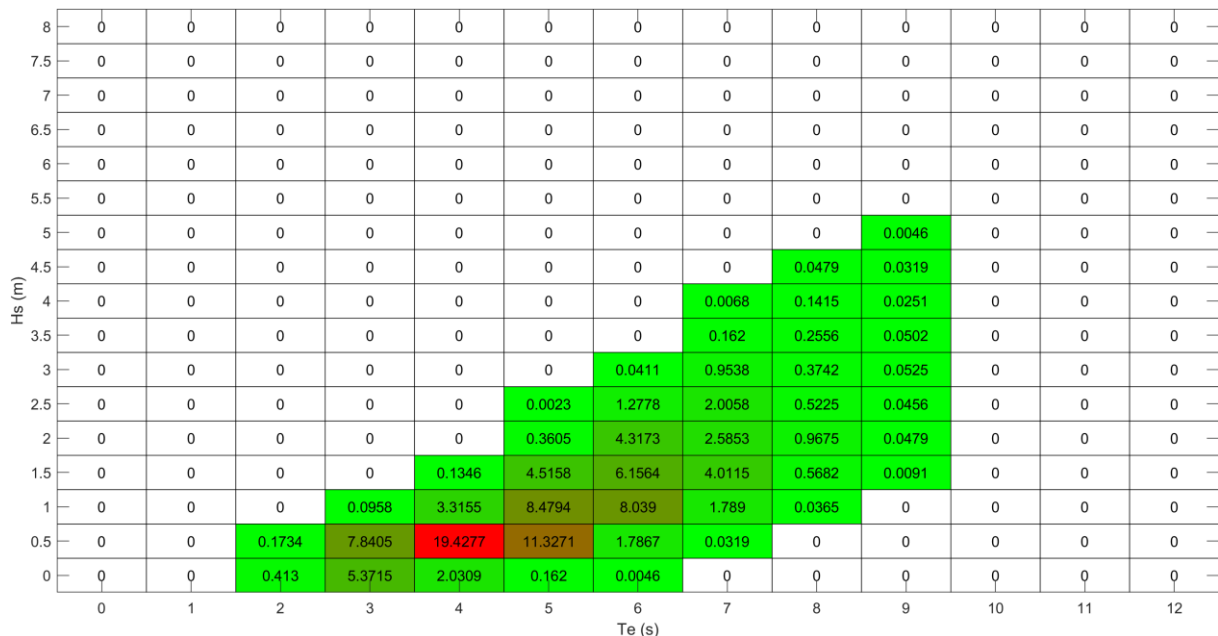
Στην κατανομή των ετήσιων ροδογραμμάτων η επικρατέστερη διεύθυνση διάδοσης είναι ο τομέας που προαναφέρθηκε στις [255°, 270°] με ποσοστό εμφάνισης 24% των συνολικών κυμάτων που παρατηρήθηκαν στην διάρκεια των 5 ετών. Παρατηρείται ότι το συνηθέστερο ύψος κύματος για την περίοδο μελέτης είναι έως 1 m με ποσοστό εμφάνισης 60%, η συνηθέστερη ενεργειακή περίοδος είναι 4 – 6 s με ποσοστό 49% και το επικρατέστερο κυματικό δυναμικό 5 kW/m με ποσοστό 73%.

Στη συνέχεια δημιουργήθηκαν οι πίνακες που συνδυάζουν το σημαντικό ύψος κύματος με την ενεργειακή περίοδο και παρουσιάζουν την συχνότητα εμφάνισης των συνδυασμών αυτών σε εποχιακή και ετήσια κατανομή.



Εικόνα 87 Ηγères: Εποχιακοί Πίνακες Κατανομής Συχνότητας Εμφάνισης

Σύμφωνα με τους εποχιακούς πίνακες κατανομής της συχνότητας εμφάνισης διακρίνεται ότι για όλες τις εποχές, ο συνδυασμός με την μεγαλύτερη συχνότητα εμφάνισης είναι τα κύματα με σημαντικό ύψος κύματος εύρους 0.25 – 0.75 m και ενεργειακή περίοδο 3.5 – 4.5 s.



Εικόνα 88 Ηγères: Ετήσιος Πίνακας Κατανομής Συχνότητας Εμφάνισης

Τέλος ο συνδυασμός με τη μεγαλύτερη συχνότητα εμφάνισης παραμένει ο ίδιος που είδαμε και στην επιμέρους εποχιακή κατανομή με ποσοστό 19.43%. Περαιτέρω πληροφορίες για το σημαντικό ύψος κύματος και την ενεργειακή περίοδο παρουσιάζονται στον παρακάτω

πίνακα. Χαρακτηριστικές τιμές αποτελούν το μέγιστο σημαντικό ύψος κύματος που ήταν 4.953 m και η μέγιστη ενεργειακή περίοδος 9.429 s, ενώ τα ελάχιστα ήταν 0.072 m και 1.758 s αντίστοιχα.

Ύψος Κύματος					
Μέση Τιμή	Διασπορά	Τυπική Απόκλιση	Min	Max	cv (%)
0.9765	0.4867	0.6976	0.072	4.953	71.43881
Περίοδος					
Μέση Τιμή	Διασπορά	Τυπική Απόκλιση	Min	Max	cv (%)
5.0149	1.736	1.3176	1.758	9.429	26.2737

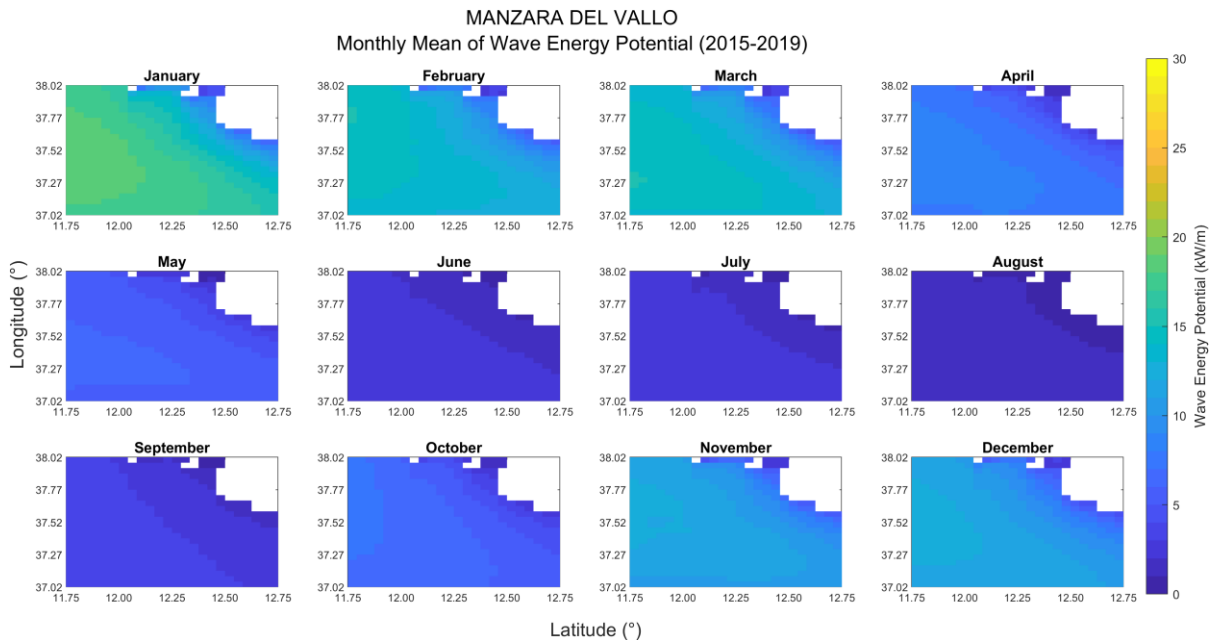
Πίνακας 6 Ηγέτες: Χαρακτηριστικές τιμές του ύψους και της περιόδου των κυμάτων

Manzara del Vallo

Η Manzara del Vallo βρίσκεται στο νοτιοδυτικό άκρο της Σικελίας, της Ιταλίας και η περιοχή μελέτης του κυματικού δυναμικού ορίζεται από τις συντεταγμένες: 11.75° W έως 12.75° E και 37.02° S έως 38.02° N. Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης του κυματικού δυναμικού της περιοχής αυτής σε μηνιαία, εποχιακή και ετήσια κατανομή.



