



ΔΙΕΘΝΕΣ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΤΗΣ ΕΛΛΑΔΟΣ



ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΣΠΟΥΔΩΝ
«ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ»

Διπλωματική Εργασία

**Αξιοποίηση της θαλάσσιας κυματικής ενέργειας - Εφαρμογή σε
επιλεγμένες παράκτιες περιοχές της Ελλάδας.**

Φοιτήτρια: Υποδηματοπούλου Σοφία

Σίνδος

Ιούνιος 2023

Αξιοποίηση της θαλάσσιας κυματικής ενέργειας - Εφαρμογή σε επιλεγμένες παράκτιες περιοχές της Ελλάδας.

Φοιτήτρια: Υποδηματοπούλου Σοφία

Υποβλήθηκε στο Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος της Σχολής Μηχανικών του ΔΙΠΑΕ στο πλαίσιο του Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών «Σχεδιασμός και Κατασκευή Τεχνικών Έργων»

Ημερομηνία Προφορικής Εξέτασης: 29 / 6 / 2023

Τριμελής Εξεταστική Επιτροπή:

1. Δρ. Σαββίδης Ιωάννης, Καθηγητής – Επιβλέπων
2. Δρ. Κεραμάρης Ευάγγελος, Αναπλ. Καθηγητής – Μέλος
3. Δρ. Τελόγλου Ηλίας, Αναπλ. Καθηγητής – Μέλος

Copyright © Υποδηματοπούλου Σοφία, 2023

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Αξιοποίηση της θαλάσσιας κυματικής ενέργειας - Εφαρμογή σε επιλεγμένες περιοχές της Ελλάδας.

Απαγορεύεται η αντιγραφή αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση η αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Διεθνούς Πανεπιστημίου της Ελλάδος (ΔΙ.ΠΑ.Ε.)

Σίνδος

Ιούνιος 2023

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Με την παρούσα διπλωματική εργασία, ολοκληρώνεται ο κύκλος των σπουδών μου στο μεταπτυχιακό πρόγραμμα σπουδών «Σχεδιασμός και Κατασκευή Τεχνικών Έργων» του τμήματος Μηχανικών Περιβάλλοντος του Διεθνούς Πανεπιστημίου της Ελλάδος.

Η εκπόνηση της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας δεν θα ήταν δυνατή χωρίς την άμεση ή έμμεση συμβολή ορισμένων ανθρώπων, στους οποίους θα ήθελα να εκφράσω τις θερμότερες ευχαριστίες μου.

Ιδιαίτερα, θέλω να εκφράσω ένα βαθύ ευχαριστώ στον επιβλέποντα καθηγητή μου, Δρ. Ιωάννη Σαββίδη, Καθηγητή του τμήματος Μηχανικών Περιβάλλοντος του ΔΙ.ΠΑ.Ε, του οποίου η επιστημονική καθοδήγηση, η αμέριστη υποστήριξη και διαθεσιμότητά του καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της εργασίας, αποτέλεσαν σπουδαία βοήθεια για την επιτυχή ολοκλήρωσή της.

Ένα μεγάλο ευχαριστώ οφείλω στην καθηγήτρια του τμήματος Μηχανικών Περιβάλλοντος του ΔΙ.ΠΑ.Ε., Δρ. Μαρίνα Σύρπη, η οποία βοήθησε σημαντικά, με τις γνώσεις και την εμπειρία της, στη στατιστική επεξεργασία των δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία, με τη χρήση του προγράμματος SPSS.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες οφείλω να εκφράσω στην Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία για την ευγενική παροχή των ανεμολογικών δεδομένων που χρειάστηκαν για την εκπόνηση της παρούσας εργασίας.

Τέλος, δεν μπορώ να μην ευχαριστήσω κάθε μέλος της οικογένειάς μου ξεχωριστά, για την στήριξη που μου παρείχαν, ηθική και υλική, τη συμπαράσταση, την κατανόηση και απεριόριστη υπομονή που έδειξαν, κατά τη διάρκεια της εκπόνησης αυτής της εργασίας.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα εργασία εκπονήθηκε στα πλαίσια του μεταπτυχιακού προγράμματος σπουδών «Σχεδιασμός και Κατασκευή Τεχνικών Έργων» του Διεθνούς Πανεπιστημίου της Ελλάδος. Στη συγκεκριμένη εργασία παρουσιάζονται αναλυτικά οι μέχρι σήμερα διαδεδομένοι πιθανοί τρόποι και κατασκευαστικές εκμετάλλευσης της κυματικής ενέργειας. Παράλληλα, εξετάζονται τρεις διαφορετικές περιοχές στον Ελλαδικό παράκτιο χώρο, ως προς την καταλληλότητά τους για εγκατάσταση σε αυτές ενός ενεργειακού τοίχου, για αξιοποίηση της κυματικής ενέργειας και παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Στο 1^ο Κεφάλαιο «Εισαγωγή» παρουσιάζονται θεωρητικές πληροφορίες για την αξιοποίηση της ενέργειας των κυμάτων, ιστορικά στοιχεία σχετικά με αυτή και αναλύονται οι πιθανοί τρόποι με τους οποίους δύναται να αξιοποιηθεί η κυματική ενέργεια.

Στο 2^ο Κεφάλαιο «Μέθοδοι και Υλικά» αναφέρονται όλες τις πηγές των δεδομένων και αναλύεται ο τρόπος επεξεργασίας τους.

Στο 3^ο Κεφάλαιο «Αποτελέσματα και Συζήτηση» παρουσιάζονται τα αναλυτικά αποτελέσματα της έρευνας. Περιλαμβάνονται πίνακες και εικόνες για την κάθε μία υπό εξέταση περιοχή μελέτης ξεχωριστά.

Στο 4^ο Κεφάλαιο «Βιβλιογραφία» αναφέρονται όλες οι βιβλιογραφικές πηγές από τις οποίες αντλήθηκαν οι πληροφορίες για αυτήν την εργασία. Αναφέρονται ξεχωριστά οι ξενόγλωσσες πηγές, οι ελληνικές πηγές, καθώς και οι διαδικτυακές πηγές.

SUMMARY

The present study, titled "Exploitation of marine wave energy - Application in selected Greek coastal areas," was conducted as part of the postgraduate program in "Design and Construction of Civil Engineering Structures" at the International University of Greece. This study provides a detailed analysis of all possible methods and devices for harnessing wave energy. Additionally, it examines three different areas in the coastal region of Greece, assessing their suitability for the installation of an energy barrier to exploit wave energy and generate electricity.

Chapter 1, "Introduction," presents theoretical information on wave energy utilization, provides historical background, and analyzes the various ways in which wave energy can be harnessed.

Chapter 2, "Methods and Materials," identifies all data sources and describes the data processing methods employed in the study.

Chapter 3, "Results and Discussion," presents the detailed findings of the research. This chapter includes tables and figures specific to each examined area.

Chapter 4, "Bibliography," lists all the bibliographic sources used as references for this study. Separate sections are dedicated to foreign-language sources, Greek sources, and online sources.

Πίνακας περιεχομένων

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1.1 Γενικά-Ορισμοί	1
1.2 Ιστορικά στοιχεία για την αξιοποίηση της κυματικής ενέργειας.....	4
1.2.1 Η αξιοποίηση της κυματικής ενέργειας στην Ευρώπη.....	4
1.2.2 Η αξιοποίηση της κυματικής ενέργειας σε παγκόσμιο επίπεδο	7
1.2.3. Η αξιοποίηση της κυματικής ενέργειας στην Ελλάδα.....	8
1.3. Το κύμα.....	11
1.3.1 Τα θαλάσσια κύματα.....	12
1.3.2 Η ενέργεια των κυμάτων.....	15
1.4. Μετατροπείς κυματικής ενέργειας	18
1.4.1. Κατηγοριοποίηση των μετατροπέων κυματικής ενέργειας.....	19
1.4.2. Κατηγοριοποίηση ανάλογα την τοποθεσία εγκατάστασης	20
1.4.3. Κατηγοριοποίηση ανάλογα τη μέθοδο απόσπασης της κυματικής ενέργειας	22
1.4.4. Κατηγοριοποίηση ανάλογα τη μέθοδο μετατροπής της κυματικής ενέργειας	26
1.5. Συσκευές μετατροπής κυματικής ενέργειας – Αναλυτική περιγραφή	31
1.5.1. LIMPET (Last Installed Marine Power Energy Transmitter).....	31
1.5.2. WECA (Wave Energy Conversion Activator).....	31
1.5.3. Τεχνολογίες Υπέρβασης/Υπερύψωσης (SSG).....	32
1.5.4. LabBuoy	33
1.5.5. SDE.....	33
1.5.6. Mighty Whale	34
1.5.7. WET EnGen™	35
1.5.8. CES (Combined Energy System).....	36
1.5.9. Trotman Unit	37
1.5.10. The Waveberg	37
1.5.11. Oyster	38
1.5.12. WaveRoller	39
1.5.13. bioWAVE.....	39
1.5.14. MAWEC (Multi Absorbing Wave Energy Converter)	40
1.5.15. Oceanlinx.....	40
1.5.16. Sperboy.....	41
1.5.17. European Pilot Plant.....	41
1.5.18. Energetech.....	42
1.5.19. Pendulor	42

1.5.20. TAPCHAN	43
1.5.21. OSPREY	43
1.5.22. Archimedes Wave Swing (AWS)	44
1.5.23. Floating Wave Power Vessel	45
1.5.24. McCabe Wave Pump	45
1.5.25. OPT PowerBuoy	46
1.5.26. AquaBuoy	47
1.5.27. Pelamis	47
1.5.28. Point Absorber Wave Energy Converter	48
1.5.29. Salter Duck.....	49
1.5.30. Wave Dragon	49
1.6. Λιμενικές και παράκτιες κατασκευές.....	50
1.6.1. Λιμενικές και παράκτιες κατασκευές – Αναλυτική περιγραφή	50
1.6.1.1. Μώλοι.....	50
1.6.1.2. Βραχίονες	51
1.6.1.3. Κυματοθραύστες.....	52
1.6.1.4. Κρηπιδότοιχοι.....	52
1.7. Ενεργειακές λιμενικές και παράκτιες κατασκευές	53
1.7.1. Mutriku Energy Plant.....	53
1.7.2. Medusa	54
1.7.3. Μοντελοποίηση της εκμετάλλευσης της κυματικής ενέργειας από έναν κυματοθραύστη.....	55
1.7.5. Εκμετάλλευση της κυματικής ενέργειας σε παράκτια τεχνικά έργα.....	55
1.7.6. Μελέτη αξιοποίησης της κυματικής ενέργειας στις κατασκευές λιμένα	55
1.7.7. Βέλτιστος σχεδιασμός ενός συστήματος υπερπήδησης κυματισμών OBREC σε κυματοθραύστη με τη χρήση Αρμονικού Αλγόριθμου	56
1.7.8. Σύνθετοι κρηπιδότοιχοι για την αξιοποίηση της κυματικής ενέργειας: 2D πειραματικά αποτελέσματα.....	56
1.8. Σκοπός της εργασίας	57
2. ΜΕΘΟΔΟΙ ΚΑΙ ΥΛΙΚΑ.....	59
2.1. Ανεμολογικά δεδομένα	59
2.2. Μέθοδοι πρόγνωσης ανεμογεννών κυματισμών	61
2.3. Μαθηματικό μοντέλο WAVEN	64
2.4. Υπολογισμός ισχύος μέσω του μαθηματικού μοντέλου WAVEN	67
3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ.....	71
3.1 Αποτελέσματα.....	71

3.1.1 Περιοχή Ακτίου – Αποτελέσματα.....	71
3.1.2 Περιοχή Ηρακλείου - Αποτελέσματα	90
3.1.3 Περιοχή Ιεράπετρας – Αποτελέσματα	109
3.2 Αποτελέσματα εφαρμογής μοντέλου	125
3.3 Συμπεράσματα - Προτάσεις	130
4. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	133
4.1 Ξένη βιβλιογραφία.....	133
4.2 Ελληνική βιβλιογραφία	135
4.3 Ηλεκτρονικές πηγές.....	137

Πίνακας Εικόνων

Εικόνα 1 Αρχή λειτουργίας της συσκευής Archimedes Wave Swing (Blackledge et al., 2013)	6
Εικόνα 2 Μέσο ύψος κύματος (αριστερά) (Soukissian et al., 2007) και μέση ροή κυματικής ισχύος (δεξιά) (Soukissian et al., 2011) κατά την περίοδο του χειμώνα	9
Εικόνα 3. Μέσο ύψος κύματος (αριστερά) (Soukissian et al., 2007) και μέση ροή κυματικής ισχύος (δεξιά) (Soukissian et al., 2011) κατά την περίοδο της άνοιξης.....	10
Εικόνα 4. Μέσο ύψος κύματος (αριστερά) (Soukissian et al., 2007) και μέση ροή κυματικής ισχύος (δεξιά) (Soukissian et al., 2011) κατά την περίοδο του καλοκαιριού	10
Εικόνα 5. Μέσο ύψος κύματος (αριστερά) (Soukissian et al., 2007) και μέση ροή κυματικής ισχύος (δεξιά) (Soukissian et al., 2011) κατά την περίοδο του φθινοπώρου	11
Εικόνα 6. Γραφική αναπαράσταση κύματος (Muchtar et al., 2016).....	12
Εικόνα 7. Χαρακτηριστική μορφή απλού ημιτονοειδούς κύματος (Κουτίτας, 1996).....	13
Εικόνα 8. Κυκλική κίνηση στοιχειώδους μάζας νερού (Vorn et al., 2014)	15
Εικόνα 9. Δυνάμεις που ασκούνται σε επιφανειακά σώματα νερού στην επιφάνεια της θάλασσας (Vorn et al., 2014)	16
Εικόνα 10. Εξασθενητής κυμάτων (aquaret.com).....	23
Εικόνα 11. Αξονοσυμμετρικός σημειακός απορροφητής (aquaret.com).....	23
Εικόνα 12. Παλλόμενος μετατροπέας (aquaret.com).....	24
Εικόνα 13. Παλλόμενη υδάτινη στήλη (aquaret.com).....	25
Εικόνα 14. Συσκευή υπερακόντισης (aquaret.com)	25
Εικόνα 15. Βυθιζόμενη συσκευή διαφορικής πίεσης (aquaret.com)	26
Εικόνα 16. Σχηματική επεξήγηση παλινδρομούσας στήλης νερού (Dzhonova et al., 2013)..	27
Εικόνα 17. Συσκευή υπερπήδησης (Goswami, 2015)	27
Εικόνα 18. Αρχή λειτουργίας attenuator (EPRI, 2007).....	28
Εικόνα 19. Η συσκευή Archimedes Wave Swing (Valerio et al., 2007)	29
Εικόνα 20. Αρχή λειτουργίας συσκευή οριζόντιας κυματικής παλινδρόμησης (Καρακινάρης, 2017).....	29
Εικόνα 21. Οι συσκευές OPT Powerbuoy (αριστερά) και Aquabuoy (δεξιά) (sciencephoto.com)	30
Εικόνα 22. Η τεχνολογία Anaconda (Heller et al., 2010).....	30
Εικόνα 23. Η τεχνολογία LIMPET στη νήσο Islay (sciencephoto.com).....	31
Εικόνα 24. Η κατασκευή SSG (Vicinanza et al., 2012)	33
Εικόνα 25. Η τεχνολογία Labuoy (Καρακινάρης, 2017)	33
Εικόνα 26. Ο μετατροπέας SDE (Καρακινάρης, 2017)	34

Εικόνα 27. Η τεχνολογία Mighty Whale (jamstec.go.jp)	35
Εικόνα 28. Ο μετατροπέας WET EnGen (Καρακινάρης, 2017).....	36
Εικόνα 29. Εφαρμογή της συσκευής Waveberg στις Η.Π.Α. (Huckerby, 2012)	38
Εικόνα 30. Το σύστημα Oyster (Renzi et al., 2012)	38
Εικόνα 31. Ο μετατροπέας WaveRoller (sciencephoto.com).....	39
Εικόνα 32. Το σύστημα bioWAVE (inhabitat.com).....	40
Εικόνα 33. Η συσκευή Oceanlinx (seao2.com).....	41
Εικόνα 34. Η συσκευή European Pilot Plant (Clement et al., 2002).....	42
Εικόνα 35. Η συσκευή Energetech (Clement et al., 2002)	42
Εικόνα 36. Σχηματική απεικόνιση της συσκευής Pendulor (Clement et al., 2002)	43
Εικόνα 37. Η συσκευή OSPREY II (sciencephoto.com)	44
Εικόνα 38. Σχηματική απεικόνιση του συστήματος Archimedes Wave Swing (Baker et al., 2001).....	44
Εικόνα 39. Floating Wave Power Vessel (Lagstroem, 2000)	45
Εικόνα 40. Η τεχνολογία McCabe Wave Pump (Jackson et al., 2012)	46
Εικόνα 41. Αρχή λειτουργίας OPT PowerBuoy (Hossain, 2015).....	46
Εικόνα 42. Αρχή λειτουργίας της συσκευής Aquabuoy (Baker, 2007).....	47
Εικόνα 43. Συσκευή Pelamis (sciencephoto.com).....	48
Εικόνα 44. Η συσκευή Point Absorber WEC (Ζαφειρίου, 2012)	48
Εικόνα 45. Η διάταξη Salter Duck (baonguyen1994.wordpress.com)	49
Εικόνα 46. Αρχή λειτουργίας συσκευής Wave Dragon (Kofoed et al., 2007)	49
Εικόνα 47. Προσήμεμος μώλος στην Ικαρία (https://www.ergomare.gr/el/erga/epektasi-prosinemou-molou-limena-eydilou-ikarias-eydilos-1997-2014/).....	51
Εικόνα 48. Βραχίονες σε λιμάνι του Σίδνεϊ (https://www.visitsydneyaustralia.com.au/wharves.html)	51
Εικόνα 49. Σχηματική απεικόνιση κυματοθραύστη (Domingo, 2010).....	52
Εικόνα 50. Κρηπιδότοιχος (http://bulkheadbuilders.com/bulkheads-and-retaining-wall-construction/).....	53
Εικόνα 51. Η κατασκευή Mutriku Energy plant (a) και οι διατάξεις OWC (b) (Cascajo et al., 2019).....	54
Εικόνα 52. Η συσκευή Medusa (wavesenergy.blogspot.com).....	54
Εικόνα 53 Η ενέργεια που εισέρχεται σε έναν σύνθετο κρηπιδότοιχο (Stagonas et al., 2010)	56
Εικόνα 54. Οι επιλεγμένες περιοχές (Iprodimatoroulou et al., 2023)	57

Εικόνα 55. Το ισοδύναμο μήκος κύματος F_{eff} (Καραμπάς κ.ά., 2015)	62
Εικόνα 56. Η μορφή του ενεργειακού τοίχου/κυματοθραύστη (Gravas et al., 2012).....	65
Εικόνα 57. Ο στρόβιλος χαμηλού φορτίου (Mini Hydro Turbine Generator - Trdcorp (ecplaza.net).....	68
Εικόνα 58. Απεικόνιση της διεύθυνσης των ανέμων που δημιουργούν κύματα προς την ακτή στην περιοχή του Ακτίου, απεικόνιση μέσω Google Earth.....	71
Εικόνα 59. Εκτιμώμενη μέση ταχύτητα ανά διεύθυνση ανέμου για τον μήνα Ιανουάριο στην περιοχή του Ακτίου (έτη 1990 - 2021)	72
Εικόνα 60. Ποσοστιαία κατανομή των διευθύνσεων των ανέμων για τον μήνα Ιανουάριο (Άκτιο, έτη 1990 - 2021)	73
Εικόνα 61. Εκτιμώμενη μέση ταχύτητα ανά διεύθυνση ανέμου για τον μήνα Φεβρουάριο στην περιοχή του Ακτίου (έτη 1990 – 2021).....	73
Εικόνα 62. Ποσοστιαία κατανομή των διευθύνσεων των ανέμων για τον μήνα Φεβρουάριο (Άκτιο, έτη 1990 - 2021)	74
Εικόνα 63. Εκτιμώμενη μέση ταχύτητα ανά διεύθυνση ανέμου για τον μήνα Μάρτιο στην περιοχή του Ακτίου (έτη 1990 – 2021).....	75
Εικόνα 64. Ποσοστιαία κατανομή των διευθύνσεων των ανέμων για τον μήνα Μάρτιο (Άκτιο, έτη 1990 – 2021)	75
Εικόνα 65. Εκτιμώμενη μέση ταχύτητα ανά διεύθυνση ανέμου για τον μήνα Απρίλιο στην περιοχή του Ακτίου (έτη 1990 – 2021).....	76
Εικόνα 66. Ποσοστιαία κατανομή των διευθύνσεων των ανέμων για τον μήνα Απρίλιο (Άκτιο, έτη 1990 – 2021)	76
Εικόνα 67. Εκτιμώμενη μέση ταχύτητα ανά διεύθυνση ανέμου για τον μήνα Μάιο στην περιοχή του Ακτίου (έτη 1990 – 2021).....	77
Εικόνα 68. Ποσοστιαία κατανομή των διευθύνσεων των ανέμων για τον μήνα Μάιο (Άκτιο, έτη 1990 – 2021)	78
Εικόνα 69. Εκτιμώμενη μέση ταχύτητα ανά διεύθυνση ανέμου για τον μήνα Ιούνιο στην περιοχή του Ακτίου (έτη 1990 – 2021).....	78
Εικόνα 70. Ποσοστιαία κατανομή των διευθύνσεων των ανέμων για τον μήνα Ιούνιο (Άκτιο, έτη 1990 – 2021)	79
Εικόνα 71. Εκτιμώμενη μέση ταχύτητα ανά διεύθυνση ανέμου για τον μήνα Ιούλιο στην περιοχή του Ακτίου (έτη 1990 – 2021).....	79
Εικόνα 72. Ποσοστιαία κατανομή των διευθύνσεων των ανέμων για τον μήνα Ιούλιο (έτη 1990 – 2021).....	80