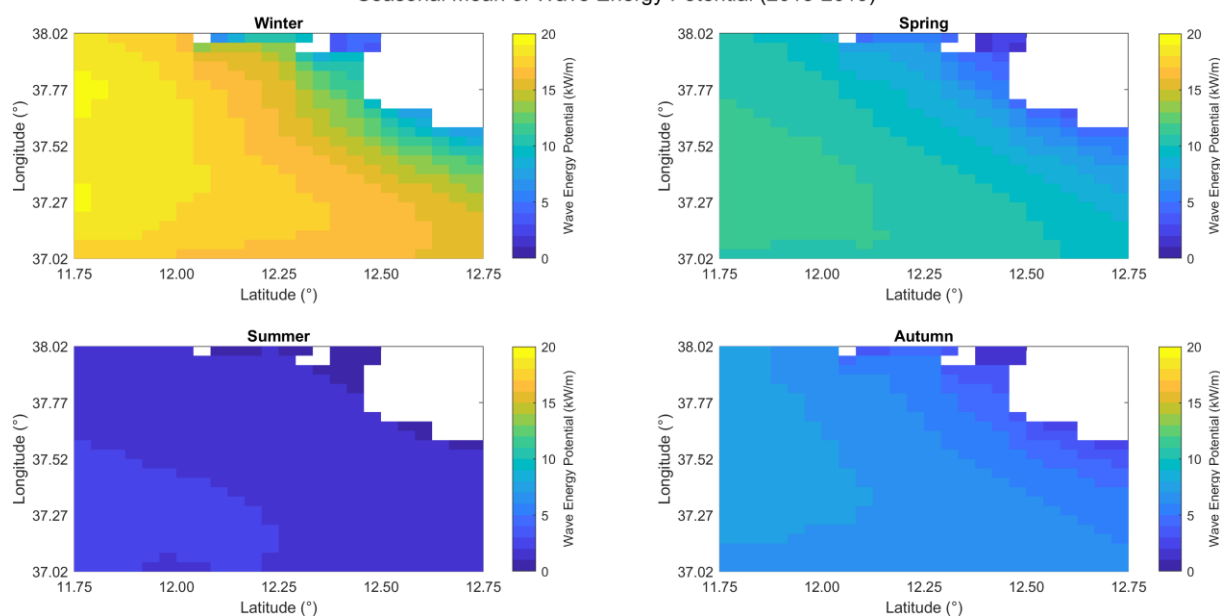
Εικόνα 89 Manzara del Vallo



Εικόνα 90 Manzara del Vallo: Μέσο Μηνιαίο Κυματικό Δυναμικό

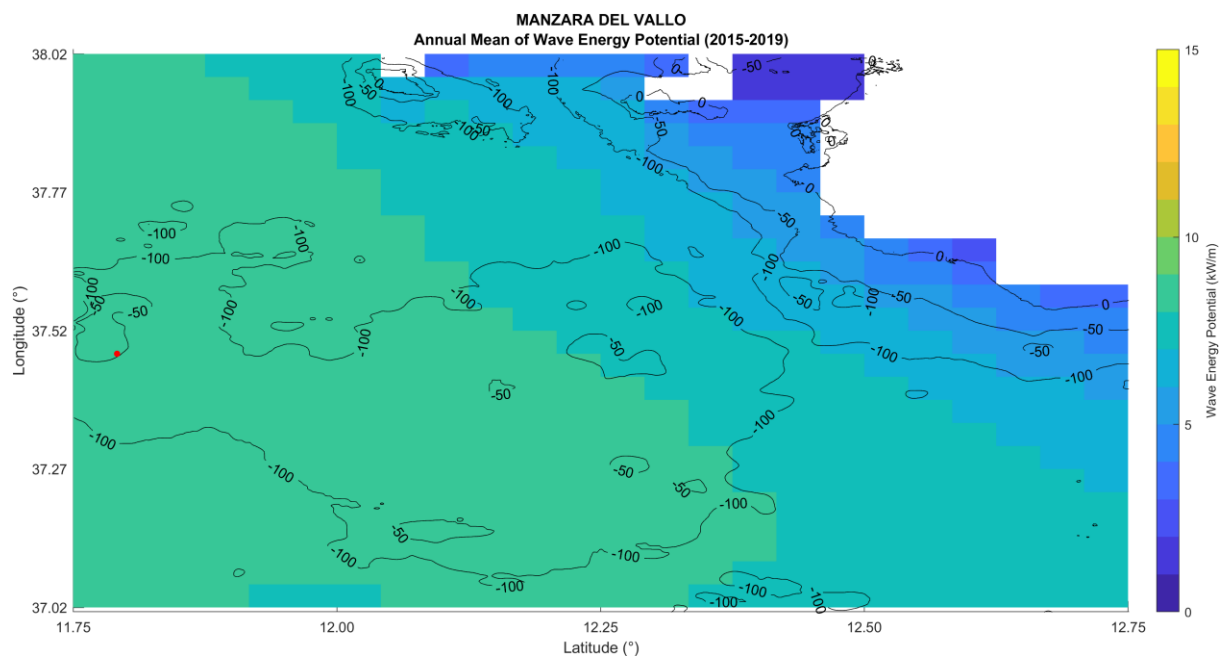
Για λόγους πληρότητας παρουσιάζεται η μέση μηνιαία κυματική ισχύς για την απεικόνιση της βαθμιδωτής μεταβολής του κυματικού δυναμικού. Ωστόσο ο σχολιασμός των αποτελεσμάτων θα εστιαστεί στο μέσο εποχιακό και ετήσιο κυματικό δυναμικό.

MANZARA DEL VALLO
Seasonal Mean of Wave Energy Potential (2015-2019)



Εικόνα 91 Manzara del Vallo: Μέσο Εποχιακό Κυματικό Δυναμικό

Για την περιοχή μελέτης και την περίοδο του χειμώνα διακρίνεται ότι το κυματικό δυναμικό καταλαμβάνει ένα ευρύ φάσμα τιμών όπου ως μέση τιμή της κυματικής ισχύς θα μπορούσαν να καθοριστούν τα 18 kW/m. Την άνοιξη η μέση κυματική ισχύς υπολογίζεται στα $\approx 10-11$ kW/m, το καλοκαίρι πέφτει κατακόρυφα στα 2 kW/m και το φθινόπωρο ανέρχεται στα 7 kW/m.

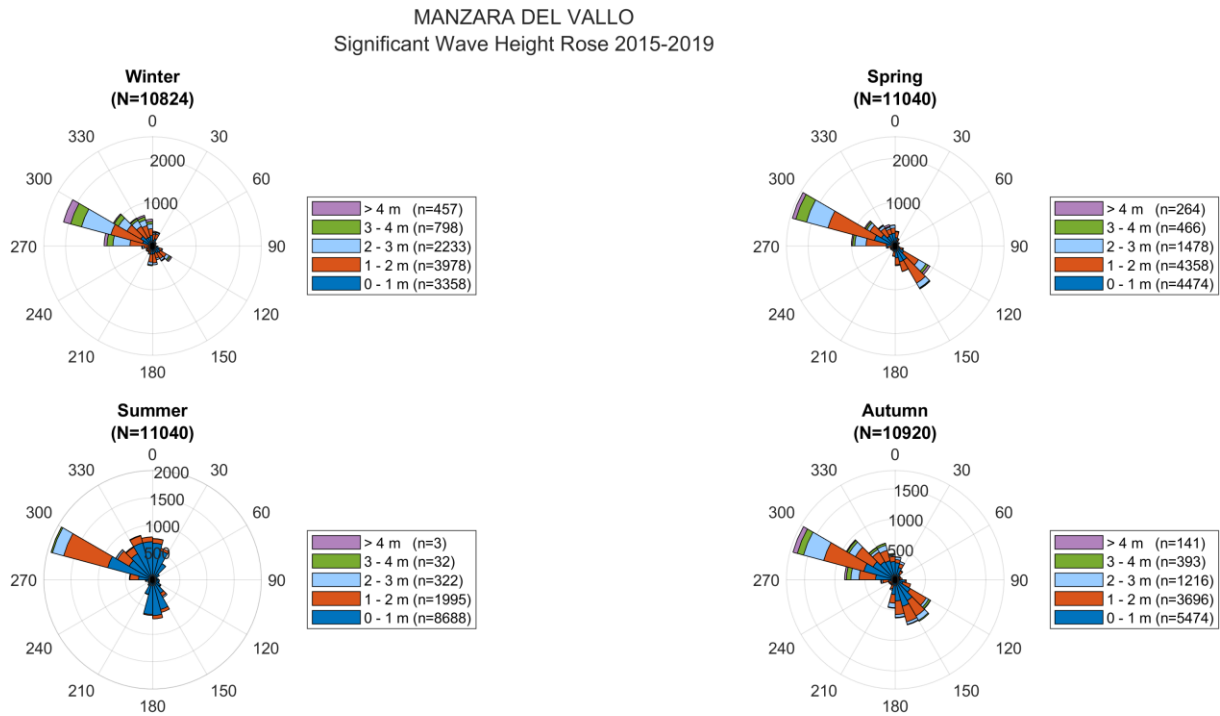


Εικόνα 92 Manzara del Vallo: Μέσο Ετήσιο Κυματικό Δυναμικό

Για την ετήσια κατανομή του κυματικού δυναμικού παρατηρείται ότι η μέση τιμή της κυματικής ισχύς εντοπίζεται στα 9 kW/m. Κατόπιν τοποθέτησης της βαθυμετρίας τα σημεία για την τοποθέτηση των μηχανών παραγωγής ενέργειας που πληρούσαν τις προϋποθέσεις του

υψηλού κυματικού και της βαθυμετρίας ήταν άφθονα. Ωστόσο η τελική επιλογή του σημείου έγινε λαμβάνοντας υπόψη και τα εποχιακά και μηνιαία αποτελέσματα με στόχο την εύρεση του σημείου με το υψηλότερο δυνατό δυναμικό αλλά και την μικρότερη δυνατή μεταβολή του στους μήνες για την αποδοτικότερη λειτουργία της εκάστοτε μηχανής. Έτσι το σημείο που επιλέχθηκε έχει συντεταγμένες 11.792° E και 37.479° N και βάθος περίπου 40m.

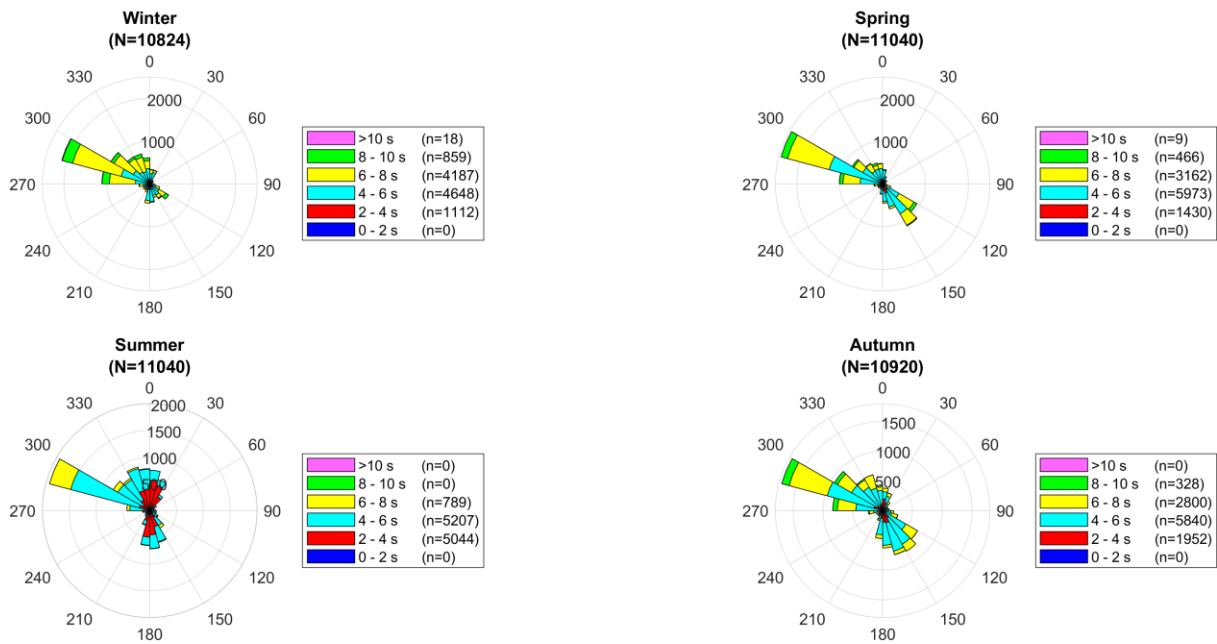
Παρακάτω για το σημείο επιλογής παρουσιάζονται τα ροδογράμματα για το σημαντικό ύψος κύματος και την ενεργειακή περίοδο σε εποχιακή και ετήσια κατανομή, όπως και το ροδόγραμμα για την ετήσια κατανομή του κυματικού δυναμικού.



Εικόνα 93 Manzara del Vallo: Εποχιακά Ροδογράμματα Σημαντικού Ύψους Κύματος

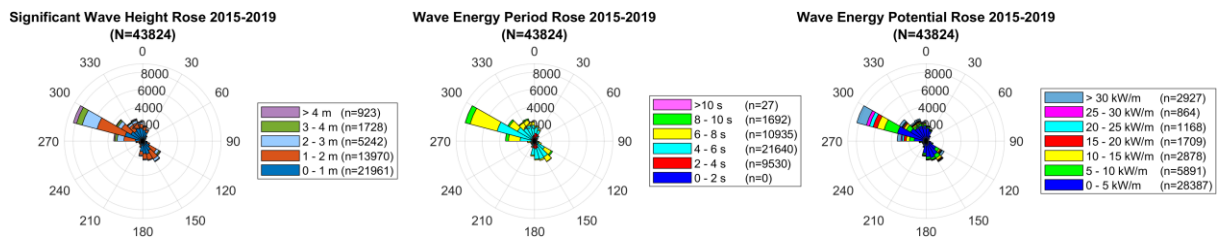
Η κατανομή των διευθύνσεων στα ροδογράμματα του σημαντικού ύψους κύματος διαφέρει αρκετά ανάμεσα στις εποχές. Παρά την κοινή κύρια διεύθυνση διάδοσης των κυμάτων στον τομέα των [285°, 300°] για όλες τις εποχές, παρατηρείται ότι η κατανομή των υπόλοιπων διευθύνσεων των κυμάτων καταλαμβάνει διαφορετικούς τομείς διάδοσης για κάθε εποχή. Όσον αφορά το σημαντικό ύψος κύματος διακρίνεται ότι το ύψος που υπερισχύει σε όλες τις εποχές είναι έως 1 m, πλην του χειμώνα όπου το μεγαλύτερο ποσοστό ύψους κύματος είναι ανάμεσα στο 1 με 2 m. Γενικά η περιοχή μελέτης παρουσιάζει ένα σημαντικό ποσοστό υψηλών κυμάτων που μοιράζονται σε όλες τις διευθύνσεις, με το μεγαλύτερο ποσοστό όμως να βρίσκεται στον τομέα των [285°, 300°].