Εικόνα 73. Εκτιμώμενη μέση ταχύτητα ανά διεύθυνση ανέμου για τον μήνα Αύγουστο στην περιοχή του Ακτίου (Ακτιο, έτη 1990 – 2021).....	80
Εικόνα 74. Ποσοστιαία κατανομή των διευθύνσεων των ανέμων για τον μήνα Αύγουστο (Ακτιο, έτη 1990 – 2021)	81
Εικόνα 75. Εκτιμώμενη μέση ταχύτητα ανά διεύθυνση ανέμου για τον μήνα Σεπτέμβριο στην περιοχή του Ακτίου (έτη 1990 – 2021).....	82
Εικόνα 76. Ποσοστιαία κατανομή των διευθύνσεων των ανέμων για τον μήνα Σεπτέμβριο (Ακτιο, έτη 1990 – 2021)	82
Εικόνα 77. Εκτιμώμενη μέση ταχύτητα ανά διεύθυνση ανέμου για τον μήνα Οκτώβριο στην περιοχή του Ακτίου (έτη 1990 – 2021).....	83
Εικόνα 78. Ποσοστιαία κατανομή των διευθύνσεων των ανέμων για τον μήνα Οκτώβριο (Ακτιο, έτη 1990 – 2021)	83
Εικόνα 79. Εκτιμώμενη μέση ταχύτητα ανά διεύθυνση ανέμου για τον μήνα Νοέμβριο στην περιοχή του Ακτίου (έτη 1990 – 2021).....	84
Εικόνα 80. Ποσοστιαία κατανομή των διευθύνσεων των ανέμων για τον μήνα Νοέμβριο (Ακτιο, έτη 1990 – 2021)	84
Εικόνα 81. Εκτιμώμενη μέση ταχύτητα ανά διεύθυνση ανέμου για τον μήνα Δεκέμβριο στην περιοχή του Ακτίου (έτη 1990 – 2021).....	85
Εικόνα 82. Ποσοστιαία κατανομή των διευθύνσεων των ανέμων για τον μήνα Δεκέμβριο (Ακτιο, έτη 1990 – 2021)	85
Εικόνα 83. Ροδόγραμμα απεικόνισης ανεμολογικών στοιχείων για την περιοχή του Ακτίου στο σύνολο των ετών μεταξύ 1990 και 2021.....	86
Εικόνα 84. Απεικόνιση της διεύθυνσης των ανέμων που δημιουργούν κύματα προς την ακτή στην περιοχή του Ηρακλείου, απεικόνιση μέσω Google Earth	90
Εικόνα 85. Εκτιμώμενη μέση ταχύτητα ανά διεύθυνση ανέμου για τον μήνα Ιανουάριο στην περιοχή του Ηρακλείου (έτη 1990 – 2021).....	91
Εικόνα 86. Ποσοστιαία κατανομή των διευθύνσεων των ανέμων για τον μήνα Ιανουάριο (Ηράκλειο, έτη 1990 – 2021).....	91
Εικόνα 87. Εκτιμώμενη μέση ταχύτητα ανά διεύθυνση ανέμου για τον μήνα Φεβρουάριο στην περιοχή του Ηρακλείου (έτη 1990 – 2021).....	92
Εικόνα 88. Ποσοστιαία κατανομή των διευθύνσεων των ανέμων για τον μήνα Φεβρουάριο (Ηράκλειο, έτη 1990 – 2021).....	93
Εικόνα 89. Εκτιμώμενη μέση ταχύτητα ανά διεύθυνση ανέμου για τον μήνα Μάρτιο στην περιοχή του Ηρακλείου (έτη 1990 – 2021).....	93

Εικόνα 90. Ποσοστιαία κατανομή των διευθύνσεων των ανέμων για τον μήνα Μάρτιο (Ηράκλειο, έτη 1990 – 2021).....	94
Εικόνα 91. Εκτιμώμενη μέση ταχύτητα ανά διεύθυνση ανέμου για τον μήνα Απρίλιο στην περιοχή του Ηρακλείου (έτη 1990 – 2021).....	95
Εικόνα 92. Ποσοστιαία κατανομή των διευθύνσεων των ανέμων για τον μήνα Απρίλιο (Ηράκλειο, έτη 1990 – 2021).....	95
Εικόνα 93. Εκτιμώμενη μέση ταχύτητα ανά διεύθυνση ανέμου για τον μήνα Μάιο στην περιοχή του Ηρακλείου (έτη 1990 – 2021).....	96
Εικόνα 94. Ποσοστιαία κατανομή των διευθύνσεων των ανέμων για τον μήνα Μάιο (Ηράκλειο, έτη 1990 – 2021).....	97
Εικόνα 95. Εκτιμώμενη μέση ταχύτητα ανά διεύθυνση ανέμου για τον μήνα Ιούνιο στην περιοχή του Ηρακλείου (έτη 1990 – 2021).....	97
Εικόνα 96. Ποσοστιαία κατανομή των διευθύνσεων των ανέμων για τον μήνα Ιούνιο (Ηράκλειο, έτη 1990 – 2021).....	98
Εικόνα 97. Εκτιμώμενη μέση ταχύτητα ανά διεύθυνση ανέμου για τον μήνα Ιούλιο στην περιοχή του Ηρακλείου (έτη 1990 – 2021).....	98
Εικόνα 98. Ποσοστιαία κατανομή των διευθύνσεων των ανέμων για τον μήνα Ιούλιο (Ηράκλειο, έτη 1990 – 2021).....	99
Εικόνα 99. Εκτιμώμενη μέση ταχύτητα ανά διεύθυνση ανέμου για τον μήνα Αύγουστο στην περιοχή του Ηρακλείου (έτη 1990 – 2021).....	99
Εικόνα 100. Ποσοστιαία κατανομή των διευθύνσεων των ανέμων για τον μήνα Αύγουστο (Ηράκλειο, έτη 1990 – 2021).....	100
Εικόνα 101. Εκτιμώμενη μέση ταχύτητα ανά διεύθυνση ανέμου για τον μήνα Σεπτέμβριο στην περιοχή του Ηρακλείου (έτη 1990 – 2021).....	101
Εικόνα 102. Ποσοστιαία κατανομή των διευθύνσεων των ανέμων για τον μήνα Σεπτέμβριο (Ηράκλειο, έτη 1990 – 2021).....	101
Εικόνα 103. Εκτιμώμενη μέση ταχύτητα ανά διεύθυνση ανέμου για τον μήνα Οκτώβριο στην περιοχή του Ηρακλείου (έτη 1990 – 2021).....	102
Εικόνα 104. Ποσοστιαία κατανομή των διευθύνσεων των ανέμων για τον μήνα Οκτώβριο (Ηράκλειο, έτη 1990 – 2021).....	102
Εικόνα 105. Εκτιμώμενη μέση ταχύτητα ανά διεύθυνση ανέμου για τον μήνα Νοέμβριο στην περιοχή του Ηρακλείου (έτη 1990 – 2021).....	103
Εικόνα 106. Ποσοστιαία κατανομή των διευθύνσεων των ανέμων για τον μήνα Νοέμβριο (Ηράκλειο, έτη 1990 – 2021).....	103

Εικόνα 107. Εκτιμώμενη μέση ταχύτητα ανά διεύθυνση ανέμου για τον μήνα Δεκέμβριο στην περιοχή του Ηρακλείου (έτη 1990 – 2021)	104
Εικόνα 108. Ποσοστιαία κατανομή των διευθύνσεων των ανέμων για τον μήνα Δεκέμβριο (Ηράκλειο, έτη 1990 – 2021).....	104
Εικόνα 109. Ροδόγραμμα απεικόνισης ανεμολογικών στοιχείων για την περιοχή του Ηρακλείου στο σύνολο των ετών μεταξύ 1990 και 2021	105
Εικόνα 110. Απεικόνιση της διεύθυνσης των ανέμων που δημιουργούν κύματα προς την ακτή στην περιοχή της Ιεράπετρας, απεικόνιση μέσω Google Earth.....	109
Εικόνα 111. Εκτιμώμενη μέση ταχύτητα ανά διεύθυνση ανέμου για τον μήνα Ιανουάριο στην περιοχή της Ιεράπετρας (έτη 1990 - 2010)	110
Εικόνα 112. Ποσοστιαία κατανομή των διευθύνσεων των ανέμων για τον μήνα Ιανουάριο (Ιεράπετρα, έτη 1990 - 2010)	110
Εικόνα 113. Εκτιμώμενη μέση ταχύτητα ανά διεύθυνση ανέμου για τον μήνα Φεβρουάριο στην περιοχή της Ιεράπετρας (έτη 1990 – 2010).....	111
Εικόνα 114. Ποσοστιαία κατανομή των διευθύνσεων των ανέμων για τον μήνα Φεβρουάριο (Ιεράπετρα, έτη 1990 - 2010).....	111
Εικόνα 115. Εκτιμώμενη μέση ταχύτητα ανά διεύθυνση ανέμου για τον μήνα Μάρτιο στην περιοχή της Ιεράπετρας (έτη 1990 – 2010)	112
Εικόνα 116. Ποσοστιαία κατανομή των διευθύνσεων των ανέμων για τον μήνα Μάρτιο (Ιεράπετρα, έτη 1990 – 2010)	112
Εικόνα 117. Εκτιμώμενη μέση ταχύτητα ανά διεύθυνση ανέμου για τον μήνα Απρίλιο στην περιοχή της Ιεράπετρας (έτη 1990 – 2010)	113
Εικόνα 118. Ποσοστιαία κατανομή των διευθύνσεων των ανέμων για τον μήνα Απρίλιο (Ιεράπετρα, έτη 1990 – 2010)	113
Εικόνα 119. Εκτιμώμενη μέση ταχύτητα ανά διεύθυνση ανέμου για τον μήνα Μάιο στην περιοχή της Ιεράπετρας (έτη 1990 – 2010)	114
Εικόνα 120. Ποσοστιαία κατανομή των διευθύνσεων των ανέμων για τον μήνα Μάιο (Ιεράπετρα, έτη 1990 – 2010)	114
Εικόνα 121. Εκτιμώμενη μέση ταχύτητα ανά διεύθυνση ανέμου για τον μήνα Ιούνιο στην περιοχή της Ιεράπετρας (έτη 1990 – 2010)	115
Εικόνα 122. Ποσοστιαία κατανομή των διευθύνσεων των ανέμων για τον μήνα Ιούνιο (Ιεράπετρα, έτη 1990 – 2010)	116
Εικόνα 123. Εκτιμώμενη μέση ταχύτητα ανά διεύθυνση ανέμου για τον μήνα Ιούλιο στην περιοχή της Ιεράπετρας (έτη 1990 – 2010)	116

Εικόνα 124. Ποσοστιαία κατανομή των διευθύνσεων των ανέμων για τον μήνα Ιούλιο (Ιεράπετρα, έτη 1990 – 2010)	117
Εικόνα 125. Εκτιμώμενη μέση ταχύτητα ανά διεύθυνση ανέμου για τον μήνα Αύγουστο στην περιοχή της Ιεράπετρας (έτη 1990 – 2010)	117
Εικόνα 126. Ποσοστιαία κατανομή των διευθύνσεων των ανέμων για τον μήνα Αύγουστο (Ιεράπετρα, έτη 1990 – 2010)	118
Εικόνα 127. Εκτιμώμενη μέση ταχύτητα ανά διεύθυνση ανέμου για τον μήνα Σεπτέμβριο στην περιοχή της Ιεράπετρας (έτη 1990 – 2010)	118
Εικόνα 128. Ποσοστιαία κατανομή των διευθύνσεων των ανέμων για τον μήνα Σεπτέμβριο (Ιεράπετρα, έτη 1990 – 2010)	119
Εικόνα 129. Εκτιμώμενη μέση ταχύτητα ανά διεύθυνση ανέμου για τον μήνα Οκτώβριο στην περιοχή της Ιεράπετρας (έτη 1990 – 2010)	119
Εικόνα 130. Εκτιμώμενη μέση ταχύτητα ανά διεύθυνση ανέμου για τον μήνα Νοέμβριο στην περιοχή της Ιεράπετρας (έτη 1990 – 2010)	120
Εικόνα 131. Ποσοστιαία κατανομή των διευθύνσεων των ανέμων για τον μήνα Νοέμβριο (Ιεράπετρα, έτη 1990 – 2010)	120
Εικόνα 132. Εκτιμώμενη μέση ταχύτητα ανά διεύθυνση ανέμου για τον μήνα Δεκέμβριο στην περιοχή της Ιεράπετρας (έτη 1990 – 2010)	121
Εικόνα 133. Ποσοστιαία κατανομή των διευθύνσεων των ανέμων για τον μήνα Δεκέμβριο (Ιεράπετρα, έτη 1990 – 2010)	121
Εικόνα 134. Ροδόγραμμα απεικόνισης ανεμολογικών στοιχείων για την περιοχή της Ιεράπετρας στο σύνολο των ετών μεταξύ 1990 και 2010	122
Εικόνα 135. Διακύμανση της κυματικής ισχύος που αποδίδεται από την κατασκευή - Άκτιο	126
Εικόνα 136. Διακύμανση κυματικής ισχύος που αποδίδεται από την κατασκευή - Ηράκλειο	127
Εικόνα 137. Διακύμανση της κυματικής ισχύος που αποδίδεται από την κατασκευή – Ιεράπετρα	127

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Γενικά-Ορισμοί

Η ενεργειακή κρίση στις μέρες μας παίρνει όλο και μεγαλύτερες διαστάσεις. Πολλές μελέτες αναφέρουν, ότι η κρίση που βιώνουμε στην ενέργεια τα τελευταία χρόνια είναι μεγαλύτερη από την κρίση του 1970. Η ένταση της τωρινής ενεργειακής κρίσης οφείλεται σε έναν συνδυασμό παραγόντων, με κυριότερο την ξαφνική ανάκαμψη των οικονομιών από τα παρατεταμένα lockdown λόγω του κορωνοϊού που είχε ως αποτέλεσμα την αύξηση της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας. Άλλοι παράγοντες που συντελούν στην ενεργειακή κρίση είναι η αυξημένη ζήτηση των χωρών της Ασίας για φυσικό αέριο και τη μειωμένη προσφερόμενη ποσότητα του αγαθού από την Ευρώπη, η υπερκατανάλωση της ενέργειας, κυρίως με τη μορφή ηλεκτρικού ρεύματος, καθώς επίσης και η συνεχής αύξηση του παγκόσμιου πληθυσμού.

Παγκοσμίως, χρησιμοποιούνται κατά βάση ορυκτά καύσιμα για την παραγωγή ενέργειας. Ωστόσο, οι πηγές των ορυκτών καυσίμων δεν είναι ανεξάντλητες και προκαλούν σημαντικά περιβαλλοντικά προβλήματα, όπως η αύξηση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, όπως το διοξείδιο του άνθρακα CO₂ το οποίο οδηγεί στην υπερθέρμανση του πλανήτη και κατά συνέπεια στη διατάραξη της βιοποικιλότητας.

Στην Ελλάδα, κατά το έτος 2005, η μέση κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας (kWh ανά κάτοικο/ανά έτος) ήταν 5242 kWh, το 2006 ήταν 5272 kWh, ενώ το 2007 η μέση κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας ανέρχονταν στα 5628 kWh (Μαμάσης & Στεφανάκος, 2014). Τα γενικά στοιχεία για την Ελλάδα, κατά τα πιο πρόσφατα έτη, σύμφωνα με τους Μαμάση και Ευστρατιάδη (2018) είναι τα εξής:

- Η τρέχουσα κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας εκτιμάται σε περίπου 5500 kWh/άτομο/έτος, ενώ το 1990 ανερχόταν σε περίπου 3000 kWh/άτομο/έτος.
- Η συνολική κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας είναι περίπου 50 TWh/έτος.
- Καταναλώνεται περισσότερη ενέργεια τις καθημερινές απ' ό,τι τα Σαββατοκύριακα.
- Καταναλώνεται περισσότερη ενέργεια κατά τους μήνες με ακραίες θερμοκρασίες (καλοκαίρι, χειμώνα) σε σχέση με τους μεταβατικούς (φθινόπωρο, άνοιξη).
- Εκλύονται περίπου 0,875 kg CO₂ ανά παραγόμενη kWh.
- Η μέση κατανάλωση ενέργειας ενός νοικοκυριού ανά ημέρα, ανέρχεται σε 27,7 kWh.

Η Ελληνική Στατιστική Αρχή (ΕΛΣΤΑΤ) κατά το χρονικό διάστημα μεταξύ Οκτωβρίου 2011 και Σεπτεμβρίου 2012 πραγματοποίησε μία έρευνα αναφορικά με την κατανάλωση ενέργειας στα ελληνικά νοικοκυριά. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η μέση κατανάλωση

ενέργειας για το κάθε νοικοκυριό είναι 13994 kWh και πιο συγκεκριμένα 10244 kWh αφορούν τη θερμική ενέργεια και 3750 kWh αφορούν την ηλεκτρική ενέργεια.

Οι υψηλές απαιτήσεις σε ενέργεια σε συνδυασμό με το γεγονός ότι για την παραγωγή της χρησιμοποιούνται κατά βάση ορυκτά καύσιμα, τα οποία είναι επιβλαβή για το περιβάλλον, καθιστούν επιτακτική ανάγκη τη χρήση άλλων πηγών ενέργειας, που είναι πιο φιλικές προς το περιβάλλον. Οι Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ) είναι μορφές εκμεταλλεύσιμης ενέργειας που προέρχονται από διάφορες φυσικές διαδικασίες, όπως ο άνεμος, η γεωθερμία, η κυκλοφορία του νερού, κ.α. Για την εκμετάλλευσή τους δεν απαιτείται κάποια ενεργητική παρέμβαση, όπως εξόρυξη, άντληση ή καύση, όπως με τις μέχρι τώρα χρησιμοποιούμενες μορφές ενέργειας, αλλά απλώς η εκμετάλλευση της ήδη υπάρχουσας ροής τους στη φύση (Τέγος, 2011). Οι ΑΠΕ είναι οικονομικά και περιβαλλοντικά βιώσιμες. Μέσω της εκμετάλλευσης των ΑΠΕ, η Ευρωπαϊκή Ένωση στοχεύει αρχικά στο να συνεισφέρει στην προστασία του περιβάλλοντος και εν συνεχεία στο να εξασφαλίσει την ενεργειακή ασφάλεια για τα κράτη-μέλη της, και μέσω της επένδυσης στην ανάπτυξη ανταγωνιστικών μονάδων παραγωγής ενέργειας μέσω των ΑΠΕ, να αυξήσει σε βάθος χρόνου τα ενεργειακά αποθέματά της (Νικολάου, 2015).