MANZARA DEL VALLO
Wave Energy Period Rose 2015-2019



Εικόνα 94 Manzara del Vallo: Εποχιακά Ροδογράμματα Ενεργειακής Περιόδου

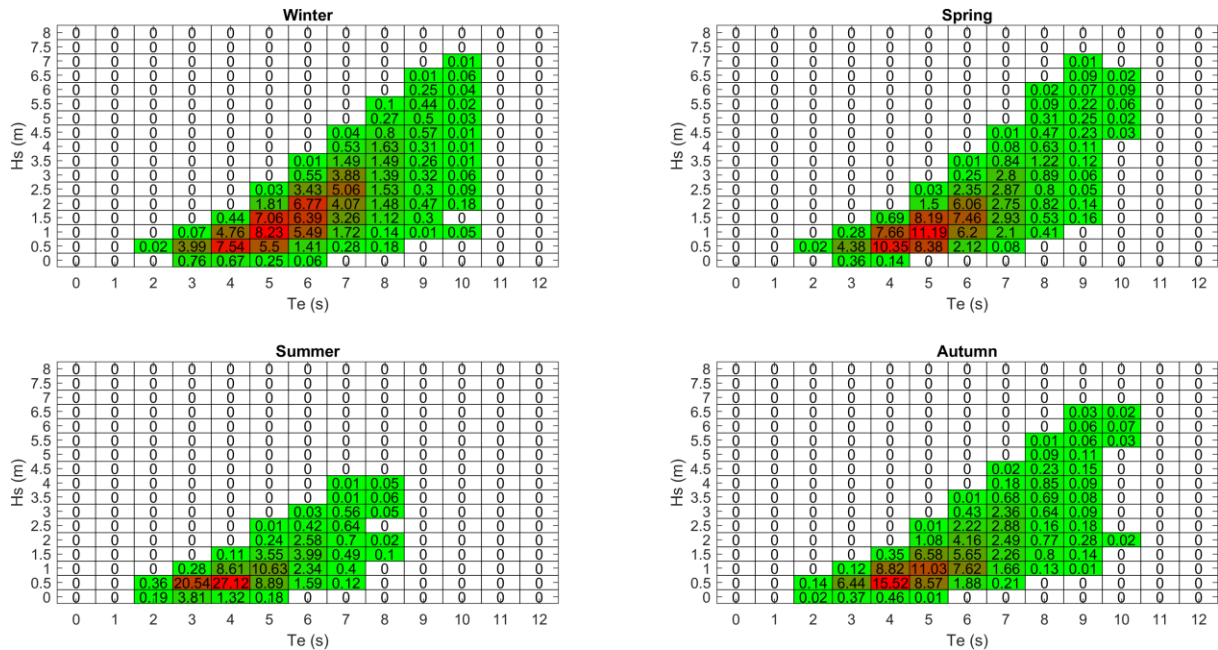
Στη κατανομή των ενεργειακών περιόδων που απεικονίζεται στα ροδογράμματα, τα μεγαλύτερα ποσοστά εμφάνισης σημειώνονται για τις ενεργειακές περιόδους 4 έως 6 s για όλες τις εποχές. Επίσης διαπιστώνεται ότι στο σημείο της επιλογής διέρχονται κύματα που μοιράζονται και καλύπτουν ένα μεγάλο εύρος ενεργειακών περιόδων εκτός της περιόδου του καλοκαιριού όπου οι ενεργειακές περίοδοι περιορίζονται στα 2 έως 8 s.



Εικόνα 95 Manzara del Vallo: Ετήσια Ροδογράμματα Σημαντικού Ύψους Κύματος, Ενεργειακής Περιόδου και Κυματικού Δυναμικού

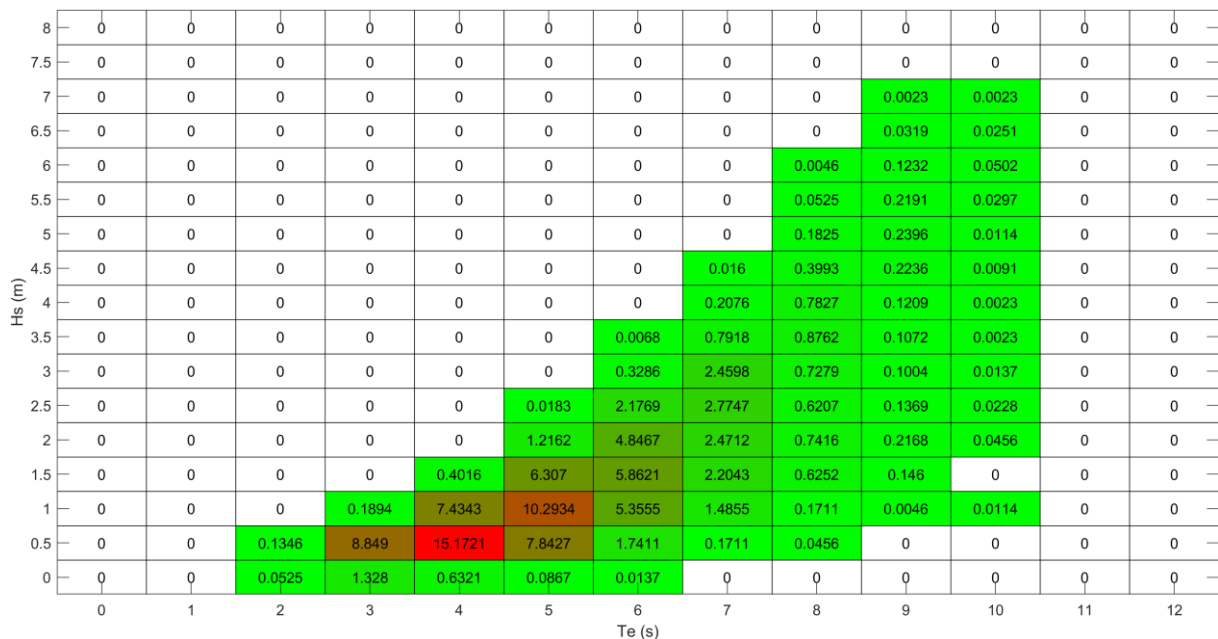
Στην ετήσια κατανομή των ροδογραμμάτων του σημαντικού ύψους, της ενεργειακής περιόδου και του δυναμικού του κύματος η επικρατέστερη διεύθυνση των κυμάτων είναι αυτή των [285°, 300°] και αποτελεί το 19% των συνολικών κυμάτων. Τα ποσοστά εμφάνισης που υπερτερούν αφορούν κύματα σημαντικού ύψους έως 1 m με ποσοστό 50%, ενεργειακής περιόδου 4 – 6 s με ποσοστό 49% και κυματικής ισχύς 5 kW/m με ποσοστό 65%.

Στη συνέχεια δημιουργήθηκαν οι πίνακες που συνδυάζουν το σημαντικό ύψος κύματος με την ενεργειακή περίοδο και παρουσιάζουν την συχνότητα εμφάνισης των συνδυασμών αυτών σε εποχιακή και ετήσια κατανομή.



Εικόνα 96 Manzara del Vallo: Εποχιακοί Πίνακες Κατανομής Συχνότητας Εμφάνισης

Όπως φαίνεται στην παραπάνω εικόνα των εποχιακών πινάκων κατανομής της συχνότητας εμφάνισης, ο συνδυασμός με την μεγαλύτερη συχνότητα εμφάνισης διαφέρει ανάμεσα στις εποχές. Συγκεκριμένα ο συνδυασμός που υπερτερεί για τον χειμώνα και την άνοιξη είναι τα κύματα με σημαντικό ύψος κύματος εύρους 0.75 – 1.25 m και ενεργειακή περίοδο 4.5 - 5.5 s ενώ για το καλοκαίρι και το φθινόπωρο ο συνδυασμός [0.25 – 0.75 m, 3.5 - 4.5 s].



Εικόνα 97 Manzara del Vallo: Ετήσιος Πίνακας Κατανομής Συχνότητας Εμφάνισης

Στην περίπτωση της ετήσιας κατανομής της συχνότητας εμφάνισης, ο συνδυασμός που υπερισχύει είναι ο ίδιος που εμφανίστηκε το καλοκαίρι και το φθινόπωρο, καθώς και για τις άλλες δύο εποχές τα ποσοστά για τον συνδυασμό αυτό προσέγγιζαν τον κυρίαρχο συνδυασμό της εκάστοτε εποχής. Το ποσοστό των κυμάτων με χαρακτηριστικά [0.25 – 0.75 m, 3.5 - 4.5 s] είναι 15.17%. Περαιτέρω πληροφορίες για το σημαντικό ύψος κύματος και την ενεργειακή περίοδο παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα. Χαρακτηριστικές τιμές αποτελούν το μέγιστο σημαντικό ύψος κύματος που ήταν 6.762 m και η μέγιστη ενεργειακή περίοδος 10.365 s, ενώ τα ελάχιστα ήταν 0.113 m και 2.101 s αντίστοιχα.

Ύψος Κύματος					
Μέση Τιμή	Διασπορά	Τυπική Απόκλιση	Min	Max	cv (%)
1.279	0.9119	0.955	0.113	6.761	74.66771
Περίοδος					
Μέση Τιμή	Διασπορά	Τυπική Απόκλιση	Min	Max	cv (%)
5.239	2.029	1.424	2.101	10.365	27.18839

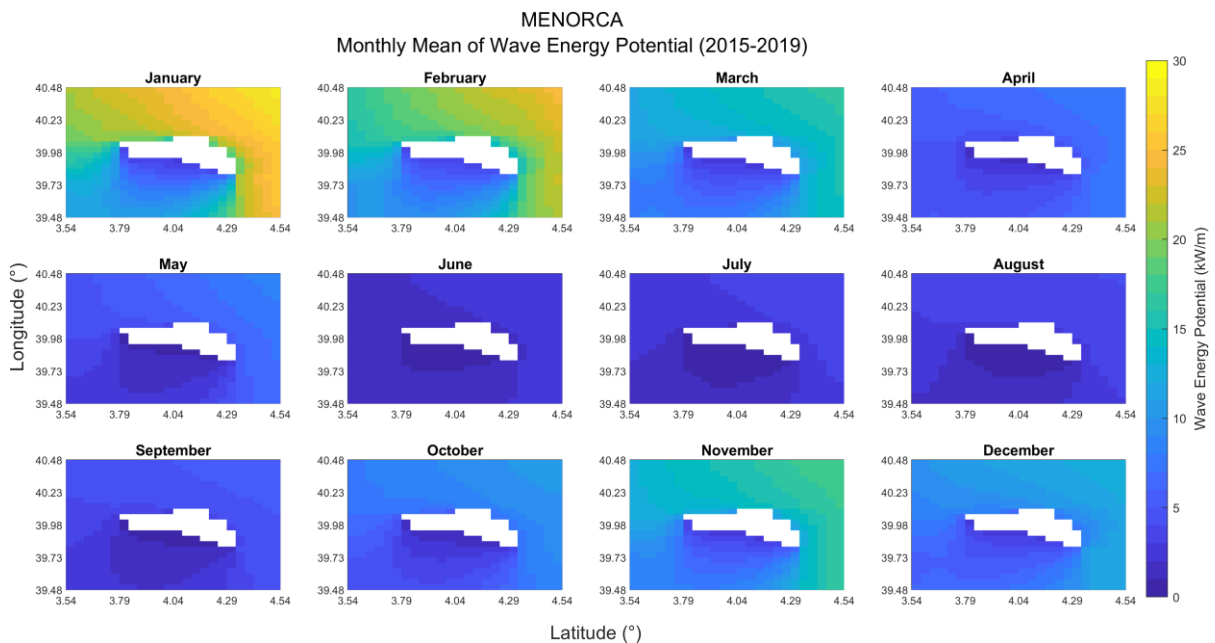
Πίνακας 7 Manzara del Vallo: Χαρακτηριστικές τιμές του ύψους και της περιόδου των κυμάτων

Menorca

Η Menorca υπάγεται στις Βαλεαρίδες νήσους της Ισπανίας και βρίσκεται ανατολικά κοντά στην Mallorca. Η περιοχή μελέτης του κυματικού δυναμικού ορίζεται από τις συντεταγμένες: 3.54° W έως 4.54° E και 39.48° S έως 40.48° N. Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης του κυματικού δυναμικού της περιοχής αυτής σε μηνιαία, εποχιακή και ετήσια κατανομή.

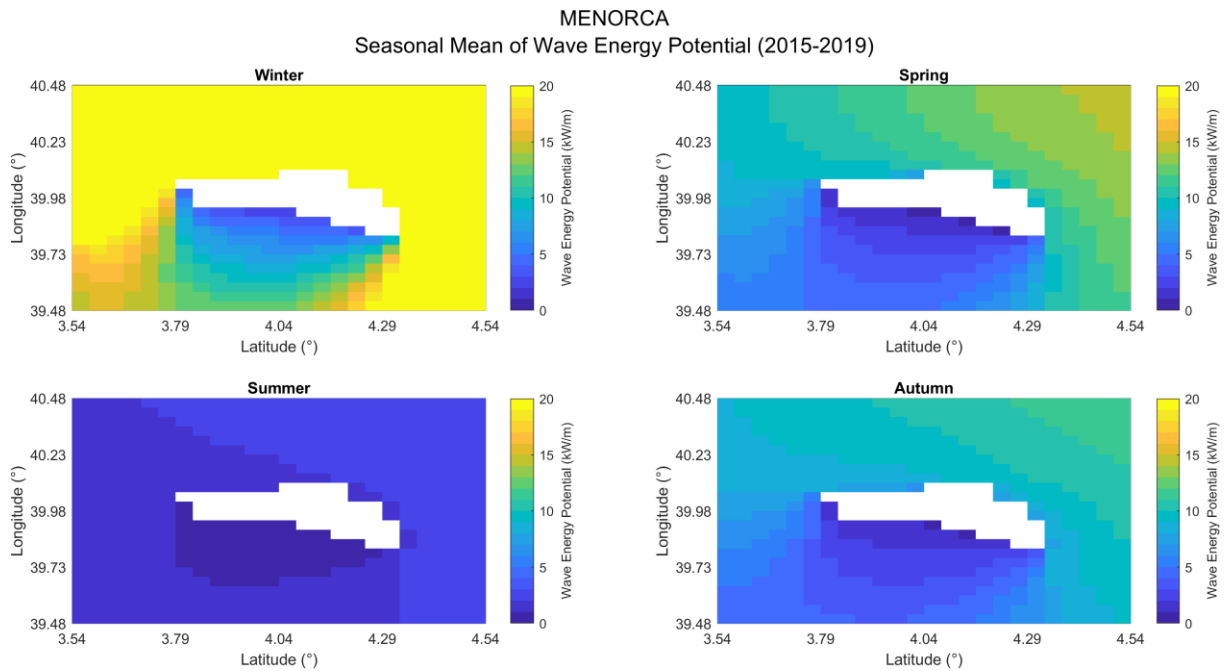


Εικόνα 98 Menorca



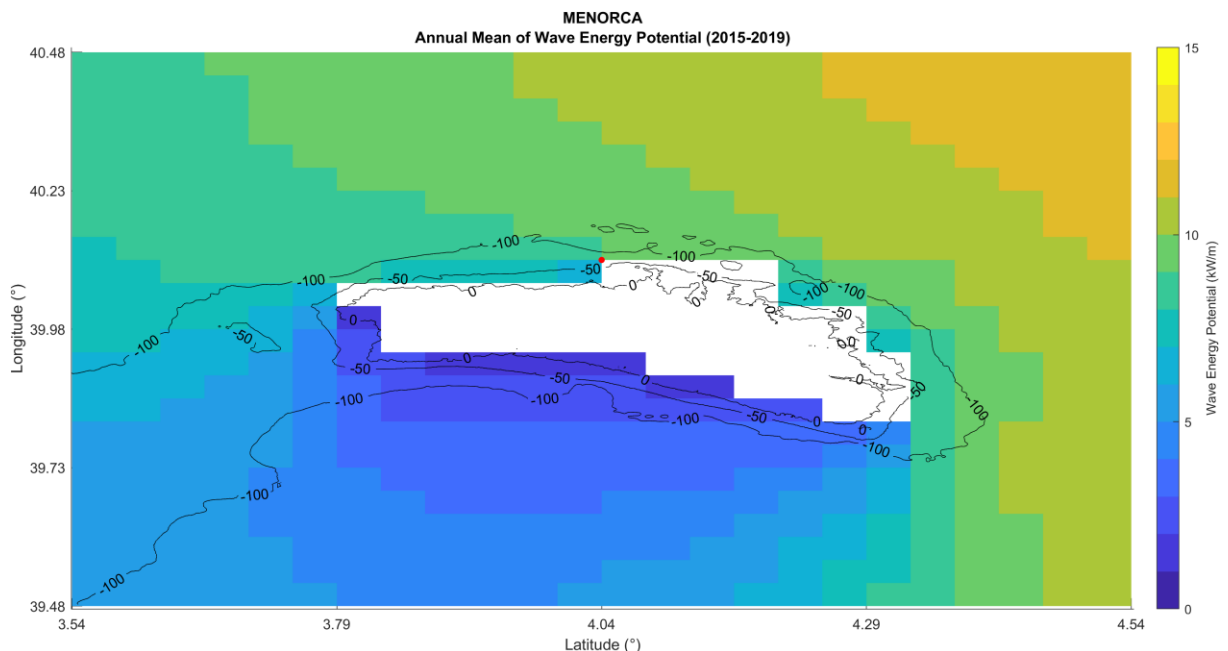
Εικόνα 99 Menorca: Μέσο Μηνιαίο Κυματικό Δυναμικό

Για λόγους πληρότητας παρουσιάζεται η μέση μηνιαία κυματική ισχύς για την απεικόνιση της βαθμιδωτής μεταβολής του κυματικού δυναμικού. Ωστόσο ο σχολιασμός των αποτελεσμάτων θα εστιαστεί στο μέσο εποχιακό και ετήσιο κυματικό δυναμικό.



Εικόνα 100 Menorca: Μέσο Εποχιακό Κυματικό Δυναμικό

Η περιοχή που μας ενδιαφέρει για την τοποθέτηση των μηχανών παραγωγής ενέργειας είναι στη βόρεια πλευρά της Menorca όπου αποτυπώνεται και το υψηλότερο κυματικό δυναμικό. Συνεπώς για τον χαρακτηρισμό της μέσης κυματικής ισχύς επιλέχθηκε το βόρειο τμήμα του νησιού όπου αποτυπώθηκε κατά την χειμερινή περίοδο κυματική ισχύς 20 kW/m καθ' όλη την έκταση της περιοχής μελέτης, την άνοιξη ≈ 13 kW/m, το καλοκαίρι 3 kW/m και το φθινόπωρο 10-11 kW/m.

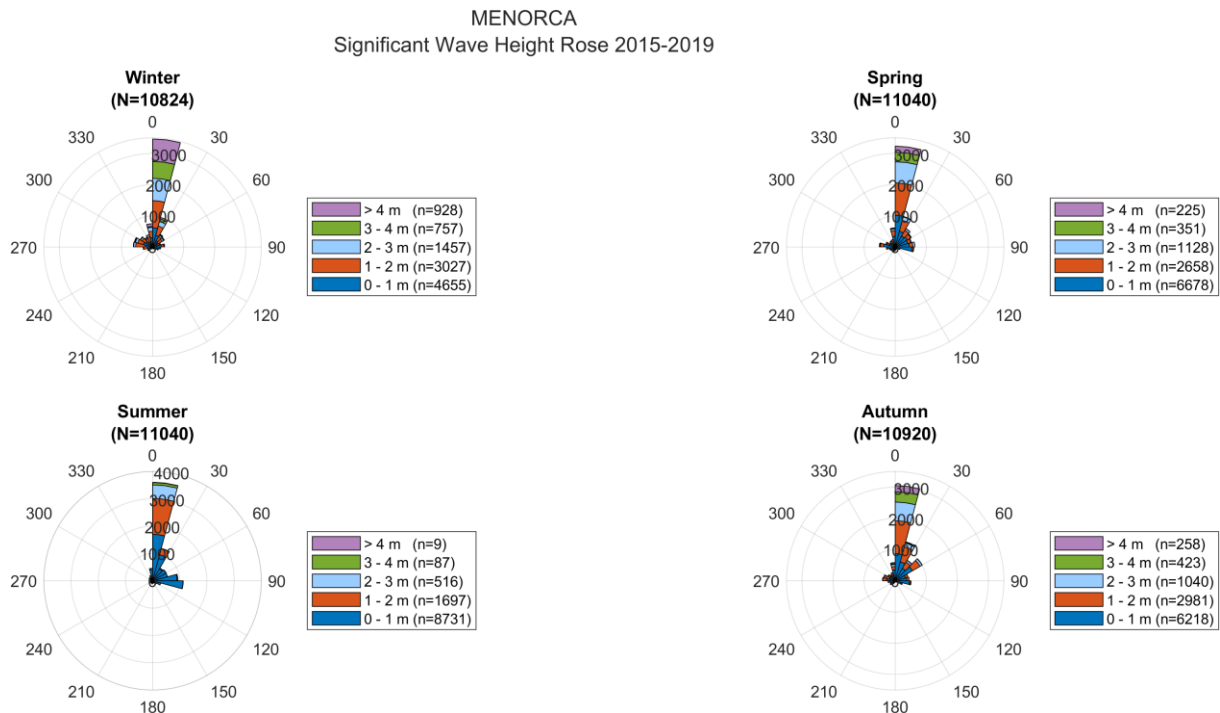


Εικόνα 101 Menorca: Μέσο Ετήσιο Κυματικό Δυναμικό

Από την ανάλυση του κυματικού δυναμικού για την 5ετία μελέτης, αποδόθηκε η μέση ετήσια κυματική ισχύς στα 10-11 kW/m. Μετά την ένταξη της βαθυμετρίας της περιοχής, οι επιλογές

σημείων για την τοποθέτηση των κυματικών μηχανών στις περιοχές με υψηλό δυναμικό περιορίστηκαν. Έτσι το ιδανικότερο σημείο τοποθέτησης που επιλέχθηκε έχει συντεταγμένες 4.042° E και 40.104° N και η μέση κυματική ενέργεια είναι 9 kW/m και βάθος 62 m.