Οι κύριες μορφές των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (Renewable Energy Sources, RES) είναι οι εξής:

- Ηλιακή Ενέργεια
- Αιολική Ενέργεια
- Υδροηλεκτρική Ενέργεια
- Γεωθερμική Ενέργεια
- Ενέργεια από βιομάζα
- Ενέργεια από θαλάσσια κύματα
- Ενέργεια από θαλάσσια ρεύματα

Λαμβάνοντας υπόψη την αναμενόμενη αύξηση της κατανάλωσης ενέργειας στον κόσμο, τόσο σε παγκόσμιο όσο και σε ευρωπαϊκό επίπεδο, υπάρχει μια αυξανόμενη ανησυχία για τον αρνητικό αντίκτυπο που έχουν οι παραδοσιακές πηγές ενέργειας στο περιβάλλον. Συνεπώς, υπάρχει ένα αυξανόμενο ενδιαφέρον για τη χρήση πιο φιλικών προς το περιβάλλον μεθόδων παραγωγής ενέργειας (Clement *et al.*, 2002). Το τελευταίο διάστημα, έχει εμφανιστεί μια νέα μορφή ενέργειας η κυματική ενέργεια, δηλαδή η ενέργεια που μπορεί να αντληθεί από τα κύματα της θάλασσας. Η κυματική ενέργεια θεωρείται μια από τις πιο σταθερές και περιβαλλοντικά φιλικές πηγές ενέργειας, καθώς έχει μικρότερο βαθμό αβεβαιότητας και μεταβλητότητας σε σύγκριση με άλλες

ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Αυτό της παρέχει σημαντικά πλεονεκτήματα κατά την ενσωμάτωσή της στα δίκτυα παραγωγής ενέργειας. Επιπλέον, η ενέργεια από τα κύματα της θάλασσας παρουσιάζει την υψηλότερη ενεργειακή πυκνότητα ανάμεσα στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Όσο για τις επιπτώσεις που προκαλεί η εγκατάσταση θαλάσσιων σταθμών για την εκμετάλλευση της κυματικής ενέργειας στο τοπτικό περιβάλλον, αυτές συνήθως είναι περιορισμένες (Γαλάνης κ.ά., 2012), αλλά αυτό δεν σημαίνει ότι δεν υπάρχουν. Η λειτουργία των πλωτών θαλάσσιων σταθμών, για παράδειγμα, προκαλεί λιγότερες επιπτώσεις στο περιβάλλον σε σύγκριση με τις σταθερές συσκευές εκμετάλλευσης της κυματικής ενέργειας που είναι τοποθετημένες στην ακτή, όπου το φυσικό περιβάλλον είναι πιο ευαίσθητο. Οι κύριες περιβαλλοντικές επιπτώσεις που προκαλούνται από τις παράκτιες κατασκευές για την εκμετάλλευση της θαλάσσιας ενέργειας είναι η διάβρωση των ακτών και οι ζημιές που προκαλούνται από τον ελλιμενισμό των πλοίων (Savvidis *et al.*, 2013). Επιπλέον, η Ευρωπαϊκή Ένωση έχει θέσει ψηλά τον πήχη όσον αφορά την έρευνα και ανάπτυξη στον τομέα της θαλάσσιας ενέργειας. Προηγούμενες έρευνες είχαν εκτιμήσει ότι έως το 2020, η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας αποκλειστικά από την κυματική ενέργεια θα έφτανε τα 0,9 GW. Οι ίδιες έρευνες υποστηρίζουν ότι έως το 2030 αναμένεται η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από κύματα να φτάσει τα 1,7 GW και ότι μέχρι το 2050 προβλέπεται η επένδυση στη θαλάσσια ενέργεια να προωθηθεί με την εγκατάσταση ύψους 100 GW σε μονάδες θαλάσσιας ενέργειας στην Ευρώπη (Νικολάου, 2015). Οι οικονομικές πτυχές της εκμετάλλευσης της θαλάσσιας ενέργειας επικεντρώνονται στην κατασκευή μονάδων παραγωγής κυματικής ενέργειας και το υψηλό κόστος που συνεπάγεται η ανέγερσή τους. Σύμφωνα με έρευνα των Savvidis *et al.* (2013), οι τιμές ποικίλλουν αφού ξεκινούν από 1400€/MW και φτάνουν μέχρι και 10000€/MW. Ένα από τα βασικά προβλήματα της εγκατάστασης τέτοιων μονάδων εκμετάλλευσης της θαλάσσιας ενέργειας, είναι το μεγάλο κόστος κατασκευής και το κόστος μεταφοράς της ενέργειας μέσω των καλωδίων από τις υπεράκτιες κατασκευές προς την ακτή. Υπολογίζεται, όμως, ότι το κόστος θα μειωθεί με την πάροδο του χρόνου και τη βελτίωση της τεχνολογίας, καθιστώντας έτσι τη συγκεκριμένη μορφή ενέργειας πιο ανταγωνιστική σε σχέση με άλλες μορφές ανανεώσιμης ενέργειας.

Στα πλαίσια της παρούσας διατριβής, θα χρησιμοποιούνται εφεξής οι ακόλουθοι όροι με τις αντίστοιχες εννοιολογίες:

- ✓ Ενεργειακή κρίση: Ως ενεργειακή κρίση ορίζεται κάθε κατάσταση όπου η συνολική ζήτηση για ενέργεια υπερβαίνει τη συνολική προσφορά σε μία ορισμένη περίοδο και

σε έναν ορισμένο γεωγραφικό χώρο. Μπορεί να είναι είτε εγχώρια, είτε διεθνής ή και τα δύο.

- ✓ Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας: Ως ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ) ορίζονται οι ενεργειακές πηγές που υπάρχουν σε αφθονία στο φυσικό περιβάλλον. Είναι ανεξάντλητες και η χρήση τους δεν μολύνει το περιβάλλον.
- ✓ Κυματοθραύστης: Ο κυματοθραύστης είναι μια τεχνητή υπεράκτια κατασκευή που προστατεύει ένα λιμάνι από τα κύματα. Οι κυματοθραύστες αναχαιτίζουν τα μακρόστενα ρεύματα και τείνουν να αποτρέπουν τη διάβρωση των ακτών (Britannica, 1998).

1.2 Ιστορικά στοιχεία για την αξιοποίηση της κυματικής ενέργειας

Η θάλασσα έχει θεωρηθεί εδώ και χιλιάδες χρόνια ως πηγή ενέργειας. Κατά τα μεσαιωνικά χρόνια (1200 – 1500 μ.Χ.) οι αγρότες αποθήκευαν το νερό της θάλασσας στις λίμνες των μύλων, ώστε να το χρησιμοποιήσουν στους υδρόμυλους δύναμης (Νικολάου, 2015). Μία μελέτη των Clement *et al.*, (2002), αναφέρει πως οι πρώτες τεχνολογίες αξιοποίησης της κυματικής ενέργειας άρχισαν να εφαρμόζονται γύρω στο 1799 από τους Girarg & Son στη Γαλλία. Το έτος 1976, οι Leishman & Scobie παρουσίασαν αναλυτικά την εξέλιξη των συσκευών μετατροπής της κυματικής ενέργειας από το έτος 1855, που εφευρέθηκε στη Βρετανία η πρώτη συσκευή που εξυπηρετούσε αυτό τον σκοπό, μέχρι και το έτος 1973, όπου υπήρχαν ήδη 340 συσκευές. Σε αυτό το χρονικό διάστημα, σχεδιάστηκαν και εφαρμόστηκαν πολλές συσκευές μετατροπής της κυματικής ενέργειας σε ηλεκτρική, αρκετές από τις οποίες εφαρμόστηκαν και στη θάλασσα (Clement *et al.*, 2002). Γύρω στα τέλη της δεκαετίας του '90 έγινε σαφές ότι η τεχνολογία είχε προωθηθεί αρκετά ώστε η αξιόπιστη και οικονομική ενέργεια από τα κύματα της θάλασσας να μπορεί να γίνει πραγματικότητα. Το Ηνωμένο Βασίλειο παρήγαγε για πρώτη φορά ηλεκτρική ενέργεια από τα κύματα, θαλάσσια και παλιροοϊκά, και εφοδίασε με αυτή το εθνικό του δίκτυο το έτος 2000, ωθώντας και άλλες χώρες να αρχίσουν να σκέφτονται την εκμετάλλευση των κυμάτων για παραγωγή ενέργειας.

1.2.1 Η αξιοποίηση της κυματικής ενέργειας στην Ευρώπη

Σε πολλές Ευρωπαϊκές χώρες πραγματοποιήθηκαν έρευνες σχετικά με την ανάπτυξη της κυματικής ενέργειας. Στις χώρες με μεγάλη ακτογραμμή ή σε χώρες όπου παρατηρούνται μεγάλα ποσοστά θαλάσσιας ενέργειας, η ενέργεια που παράγεται από τα κύματα μπορεί να καλύψει ένα μεγάλο τμήμα των ενεργειακών τους αναγκών ή ακόμα και να γίνει η πρωταρχική πηγή ενέργειας για τις χώρες αυτές. Στις χώρες όπου η δυνατότητα της αξιοποίησής της δεν είναι τόσο υψηλή, η κυματική ενέργεια δύναται να αξιοποιηθεί

συμπληρωματικά με άλλες μορφές ανανεώσιμης ενέργειας ώστε να καλυφθούν οι ενεργειακές ανάγκες της εκάστοτε χώρας.

Ήδη στην Ευρώπη, η Δανία, η Ιρλανδία, η Νορβηγία, η Πορτογαλία, η Σουηδία και το Ηνωμένο Βασίλειο, έχουν συμπεριλάβει την κυματική ενέργεια ως μία εναλλακτική πηγή ενέργειας.

Πιο συγκεκριμένα, για τη Δανία, μόνο οι ακτές που βρίσκονται στα βοριοδυτικά της χώρας έχουν ικανοποιητικά αποτελέσματα για εκμετάλλευση της θαλάσσιας ενέργειας και περαιτέρω αξιοποίησή της. Οι εκμεταλλεύσιμοι πόροι κυματικής ενέργειας για τη Δανία, έχουν υπολογιστεί σε 30 TWh, ενώ η μέση ετήσια κυματική ενέργεια κυμαίνεται από 7 μέχρι 24 kW/m και προέρχεται κατά κύριο λόγο από δυτική διεύθυνση.

Σύμφωνα με έρευνα του Lewis (1999) οι εκμεταλλεύσιμοι πόροι κυματικής ενέργειας, για την Ιρλανδία, υπολογίζονται σε 375 MWh/m και η πιθανή συνολική κυματική ενέργεια, υπολογίζεται σε 187.5 TWh (Clement *et al.*, 2002).

Η Νορβηγία έχει μεγάλο μήκος ακτογραμμών που βρέχονται από την ανατολική πλευρά του Ατλαντικού Ωκεανού, όπου επικρατούν δυτικοί άνεμοι, και έτσι οι εκμεταλλεύσιμοι ενεργειακοί πόροι από την κυματική ενέργεια φτάνουν μέχρι και τις 400 TWh/έτος.

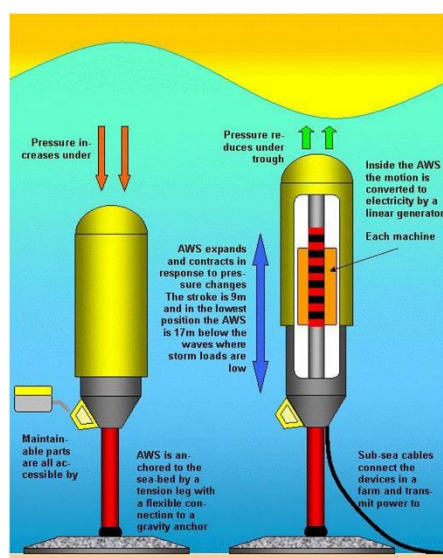
Στην περίπτωση της Πορτογαλίας, η μέση ετήσια παραγωγή κυματικής ενέργειας κυμαίνεται από 30 έως 40 kW/m. Το μεγαλύτερο απόθεμα ενέργειας έχει παρατηρηθεί, στο αρχιπέλαγος των Αζόρων, στη βορειοδυτική ακτογραμμή της Πορτογαλίας. Εκτιμάται ότι οι συνολικοί εκμεταλλεύσιμοι πόροι στην ηπειρωτική Πορτογαλία αγγίζουν τα 10 GW/m, εκ των οποίων είναι δυνητικά αξιοποιήσιμοι. Η κυβέρνηση της Πορτογαλίας στηρίζει την κυματική ενέργεια, όπως και άλλες ΑΠΕ με διάφορους οικονομικού μηχανισμούς.

Η Σουηδία έχει λίγες περιοχές για αξιοποίηση της θαλάσσιας ενέργειας, οι οποίες βρίσκονται βόρεια τμήματα της δυτικής ακτογραμμής της χώρας. Οι θάλασσες που βρέχουν αυτά τα τμήματα είναι η Βαλτική και η Βόρεια θάλασσα. Η αξιοποιήσιμη ενέργεια είναι μεταξύ 5 – 10 TWh/έτος, ενώ η ετήσια ζήτηση για ηλεκτρική ενέργεια είναι 150 TWh.

Το Ηνωμένο Βασίλειο, περιτριγυρίζεται από θυελλώδη θάλασσα, αφού η γεωγραφική του θέση το τοποθετεί στο ανατολικό τμήμα του Ατλαντικού Ωκεανού, όπου επικρατούν ευνοϊκοί δυτικοί άνεμοι. Οι εκμεταλλεύσιμοι πόροι κυματικής ενέργειας υπολογίζονται σε 120 GW (Clement *et al.*, 2002).

Σε χώρες της Ευρώπης όπως το Βέλγιο, η Γερμανία, η Γαλλία, η Φινλανδία, η Ιταλία, η Ολλανδία και η Ισπανία, η έρευνα για την αξιοποίηση της κυματικής ενέργειας δεν έχει αναπτυχθεί επαρκώς, εξαιτίας πολιτικών λόγων ή αδυναμίας εύρεσης πόρων, ενώ ταυτόχρονα παρατηρείται εστίαση σε άλλες μορφές ενέργειας (Δραγανίδης, 2020).

Από τις προαναφερθείσες χώρες, το Βέλγιο, η Γερμανία και η Ολλανδία, δεν έχουν μεγάλο μήκος ακτογραμμών, ενώ χαρακτηρίζονται επίσης από ρηχά νερά και μεγάλη θαλάσσια κυκλοφορία. Αυτά λειτουργούν ως ανασταλτικοί παράγοντες οι οποίοι περιορίζουν το ενδιαφέρον για έρευνα γύρω από το πεδίο της κυματικής ενέργειας, χωρίς αυτό να σημαίνει ότι δεν έχουν πραγματοποιηθεί έρευνες πάνω στον τομέα της κυματικής ενέργειας από διάφορα πανεπιστήμια, ερευνητικά κέντρα και ιδιωτικούς οργανισμούς. Σύμφωνα με τους Clement et al, στην Ολλανδία είχε σχεδιαστεί μία πολλά υποσχόμενη συσκευή μετατροπής της κυματικής ενέργειας, η οποία ονομάστηκε Archimedes Wave Swing (Εικόνα 1). Όπως επίσης και στη Γερμανία, όπου διάφορες εταιρείες και ερευνητικά ινστιτούτα, από διάφορους τομείς της μηχανική που συσχετίζονται με τη διαχείριση της κυματικής ενέργειας, συμπεριλαμβάνονται στην ευρωπαϊκή πρόοδο που γίνεται για την αξιοποίηση της κυματικής ενέργειας.



Εικόνα 1 Αρχή λειτουργίας της συσκευής Archimedes Wave Swing (Blackledge et al., 2013)

Η Γαλλία έχει μεγάλο μήκος ακτογραμμών τόσο στη Μεσόγειο θάλασσα όσο και στον Ατλαντικό Ωκεανό. Η σημαντικότερη πηγή για αξιοποίηση της κυματικής ενέργειας στη Γαλλία, είναι ο Βισκαϊκός κόλπος, όπου η μέση ετήσια κυματική ισχύς αγγίζει τα 40 kW/m, με τους συνολικούς εκμεταλλεύσιμους πόρους στην περιοχή να φτάνουν μέχρι και τα 28 GW. Οι περιοχές της χώρας από την πλευρά της Μεσογείου, δίνουν μία μέση ετήσια κυματική ισχύ που κυμαίνεται μεταξύ 4 - 5 kW/m.

Η Ιταλία, παρότι έχει μεγάλο μήκος ακτογραμμών και θα μπορούσε να αποτελεί ένα ιδανικό μέρος για αξιοποίηση της ενέργειας της θάλασσας, σύμφωνα με μελέτες που πραγματοποιήθηκαν στο σύνολο της ακτογραμμής της χώρας, έδειξαν ότι η μέση ετήσια

κυματική ενέργεια είναι λιγότερη από 5 kW/m. Υπάρχουν, όμως, ορισμένα απομακρυσμένα νησιά, καθώς επίσης και τοποθεσίες όπως η Σικελία και η Σαρδηνία, όπου η μέση ετήσια κυματική ενέργεια είναι υψηλότερη και υπολογίζεται στα 10 kW/m (Clement *et al.*, 2002).

1.2.2 Η αξιοποίηση της κυματικής ενέργειας σε παγκόσμιο επίπεδο

Πολλές χώρες εκτός Ευρώπης, όπως η Αυστραλία, η Σρι Λάνκα, οι Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής, ο Καναδάς, η Κίνα, η Ρωσία, η Ιαπωνία, η Κορέα, η Ινδία, το Μεξικό, το Ισραήλ, το Ιράν και η Ινδονησία, έχουν διενεργήσει έρευνα σχετικά με την αξιοποίηση της θαλάσσιας κυματικής ενέργειας.

Η Αυστραλία έχει αρκετά μεγάλους εκμεταλλεύσιμους πόρους κυματικής ενέργειας, που αγγίζουν τα 10 GW, όμως οι ενεργειακές ανάγκες της χώρας είναι αρκετά υψηλές σε πολλές περιοχές της, συγκριτικά με τη διαθέσιμη ενέργεια.

Στο Κολόμπο, την πρωτεύουσα της Σρι Λάνκα, πραγματοποιήθηκε έρευνα για την αξιοποίηση της κυματικής και της θερμικής ενέργειας στο National Aquatic Resource Agency. Με τη χρηματοδότηση του Υπουργείου Επιστήμης και Τεχνολογίας, κατασκευάστηκε μια δοκιμαστική μηχανή που μπορεί να παράγει 150 kW ισχύος μέσω των κυμάτων.

Στις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής, οι έρευνες σχετικά με την αξιοποίηση της κυματικής ενέργειας χρονολογούνται ότι ξεκίνησαν στις αρχές του 1950. Παρά το γεγονός ότι τα μέσα ετήσια ποσοστά της παραγόμενης ενέργειας στις βορειοδυτικές ακτές των Η.Π.Α. ξεπερνούν τα 235 kW/m, το ενδιαφέρον των βόρειων Πολιτειών για την αξιοποίηση της κυματικής ενέργειας παραμένει μικρό, καθιστώντας σαφές ότι η συνεισφορά τους στο ενεργειακό απόθεμα της χώρας θα είναι μικρή.

Στον Καναδά, διεξάγονται έρευνες σχετικά με την αξιοποίηση της κυματικής ενέργειας από το Πανεπιστήμιο British Columbia και την εταιρεία Powertech Labs Inc.

Στην Κίνα, πραγματοποιείται έρευνα για την εκμετάλλευση της κυματικής ενέργειας, στο Ινστιτούτο Guangzhou και στο Τεχνολογικό Πανεπιστήμιο της Guangdong, σε συνεργασία με άλλα ινστιτούτα, εθνικά και από άλλες χώρες όπως η Δανία, το Ηνωμένο Βασίλειο, η Ινδία και η Ιαπωνία (Δραγανίδης, 2020).

Η Ινδία καινοτόμησε στην έρευνα για την αξιοποίηση της θαλάσσιας ενέργειας με ένα εθνικό πρόγραμμα στο Ινστιτούτο Τεχνολογίας Madras, το 1983. Τα αποτελέσματα της έρευνας παρουσιάστηκαν από το Εθνικό Ινστιτούτο Θαλάσσιας Τεχνολογίας και τα δημοσιοποίησαν η κυβέρνηση και το Ινδικό Ινστιτούτο Τεχνολογίας Madras. Η έρευνα είχε

πραγματοποιηθεί σε συνεργασία με εθνικά και παγκόσμια ερευνητικά κέντρα. (Clement *et al.*, 2002).

Η Ιαπωνία έχει μεγάλο μήκος ακτογραμμών, που αγγίζει τις 35000 km. Η Ιαπωνία είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με τα εισαγόμενα καύσιμα. Παρ'όλα αυτά συμπεριέλαβε την κυματική ενέργεια ως μία συμπληρωματική μορφή ενέργειας. Η έρευνα αναφορικά με την κυματική ενέργεια και την αξιοποίησή της πραγματοποιήθηκε σε διάφορα ερευνητικά ινστιτούτα και σε πολλές βιομηχανικές εταιρείες.

Μία πρωτοποριακή συσκευή μετατροπής της κυματικής ενέργειας πλωτού τύπου σχεδιάστηκε στο Ισραήλ. Η συσκευή αυτή χρησιμοποιεί μία καινοτόμο μέθοδο ώστε να μετατρέπει την κυματική ενέργεια σε υδραυλική και έτσι να παράγει ηλεκτρική ενέργεια. Από τη λειτουργία της συγκεκριμένης κατασκευής προέκυψαν θετικά αποτελέσματα, αφού παρατηρήθηκε πως μπορεί να παράξει ενέργεια έως 40 kW (Δραγανίδης, 2020).