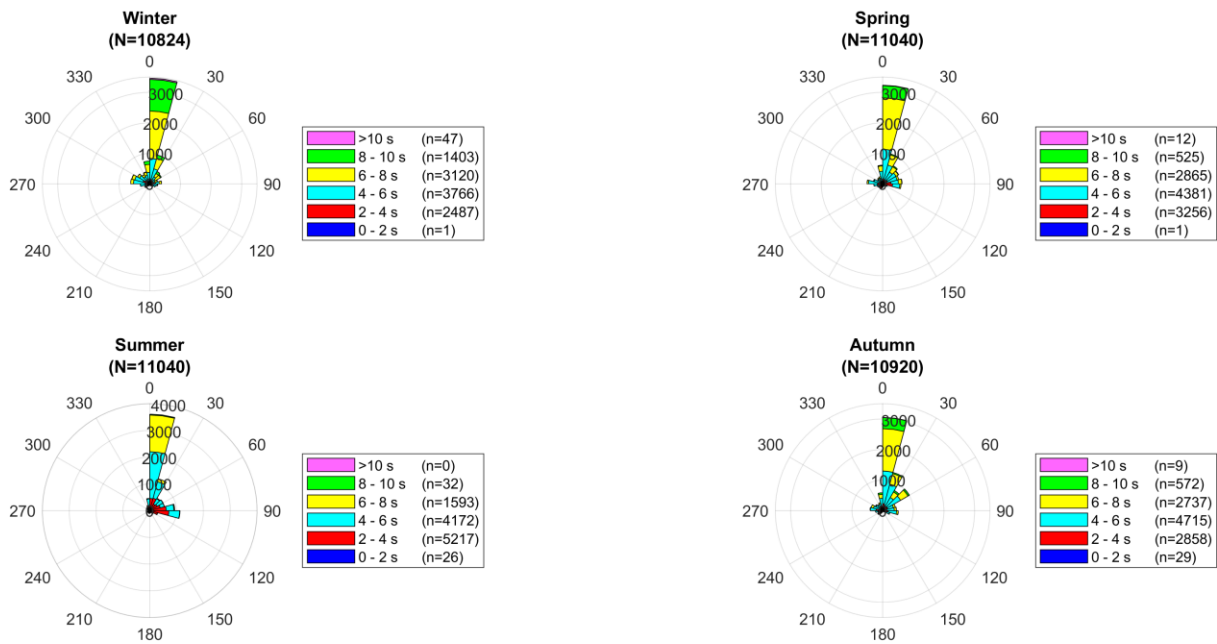
Παρακάτω για το σημείο επιλογής παρουσιάζονται τα ροδογράμματα για το σημαντικό ύψος κύματος και την ενεργειακή περίοδο σε εποχιακή και ετήσια κατανομή, όπως και το ροδόγραμμα για την ετήσια κατανομή του κυματικού δυναμικού.



Εικόνα 102 Menorca: Εποχιακά Ροδογράμματα Σημαντικού Ύψους Κύματος

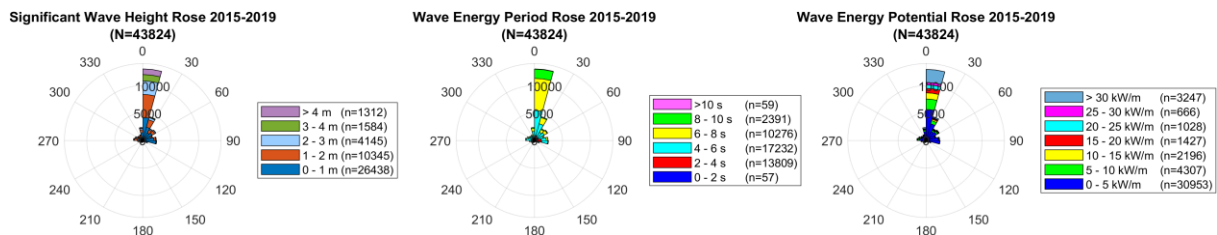
Από τον υπολογισμό των ροδογραμμάτων του σημαντικού ύψους κύματος είναι εμφανές ότι η υπερτερούσα διεύθυνση διάδοσης των κυμάτων έχει διεύθυνση βόρεια στον τομέα των [0°, 15°]. Ειδικότερα είναι ενδιαφέρον να παρουσιαστούν τα ποσοστά συχνότητας εμφάνισης των κυμάτων στη διεύθυνση των [0°, 15°] για κάθε εποχή. Επομένως τον χειμώνα είναι 31%, την άνοιξη 29%, το καλοκαίρι 32% και το φθινόπωρο 28%. Επίσης παρατηρείται ότι στο σημείο μελέτης έχουν καταγραφεί κύματα μεγάλου ύψους σε όλες τις εποχές, με την κυρίαρχη κατηγορία ύψους κυμάτων όμως να ορίζεται έως 1 m. Το ποσοστό των κυμάτων έως 1 m που παρατηρήθηκαν στο σημείο για τον χειμώνα αποτελούν το 43%, την άνοιξη 60%, το καλοκαίρι 79% και το φθινόπωρο 57%.

MENORCA
Wave Energy Period Rose 2015-2019



Εικόνα 103 Menorca: Εποχιακά Ροδογράμματα Ενεργειακής Περιόδου

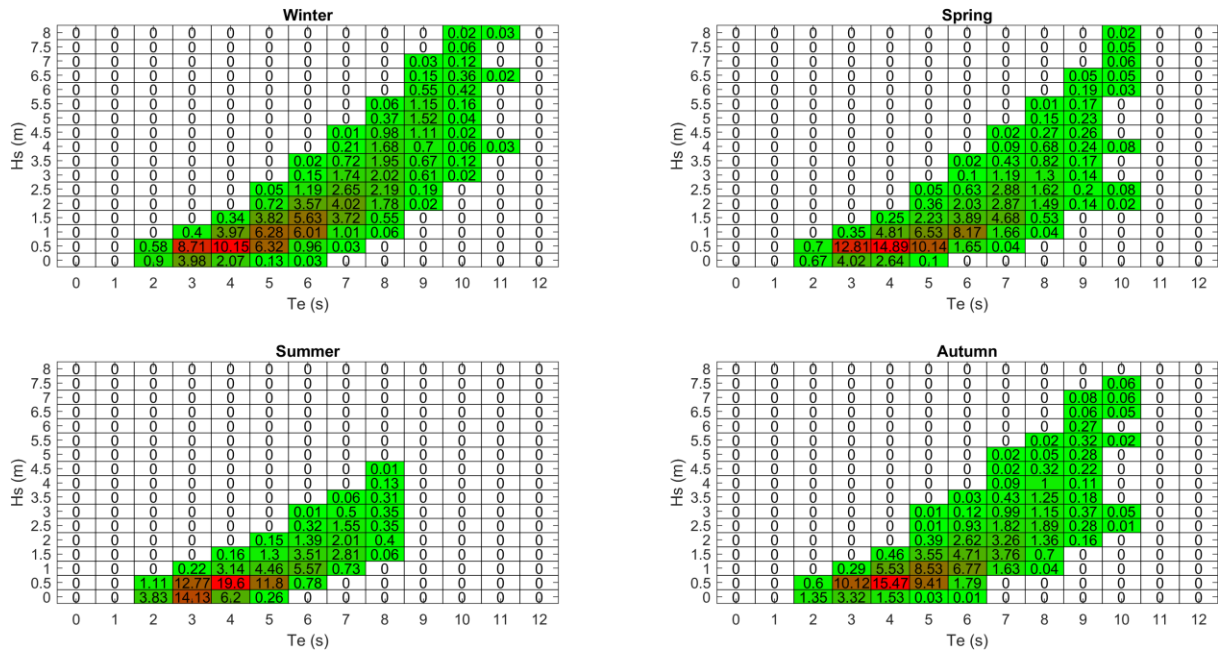
Παρομοίως στα ροδογράμματα της ενεργειακής περιόδου για το σημείο μελέτης έχουν καταγραφεί κύματα με μεγάλες ενεργειακές περιόδους σε όλες τις εποχές. Ωστόσο η κυρίαρχη περίοδοι έχουν τιμές από 4 έως 6 s εκτός από την εποχή του καλοκαιριού που είναι από 2 έως 4 s. Συγκεκριμένα το ποσοστό των κυμάτων από 4 έως 6 s που παρατηρήθηκαν στο σημείο επιλογής για τον χειμώνα αποτελούν το 35%, την άνοιξη 40% και το φθινόπωρο 43%, ενώ το καλοκαίρι το ποσοστό των κυμάτων από 2 έως 4 s που είναι η επικρατέστερη κατηγορία αποτελεί το 47%.



Εικόνα 104 Menorca: Ετήσια Ροδογράμματα Σημαντικού Ύψους Κύματος, Ενεργειακής Περιόδου και Κυματικού Δυναμικού

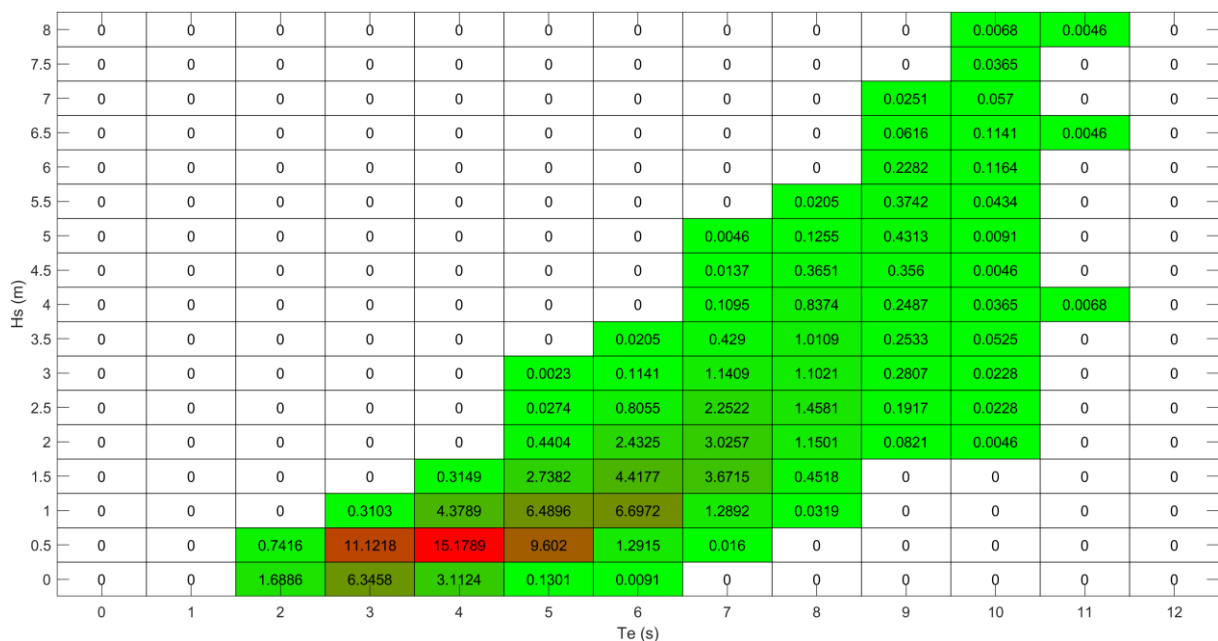
Στην ετήσια κατανομή των ροδογραμμάτων του σημαντικού ύψους, της ενεργειακής περιόδου και του δυναμικού του κύματος η επικρατέστερη διεύθυνση διάδοσης των κυμάτων είναι όπως και στα παραπάνω ροδογράμματα στον τομέα $[0^\circ, 15^\circ]$ και αποτελεί το 37% των συνολικών κυμάτων. Το συνηθέστερο ύψος κύματος για το σημείο μελέτης είναι έως 1 m με ποσοστό εμφάνισης 60%, η συνηθέστερη ενεργειακή περίοδος είναι 4 – 6 s με ποσοστό 39% και το επικρατέστερο κυματικό δυναμικό 5 kW/m με ποσοστό 71%.

Στη συνέχεια δημιουργήθηκαν οι πίνακες που συνδυάζουν το σημαντικό ύψος κύματος με την ενεργειακή περίοδο και παρουσιάζουν την συχνότητα εμφάνισης των συνδυασμών αυτών σε εποχιακή και ετήσια κατανομή.



Εικόνα 105 Μενορca: Εποχιακοί Πίνακες Κατανομής Συχνότητας Εμφάνισης

Όσον αφορά τους εποχιακούς πίνακες κατανομής της συχνότητας εμφάνισης, ο συνδυασμός σημαντικού ύψους κύματος και ενεργειακής περιόδου την μεγαλύτερη συχνότητα εμφάνισης έχει τιμές εύρους 0.25 – 0.75 m και 3.5 - 4.5 s αντίστοιχα. Επιπλέον το εύρος των συνδυασμών σημαντικού ύψους κύματος και ενεργειακής περιόδου, κατά την περίοδο του χειμώνα, της άνοιξης και του φθινοπώρου είναι μεγάλο συγκριτικά με το καλοκαίρι, όπου το εύρος των συνδυασμών αυτών περιορίζεται κατά πολύ, λόγω των μικρών υψών κύματος και ενεργειακών περιόδων.



Εικόνα 106 Μενορca: Ετήσιος Πίνακας Κατανομής Συχνότητας Εμφάνισης

Τέλος στον ετήσιο πίνακα κατανομής της συχνότητας εμφάνισης ο συνδυασμός με τη μεγαλύτερη συχνότητα εμφάνισης όπως προαναφέρθηκε είναι για κύματα με χαρακτηριστικά [0.25 – 0.75 m, 3.5 - 4.5 s] και με ποσοστό εμφάνισης 15.18%. Περαιτέρω πληροφορίες για το σημαντικό ύψος κύματος και την ενεργειακή περίοδο παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα. Χαρακτηριστικές τιμές αποτελούν το μέγιστο σημαντικό ύψος κύματος που ήταν 8.176 m και η μέγιστη ενεργειακή περίοδος 10.691 s, ενώ τα ελάχιστα ήταν 0.046 m και 1.501 s αντίστοιχα.

Ύψος Κύματος					
Μέση Τιμή	Διασπορά	Τυπική Απόκλιση	Min	Max	cv (%)
1.1347	1.1683	1.0809	0.046	8.176	95.25866
Περίοδος					
Μέση Τιμή	Διασπορά	Τυπική Απόκλιση	Min	Max	cv (%)
5.0616	2.8409	1.6855	1.501	10.691	33.29975

Πίνακας 8 Menorca: Χαρακτηριστικές τιμές του ύψους και της περιόδου των κυμάτων

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι συντεταγμένες των περιοχών μελέτης και οι συντεταγμένες, το βάθος και η μέση ετήσια κυματική ισχύς κάθε σημείου επιλογής τοποθέτησης της κυματικής μηχανής.

Όνομα	Συντεταγμένες Ανάλυσης (1°)				Επιλογή Σημείου			Μέση Ετήσια Κυματική Ισχύς Σημείου (kW/m)
	W	E	S	N	Βάθος (m)	E	N	
Ajaccio	8.25	9.25	41.23	42.23	-57	8.54	41.85	9
Alghero	7.75	8.75	40.23	41.23	-46	8.125	40.729	11
Annaba	7.25	8.25	36.52	37.52	-50	7.375	37.146	9
Benghazi	19.5	20.5	31.77	32.77	-48	20.042	32.271	7
Kasos	26.5	27.5	35.02	36.02	-54	27.042	35.438	5
Hyères	5.29	6.29	42.73	43.73	-59	6.25	42.99	6
Manzara del Vallo	11.75	12.75	37.02	38.02	-40	11.792	37.479	9
Menorca	3.54	4.54	39.48	40.48	-62	4.042	40.104	9

Πίνακας 9 Συγκεντρωτικός Πίνακας Συντεταγμένων και Μέσης Ετήσιας Κυματικής Ισχύς

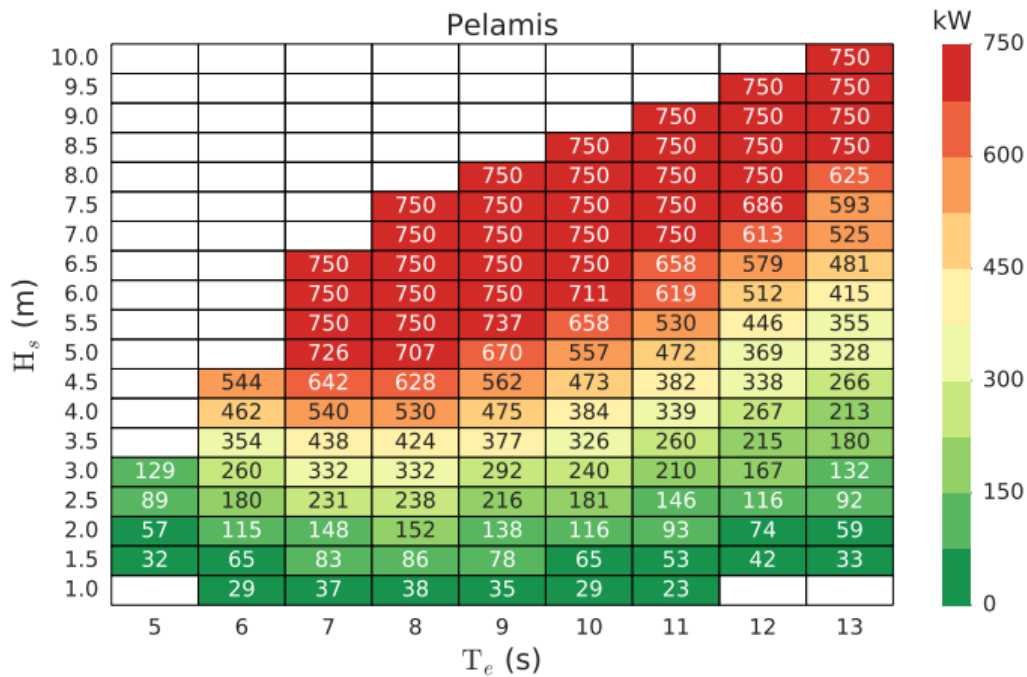
Όπως φαίνεται στον πίνακα παραπάνω από τα σημεία που επιλέχθηκαν για κάθε περιοχή για την τοποθέτηση των κυματικών μηχανών, ώστε να καλύπτουν τις απαραίτητες προϋποθέσεις βάθους και υψηλού κυματικού δυναμικού, η περιοχή μελέτης που ξεχωρίζει από τα αποτελέσματα είναι το Alghero. Το Alghero παρουσιάζει το υψηλότερο δυναμικό από όλες τις περιοχές μελέτης και υπολογίζεται στα 11 kW/m. Στην συνέχεια ακολουθούν οι περιοχές μελέτης Ajaccio, Annaba, Manzara del Vallo και Menorca με 9 kW/m, η Benghazi με 7 kW/m, το Hyères με 6 kW/m και τέλος η Κάσος με 5 kW/m.

Τέλος γενικά από την ανάλυση διαπιστώθηκε ότι η επικρατέστερη κατηγορία κυμάτων που καταγράφηκαν σε όλες τις περιοχές μελέτης, είχαν σημαντικό ύψος κύματος ανάμεσα 0.25 – 0.75 m και ενεργειακή περίοδο από 3.5 έως 4.5 s.

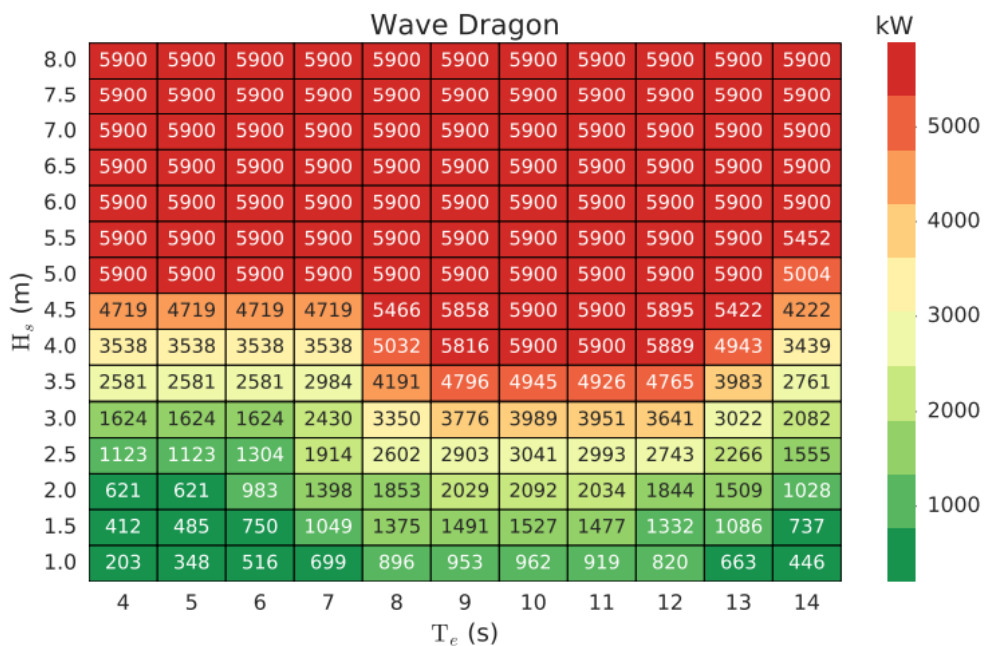
6.3. Τοποθέτηση των Κυματικών Μηχανών και αποτελέσματα απόδοσης

Αφού έγινε η ανάλυση των δεδομένων, που συγκεντρώθηκαν από τους διάφορους παρόχους και επιλέχθηκαν τα σημεία τοποθέτησης των κυματικών μηχανών, σημαντικό ρόλο για τον υπολογισμό της ισχύς έπαιξαν οι πίνακες κατανομής της συχνότητας εμφάνισης. Στους πίνακες αυτούς ο διαχωρισμός και το εύρος των κελιών επιλέχθηκαν έτσι ώστε να ταυτίζονται με τον διαχωρισμό των ενεργειακών πινάκων απόδοσης των κυματικών μηχανών (Power Matrices).

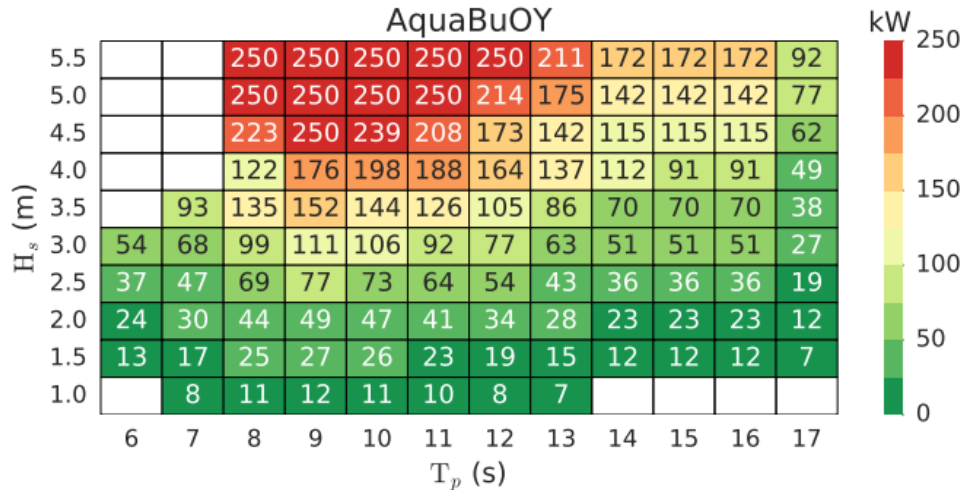
Παρακάτω παρουσιάζονται οι ενεργειακοί πίνακες για τις τρεις κυματικές μηχανές που είναι υπό μελέτη (Pelamis, WaveDragon, AquaBuoy).