Σε χώρες όπως είναι η Ρωσία, η Κορέα, το Μεξικό, το Ιράν και η Ινδονησία, διεξάγεται έρευνα πάνω στην κυματική ενέργεια μέσω Πανεπιστημίων και ερευνητικών Ινστιτούτων με τη στήριξη της εκάστοτε κυβέρνησης, και πολλές φορές σε συνεργασία με άλλα Ινστιτούτα σε Ευρώπη και Ασία (Clement *et al.*, 2002).

1.2.3. Η αξιοποίηση της κυματικής ενέργειας στην Ελλάδα

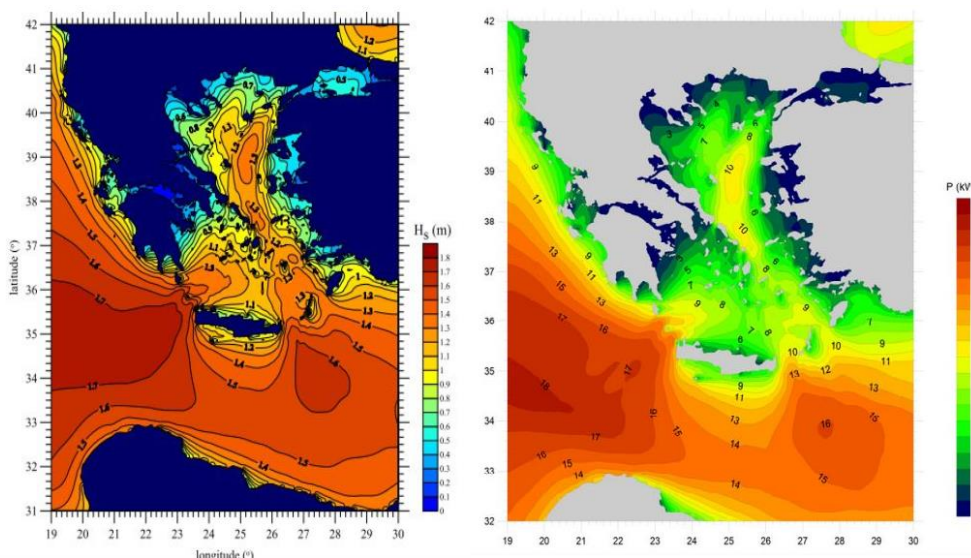
Η Ελλάδα είναι μία χώρα με πολύ μεγάλο μήκος ακτογραμμών, οπότε η εκμετάλλευση της κυματικής ενέργειας, σε συνδυασμό με τη χρήση άλλων ΑΠΕ, μπορεί να συνεισφέρει στην κάλυψη των ενεργειακών αναγκών της χώρας. Οι ακτογραμμές της Ελλάδας στο Αιγαίο και το Ιόνιο πέλαγος έχουν μήκος ίσο με 13.676 χιλιόμετρα, τόσα όση και η απόσταση από την Αθήνα μέχρι τον Νότιο Πόλο. Στο Αιγαίο Πέλαγος πνέουν βόρειοι και νότιοι άνεμοι μεγάλης ισχύος, οι οποίοι είναι ικανοί να προκαλέσουν έντονους κυματισμούς, οι οποίοι με τη σειρά τους μπορούν να παράξουν ετήσιο ποσοστό κυματικής ισχύος που ξεκινάει από 4 kW/m και φτάνει μέχρι και τα 11 Kw/m. Παρατηρήθηκε επίσης ότι δημιουργούνται σημεία, τα λεγόμενα «hot spots», στα οποία παρατηρούνται υψηλά επίπεδα κυματικής ισχύος. Αυτό οφείλεται στο σύμπλεγμα των νησιών. Οι μονάδες παραγωγής κυματικής ενέργειας είναι κατάλληλες για μεταφορά ηλεκτρισμού σε πολλά νησιά τα οποία τροφοδοτούνται ενεργειακά μέσω πετρελαιοκίνητων σταθμών. Ακριβώς επειδή το κόστος ηλεκτρισμού στα νησιά είναι μεγάλο, η παραγωγή ενέργειας μέσω των κυμάτων καθίσταται πλήρως ανταγωνιστική έναντι των συμβατικών πηγών ενέργειας (Clement *et al.*, 2002).

Το έτος 2011 πραγματοποιήθηκε έρευνα από τους Soukissian *et al.*, ώστε να αξιολογήσουν με περισσότερες λεπτομέρειες την κυματική ενέργεια στις ελληνικές θάλασσες. Για να το

επιτύχουν αυτό χρησιμοποίησαν διάφορα αριθμητικά μοντέλα σε συνδυασμό με επιτόπιες μετρήσεις στον θαλάσσιο χώρο. Συλλέχθηκαν δεδομένα υψηλής χωρικής και χρονικής ανάλυσης, τα οποία καλύπτουν ένα χρονικό διάστημα 10 ετών, από το 1995 έως και το 2004. Τα αποτελέσματα της έρευνάς τους εξήχθησαν από ένα αριθμητικό κυματικό μοντέλο, τύπου WAM – Cycle 4, με χωρική ανάλυση $0,1 \times 0,1$ m και χρονική ανάλυση 3 ωρών.

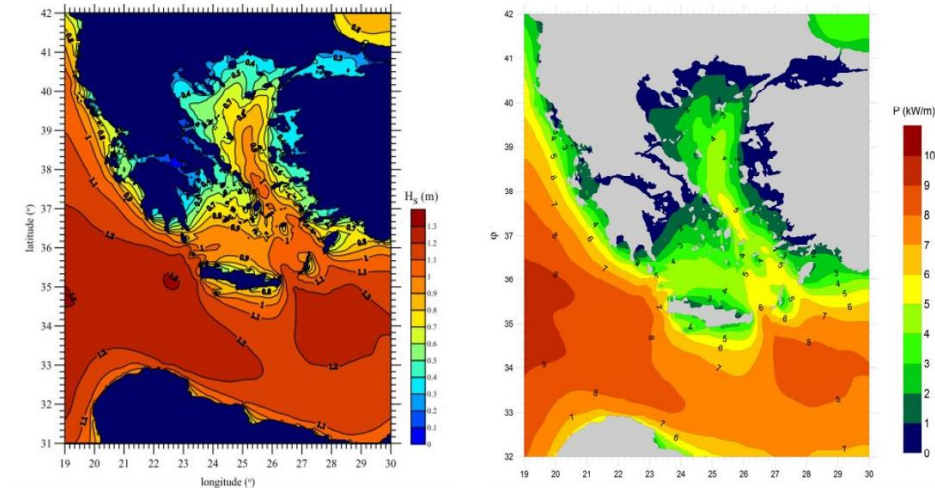
Η έρευνά τους εστίασε και στην επεξεργασία δεδομένων σε εποχιακή βάση, όπου παρατηρήθηκε ότι η μέση κυματική ισχύς είναι μεγαλύτερη κατά τη διάρκεια του χειμώνα.

Όπως φαίνεται και στην *Εικόνα 2*, που αναπαριστά τη μέση ροή της κυματικής ισχύος (δεξιά εικόνα), η μέγιστη τιμή της κυματικής ισχύος παρατηρείται στο βόρειο σύμπλεγμα των Κυκλάδων και φτάνει τα 10 kW/m, ενώ στο νότιο σύμπλεγμα των Κυκλάδων, η κυματική ισχύς είναι χαμηλότερη, κυμαίνεται μεταξύ 6 – 8 kW/m. Μεταξύ Κρήτης και Κάσου, στο νοτιοανατολικό Αιγαίο, οι τιμές της κυματικής ισχύος κυμαίνονται μεταξύ 10 – 12 kW/m, ενώ οι τιμές στο νοτιοδυτικό Αιγαίο κυμαίνονται μεταξύ 8 – 10 kW/m. Η υψηλότερη τιμή κυματικής ισχύος στο Αιγαίο πέλαγος, παρατηρείται μεταξύ Κρήτης και Κυθήρων, όπου οι τιμές κυμαίνονται μεταξύ 12 – 14 kW/m. Στο Ιόνιο πέλαγος, κατά τη διάρκεια του χειμώνα, οι τιμές της κυματικής ισχύος κυμαίνονται μεταξύ 9 – 15 kW/m.



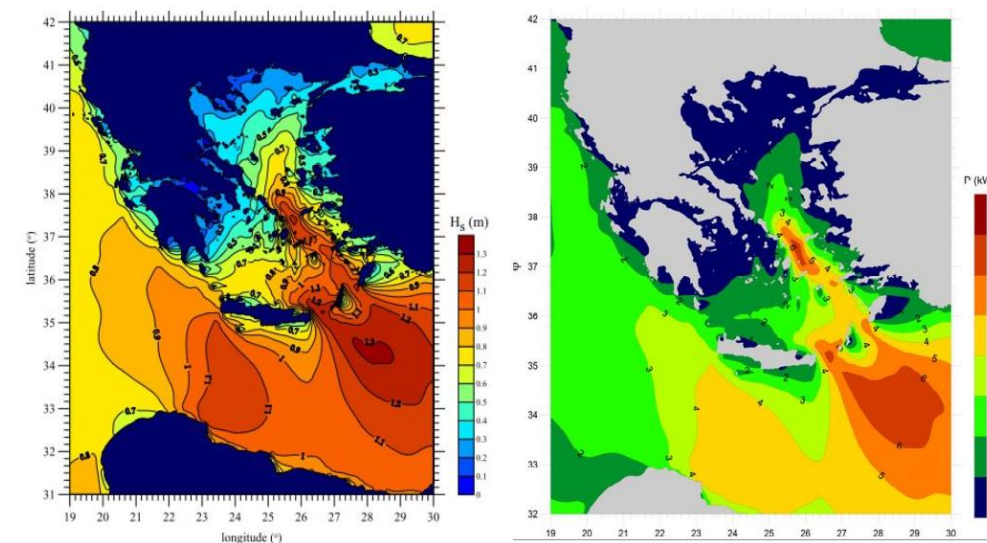
Εικόνα 2 Μέσο ύψος κύματος (αριστερά) (Soukissian et al., 2007) και μέση ροή κυματικής ισχύος (δεξιά) (Soukissian et al., 2011) κατά την περίοδο του χειμώνα

Κατά τη διάρκεια της άνοιξης (Εικόνα 3), η μέση τιμή της κυματικής ισχύος στο βορειοκεντρικό και δυτικό Αιγαίο, φτάνουν μέχρι και τα 5 kW/m. Η μέγιστες τιμές της κυματικής ισχύος, τόσο για το Αιγαίο όσο και για το Ιόνιο πέλαγος, κατά τη διάρκεια της άνοιξης υπολογίστηκαν στα 7 kW/m.



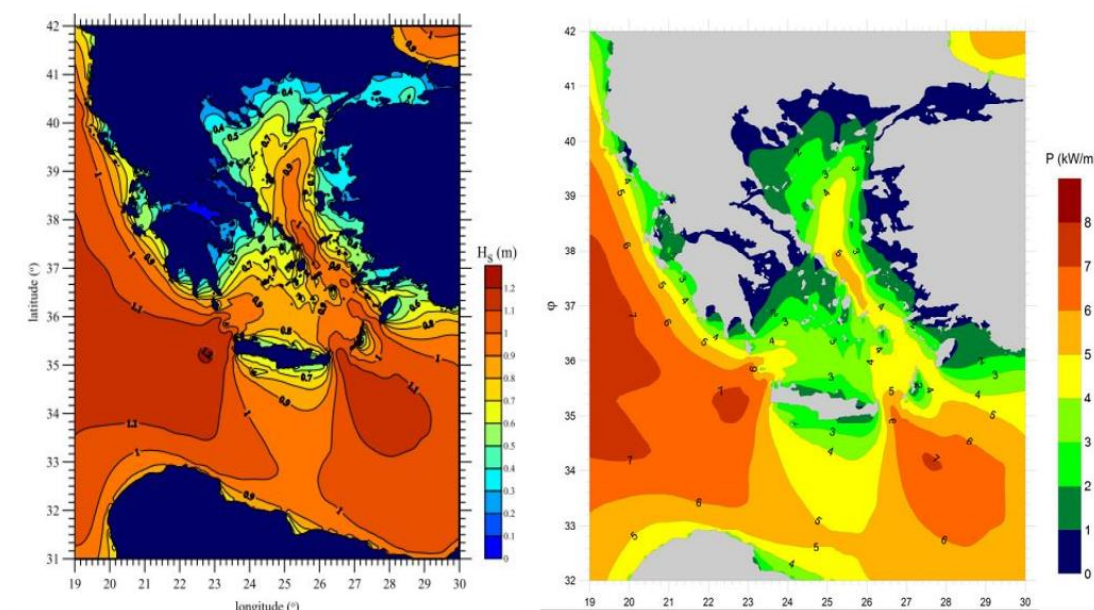
Εικόνα 3. Μέσο ύψος κύματος (αριστερά) (Soukissian et al., 2007) και μέση ροή κυματικής ισχύος (δεξιά) (Soukissian et al., 2011) κατά την περίοδο της άνοιξης

Όσον αφορά την περίοδο του καλοκαιριού (Εικόνα 4), οι μέγιστες τιμές της κυματικής ισχύος, έχουν εντοπιστεί στο βορειότερο σύμπλεγμα των Κυκλάδων, στο κεντρικό Αιγαίο, με τιμές που φτάνουν τα 6 kW/m, όπως επίσης και στο νοτιοανατολικό Αιγαίο, μεταξύ Κρήτης και Κάσου, όπου οι τιμές κυμαίνονται μεταξύ 5 – 6 kW/m καθώς επίσης και μεταξύ Κάρπαθου και Ρόδου, όπου η μέγιστη κυματική ισχύς φτάνει τα 5 kW/m. Η μέση τιμή της κυματικής ισχύος, κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού, μεγιστοποιείται στα στενά του κεντρικού και νοτιοανατολικού Αιγαίου, γεγονός που οφείλεται στα «μελτέμια».



Εικόνα 4. Μέσο ύψος κύματος (αριστερά) (Soukissian et al., 2007) και μέση ροή κυματικής ισχύος (δεξιά) (Soukissian et al., 2011) κατά την περίοδο του καλοκαιριού

Τους φθινοπωρινούς μήνες (Εικόνα 5), η κυματική ισχύς στο κεντροανατολικό Αιγαίο, κυμαίνεται μεταξύ 4 – 5 kW/m. Στο νοτιοδυτικό Αιγαίο οι τιμές αυτές διαμορφώνονται στα 5 – 6 kW/m, ενώ στο Ιόνιο πέλαγος οι τιμές είναι μεταξύ 4 – 6 kW/m.



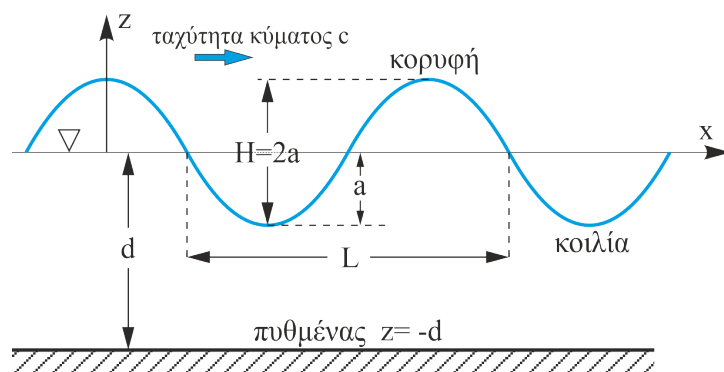
Εικόνα 5. Μέσο ύψος κύματος (αριστερά) (Soukissian et al., 2007) και μέση ροή κυματικής ισχύος (δεξιά) (Soukissian et al., 2011) κατά την περίοδο του φθινοπώρου

1.3. Το κύμα

Κύμα γενικά ονομάζεται μια διαταραχή που διαδίδεται στον χώρο και τον χρόνο. Ο όρος κύμα, ο οποίος προέρχεται από το αρχαιοελληνικό ρήμα «κύω» που σημαίνει διογκώνομαι, φουσκώνω, χαρακτηρίζει τη μεταφορά της διαταραχής, συνήθως μέσω ενός μέσου. Η μεταφορά αυτή, γίνεται στα υλικά μέσα ως παλμική κίνηση μεταξύ των στοιχειωδών σωματιδίων του μέσου, ορισμένα είδη κυμάτων, όπως τα ηλεκτρομαγνητικά, μπορούν να διαδίδονται και στο κενό.

Η διαταραχή αφορά ένα συγκεκριμένο φυσικό μέγεθος, ανάλογα με το είδος του κύματος. Παραδείγματος χάριν, σε ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα, η διαταραχή αφορά την ένταση του ηλεκτρικού και του μαγνητικού πεδίου. Στα κύματα της θάλασσας διαταράσσεται το επιφανειακό στρώμα του νερού. Υπάρχουν πολλά είδη κυμάτων, όμως όλα έχουν ένα κοινό χαρακτηριστικό: μεταφέρουν ενέργεια. Ένα κύμα που κινείται στην επιφάνεια της θάλασσας, αναγκάζει κάθε σώμα που επιπλέει σε αυτήν να ανεβοκατεβαίνει. Αυτό συμβαίνει λόγω της ενέργειας που μεταφέρει το κύμα, η οποία τελικά προκαλεί ταλαντώσεις στο επιπλέον σώμα. Το ίδιο συμβαίνει και στον αέρα, όταν ταλαντώνονται τα μόριά του από ένα ηχητικό κύμα που «ταξιδεύει» μέσα σε αυτόν.

Τα κύματα είναι φαινόμενα περιοδικά, δηλαδή επαναλαμβάνονται με τον ίδιο μέσα σε συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα, όπως αποτυπώνεται και στην *Εικόνα 6*. Ουσιαστικά, αυτό που επαναλαμβάνεται στην περίπτωση των κυμάτων είναι η διαταραχή.



Εικόνα 6. Γραφική αναπαράσταση κύματος (Muchtar et al., 2016)

Τα κύματα προκαλούνται από διαταραχές, οι οποίες καταστρέφουν κάποιο είδος ισορροπίας άρα μεταφέρουν και ενέργεια. Άρα μπορούμε να πούμε ότι το κύμα μεταφέρει ενέργεια η οποία αξιοποιείται κατά τη διάδοση του κύματος. Ένα μέρος αυτής της ενέργειας αποθηκεύεται προσωρινά στην περιοχή διάδοσης του κύματος. Η ενέργεια που υπάρχει σε

κάποια περιοχή, είναι συνήθως της μορφής $\frac{kA^2}{2}$ όπου k είναι ένας συντελεστής που

εξαρτάται από την περιοχή του μέσου στο οποίο διαδίδεται το κύμα και A το πλάτος κύματος. Παρατηρείται επίσης το φαινόμενο η ενέργεια να μετατρέπεται σε δύο διαφορετικές μορφές ενέργειας περιοδικά, για παράδειγμα στα μηχανικά κύματα η ενέργεια μετατρέπεται σε κινητική και δυναμική ενέργεια, στα ηλεκτρομαγνητικά κύματα η ενέργεια μετατρέπεται σε δυναμική και μαγνητική ενέργεια.

Η ενέργεια που μεταφέρει ένα κύμα προέρχεται από την πηγή του. Τα κύματα από την πηγή τους εκπέμπονται ομοιόμορφα μέσα στο κενό ή στο μέσο όπου διαδίδονται. Η πηγή κάθε χρονική στιγμή έχει συγκεκριμένη ισχύ P . Το μέρος του κύματος που εκπέμφθηκε πριν από κάποιο χρόνο έχει ένα μέρος της ισχύος που είχε η πηγή τη στιγμή που το εξέπεμπε (Νικολάου, 2015).

1.3.1 Τα θαλάσσια κύματα

Με τον όρο κυματισμός χαρακτηρίζεται γενικά το σύνολο των φυσικών φαινομένων που παρουσιάζει η επιφάνεια της θάλασσας, τα οποία οφείλονται κυρίως στην απορρόφηση της κινητικής ενέργειας του ανέμου.

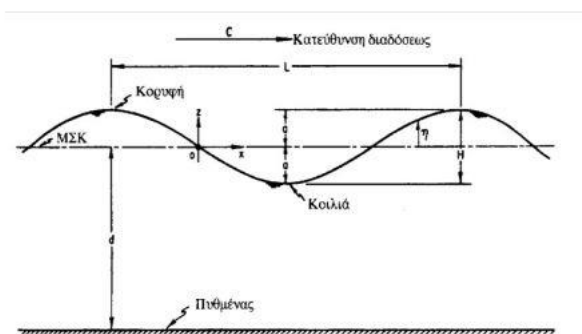
Ως κυματισμός ορίζεται κάθε περιοδική ή μη περιοδική διαταραχή της επιφάνειας της θάλασσας σε ένα πεπερασμένο ή άπειρο πεδίο. Οι κυματισμοί, χωρικά, χαρακτηρίζονται από το μήκος του κύματος L , δηλαδή το οριζόντιο μήκος στο οποίο επεκτείνεται ή

επαναλαμβάνεται η διαταραχή της στάθμης, το ύψος τους H , δηλαδή η μέγιστη απόσταση μεταξύ κοιλίας και κορυφής του κύματος και, χρονικά σε περίπτωση περιοδικών κυματισμών, χαρακτηρίζονται από την περίοδο T (Καραμπάς κ.ά., 2015).