Εικόνα 107 Ενεργειακός Πίνακας Απόδοσης Pelamis



Εικόνα 108 Ενεργειακός Πίνακας Απόδοσης WaveDragon



Εικόνα 109 Ενεργειακός Πίνακας Απόδοσης AquaBuoy

Παρατηρείται ότι κάθε μηχανή έχει το δικό της εύρος λειτουργίας. Συγκεκριμένα το Pelamis τίθεται σε λειτουργία για κύματα με σημαντικό ύψος κύματος από 0.75 έως 10.5 και ενεργειακή περίοδο από 3.5 έως 14.5 αλλά όχι για κάθε πιθανό συνδυασμό. Η ονομαστική του ισχύς φτάνει τις 750 kW και αποδίδει καλύτερα σε κύματα άνω των 4.75 m και 7 s. Για το WaveDragon η ονομαστική ισχύς είναι αρκετά υψηλή στις 5900 kW συγκριτικά με το Pelamis και το AquaBuoy, και αυτό οφείλεται στον όγκο της κατασκευής και στην μεγαλύτερη έκταση κυματικού δυναμικού που μπορεί να αξιοποιήσει η μηχανή. Ένα ακόμα πλεονέκτημα του WaveDragon είναι ότι λειτουργεί για όλους τους συνδυασμούς κυμάτων που κυμαίνονται από 0.75 έως 8.25 m ύψος και 3.5 έως 14.5 s περίοδο. Τέλος το AquaBuoy έχει πιο σημειακή εφαρμογή και η ονομαστική ισχύς του είναι στις 250 kW. Τα κύματα που θέτουν σε λειτουργία την κυματική αυτή μηχανή έχουν ύψος 0.75 – 5.75 m και ενεργειακή περίοδο 5.5 – 17.5 s.

Με την βοήθεια των ενεργειακών πινάκων των τριών κυματικών μηχανών αντιστοιχήθηκαν οι αποδόσεις ισχύς των συνδυασμών του σημαντικού ύψους κύματος και της ενεργειακής περιόδου με τους συνδυασμούς που εμφανίστηκαν σε κάθε περιοχή αντίστοιχα. Έτσι υπολογίστηκε η μέση εποχιακή και ετήσια παραγόμενη ενέργεια, οι ώρες που βρισκόταν σε λειτουργία κάθε κυματική μηχανή, όπως και η συνολική ενέργεια που παράχθηκε στην 5ετία και ο συντελεστής χωρητικότητας για όλες τις περιοχές.

Ο συντελεστής χωρητικότητας όπως προαναφέρθηκε και στο κεφάλαιο της μεθοδολογίας ορίζεται ως ο λόγος της πραγματικής παραγόμενης ενέργειας κατά την διάρκεια μίας περιόδου προς την ενέργεια που θα παραγόταν αν η μηχανή δούλευε συνέχεια στην μέγιστη ισχύ για την ίδια περίοδο.

$$CF = \frac{\text{παραγόμενη ενέργεια}}{\text{μέγιστη παραγόμενη ενέργεια}}$$

Παρακάτω παρατίθενται οι πίνακες της εποχιακής και ετήσιας αποδομένης ενέργειας για κάθε περιοχή και για κάθε κυματική μηχανή, οι ώρες και το ποσοστό λειτουργίας τους ανά περιοχή για την 5ετία μελέτης (2015-2019) καθώς και η συνολική κυματική ισχύς της 5ετίας και ο συντελεστής χωρητικότητας (Capacity Factor).

Κυματική Μηχανή	Μέση Εποχιακή Ενέργεια (GWh)				Μέση Ετήσια Ενέργεια (GWh)
	Χειμώνας	Άνοιξη	Καλοκαίρι	Φθινόπωρο	
AJACCIO					
Pelamis	0.2122	0.1405	0.0522	0.124	0.5359
WaveDragon	2.4757	1.6836	0.6738	1.485	6.3439
AquaBuoy	0.0616	0.038	0.0121	0.0328	0.1457
ALGHERO					
Pelamis	0.2679	0.1727	0.0627	0.1566	0.66
WaveDragon	3.0079	1.957	0.7544	1.7841	7.4596
AquaBuoy	0.0798	0.0474	0.0146	0.0427	0.1836
ANNABA					
Pelamis	0.2717	0.1449	0.0352	0.1347	0.5765
WaveDragon	3.1204	1.8033	0.5892	1.6824	7.0754
AquaBuoy	0.0818	0.0395	0.0076	0.0382	0.1627
BENGHAZI					
Pelamis	0.2161	0.0784	0.0229	0.0622	0.3882
WaveDragon	2.5	1.058	0.4401	0.9088	4.9959
AquaBuoy	0.0628	0.0186	0.0037	0.0151	0.1031
KASOS					
Pelamis	0.1541	0.0459	0.0376	0.0482	0.2884
WaveDragon	1.5277	0.624	0.6337	0.6359	3.444
AquaBuoy	0.0325	0.008	0.0048	0.008	0.0538
HYÈRES					
Pelamis	0.135	0.0902	0.027	0.0847	0.3432
WaveDragon	1.4731	1.0528	0.3866	0.9751	3.9339
AquaBuoy	0.029	0.0177	0.0043	0.0167	0.0695
MANZARA DEL VALLO					
Pelamis	0.2611	0.1755	0.0313	0.1371	0.6147
WaveDragon	2.5376	1.8093	0.4407	1.4526	6.3045
AquaBuoy	0.0616	0.0397	0.0056	0.0289	0.1381
MENORCA					
Pelamis	0.2808	0.1398	0.0494	0.148	0.599
WaveDragon	2.7506	1.4884	0.5701	1.5783	6.2168
AquaBuoy	0.0714	0.0325	0.01	0.0343	0.1424

Πίνακας 10 Μέση Εποχιακή και Ετήσια Κυματική Ενέργεια ανά Περιοχή

Από τον πίνακα της μέσης εποχιακής ενέργειας παρατηρείται, όπως ήταν αναμενόμενο από την ανάλυση του κυματικού δυναμικού, ότι η περίοδος του χειμώνα παρουσιάζει μεγαλύτερη απόδοση ενέργειας για κάθε περιοχή. Εν συνεχεία οι κυματικές μηχανές δείχνουν να αποδίδουν περισσότερο την άνοιξη ακολουθημένες από το φθινόπωρο και τέλος η χαμηλότερη ενέργεια παράγεται το καλοκαίρι. Εξαιρέση στην κατανομή απόδοσης ενέργειας ανάμεσα στις εποχές παρουσιάζει η Κάσος και η Menorca όπου η φθίνουσα κατάταξη παραγωγής απόδοσης έχει ως εξής: χειμώνας – φθινόπωρο – άνοιξη – καλοκαίρι.

Για την μέση ετήσια ενέργεια παρατηρείται ότι οι περιοχές που είναι πιο αποδοτικές σε φθίνουσα μορφή για κάθε κυματική μηχανή είναι:

- Για το Pelamis:

Alghero – Manzara del Vallo – Menorca – Annaba – Ajaccio – Benghazi – Hyères – Κάσος

- Για το WaveDragon:

Alghero – Annaba – Ajaccio – Manzara del Vallo – Menorca – Benghazi – Hyères – Κάσος

- Για το AquaBuoy:

Alghero – Annaba – Ajaccio – Menorca – Manzara del Vallo – Benghazi – Hyères – Κάσος

Διακρίνουμε από την παραπάνω ταξινόμηση ότι η περιοχή με την υψηλότερη παραγόμενη ενέργεια σε κάθε περίπτωση κυματικής μηχανής είναι το Alghero. Αντιθέτως οι περιοχές με την λιγότερη παραγόμενη ενέργεια είναι σταθερά η Benghazi, το Hyères και τέλος η Κάσος. Στις ενδιάμεσες θέσεις υπάρχουν εναλλαγές στις περιοχές ως προς την απόδοση τους ανάλογα την κυματική μηχανή.

Από τον υπολογισμό της μέσης ετήσιας παραγόμενης κυματικής ενέργειας, είναι ένας τρόπος να αξιολογηθεί η απόδοση κάθε κυματικής μηχανής ανά περιοχή. Ωστόσο δεν μπορεί να γίνει ακόμα η σύγκριση αποδοτικότητας ανάμεσα στις μηχανές καθώς η ονομαστική ισχύς τους και η αξιοποιήσιμη έκταση κυματικού δυναμικού διαφέρει για κάθε μία.

Η σύγκριση της καταλληλότητας των κυματικών μηχανών για την επιλογή της ιδανικότερης ανάλογα την περιοχή θα γίνει στη συνέχεια με την βοήθεια των παρακάτω πινάκων που διατυπώνουν τις ώρες λειτουργίας της κάθε μηχανής όπως και τον συντελεστή χωρητικότητας.

Κυματική Μηχανή	Ώρες Λειτουργίας (5ετία)	Ποσοστό (5ετία)
Σύνολο Ωρών 5ετίας = 43824		
AJACCIO		
Pelamis	18984 ώρες	43.32 %
WaveDragon	21941 ώρες	50.07 %
AquaBuoy	14409 ώρες	32.88 %
ALGHERO		
Pelamis	19995 ώρες	45.63 %
WaveDragon	23408 ώρες	53.41 %
AquaBuoy	15427 ώρες	35.20 %
ANNABA		
Pelamis	20437 ώρες	46.63 %
WaveDragon	24546 ώρες	56.01 %
AquaBuoy	15774 ώρες	35.99 %
BENGAZI		
Pelamis	16009 ώρες	36.53 %
WaveDragon	24414 ώρες	55.71 %
AquaBuoy	11288 ώρες	25.76 %
KASOS		
Pelamis	13945 ώρες	31.82 %
WaveDragon	26421 ώρες	60.29 %
AquaBuoy	7370 ώρες	16.82 %
HYÈRES		
Pelamis	17269 ώρες	39.41 %
WaveDragon	22497 ώρες	51.33 %
AquaBuoy	11605 ώρες	26.48 %
MANZARA DEL VALLO		
Pelamis	19989 ώρες	45.61 %
WaveDragon	27934 ώρες	63.74 %
AquaBuoy	14131 ώρες	32.24 %
MENORCA		
Pelamis	17209 ώρες	39.27 %
WaveDragon	22107 ώρες	50.45 %
AquaBuoy	12513 ώρες	28.55 %

Πίνακας 11 Ώρες και Ποσοστό Λειτουργίας Κυματικών Μηχανών ανά Περιοχή για την 5ετία

Ο πίνακας παραπάνω αποτυπώνει τον αριθμό και το ποσοστό ωρών που βρίσκονταν οι κυματικές μηχανές σε λειτουργία για τα 5 χρόνια μελέτης (43824 ώρες). Σε κάθε περίπτωση περιοχής, η κυματική μηχανή με την μεγαλύτερη διάρκεια σε χρήση ήταν το WaveDragon με ποσοστά που κυμαίνονταν από 50.07 - 63.74 %. Το AquaBuoy ήταν η κυματική μηχανή με την μικρότερη διάρκεια λειτουργίας και ποσοστά από 16.82 - 35.99 %. Τέλος το Pelamis ήταν σε μία ενδιάμεση κατάσταση με ποσοστό λειτουργίας σε γενικές γραμμές στα 5 χρόνια σε ποσοστό 36.53 - 46.63 % εκτός από την περιοχή της Κάσου που ήταν λιγότερο ενεργό με ποσοστό 31.82 %.