Με την έναρξη του ανέμου, σχηματίζονται στην επιφάνεια ηρεμούντων υδάτων ρυτίδες ακανόνιστου σχήματος. Όσο η ένταση του ανέμου αυξάνεται, τόσο παρατείνεται και η διάρκεια της δράσεώς του στην επιφάνεια των υδάτων, με αποτέλεσμα οι ρυτίδες να μεταβάλλονται σε κύματα ακαθόριστου σχήματα και διεύθυνσης. Όταν όμως ο άνεμος παύσει να πνέει, τα κύματα λαμβάνουν συγκεκριμένη μορφή, δηλαδή κανονικό σχήμα με ορισμένο ύψος, μήκος και περίοδο. Αν, στο μεταξύ, δε μεσολαβήσει άλλη αιτία, η περίοδος του κυματισμού θα διατηρείται μέχρι την πλήρη απόσβεσή της (Νικολάου, 2015). Οι ανεμογενείς κυματισμοί αποτελούν κυματισμούς που προκύπτουν από τη δράση του ανέμου. Αυτοί οι κυματισμοί αποτελούνται από διάφορες προέλευσεις κυμάτων με διαφορετικές περιόδους T και έχουν τρισδιάστατη μορφή. Ωστόσο, για να τους περιγράψουμε αναλυτικά, κατ' αρχήν υποθέτουμε έναν δισδιάστατο κυματισμό. Συγκεκριμένα, υποθέτουμε ότι τα στοιχεία του κυματισμού κατά την κατεύθυνση y παραμένουν σταθερά, ενώ οι ενδεχόμενες μεταβολές περιορίζονται στο επίπεδο x, z . (Καραμπάς κ.ά., 2015).

Μία λανθασμένη εντύπωση που τείνει να επικρατεί, είναι πως κατά τον κυματισμό μετατοπίζεται μάζα ύδατος. Στην πραγματικότητα αλλάζει μόνο το σχήμα της κατανομής της επιφάνειας του ύδατος. Αυτό γίνεται εύκολα κατανοητό, αν σκεφτούμε το ενδεχόμενο να ρίξουμε στην επιφάνεια της θάλασσας ένα κομμάτι ξύλου. Αν το παρατηρήσουμε, θα δούμε πως ενώ τα κύματα προχωρούν, το ξύλο απλώς ανεβοκατεβαίνει στο ίδιο σημείο όπου το ρίξαμε. Η μοναδική περίπτωση να μετακινηθεί το ξύλο, είναι να ενεργήσει παράλληλα με τους κυματισμούς και μία άλλη δύναμη, όπως ο άνεμος.

Τα χαρακτηριστικά που περιγράφουν ένα κύμα είναι τα εξής και αποτυπώνονται και στην *Εικόνα 7* (Νικολάου, 2015):



Εικόνα 7. Χαρακτηριστική μορφή απλού ημιτονοειδούς κύματος (Κουτίτας, 1996)

- Κορυφή κύματος: είναι το υψηλότερο σημείο του κύματος
- Κοίλο κύματος: Ονομάζεται το χαμηλότερο σημείο του κύματος
- Μήκος κύματος: Ονομάζεται η απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών κορυφών ή δύο διαδοχικών κοίλων. Συνήθως συμβολίζεται με το γράμμα λ ή L .
- Ύψος κύματος: Ονομάζεται η κάθετος απόσταση μεταξύ της κορυφής και του κοίλου τμήματος του κύματος. Είναι το αντίστοιχο πλάτος στην κυματική.
- Ταχύτητα κύματος: Ως ταχύτητα του κύματος ορίζεται ο λόγος της μετατόπισης του κύματος στο χρόνο που διέρρευσε. Συμβολίζεται συνήθως με το γράμμα U .
- Περίοδος κύματος: Περίοδος κύματος ονομάζεται ο απαιτούμενος χρόνος για να διέλθουν από ένα σταθερό σημείο δύο διαδοχικά σημεία ίδιων φάσεων, δύο κορυφές ή δύο κοίλα. Συμβολίζεται με το γράμμα T .
- Συχνότητα κύματος: Ως συχνότητα ορίζεται ο αριθμός των μηκών του κύματος που διέρχονται από ένα σταθερό σημείο στη μονάδα του χρόνου. Συμβολίζεται με το γράμμα N .

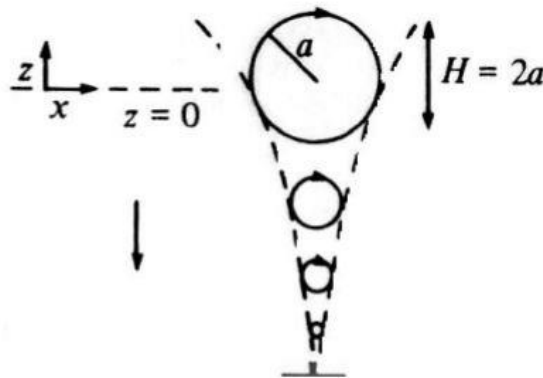
Για τα θαλάσσια τεχνικά έργα είναι ιδιαίτερα σημαντικές οι διαταραχές της επιφάνειας της θάλασσας. Οι διαταραχές αυτές είναι γνωστές ως επιφανειακοί θαλάσσιοι κυματισμοί, διέπονται από τη δύναμη της βαρύτητας και το ενεργειακό μηχανικό περιεχόμενό τους είναι ο σημαντικότερος παράγοντας φόρτισης των τεχνικών έργων που σχεδιάζονται και υπολογίζονται από πολιτικούς μηχανικούς (Δραγανίδης, 2020).

Η προέλευση των κυματισμών στη φύση διαφοροποιείται σημαντικά. Η επίδραση του ανέμου στην επιφάνεια της θάλασσας, οι διαφορές στη βαρομετρική πίεση από θέση σε θέση, η αστρονομική παλίρροια, πιθανές υποβρύχιες κατολισθήσεις και υποβρύχιοι σεισμοί, οι διαφοροποιήσεις της πυκνότητας των θαλάσσιων μαζών, είναι οι κυριότερες αιτίες δημιουργίας επιφανειακών ή εσωτερικών κυματισμών (Κουτίτας, 1996).

Μερικές ακόμα από τις ιδιότητες των επιφανειακών κυμάτων είναι οι παρακάτω:

- Τα κύματα της επιφάνειας αποτελούνται από τη σύζευξη κυμάτων με διαφορετικό μήκος κύματος, διαφορετική φάση και διαφορετική διεύθυνση.
- Η κίνηση κάθε σωματιδίου νερού είναι κυκλική. Η επιφάνεια του κύματος διαδίδεται προς μία κατεύθυνση, δεν ισχύει όμως το ίδιο και για τα σωματίδια του νερού. Στο σχήμα που παρουσιάζεται στην *Εικόνα 8*, φαίνεται η κυκλική κίνηση μιας στοιχειώδους μάζας νερού, με ακτίνα α η οποία ελαττώνεται σχεδόν εκθετικά όσο αυξάνεται το βάθος.
- Το νερό που βρίσκεται στην επιφάνεια, παραμένει στην επιφάνεια

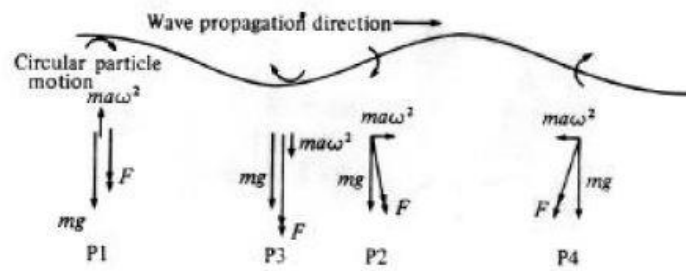
- Το πλάτος των κυκλικών κινήσεων που πραγματοποιούν τα σωματίδια του νερού, μειώνεται, όπως προαναφέρθηκε, εκθετικά με το βάθος. Σε βάθος $\lambda/2\pi$, για παράδειγμα, το πλάτος μειώνεται στο $1/e$ του πλάτους της επιφάνειας. Σε βάθη μεγαλύτερα από $\lambda/2$, η κίνηση είναι μικρότερη από 5% σε σχέση με την κίνηση στην επιφάνεια, οπότε και θεωρείται αμελητέα. Στην *Εικόνα 8* μπορεί να παρατηρηθεί ότι όσο αυξάνει το βάθος τόσο φθίνει η ακτίνα της κυκλικής τροχιάς. Μετά από βάθος μεγαλύτερο από $\lambda/2$, η ακτίνα γίνεται, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, τόσο μικρή που μπορεί να θεωρηθεί πως τα στοιχεία είναι πλέον ακίνητα. Στον πυθμένα της θάλασσας, η κίνηση είναι σχεδόν οριζόντια.
- Το πλάτος του κύματος, πολύ σπάνια ξεπερνά το $1/10$ του μήκους του. Επίσης, το πλάτος στην επιφάνεια είναι πρακτικά ανεξάρτητο από το μήκος του κύματος. Εξαρτάται μόν από την προϊστορία των ανέμων στην επιφάνεια.
- Όταν ένα κύμα «σπάσει» και εμφανιστεί αφρός, τότε καταναλώνεται ενέργεια, μειώνοντας έτσι τη διαθέσιμη ενέργεια των κυμάτων.



Εικόνα 8. Κυκλική κίνηση στοιχειώδους μάζας νερού (Vorn et al., 2014)

1.3.2 Η ενέργεια των κυμάτων

Η διαθέσιμη ενέργεια των θαλάσσιων κυμάτων υπολογίζεται ως η ενέργεια που μεταφέρουν τα ύδατα της θαλάσσιας επιφάνειας, όπως φαίνεται και στην *Εικόνα 9*.



Εικόνα 9. Δυνάμεις που ασκούνται σε επιφανειακά σώματα νερού στην επιφάνεια της θάλασσας (Vorn et al., 2014)

Όπου m είναι η μάζα του νερού και ω είναι η γωνιακή ταχύτητα της κυκλικής κίνησης που εκτελεί το νερό, όπως προαναφέρθηκε.

Η ενέργεια των θαλάσσιων κυμάτων προέρχεται από τις δύο κινήσεις των υδάτων της επιφάνειας της θάλασσας: την κατακόρυφη και την οριζόντια. Η κατακόρυφη κίνηση προσδιορίζει το ύψος του κύματος και η οριζόντια την ταχύτητα με την οποία κινείται το κύμα. Στα χαρακτηριστικά των κυμάτων κατατάσσεται και η κινητική και η δυναμική τους ενέργεια. Έτσι, η κυματική ενέργεια αποτελείται από την κινητική και τη δυναμική ενέργεια των υδάτων στην επιφάνεια της θάλασσας (Νικολάου, 2015).

Γενικά, υπάρχουν πολλοί τρόποι και αρκετές διατάξεις για να εκμεταλλευτούμε την κυματική ενέργεια. Παρακάτω δίνεται ένα ενδεικτικό γενικό πλαίσιο το οποίο περιγράφει τους τρόπους με τους οποίους μπορούμε να εκμεταλλευτούμε την κίνηση των κυμάτων της θάλασσας ώστε να παράξουμε από αυτά ενέργεια:

- Η ενέργεια των κυμάτων ανοιχτής θάλασσας διατίθεται με τη μορφή εναλασσόμενων ανοδικών και καθοδικών κινήσεων του νερού
- Από τα κύματα κοντά στην ακτή μπορούμε να εκμεταλλευτούμε την προωστική δύναμη του μετώπου του κύματος για την κίνηση στροβιλοκινητήρων νερού ή αέρα
- Τα κύματα που «σπάνε» στην ακτή χρησιμοποιούνται για την πλήρωση φραγμάτων, ώστε να παραχθεί εν συνεχεία υδροηλεκτρική ενέργεια.

Με βάση τις παραπάνω γενικές παραδοχές, αναπτύχθηκαν κατά καιρούς διάφορα μοντέλα για την εκμετάλλευση της ενέργειας από τα θαλάσσια κύματα, ορισμένα εκ των οποίων έχουν εφαρμοστεί και στην πράξη σε πολλές περιοχές του κόσμου.

Όμως, μελετώντας το θέμα της εκμετάλλευσης των θαλάσσιων κυμάτων, εντοπίζονται ορισμένα μειονεκτήματα τα οποία δυσχεραίνουν την πρακτική εφαρμογή των μοντέλων. Κάποια γενικά μειονεκτήματα παρουσιάζονται παρακάτω:

- Τα κύματα έχουν ακανόνιστη μορφή, δηλαδή έχουν διαφορετικό πλάτος, διαφορετική φάση και διεύθυνση, γεγονός που δυσκολεύει την κατασκευή διατάξεων που να καλύπτουν λειτουργικά πολλές και μεγάλου εύρους μεταβλητές.
- Υπάρχει πάντα η πιθανότητα να υπάρξουν κύματα ακραίας έντασης, πολλές φορές έως και 10 φορές μεγαλύτερης της μέσης αναμενόμενης τιμής. Επομένως, απαιτούνται διατάξεις ανθεκτικές σε παραγόμενη ισχύ μέχρι και 100 φορές μεγαλύτερη από τη μέση παραγόμενη ισχύ, πράγμα που σημαίνει ότι αυξάνεται το κόστος κατασκευής.
- Η μέγιστη ένταση των κυμάτων βρίσκεται σε μεγάλη απόσταση από την ακτή. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι η κατασκευή, η συντήρηση και η ασφάλεια των διατάξεων δυσχεραίνεται ακόμα περισσότερο, γεγονός που πιθανόν να έχει και συνέπεια στο κόστος κατασκευής.
- Η περίοδος των κυμάτων είναι πολύ μικρή, της τάξεως του 0,1 Hz, γεγονός που δημιουργεί προβλήματα στην συνδυαστική λειτουργία με ηλεκτρογεννήτριες των οποίων οι συχνότητες λειτουργίας τους είναι 500 φορές μεγαλύτερες από την τάξη συχνότητας των κυμάτων της θάλασσας.
- Ένα ακόμα μεγάλο μειονέκτημα, είναι ότι τα θαλάσσια κύματα έχουν σχετικά μικρή προσφορά ισχύος συγκριτικά με τις συνήθεις ανάγκες της βιομηχανίας, το οποίο οδηγεί στο να κατασκευαστούν πολύ μεγάλες διατάξεις με πολύ υψηλό κόστος κατασκευής, ώστε να παράγεται η ζητούμενη ισχύς.

Οι όροι κυματική ενέργεια και κυματική ισχύς δεν έχουν ταυτόσημες έννοιες. Αναφερόμενοι στον όρο κυματική ισχύς, εννοούμε το ποσοστό κατά το οποίο η ενέργεια μεταφέρεται με τη διάδοση του κύματος και μπορεί να αξιοποιηθεί για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Η συνηθέστερη μονάδα μέτρησης της κυματικής ισχύος είναι τα kW/m. (Soukissian *et al.*, 2011)

Η κυματική ισχύς που συμβολίζεται με το γράμμα P, δίνεται από την παρακάτω εξίσωση (1) (Savvidis *et al.*, 2013):

$$P = E \cdot \frac{n}{T} \quad (1)$$

όπου: E

E = η κυματική ενέργεια (J)

T: η περίοδος του κύματος

n: κυματική παράμετρος

Η κυματική ενέργεια E, καθώς και η κυματική παράμετρος n, δίνονται από τους ακόλουθους τύπους (2) και (3):

$$E = \rho \cdot g \cdot H^2 \cdot \frac{L}{8} \quad (2)$$

$$n = 0.5 \left(1 + \left(\frac{2kd}{\sinh(2kd)} \right) \right) \quad (3)$$

όπου:

ρ = η πυκνότητα του θαλασσινού νερού 1025 kg/m³

g = η επιτάχυνση της βαρύτητας = 9,81 m/sec²

H = το ύψος του κύματος (m)

L = το μήκος του κύματος (m)

d = το βάθος του νερού (m)

$k = 2\pi/L$

Βάσει της κυματικής θεωρίας, η κυματική ισχύς εξαρτάται από τρεις παράγοντες:

- Το ύψος του κύματος
- Την περίοδο του κύματος
- Το βάθος του νερού

Η κυματική ισχύς σε βαθιά νερά, δηλαδή για νερά όπου το βάθος τους επαληθεύει την ανίσωση $d/L > 0.5$ προκύπτει από την παρακάτω σχέση (4) :

$$P = \rho \cdot g^2 \cdot T \cdot \frac{H^2}{(\beta \cdot \pi)} \quad (4)$$

όπου:

P = η κυματική ισχύς ανά μονάδα μήκους του κύματος (kW/m)

ρ = η πυκνότητα του θαλασσινού νερού 1025 kg/m³

g = η επιτάχυνση της βαρύτητας = 9.81 m/s²

T = η περίοδος του κύματος

$\pi = 3,14$

β = συντελεστής – σταθερά, 64 για μη κανονικά κύματα και 32 για κανονικά κύματα. Οπότε, για βαθιά νερά, όπου $n = 0,5$ η παραπάνω εξίσωση (4) διαμορφώνεται ως εξής (Εξισώσεις 5 & 6) (Λιακόπουλος, 2014):

$$P = 1000 \cdot H^2 \cdot T \text{ (W/m)} \text{ ή } P = H^2 \cdot T \text{ (Kw/m)} \text{ για κανονικά κύματα} \quad (5)$$

$$P = 500 \cdot H^2 \cdot T \text{ (W/m)} \text{ ή } P = 0,5 H^2 \cdot T \text{ (Kw/m)} \text{ για μη κανονικά κύματα} \quad (6)$$

1.4. Μετατροπείς κυματικής ενέργειας

Από τις αρχές του 19^{ου} αιώνα μέχρι και σήμερα έχουν καταγραφεί πάνω από 1200 ευρεσιτεχνίες για την παραγωγή ενέργειας από τα κύματα, καθώς επίσης και πάρα πολλές διατάξεις και συστήματα υψηλής τεχνολογίας, πολλά από τα οποία έχουν ήδη δοκιμαστεί ή βρίσκονται τώρα σε φάση δοκιμών. Η ιστορία των συσκευών μετατροπής της κυματικής

ενέργειας, ξεκίνησε ως μία πρωτοποριακή ιδέα, η οποία πέρασε από πολλές φάσεις σχεδιασμού ώστε να εδραιωθεί το θεωρητικό της υπόβαθρο. Στην πορεία ακολούθησε πληθώρα εργαστηριακών πειραμάτων προτού αρχίσουν οι δοκιμές στην ανοιχτή θάλασσα, σε πραγματικές συνθήκες. Σε γενικές γραμμές, για την εκμετάλλευση της ενέργειας των κυμάτων και τη μετατροπή σε ωφέλιμο έργο, απαιτείται η αλληλεπίδραση των κυματισμών με έναν Μετατροπέα Κυματικής Ενέργειας.

Παρά τη μεγάλη ποικιλία τεχνολογιών που υπάρχουν, οι συσκευές μετατροπής της κυματικής ενέργειας έχουν να υπερβούν πολλές δυσκολίες ώστε να μπορούν να συναγωνίζονται επάξια τις άλλες μορφές ΑΠΕ. Οι δυσκολίες αυτές έχουν να κάνουν κατά κύριο λόγο με την αξιοπιστία των συσκευών, το κατασκευαστικό και το λειτουργικό τους κόστος. Πέρα όμως αυτών των δυσκολιών, οι μετατροπείς της κυματικής ενέργειας θα πρέπει να μπορούν να ξεπεράσουν και τα φυσικά εμπόδια που προκύπτουν, όπως τα ακραία καιρικά φαινόμενα, οι τυχηματικές τιμές της ισχύος και οι χαμηλές τιμές της συχνότητας μετάδοσης. Επίσης, τα φορτία μέσα στη θάλασσα, ενδέχεται να ξεπεράσουν κατά πολύ τις προβλεπόμενες τιμές τους, επομένως η πρόβλεψή τους καθίσταται δύσκολη, πράγμα που σημαίνει ότι ο σχεδιασμός ενός μετατροπέα κυματικής ενέργειας θα πρέπει να παρέχει επαρκή ασφάλεια και να εξασφαλίζει τη λειτουργικότητά του ακόμα και σε ακραία καιρικά φαινόμενα, όπου η υψηλή ενεργειακή πυκνότητα των κυμάτων συνεπάγεται μεγάλες καταπονήσεις που μπορεί να υπερβαίνουν ακόμα και εκατό φορές τις μέσες καταπονήσεις, ενώ ταυτόχρονα θα πρέπει να είναι και οικονομικά ανταγωνιστικός έναντι άλλων ΑΠΕ (Clement et al., 2002). Οι γενικότερες τεχνικές δυσκολίες που προκαλεί το θαλασσινό νερό, απαιτεί υψηλό βαθμό αντοχής των κατασκευών αυτών, έχοντας ως αποτέλεσμα και μεγαλύτερο κόστος κατασκευής. Επίσης, η δυσπροσιτότητα υπεράκτιων ή υποβρύχιων εγκαταστάσεων καθιστά πιο δύσκολο τον έλεγχο, τη συντήρηση και την επισκευή που τυχόν θα χρειαστεί ένας μετατροπέας κυματικής ενέργειας, με αποτέλεσμα να αυξάνεται και το λειτουργικό κόστος των κατασκευών αυτών (Κουρτζής, 2013).

1.4.1. Κατηγοριοποίηση των μετατροπέων κυματικής ενέργειας

Οι σύγχρονοι μετατροπείς της κυματικής ενέργειας είναι ιδιαίτερα πολύπλοκες μηχανές και, παρότι έχουν μελετηθεί πολυάριθμες παραλλαγές τους, η βασική τους αρχή λειτουργίας παραμένει ίδια: Αποτελούνται όλοι από ένα κινούμενο ή ελαστικό σώμα, το οποίο παραλαμβάνει την κυματική ενέργεια, και από μία σειρά παρελκόμενων συστημάτων τα οποία αρχικά μετατρέπουν την ενέργεια στην επιθυμητή μορφή και κατόπιν την αποθηκεύουν ή τη διοχετεύουν σε κάποιο δίκτυο μεταφοράς.

Ο τρόπος λειτουργίας των μετατροπέων κυματικής ενέργειας είναι αυτός που περιγράφεται παρακάτω: Το κινητό στοιχείο του μετατροπέα συνδέεται με μία αντλία και καθώς μετατοπίζεται υπό την επίδραση του κύματος, προκαλεί συμπίεση σε κάποια μάζα αέρα, νερού ή υδραυλικού λαδιού. Το πεπιεσμένο αέριο, με τη σειρά του, θέτει σε κίνηση έναν κινητήρα, ο οποίος μετά θέτει σε λειτουργία μία γεννήτρια παραγωγής ρεύματος.

Οι μετατροπείς της κυματικής ενέργειας, μπορεί να είναι πλωτές, υποβρύχιες ή εγκατεστημένες στον πυθμένα κατασκευές, οι οποίες τοποθετούνται σε μικρή απόσταση από την ακτή ή στην ανοιχτή θάλασσα ή ακόμα και σε σταθερές κατασκευές πάνω στην ακτή. Ορισμένες από τις βασικές υφιστάμενες τεχνολογίες είναι οι εξής (HELMERA, 2012):

- Σημειακοί απολήπτες (point absorbers), ταλαντευόμενες διατάξεις με τη μορφή πλωτήρα μικρού μεγέθους σε σχέση με το μήκος του προσπίπτοντος κύματος. Ορισμένες από αυτές τις κατασκευές είναι: Wave Star, Opt, Wavebob κ.α.
- Επιμήκεις μετατροπείς παράλληλοι προς τη διεύθυνση διάδοσης του κύματος ή αποσβεστήρες (attenuators). Ορισμένες από αυτές τις τεχνολογίες είναι: Pelamis, Dexamwave κ.α.
- Επιμήκεις μετατροπείς τερματικού τύπου (terminators), δηλαδή παράλληλοι με το μέτωπο του κύματος. Σε αυτή την κατηγορία εντάσσονται οι συσκευές οριζόντιας κυματικής παλινδρόμησης, οι οποίες έχουν τη μορφή υποθαλάσσιων επιπέδων πλακών αρθρωτά, συνδεδεμένων με τον πυθμένα. Τέτοιες συσκευές είναι: Oyster, Waveroller κ.α.
- Άλλες τεχνολογίες, όπως οι διατάξεις παλινδρομούσας υδάτινης στήλης, όπως η συσκευή Wavegen και διατάξεις υπερχειλίσης, όπως η συσκευή Wavedragon κ.α.

1.4.2. Κατηγοριοποίηση ανάλογα την τοποθεσία εγκατάστασης

Οι μετατροπείς κυματικής ενέργειας, ανάλογα την τοποθεσία της εγκατάστασής τους, χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες: χερσαίας ζώνης, παράκτιας ζώνης και υπεράκτιας ζώνης (Νικολάου,2015).

i. Συσκευές μετατροπής κυματικής ενέργειας παράκτιας ζώνης (nearshore wave energy converters):

Οι συσκευές μετατροπής της κυματικής ενέργειας παράκτιας ζώνης, τοποθετούνται σε απόσταση περίπου 500 μέτρων από την ακτή και σε βάθος που δεν υπερβαίνει τα 25 μέτρα. Τα πλεονεκτήματα αυτών των συσκευών είναι ίδια με αυτά των συσκευών χερσαίας ζώνης, υπερτερούν όμως των χερσαίων συσκευών στο γεγονός ότι συναντούν μεγαλύτερο κυματικό δυναμικό από αυτό που υπάρχει στην ακτογραμμή. Οι κατασκευές αυτές συνήθως είναι ειδικές δομές που εδράζονται στον πυθμένα της θάλασσας.

ii. Συσκευές μετατροπής κυματικής ενέργειας υπεράκτιας ζώνης (nearshore wave energy converters):

Οι συσκευές αυτές είναι πλωτά συστήματα τα οποία απαιτούν αγκύρωση. Οι συσκευές μικρού βυθίσματος τοποθετούνται σε βάθος που κυμαίνεται από 25 έως 75 μέτρα, ενώ αντίστοιχα οι συσκευές μεγάλου βυθίσματος τοποθετούνται σε βάθος μεγαλύτερο των 75 μέτρων. Σε μεγάλα βάθη οι απώλειες κύματος λόγω τριβής με τον βυθό είναι ελάχιστες, άρα το κυματικό δυναμικό φτάνει τα υψηλότερα επίπεδα. Επίσης, με την τοποθέτηση μιας τέτοιας εγκατάστασης δεν δημιουργούνται προβλήματα στον χώρο και στο οπτικό πεδίο της περιοχής. Όμως το κόστος μιας τέτοιας συσκευής είναι υψηλό και υπάρχει ο κίνδυνος ολοκληρωτικής απώλειας της συσκευής σε περίπτωση ακραίων καιρικών φαινομένων.

iii. Συσκευές μετατροπής κυματικής ενέργειας χερσαίας ζώνης (onshore wave energy converters):

Οι εγκαταστάσεις αυτού του είδους είναι ενσωματωμένες στην ακτογραμμή, σε βάθος συνήθως μικρότερο των 15 μέτρων, δίνοντάς τους έτσι το πλεονέκτημα της εύκολης εγκατάστασης και συντήρησης. Δεν απαιτείται αγκυροβόληση, ούτε υποθαλάσσια ηλεκτρικά καλώδια μεταφοράς. Το ελάττωμα των συσκευών που εγκαθίστανται στη χερσαία ζώνη είναι ότι λόγω της θέσης τους, κοντά στη στεριά, χάνουν σημαντική ισχύ και η εγκατάστασή τους είναι γενικά περιορίζεται από τη γεωλογία της ακτογραμμής. Σε αυτή τη ζώνη, συνήθως, εφαρμόζεται τεχνολογία τύπου ταλαντούμενης στήλης ύδατος.

Στον παρακάτω πίνακα, (Πίνακας 1) παρατίθενται συγκεντρωμένοι παράγοντες που επιδρούν σε κάθε κατασκευή, ανάλογα με την τοποθεσία εγκατάστασής της.

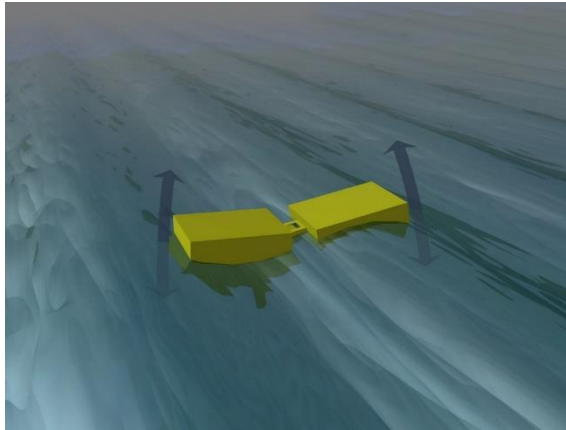
Πίνακας 1 Διάφοροι παράγοντες ανά τοποθεσία εγκατάστασης ενός ΜΚΕ (Νικολάου, 2015)

<u>Παράγοντας/Ζώνη</u>	<u>Χερσαία</u>	<u>Παράκτια</u>	<u>Υπεράκτια</u>
Διαθεσιμότητα θέσεων εγκατάστασης	ΧΑΜΗΛΗ	ΜΕΣΗ	ΥΨΗΛΗ
Κόστος λειτουργίας	ΧΑΜΗΛΟ	ΜΕΣΟ	ΜΕΣΟ-ΥΨΗΛΟ
Κόστος καλωδίωσης	ΧΑΜΗΛΟ	ΜΕΣΟ	ΜΕΣΟ-ΥΨΗΛΟ
Τεχνολογικός κίνδυνος	ΧΑΜΗΛΟΣ-ΜΕΣΟΣ	ΜΕΣΟΣ-ΥΨΗΛΟΣ	ΜΕΣΟΣ-ΥΨΗΛΟΣ
Δυναμικό παραγωγής ενέργειας	ΧΑΜΗΛΟ	ΜΕΣΟ	ΥΨΗΛΟ
Κίνδυνος βιωσιμότητας	ΧΑΜΗΛΟ	ΜΕΣΟ	ΜΕΣΟ-ΥΨΗΛΟ
Περιπλοκότητα εγκατάστασης	ΧΑΜΗΛΗ-ΜΕΣΗ	ΧΑΜΗΛΗ-ΜΕΣΗ	ΥΨΗΛΗ

1.4.3. Κατηγοριοποίηση ανάλογα τη μέθοδο απόσπασης της κυματικής ενέργειας

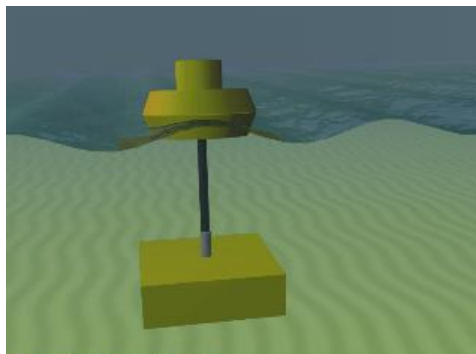
Εκτός από τη θέση και το βάθος, που αναφέρθηκαν παραπάνω, στο οποίο κατασκευάζονται για να λειτουργήσουν, οι κυματικές συσκευές κατηγοριοποιούνται και ανάλογα με τη μέθοδο που εφαρμόζεται από αυτές για την απόσπαση της κυματικής ενέργειας. Η κατηγοριοποίηση αυτή γίνεται ως εξής:

- a) Εξασθενητής κυμάτων: Εξασθενητής κυμάτων (Εικόνα 10) είναι μια μακρόστενη πλωτή συσκευή η οποία είναι ευθυγραμμισμένη προς το μέτωπο του κύματος. Ουσιαστικά, αυτή η συσκευή επιπλέει επί των διερχόμενων κυμάτων και αποσπά την ενέργειά τους με την επιλεκτική δέσμευση των κινήσεων καθ' όλο της το μήκος. Μια συσκευή αυτού του τύπου είναι η συσκευή Pelamis (Μανάλης, 2012).



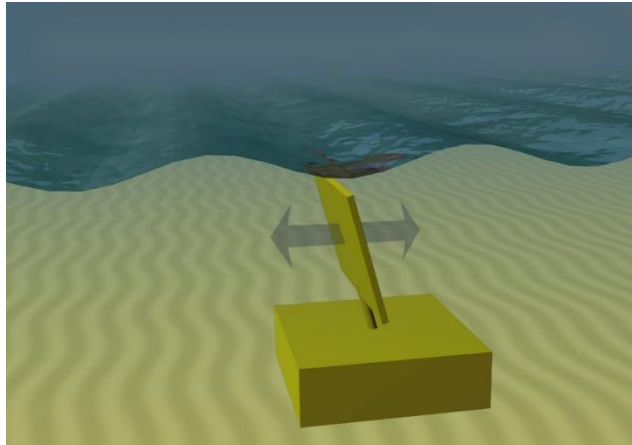
Εικόνα 10. Εξασθενητής κυμάτων (aquaret.com)

- b) Αξονοσυμμετρικός σημειακός απορροφητής: Πρόκειται για μία πλωτή συσκευή που απορροφά την κυματική ενέργεια, από κάθε διεύθυνση, μέσω των κινήσεών της στην επιφάνεια των υδάτων ή κοντά σε αυτή (Εικόνα 11). Οι διαστάσεις της είναι μικρές, συγκριτικά με το τυπικό μήκος κύματος, και η διάμετρός της συνήθως είναι της τάξης των λίγων μέτρων. Το χαρακτηριστικό της σημειακής απορρόφης, είναι κατά κανόνα, η ικανότητα απορρόφησης της ενέργειας μιας θαλάσσιας περιοχής μεγαλύτερης από τις διαστάσεις της συσκευής. Οι σχεδιασμοί τύπου σημαδούρας ενεργούν ως σημειακοί απορροφητές και συνήθως αυτοί σχεδιασμοί είναι αξονοσυμμετρικοί. Παραδείγματα κατασκευών που ανήκουν στην κατηγορία αυτή είναι οι συσκευές Wavebob, OPT PowerBuoy και Aquabuoy (Μανάλης, 2012).



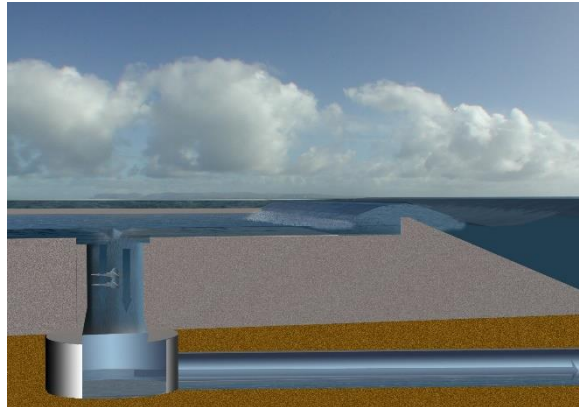
Εικόνα 11. Αξονοσυμμετρικός σημειακός απορροφητής (aquaret.com)

- c) Παλλόμενοι μετατροπείς των κυματικών κλυδωνισμών (OWSC): Τέτοιου τύπου συλλέκτες βρίσκονται κοντά στην επιφάνεια και εδράζονται πάνω σε έναν περιστρεφόμενο βραχίονα, ο οποίος είναι αγκυρωμένος στον πυθμένα (Εικόνα 12). Ο βραχίονας ταλαντεύεται ως ανάστροφο εκκρεμές, λόγω της κίνησης των σωματιδίων νερού των κυμάτων. Παραδείγματα αυτής της κατηγορίας αποτελούν η υποβρύχια συσκευή Waveroller και το διατρητικό επιφάνειας Oyster (Μανάλης, 2012, Παναγιωτόπουλος, 2015).



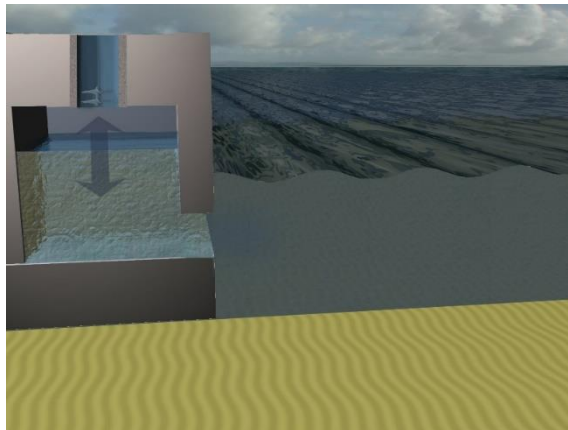
Εικόνα 12. Παλλόμενος μετατροπέας (aquaret.com)

- d) Παλλόμενη υδάτινη στήλη: Η στήλη αυτή είναι μία μερικώς υποβρύχια κοίλη κατασκευή, που έχει ένα άνοιγμα στη θάλασσα κάτω από την επιφάνεια των υδάτων ώστε να εγκλωβίζει αέρα πάνω από την υδάτινη στήλη (Εικόνα 13). Τα κύματα δημιουργούν ταλάντευση της στήλης, η οποία λειτουργεί ως έμβολο που συμπιέζει και αποσυμπιέχει τον αέρα. Ο αέρας διέρχεται μέσα από αεροστρόβιλο για την παραγωγή ενέργειας. Όταν σχεδιάζονται σωστά για την επικρατούσα κατάσταση της θάλασσας, οι στήλες ρυθμίζονται ανάλογα για το επικείμενο μήκος κύματος, ώστε να υπάρχει συντονισμός τους. Με αυτόν τον τρόπο, οι συσκευές αυτές μπορεί να είναι πολύ αποτελεσματικές και να παρουσιάζουν χαρακτηριστικά σημειακής απορρόφησης (Μανάλης, 2012).



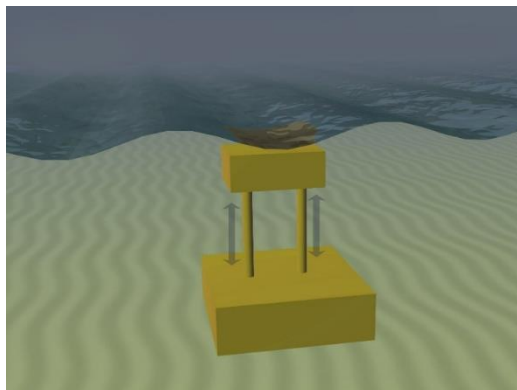
Εικόνα 13. Παλλόμενη υδάτινη στήλη (aquaret.com)

e) Συσκευή υπερακόντισης: Η συσκευή υπερακόντισης (Εικόνα 14), αποτελείται από ένα τοίχωμα πάνω στο οποίο σπάνε τα κύματα και το νερό συλλέγεται σε μία δεξαμενή αποθήκευσης. Τα προσκρούοντα κύματα δημιουργούν ένα ύψος πτώσης το οποίο ελευθερώνεται πίσω στη θάλασσα, μέσω συμβατικών στροβίλων χαμηλής πίεσης, οι οποίοι είναι εγκατεστημένοι στον πυθμένα της δεξαμενής. Μία συσκευή υπερακόντισης μπορεί να κάνει χρήση συλλεκτών για τη συγκέντρωση της κυματικής ενέργεια. Πρόκειται συνήθως για κατασκευές μεγάλες, λόγω του χώρου που απαιτείται για τη δεξαμενή, η οποία πρέπει να εξασφαλίζει μια ελάχιστη χωρητικότητα αποθήκευσης (Μανάλης, 2012).



Εικόνα 14. Συσκευή υπερακόντισης (aquaret.com)

f) Βυθιζόμενη συσκευή διαφορικής πίεσης: Πρόκειται για μία βυθιζόμενη συσκευή, η οποία συνήθως εγκαθίσταται κοντά στην ακτή και προσαρτάται στον πυθμένα (Εικόνα 15). Η κίνηση των κυμάτων προκαλεί την άνοδο και την πτώση της στάθμης της θάλασσας πάνω από τη συσκευή, πράγμα που δημιουργεί μια διαφορά πίεσης, η οποία αναγκάζει τη συσκευή να ανεβοκατεβαίνει με τα κύματα. Αν σχεδιαστεί σωστά για τη συγκεκριμένη κατάσταση της θάλασσας, αυτή η κατηγορία διατάξεων, διαθέτει αξιοσημείωτα χαρακτηριστικά σημειακής απορρόφησης (Μανάλης, 2012).