Κυματική Μηχανή	Ενέργεια 5ετίας (GWh)	Ενέργεια 5ετίας σε ονομαστική λειτουργία μηχανής (GWh)	Capacity Factor
AJACCIO			
Pelamis	2.6795	32.868	0.0815
WaveDragon	31.7195	258.5616	0.1227
AquaBuoy	0.7285	10.956	0.0665
ALGHERO			
Pelamis	3.3	32.868	0.1004
WaveDragon	37.298	258.5616	0.1443
AquaBuoy	0.918	10.956	0.0838
ANNABA			
Pelamis	2.8825	32.868	0.0877
WaveDragon	35.377	258.5616	0.1368
AquaBuoy	0.8135	10.956	0.0743
BENGHAZI			
Pelamis	1.941	32.868	0.0591
WaveDragon	24.9795	258.5616	0.0966
AquaBuoy	0.5155	10.956	0.0471
KASOS			
Pelamis	1.442	32.868	0.0439
WaveDragon	17.22	258.5616	0.0666
AquaBuoy	0.269	10.956	0.0246
HYÈRES			
Pelamis	1.716	32.868	0.0522
WaveDragon	19.6695	258.5616	0.0761
AquaBuoy	0.3475	10.956	0.0317
MANZARA DEL VALLO			
Pelamis	3.0735	32.868	0.0935
WaveDragon	31.5225	258.5616	0.1219
AquaBuoy	0.6905	10.956	0.0630
MENORCA			
Pelamis	2.995	32.868	0.0911
WaveDragon	31.084	258.5616	0.1202
AquaBuoy	0.712	10.956	0.0650

Πίνακας 12 Κυματική Ενέργεια (5ετίας), Ενέργεια σε Ονομαστική Λειτουργία Μηχανής (5ετίας) και Capacity Factor ανά Περιοχή

Η παραγόμενη ενέργεια των τριών κυματικών μηχανών που λειτουργούν για μια 5ετία στην ονομαστική τους ισχύ είναι για την κάθε μία αντίστοιχα:

- Pelamis: **32.868** GWh
- WaveDragon: **258.5616** GWh
- AquaBuoy: **10.956** GWh

Αφού υπολογίστηκε η ενέργεια που παράχθηκε στην 5ετία για κάθε μηχανή τοποθετημένη στις 8 περιοχές μελέτης, στη συνέχεια διατυπώθηκε ο συντελεστής χωρητικότητας για κάθε περίπτωση. Από τον συντελεστή χωρητικότητας διαπιστώνεται ότι η ιδανικότερη κυματική μηχανή για την παραγωγή ενέργειας σε κάθε περιοχή είναι το WaveDragon. Το WaveDragon διαδέχεται σε αποδοτικότητα η συσκευή Pelamis και στη συνέχεια το AquaBuoy για κάθε περίπτωση.

7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Μετά τη συλλογή και ανάλυση του κυματικού δυναμικού της Μεσογείου, την απομόνωση των 8 περιοχών για λεπτομερέστερη ανάλυση, και την επιλογή των σημείων τοποθέτησης που πληρούν τις απαραίτητες συνθήκες βάθους και κυματικού δυναμικού, η ταξινόμηση των περιοχών μελέτης ως προς το υψηλότερο κυματικό δυναμικό είναι το Alghero με 11 kW/m , Ajaccio, Annaba, Manzara del Vallo και Menorca με 9 kW/m, η Benghazi με 7 kW/m, το Hyères με 6 kW/m και τέλος η Κάσος με 5 kW/m.

Κατά την εγκατάσταση των κυματικών μηχανών, παρατηρείται ότι η ταξινόμηση των μελετώμενων περιοχών σύμφωνα με τον μέσο ετήσιο δυναμικό κυματικής ενέργειας συμπίπτει με την ταξινόμηση σύμφωνα με την απόδοση των κυματικών μηχανών. Αυτό οφείλεται κυρίως στην ομοιομορφία των κυμάτων που έχουν στην πλειονότητά τους σημαντικό ύψος κύματος στο εύρος 0,25 - 0,75 m και ενεργειακή περίοδο στο εύρος 3,5 - 4,5 s, σε όλες τις περιοχές μελέτης.

Το Alghero αποδείχθηκε η περιοχή που απέδωσαν καλύτερα και οι τρεις υπό μελέτη κυματικές μηχανές που τοποθετήθηκαν. Αυτό οφείλεται και συσχετίζεται με το αισθητά υψηλότερο δυναμικό συγκριτικά με τις υπόλοιπες περιοχές μελέτης. Συγκεκριμένα οι συντελεστές χωρητικότητας που αποδόθηκαν για κάθε μηχανή ήταν:

- Για το Pelamis: 0.1004
- Για το WaveDragon: 0.1443
- Για το AquaBuoy: 0.0838

Η κυματική μηχανή που αποδίδει καλύτερα σύμφωνα με τον συντελεστή χωρητικότητας σε όλες τις περιπτώσεις και περιοχές που μελετώνται είναι το WaveDragon. Ωστόσο, θα ήταν λάθος να προτιμηθεί έναντι των άλλων δύο μηχανών ως βέλτιστη καθώς σε κάθε περίπτωση πρέπει να ληφθεί υπόψη το σταθμισμένο κόστος ενέργειας (levelized cost of electricity (LCOE)). Ως εκ τούτου, είναι σημαντικό να υπολογιστούν οι κεφαλαιακές (CAPEX) και οι λειτουργικές δαπάνες (OPEX) σε σύγκριση με την αξία της ενέργειας που αποδίδεται στην διάρκεια κύκλου ζωής της μηχανής.

Σε γενικές γραμμές, η παρούσα μελέτη έδειξε ότι το κυματικό δυναμικό της Μεσογείου δεν φαίνεται να είναι πολύ αποδοτικό, βάσει των τεχνολογιών που έχουν αναπτυχθεί μέχρι στιγμής, και συγκεκριμένα των τριών ήδη τεχνολογικά ώριμων κυματικών συσκευών που εξετάστηκαν. Ενδεχομένως, οι μελλοντικές συσκευές, θα είναι σε θέση να αξιοποιούν κύματα μικρότερου ύψους και περιόδου και να αποδίδουν υψηλότερα ποσοστά ενέργειας για τους συνδυασμούς αυτούς, καθιστώντας έτσι τη Μεσόγειο να ενδείκνυται για επενδύσεις εκμετάλλευσης της κυματικής ενέργειας.

Συνολικά, όσον αφορά τη δυνατότητα εφαρμογής των κυματικών μηχανών σε θάλασσες χαμηλής ενέργειας (όπως η Μεσόγειος και η Μαύρη Θάλασσα), στην πρόσφατες ανασκοπήσεις του (Foteinis, 2022) & του (Bozzi et al., 2018) διαπιστώθηκε ότι για το μεσογειακό κλίμα ήπιων κυμάτων, η επιβιωσιμότητα των μηχανών δεν φαίνεται να αποτελεί

σημαντικό ζήτημα, όμως για τη μεγαλύτερη αποδοτικότητα των μηχανών προτείνεται ο υποβιβασμός της κλίμακας τους. Επιπλέον, όπως συμπεραίνεται στις δύο δημοσιεύσεις στον προσδιορισμό και επιλογή συγκεκριμένης μηχανής (τεχνολογία, χωρητικότητα και γεωμετρία) απαιτούνται υψηλής ποιότητας κυματικά δεδομένα και εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από την τοποθεσία, με παράδειγμα τη Μεσόγειο Θάλασσα όπου ένας λόγος υποβιβασμού της κλίμακας 0,25 παρείχε τους βέλτιστους συντελεστές χωρητικότητας.

8. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Anaconda [WWW Document], 2022. . Checkmate Seaenergy. URL <https://www.checkmateukseaenergy.com/> (accessed 4.14.22).
- Benjamin Dewals (Ed.), 2016. Sustainable Hydraulics in the Era of Global Change: Proceedings of the 4th IAHR Europe Congress (Liege, Belgium, 27-29 July 2016). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b21902>
- Besio, G., Mentaschi, L., Mazzino, A., 2016. Wave energy resource assessment in the Mediterranean Sea on the basis of a 35-year hindcast. *Energy* 94, 50–63. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.10.044>
- Bozzi, S., Besio, G. & Passoni, G. 2018. Wave power technologies for the Mediterranean offshore: Scaling and performance analysis. *Coastal Engineering*, 136, 130-146.
- Burke, M., Petraviciute, E., 2022. The Potential of Wave Power [WWW Document]. URL <https://www.kslaw.com/blog-posts/the-potential-of-wave-power> (accessed 4.14.22).
- CETO Technology, 2022. . Carnegie. URL <https://www.carnegiece.com/ceto-technology/> (accessed 4.14.22).
- EMEC: European Marine Energy Centre [WWW Document], n.d. URL <https://www.emec.org.uk/> (accessed 2.6.23).
- Farrok, O., Ahmed, K., Tahlil, A.D., Farah, M.M., Kiran, M.R., Islam, Md.R., 2020. Electrical Power Generation from the Oceanic Wave for Sustainable Advancement in Renewable Energy Technologies. *Sustainability* 12, 2178. <https://doi.org/10.3390/su12062178>
- Foteinis, S., 2022. Wave energy converters in low energy seas: Current state and opportunities. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 162, 112448. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112448>
- Guillou, N., Chapalain, G., 2018. Annual and seasonal variabilities in the performances of wave energy converters. *Energy* 165, 812–823. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.10.001>
- Lavidas, G., Agarwal, A., Venugopal, V., 2018. Availability and Accessibility for Offshore Operations in the Mediterranean Sea. *J. Waterway, Port, Coastal, Ocean Eng.* 144, 05018006. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WW.1943-5460.0000467](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WW.1943-5460.0000467)
- Lavidas, G., Loukogeorgaki, E., Michalides, C., Chatjigeorgiou, I.K., n.d. Effects of metocean conditions on selecting optimal location for wave energy production 10.
- Lavidas, G., Venugopal, V., 2017. A 35 year high-resolution wave atlas for nearshore energy production and economics at the Aegean Sea. *Renewable Energy* 103, 401–417. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.11.055>

- Liberti, L., Carillo, A., Sannino, G., 2013. Wave energy resource assessment in the Mediterranean, the Italian perspective. *Renewable Energy* 50, 938–949. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2012.08.023>
- Marine Energy Research - City University of Hong Kong [WWW Document], 2022. URL http://www.cityu.edu.hk/see_mer/wave-devices.htm (accessed 4.14.22).
- PB3 PowerBuoy | Ocean Power Technologies [WWW Document], 2022. URL <https://oceanpowertechnologies.com/platform/opt-pb3-powerbuoy/> (accessed 4.14.22).
- Pelamis Wave Power : EMEC: European Marine Energy Centre, 2022. URL <https://www.emec.org.uk/about-us/wave-clients/pelamis-wave-power/> (accessed 4.14.22).
- REWEC3 Wavenergy's Projects and Events, 2022. . Wavenergy.it. URL <https://www.wavenergy.it/portfolio/> (accessed 4.14.22).
- Science and medical images, photos, illustrations, video footage - Science Photo Library [WWW Document], n.d. URL <https://www.sciencephoto.com/> (accessed 2.6.23).
- Soukissian, T., Gizari, N., Fytilis, D., Papadopoulos, A., Korres, G., Prospathopoulos, A., n.d. Wind and Wave Potential in Offshore Locations of the Greek Seas 8.
- Straume I (2010) Straumekraft AS: durable and profitable wave power. In: Proceedings of the 3rd International Conference on Ocean Energy, pp 1–6
- The Penguin, 2022. . Wello Oy. URL <https://wello.eu/the-penguin-2/> (accessed 4.14.22).
- Trujillo, A., Thurman, H., 2010. Essentials of Oceanography.
- Wave devices : EMEC: European Marine Energy Centre, 2022. URL <https://www.emec.org.uk/marine-energy/wave-devices/> (accessed 4.14.22).
- WaveDragon Technology, 2022. URL <http://www.wavedragon.net/forside-2-2-2/> (accessed 4.14.22).
- WaveRoller – AW-Energy Oy, 2022. URL <https://aw-energy.com/waveroller/> (accessed 4.14.22).
- Γκιζάρη Νικόλ, 2012. Εκτίμηση κυματικού δυναμικού στις ελληνικές θάλασσες. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- Κύματα [WWW Document], 2022. URL http://www.aquaret.com/indexbf8e.html?option=com_content&view=article&id=137&Itemid=280&lang=el (accessed 4.14.22).
- Ντάβαλης Γεώργιος, 2016. Κυματική Ενέργεια: Τεχνολογίες Εκμετάλλευσης και Ελληνικό Κυματικό Δυναμικό. Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.