Εικόνα 15. Βυθιζόμενη συσκευή διαφορικής πίεσης (aquaret.com)

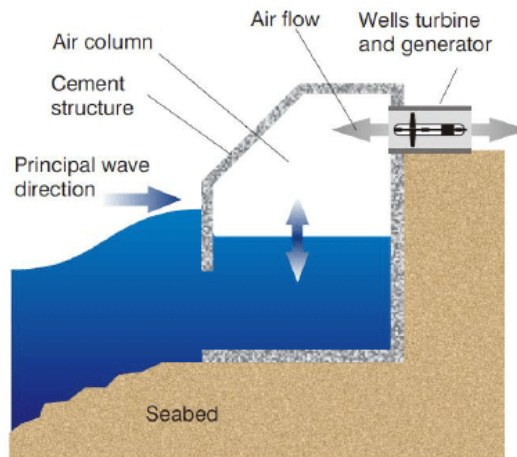
1.4.4. Κατηγοριοποίηση ανάλογα τη μέθοδο μετατροπής της κυματικής ενέργειας

Όλες οι συσκευές της κυματικής ενέργειας μετατρέπουν την οριζόντια και την κάθετη κίνηση των κυμάτων σε ηλεκτρισμό, αξιοποιώντας ή την ταλαντώμενη σχετική κίνηση σωμάτων ή τις διακυμάνσεις της πίεσης του αέρα ή τη συσσώρευση δυναμικής ενέργειας και δεσμεύουν την παραγόμενη ισχύ με τέσσερις, κυρίως, τρόπους (Καρακινάρης, 2017):

- Με υδροστρόβιλο
- Με αεριοστρόβιλο
- Με υδραυλικό κινητήρα
- Με γραμμική γεννήτρια

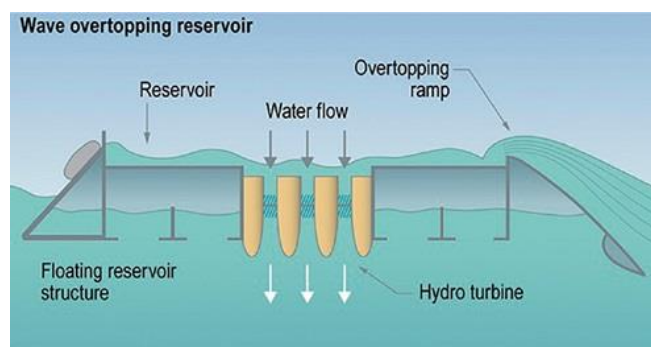
Ανάλογα τους διάφορους συνδυασμούς των βασικών αυτών αρχών, μπορούμε να διακρίνουμε τα παρακάτω είδη συσκευών:

- 1) Παλινδρομούσα στήλη νερού (Oscillating Water Column): Πρόκειται για μεγάλες διατάξεις που κατασκευάζονται κυρίως στη χερσαία ζώνη. Διαθέτουν ημιβυθισμένο θάλαμο αέρα, ο οποίος είναι ανοιχτός στο κάτω άκρο της θάλασσας (Εικόνα 16). Η παλινδρομική κίνηση της θαλάσσιας επιφάνειας προκαλεί συμπίεση και αποσυμπίεση της αέριας μάζας που υπάρχει μέσα στον θάλαμο, η οποία χρησιμοποιείται για την κίνηση του αεριοστρόβιλου. Ο αεριοστρόβιλος στρέφεται πάντα προς την ίδια κατεύθυνση, ανεξάρτητα από τη φορά κίνησης του αέρα, κινώντας τη γεννήτρια. Οι συσκευές αυτές, σχεδιάστηκαν αρχικά για να εγκαθίστανται επί της ακτής, σε κυματοθραύστες ή άλλες συσκευές, όμως στην πορεία δοκιμάστηκαν και σε ανοιχτή θάλασσα με κατάλληλη αγκύρωση.



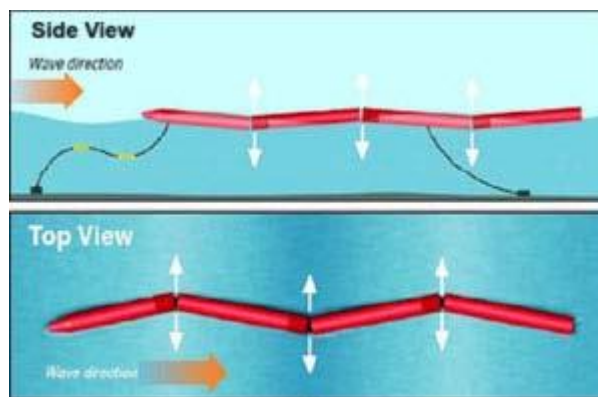
Εικόνα 16. Σχηματική επεξήγηση παλινδρομούσας στήλης νερού (Dzhonova et al., 2013)

- 2) Συσκευές υπερπήδησης του νερού (Overtopping device): Πλωτές ή σταθερές δεξαμενές, οι οποίες περισυλλέγουν το νερό των κυμάτων σε στάθμη υψηλότερη από τη μέση στάθμη της επιφάνειας της θάλασσας (Εικόνα 17). Η διαφορά της στάθμης χρησιμοποιείται για την κίνηση ενός ή περισσότερων υδροστροβίλων χαμηλής πίεσης και το νερό καταλήγει ξανά στη θάλασσα. Με λίγα λόγια, μια τέτοια συσκευή εκμεταλλεύεται τη δυναμική ενέργεια του νερού, όπως γίνεται και σε έναν υδροηλεκτρικό σταθμό. Υπάρχουν συσκευές που μπορούν να τοποθετηθούν και στην ακτογραμμή, όπως η συσκευή SSG, αλλά και συσκευές που μπορούν να τοποθετηθούν στην παράκτια και την υπεράκτια ζώνη, όπως η συσκευή Wave Dragon.



Εικόνα 17. Συσκευή υπερπήδησης (Goswami, 2015)

- 3) Συσκευές μακρόστενης μορφής – γραμμικοί αποσβεστήρες (Attenuator): Πλωτές, αρθρωτές κατασκευές που τοποθετούνται κάθετα προς τα επερχόμενα κύματα, παράλληλα με τη διεύθυνση διάδοσής τους (Εικόνα 18). Δεσμεύεται ενέργεια κατά τη διέλευση των κυμάτων, κατά μήκος όλου του συστήματος, μέσω υδραυλικών κινητήρων, οι οποίοι υπάρχουν στις αρθρώσεις. Θεωρητικά, αυτού του είδους οι τεχνολογίες, οδηγούν σε μεγαλύτερο ποσοστό απορρόφησης, συγκριτικά με τα συστήματα μικρού μήκους ή τα αξονοσυμμετρικά συστήματα. Ένα ακόμα θετικό που έχουν τέτοιου τύπου κατασκευές, είναι οι σχετικά μικρές καταπονήσεις που υφίστανται, λόγω της μικρής μετωπικής τους επιφάνειας. Κύριος εκπρόσωπος αυτής της κατηγορίας είναι η συσκευή Pelamis.



Εικόνα 18. Αρχή λειτουργίας attenuator (EPRI, 2007)

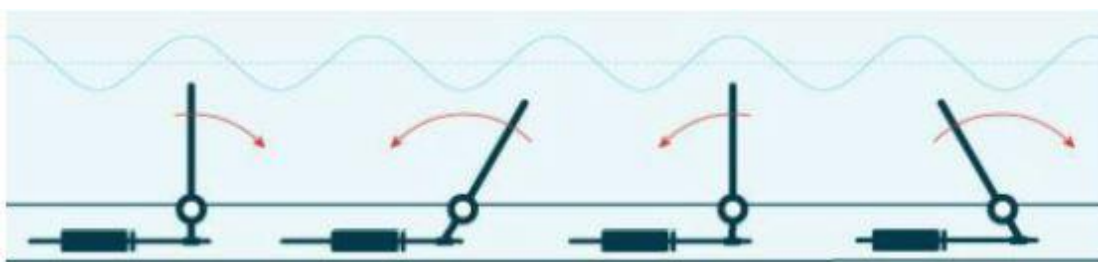
- 4) Βυθισμένες συσκευές διαφοράς πίεσης (Submerged pressure differential): Οι συσκευές αυτές, τυπικά, βρίσκονται κοντά στην ακτή και στηρίζονται στον βυθό. Χρησιμοποιούν τη διαφορά πίεσης των διαδοχικών κορυφών και κοίλων του κύματος, ώστε να προκαλέσουν την άνοδο και την κάθοδο ενός πλωτού σώματος. Αυτή η κίνηση, μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια μέσω μιας γραμμικής γεννήτριας. Η πιο γνωστή κατασκευή αυτού του τύπου, είναι το σύστημα Archimedes Wave Swing (Εικόνα 19), το οποίο είναι από το 2005 εγκατεστημένο ανοιχτά της Πορτογαλίας.



Εικόνα 19. Η συσκευή Archimedes Wave Swing (Valerio et al., 2007)

5) Συσκευές οριζόντιας κυματικής παλινδρόμησης (Oscillating Wave Surge Converter):

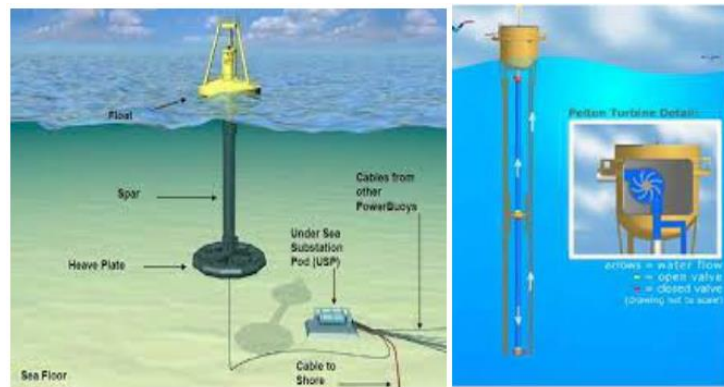
Συσκευές οι οποίες τις περισσότερες φορές στηρίζονται στον βυθό, αλλά ενδέχεται να είναι και ημιβυθισμένες. Μέσω ενός βραχίονα που παλινδρομεί σαν εκκρεμές, ο οποίος είναι στηριγμένος σε περιστρεφόμενη άτρακτο που είναι κάθετη τόσο στην κίνηση του νερού όσο και του βραχίονα, προσλαμβάνουν την ενέργεια από την οριζόντια κίνηση των στοιχείων του νερού (Εικόνα 20). Παράδειγμα τέτοιας συσκευής αποτελεί το σύστημα Oyster, το οποίο εδράζεται στον πυθμένα και χρησιμοποιεί μια διάταξη τύπου πτερυγίου. Μέσω της παλινδρομικής κίνησης του πτερυγίου, θέτεται σε κίνηση ένα έμβολο το οποίο αντλεί το νερό από τη θάλασσα στην ξηρά. Έπειτα, το υψηλής πίεσης νερό, χρησιμοποιείται για την παραγωγή ενέργειας μέσω ενός στροβίλου τύπου Pelton.



Εικόνα 20. Αρχή λειτουργίας συσκευή οριζόντιας κυματικής παλινδρόμησης (Καρακινάρης, 2017)

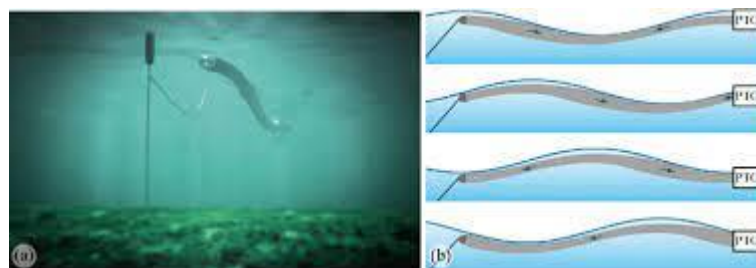
6) Σημειακοί απορροφητές ενέργειας (Point absorbers): Πρόκειται για αξονομετρικά, συνήθως, πλωτά συστήματα με διαστάσεις μικρότερες του ενός τρίτου του μέσου μήκους κύματος. Επειδή είναι αξονομετρικά συστήματα, σημαίνει ότι είναι λιγότερο ευπαθή στην κατεύθυνση προσέγγισης του μετώπου του κύματος και σε ακραίες

φορτίσεις. Μπορεί να είναι είτε πλωτές αγκυροβολημένες μονάδες, είτε να εδράζονται στον πυθμένα. Τις πιο πολλές φορές, εκμεταλλεύονται την παλινδρομική κίνηση του πλωτήρα κατά την κατακόρυφη διέγερσή του, μετατρέποντάς την μέσω μηχανικών ή υδραυλικών συστημάτων σε περιστροφική ή γραμμική κίνηση για τη λειτουργία της γεννήτριας. Το γεγονός ότι το μέγεθός τους είναι σχετικά μικρό, κάνει πιο εύκολη τη λειτουργία πολλαπλών συστημάτων υπό κοινό υποθαλάσσιο καλώδιο, για τη δημιουργία πάρκου επιθυμητής ονομαστικής ισχύος. Χαρακτηριστικά παραδείγματα αυτής της τεχνολογίας είναι οι συσκευές OPT Powerbuoy και Aquabuoy (Εικόνα 21).



Εικόνα 21. Οι συσκευές OPT Powerbuoy (αριστερά) και Aquabuoy (δεξιά) (sciencephoto.com)

- 7) Άλλες συσκευές: Σε αυτήν την κατηγορία υπάρχουν οι πιο σύγχρονες τεχνολογίες, οι οποίες δεν κατατάσσονται σε κάποια από τις παραπάνω κατηγορίες, λόγω αρκετά διαφορετικής σχεδιάσής τους, όπως είναι κάποια συστήματα περιστρεφόμενων μαζών ή κάποιες εύκαμπτες κατασκευές που αλλάζουν σχήμα και όγκος και αποτελούν μέρος του συστήματος μετατροπής της ενέργειας. Ένα παράδειγμα τέτοιας τεχνολογίας, είναι η τεχνολογία Anaconda (Εικόνα 22), η οποία είναι ουσιαστικά ένας μακρόστενος, εύκαμπτος σωλήνας που εκμεταλλεύεται τις παλινδρομικές διογκώσεις.



Εικόνα 22. Η τεχνολογία Anaconda (Heller et al., 2010)

1.5. Συσκευές μετατροπής κυματικής ενέργειας – Αναλυτική περιγραφή

1.5.1. LIMPET (Last Installed Marine Power Energy Transmitter)

Το Queen's University Belfast σε συνεργασία με τις εταιρίες Wavegan Ireland Ltd, Charles Brand Ltd, Kirk McClure Morton και I.S.T. Portugal πραγματοποίησαν το 1998 ένα επιτυχημένο έργο κατασκευής και δοκιμής μιας παράκτιας εγκατάστασης που παράγει ηλεκτρική ενέργεια από τα θαλάσσια κύματα. Η εν λόγω εγκατάσταση, γνωστή ως LIMPET (Εικόνα 23), εγκαταστάθηκε στη νήσο Islay στη Σκωτία το 2000 και από τότε παράγει ηλεκτρική ενέργεια που τροφοδοτεί το δίκτυο του Ηνωμένου Βασιλείου. Η εγκατάσταση χρησιμοποιεί μια εξελιγμένη τεχνολογία με τρεις στήλες νερού που ταλαντώνονται και μια στροβηλογεννήτρια Wells για τη μετατροπή της κινητικής ενέργειας των κυμάτων σε ηλεκτρική ενέργεια. Το LIMPET έχει αποδειχθεί αξιόπιστο και αποτελεσματικό, καθώς λειτουργεί αυτόνομα και ελέγχεται από ειδικό λογισμικό. Η εγκατάσταση αυτή έχει συνεισφέρει στην ενεργειακή ανεξαρτησία της περιοχής και αποτελεί παράδειγμα των δυνατοτήτων και της αξίας της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές, όπως τα θαλάσσια κύματα. (Μανάλης, 2012).



Εικόνα 23. Η τεχνολογία LIMPET στη νήσο Islay
(sciencephoto.com)

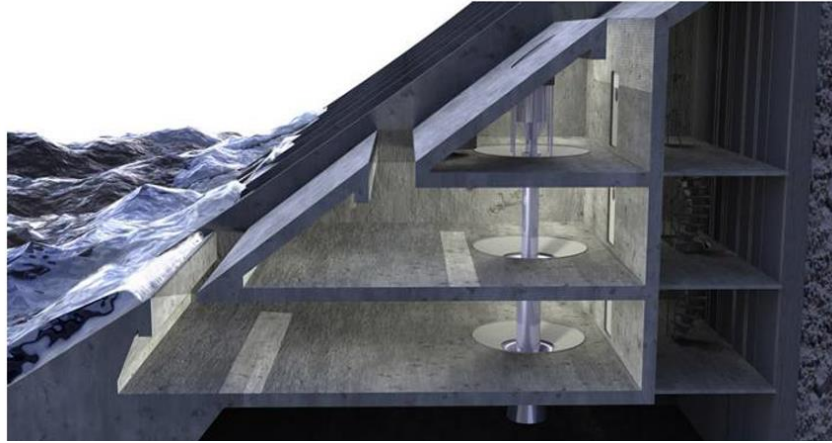
1.5.2. WECA (Wave Energy Conversion Activator)

Το WECA (Wave Energy Conversion Apparatus) είναι ένας μετατροπέας θαλάσσιων κυμάτων που κατασκευάζεται από την ελληνική εταιρία DAEDALUS Informatics Ltd. Σχεδιάστηκε για να απορροφά την ενέργεια των θαλάσσιων κυμάτων και να τη μετατρέπει σε ηλεκτρική ή άλλου είδους ενέργεια. Ο μετατροπέας αυτός χρησιμοποιεί έναν ανεστραμμένο κωνικό αεροθάλαμο συμπίεσης για να αξιοποιήσει την ορμή των προσπιπτόντων κυμάτων. Η λειτουργία του παραπέμπει στον θερμοδυναμικό κύκλο ενός αεροσυμπιεστή. Ο μετατροπέας WECA μπορεί να χρησιμοποιηθεί τόσο σε παράκτιες

εγκαταστάσεις όσο και σε εφαρμογές ανοιχτής θάλασσας. Η πλήρους κλίμακας έκδοση του WECA κατασκευάζεται από χάλυβα ή άλλα υλικά με παρόμοια χαρακτηριστικά, έτσι ώστε να μπορεί να ενσωματωθεί σε κυματοθραύστες ή άλλες παράκτιες κατασκευές. Το πειραματικό μοντέλο του WECA έχει διαστάσεις 7 μέτρα σε ύψος και 6 μέτρα σε πλάτος. Ο μετατροπέας σχεδιάστηκε έτσι ώστε να απορροφά το μεγαλύτερο μέρος της ενέργειας των θαλάσσιων κυμάτων και να την μετατρέπει σε συμπιεσμένο αέρα. Ο συμπιεσμένος αέρας μπορεί στη συνέχεια να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ή άλλων μορφών ενέργειας. Υπολογιστικές αναλύσεις και προσομοιώσεις έχουν πραγματοποιηθεί για τον υπολογισμό και τον βελτιστοποίηση του σχεδιασμού του μετατροπέα. Αναμένεται ότι το πρωτότυπο μοντέλο WECA θα παράγει περίπου 20 kW ισχύ.

1.5.3. Τεχνολογίες Υπέρβασης/Υπερύψωσης (SSG)

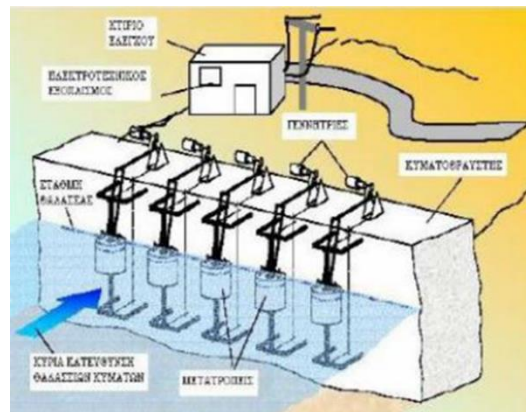
Το SSG (Seawave Slot-Cone Generator) είναι μία συσκευή μετατροπής κυματικής ενέργειας που αναπτύχθηκε από τη νορβηγική εταιρία WAVEnergy AS το 2004. Αυτή η συσκευή (Εικόνα 24) βασίζεται στην αρχή της υπέρβασης των θαλάσσιων κυμάτων και χρησιμοποιεί ένα σύνολο τριών δεξαμενών τοποθετημένων η μία πάνω στην άλλη για να αποθηκεύει την ενέργεια των κυμάτων. Η συσκευή αξιοποιεί το νερό που παγιδεύεται μέσα στις δεξαμενές και το οδηγεί μέσα από έναν πολυτμηματικό στρόβιλο προκειμένου να παράγει ηλεκτρική ενέργεια. Η χρήση πολλαπλών δεξαμενών επιτρέπει μια υψηλότερη υδραυλική απόδοση του συστήματος συγκριτικά με μονάδες που χρησιμοποιούν μόνο μία δεξαμενή. Το SSG κατασκευάζεται από οπλισμένο σκυρόδεμα και το κινούμενο μέρος του συστήματος είναι ο άξονας του στρόβιλου και οι πύλες που ελέγχουν τη ροή του νερού. Η συσκευή μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή υδρογόνου μέσω ηλεκτρόλυσης και για την παραγωγή καθαρού πόσιμου νερού μέσω όσμωσης. Έχει ευελιξία στις εφαρμογές του, καθώς μπορεί να εγκατασταθεί ως πλωτή ή σταθερή εγκατάσταση σε ανοικτή θάλασσα ή ως εγκατάσταση ακτής ενσωματωμένη σε κυματοθραύστη. Αυτό το χαρακτηριστικό του επιτρέπει να αξιοποιεί τα οφέλη της κυματοθραυστικής κατασκευής και να παρέχει επιπλέον οικονομικά οφέλη μέσω της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, φρέσκου πόσιμου νερού ή υδρογόνου. Η διαμόρφωση και η χωρητικότητα των δεξαμενών μπορούν να συμβάλουν στην εξομάλυνση των κυμάτων και στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας για το δίκτυο.



Εικόνα 24. Η κατασκευή SSG (Vicinanza et al., 2012)

1.5.4. LabBuoy

Το μοντέλο προσομοίωσης της συσκευής LabBuoy (Εικόνα 25) χρησιμοποιείται για να εξετάσει και να βελτιστοποιήσει τον σχεδιασμό και τη λειτουργία της. Το μοντέλο αποτελείται από δύο μέρη: ένα υδροδυναμικό-κινηματικό μέρος που περιγράφει την κίνηση των μετατροπέων και τις αλληλεπιδράσεις τους με το περιβάλλον, και ένα ηλεκτρικό μέρος που αναπαριστά τη μετατροπή της κυματικής ενέργειας σε ηλεκτρική ενέργεια. Επιπλέον, κατασκευάστηκε ένα πειραματικό σύστημα για την επαλήθευση και τη βελτίωση του μοντέλου. Μέσω αυτού του μοντέλου, είναι δυνατό να γίνουν αξιολογήσεις και προσομοιώσεις για να βελτιστοποιηθεί η απόδοση και η αποδοτικότητα της συσκευής LabBuoy.



Εικόνα 25. Η τεχνολογία Labuoy (Καρακινάρης, 2017)

1.5.5. SDE

Το SDE είναι ένας παράκτιος μετατροπέας της ενέργειας των θαλάσσιων κυμάτων, τον οποίο εφήυρε από τον Shmuel Onadia, ιδρυτή της εταιρίας S.D.E. Energy Ltd στο Ισραήλ (Εικόνα 26). Η μέθοδος αυτή για την εκμετάλλευση των θαλάσσιων κυμάτων για παραγωγή

ενέργειας, έχει κατοχυρωθεί με δίπλωμα ευρεσιτεχνίας. Η τεχνολογία του SDE, χρησιμοποιεί την κίνηση των θαλάσσιων κυμάτων για να παράγει υδραυλική πίεση, η οποία με τη σειρά της μετατρέπεται σε ηλεκτρισμό. Το σύστημα εκμεταλλεύεται την ταχύτητα, το ύψος, το βάθος, την ανύψωση και την πτώση του κύματος, όπως επίσης και τη ροή κάτω από το ερχόμενο κύμα, παράγοντας έτσι ενέργεια. Το SDE έχει κατασκευαστεί και έχει δοκιμαστεί σε οκτώ μονάδες συνολικά. Ένα μοντέλο πλήρους κλίμας που κατασκευάστηκε και δοκιμάστηκε στο Ισραήλ, παράγαγε 40 kW/h για σχεδόν ένα χρόνο. Η συγκεκριμένη μέθοδος μετατροπής της ενέργειας των κυμάτων, έχει λάβει οικονομική υποστήριξη ύψους 1.360.000€ από το Υπουργείο Βιομηχανίας και Εμπορίου. Επίσης, η κυβέρνηση του Ισραήλ έχει παραχωρήσει στην εταιρία S.D.E. Energy Ltd το δικαίωμα της παραγωγής και την πώλησης 50 MW ηλεκτρικής ισχύος για 20 χρόνια, χωρίς χρηματική προσφορά. Η συσκευή SDE παράγει καθαρή ενέργεια, χωρίς επιβλαβείς επιπτώσεις για το περιβάλλον και η εταιρία εγγυάται τις χαμηλότερες τιμές της αγοράς, σε σχέση με τα ορυκτά καύσιμα, το φυσικό αέριο, την ηλιακή και την αιολική ενέργεια, χαμηλό κόστος κατασκευής και ελάχιστο κόστος λειτουργίας.



Εικόνα 26. Ο μετατροπέας SDE (Καρακινάρης, 2017)

1.5.6. Mighty Whale

Από το 1987, η ομάδα κυματικής ενέργειας του JAMSTEC (Japan Marine Science and Technology Center) στην Ιαπωνία, ασχολείται με την ανάπτυξη μιας πλωτής συσκευής που μετατρέπει την ενέργεια των κυμάτων της θάλασσας σε μηχανική. Η συσκευή αυτή ονομάζεται Mighty Whale (Εικόνα 27). Οι διαστάσεις του πρωτοτύπου είναι 50 m μήκος, 30 m πλάτος και 12 m ύψος. Η συνολική ονομαστική ισχύς, άγγιξε τα 110 kW. Στην τοποθεσία της δοκιμής του πρωτοτύπου, το βάθος των υδάτων είναι 40 m και η συσκευή προσδένεται στον βυθό, προς την κατεύθυνση των επικρατούντων κυμάτων. Η λειτουργία του, βασίζεται στην ταλαντευόμενη στήλη ύδατος της θάλασσας και έχει τρεις θαλάμους αέρα οι οποίοι

μετατρέπουν την κυματική ενέργεια σε πίεση αέρα. Μέσω της κίνησης των κυμάτων, προκαλείται άνοδος και κάθοδος της στάθμης του νερού στο εσωτερικό κάθε θαλάμου, δημιουργώντας έτσι ροή αέρα διπλής κατεύθυνσης που κινεί έναν αεροστρόβιλο. Και οι τρεις στρόβιλοι πάνω στη συσκευή Mighty Whale είναι παλινδρομικοί και κάθε ένας από αυτούς έχει από δύο περιστροφικά τμήματα στη σειρά. Οι στρόβιλοι κινούν τρεις επαγωγικές γεννήτριες οι οποίες παράγουν τριφασική AC τάση 200 Volts.



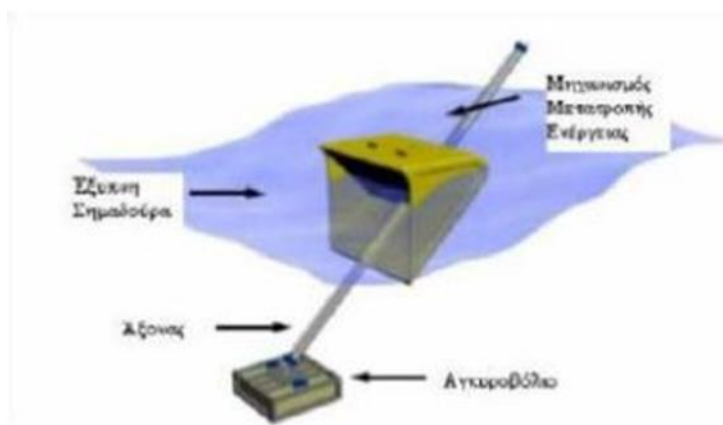
Εικόνα 27. Η τεχνολογία Mighty Whale (jamstec.go.jp)

1.5.7. WET EnGen™

Η канаδέζικη εταιρία Wave Energy Technologies Inc, δημιουργήθηκε το 2004 με σκοπό την ανάπτυξη, την κατοχύρωση, τη δοκιμή και την εμπορευματοποίηση του μετατροπέα WET EnGen™ (Εικόνα 28).

Το βασικό χαρακτηριστικό αυτού του μετατροπέα είναι το Smart Float™, δηλαδή μια «έξυπνη σημαδούρα» που κινείται κατά μήκος ενός άκαμπτου άξονα με κλίση 45°. Ο άξονας είναι δεμένος σε ένα μόνο σημείο επαφής με τη στερεωμένη στον πυθμένα βάση, έτσι ώστε να επιτρέπει στην συσκευή να περιστρέφεται ελεύθερα και να μπορεί να αυτό-προσδιορίζεται ανάλογα με την κατεύθυνση των κυμάτων. Το WET EnGen™ παράγει συνεχώς ηλεκτρική ενέργεια και κατά την ανύψωση και κατά την πτώση των κυμάτων. Συγκριτικά με άλλες συσκευές για εκμετάλλευση της κυματικής ενέργειας που είναι υπό ανάπτυξη, οι μέχρι σήμερα δοκιμές δείχνουν πως η συσκευή WET EnGen™ έχει σημαντικά μεγαλύτερη ενεργειακή απόδοση μετατροπής. Έχει, επίσης, χαμηλότερο κόστος λειτουργίας και συντήρησης και είναι οικονομικά αποδοτικό ακόμα και σε σχετικά ήπια κυματικά κλίματα, με αποδόσεις έως και 15 kW/m. Έχει χαμηλές απαιτήσεις συντήρησης, λόγω της

απλής κατασκευής του, η οποία περιλαμβάνει ελάχιστα κινούμενα τμήματα, ενώ η εγκατάσταση και η απόσυρσή του από τη θάλασσα είναι ταχύτερη και εύκολη. Ο σχεδιασμός του είναι απλός και μοναδικός και έχει αποδείξει, τόσο στο εργαστήριο όσο και σε δοκιμές στην ανοιχτή θάλασσα, ότι μπορεί να παράγει ωφέλιμη ενέργεια από τα θαλάσσια κύματα, με κόστος που ήδη είναι συγκρίσιμο με άλλες πηγές ενέργειας όπως είναι π.χ. ο άνθρακας ή η αιολική ενέργεια, ιδιαίτερα σε απομονωμένες περιοχές εκτός δικτύου όπου η ηλεκτρική ενέργεια παράγεται αποκλειστικά από ντίζελ ή άλλα υγρά καύσιμα.



Εικόνα 28. Ο μετατροπέας WET EnGen (Καρακινάρης, 2017)

1.5.8. CES (Combined Energy System)

Η αμερικανική εταιρία Ocean Motion International (OMI) ανέπτυξε μια τεχνολογία η οποία δεν εξαρτάται από εξωτερικές πηγές καυσίμου για την χαμηλού κόστους παραγωγή νερού, ηλεκτρισμού και αέριου υδρογόνου, χωρίς επιβλαβείς εκπομπές στο περιβάλλον, το Συνδυασμένο Σύστημα Ενέργειας (Combined Energy System – CES). Το CES αποτελείται από 4 βασικά τμήματα: την αντλία κυμάτων θαλασσινού νερού, την υδροστροβιλική ηλεκτρική γεννήτρια, τη μονάδα φιλτραρίσματος αντίστροφης όσμωσης και τη μονάδα παραγωγής υδρογόνου μέσω ηλεκτρόλυσης. Η συσκευή CES έχει σχεδιαστεί για να λειτουργεί σε μία μεγάλη πλατφόρμα που επιπλέει στην επιφάνεια της θάλασσα, η οποία είναι ουσιαστικά τροποποιημένη τυπική διατηρητική μονάδα ανοιχτή θαλάσσης.

Η αντλία των κυμάτων, περιγράφεται τεχνικά ως μία συσκευή μετατροπής της ενέργειας των κυμάτων τύπου μετατόπισης μάζας. Η πατενταρισμένη αντλία θαλασσινού νερού Refa, που αποτελεί το βασικότερο κομμάτι του CES, είναι μια καινοτόμα τεχνολογία που χρησιμοποιεί πολύ λίγα και απλά κινούμενα τμήματα, ώστε να έχει ελάχιστες απαιτήσεις συντήρησης και μειωμένη φθορά. Αυτή η επαναστατική αντλία θετικής μετατόπισης, είναι σχεδιασμένη για να παράγει πολύ μεγάλους όγκους νερού υψηλής πίεσης με το να κινείται

από ένα αναπόσπαστο πλωτό σώμα, όπως είναι μία σημαδούρα, το οποίο ταλαντώνεται κατακόρυφα με τη φυσική κίνηση των θαλάσσιων κυμάτων.

1.5.9. Trotman Unit

Το Trotman Unit αποτελεί μια επαναστατική συσκευή που εκμεταλλεύεται την ενέργεια των κυμάτων της θάλασσας για να παράγει ηλεκτρική ενέργεια. Αποτελείται από ένα σύστημα αντλιών και δεξαμενών αποθήκευσης νερού που λειτουργούν με ακρίβεια και αυτοματισμό. Οι αντλίες αντλούν νερό από τον ωκεανό κατά τη διάρκεια των κυμάτων και το απελευθερώνουν με μεγάλη πίεση σε προκαθορισμένο ύψος, προκαλώντας την κίνηση των τουρμπίνων που παράγουν ηλεκτρική ενέργεια. Το Trotman Unit μπορεί να λειτουργήσει αυτόνομα και αποτελεί μια βιώσιμη πηγή ενέργειας, καθώς εκμεταλλεύεται μια ανανεώσιμη πηγή - τα κύματα. Επίσης, μπορεί να συνδυαστεί με άλλες πηγές ενέργειας, όπως η ηλιακή ή η αιολική ενέργεια, για να παρέχει σταθερή παροχή ηλεκτρικής ενέργειας. Η τεχνολογία αυτή έχει τη δυνατότητα να παρέχει καθαρή, αειφόρο και αξιόπιστη ενέργεια, ενώ παράλληλα συμβάλλει στη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου που σχετίζονται με την παραγωγή ενέργειας. (Μανάλης, 2012).

1.5.10. The Waveberg

Το Waveberg είναι ένα αρθρωτό σύστημα συνδεδεμένων πλωτών σωμάτων τα οποία λυγίζουν καθώς τα κύματα περνούν από κάτω τους, χρησιμοποιώντας αυτή την κίνηση κάμψης που υφίστανται, για να αντλούν θαλασσινό νερό (Εικόνα 29). Στη συνέχεια, το νερό μεταφέρεται υπό υψηλή πίεση από το Waveberg στη στεριά μέσω ενός συστήματος σωληνώσεων, όπου μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Τα βασικά υλικά της κατασκευής του Waveberg είναι πλαστικό και fiberglass. Οι λόγοι επιλογής αυτών των υλικών είναι η αντοχή τους, η αντιδιαβρωτική τους δράση, το χαμηλό τους κόστος και η ευκολία κατασκευής τους.

Μια τυπική συσκευή Waveberg μπορεί και παράγει περισσότερα από 100 kW ηλεκτρικής ενέργειας υπό φυσιολογικές συνθήκες, ενώ η έξοδος αυτή διπλασιάζεται κατά τη διάρκεια ακραίων καιρικών φαινομένων. Το μήκος της συσκευής φτάνει τα 50 m και το κόστος κατασκευής της σε εργοστάσιο είναι περίπου 70.000€. Η συσκευή Waveberg λειτουργεί 24

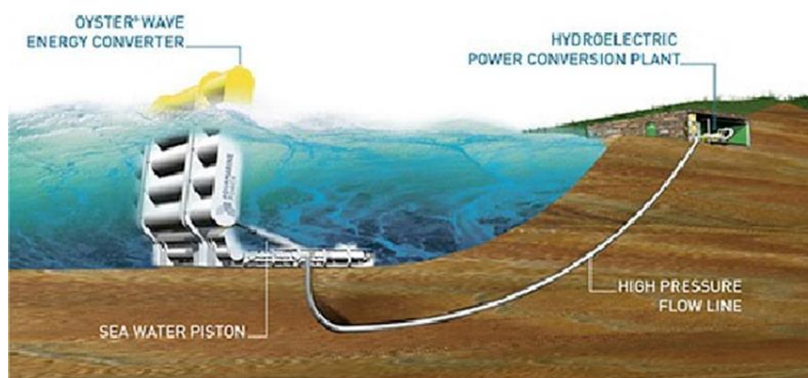
ώρες την ημέρα, κάθε μέρα και παράγει ένα ενεργειακό ισοδύναμο δύο βαρελιών πετρελαίου την ημέρα (Μανάλης, 2012).



Εικόνα 29. Εφαρμογή της συσκευής Waveberg στις Η.Π.Α. (Huckerby, 2012)

1.5.11. Oyster

Το Oyster (Εικόνα 30) είναι μια συσκευή που σχεδιάστηκε από την Aquamarine Power για τη μετατροπή κυματικής ενέργειας σε ηλεκτρική ενέργεια. Τοποθετείται στον πυθμένα της θάλασσας κοντά στην ακτή και αλληλεπιδρά αποδοτικά με τα κύματα σε ρηχά νερά. Κάθε μονάδα Oyster μπορεί να παράγει μεταξύ 300 και 600 kW ηλεκτρικής ενέργειας, ανάλογα με την τοποθεσία και τη διαμόρφωση. Μια "φάρμα κυμάτων" με 10 μονάδες Oyster μπορεί να παράγει έως και 6 MW. Η συσκευή αποτελείται από ένα πτερύγιο ταλάντωσης που εξάγει την ενέργεια των κυμάτων και τη μετατρέπει σε υδραυλική ισχύ, η οποία μεταφέρεται στην ακτή για μετατροπή σε ηλεκτρική ενέργεια. Το Oyster είναι σχεδιασμένο για να λειτουργεί ακόμα και σε ακραίες καιρικές συνθήκες και παράγει ηλεκτρική ενέργεια ακόμα και σε μικρές και ήπιες θάλασσες. (Μανάλης, 2012)



Εικόνα 30. Το σύστημα Oyster (Renzi et al., 2012)

1.5.12. WaveRoller

Το WaveRoller, που είναι σχεδιασμένο από τη φινλανδική εταιρία AW-Energy Oy, συλλέγει την κυματική ενέργεια χρησιμοποιώντας ένα ειδικά σχεδιασμένο κινούμενο πτερύγιο που είναι εγκατεστημένο στον πυθμένα της θάλασσας (Εικόνα 31). Η ενέργεια που συλλέγει, μετατρέπεται σε ηλεκτρισμό με τη χρήση παραδοσιακών τεχνολογιών.

Η μπρος – πίσω κίνηση των κυμάτων της θάλασσας στον βυθό, κινούν το προαναφερθέν πτερύγιο και η κινητική ενέργεια που παράγεται συλλέγεται από μία αντλία εμβόλου. Η ενέργεια αυτή μπορεί να μετατρέπεται σε ηλεκτρισμό με τη βοήθεια ενός κλειστού υδραυλικού συστήματος, συνδυαστικά με ένα σύστημα κινητήρα – γεννήτριας.

Όσον αφορά την τοποθεσία εγκατάστασης, ο σχεδιασμός της συσκευής WaveRoller είναι κατάλληλος για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε ένα ευρύτερο φάσμα κυματικών συνθηκών, σε σύγκριση με άλλες υπάρχουσες τεχνολογίες μετατροπής της κυματικής ενέργειας. Το WaveRoller λειτουργεί πολύ καλά σε τοποθεσίες όπου οι περίοδοι των κυμάτων είναι μεγάλες και το φούσκωμα της θάλασσας έντονο.



Εικόνα 31. Ο μετατροπέας WaveRoller
(sciencephoto.com)

1.5.13. bioWAVE

Το bioWAVE είναι ένας μετατροπέας κυματικής ενέργειας που αναπτύχθηκε από την αυστραλιανή εταιρία BioPower Systems Pty Ltd (Εικόνα 32). Εμπνευσμένο από λειτουργίες θαλάσσιων φυτών, η συσκευή προσαρμόζεται στις συνθήκες του ωκεανού και κινείται με τις δυνάμεις των κυμάτων για να μετατρέψει την ενέργειά τους σε ηλεκτρισμό. Το bioWAVE απορροφά τη μέγιστη ενέργεια από το πεδίο ροής της κυματικής ταλάντωσης μέσω της υδροδυναμικής αλληλεπίδρασης των πτερυγίων του. Χρησιμοποιεί μία ειδική ηλεκτρική

γεννήτρια που ονομάζεται O-DRIVE για να μετατρέψει τις ταλαντώσεις σε ηλεκτρική ενέργεια. Η γεννήτρια είναι αρθρωτή και μπορεί να αποσυνδεθεί για επισκευές. Το bioWAVE μπορεί επίσης να αντιμετωπίσει ακραίες καιρικές συνθήκες αποσυνδέοντας τη γεννήτρια και τοποθετώντας τον εαυτό του σε ασφαλή θέση στον πυθμένα της θάλασσας.



Εικόνα 32. Το σύστημα bioWAVE (inhabitat.com)

1.5.14. MAWEC (Multi Absorbing Wave Energy Converter)

Η εταιρία LEANCON Wave Energy, ανέπτυξε έναν Πολλαπλά Απορροφητικό Μετατροπέα Ενέργειας Κυμάτων, ο οποίος διαφοροποιείται από άλλους μετατροπείς, αφού χρησιμοποιεί απορροφητικές δυνάμεις για να συγκρατηθεί στη θέση του. Η συσκευή MAWEC είναι ένας μετατροπέας ανοιχτής θαλάσσης που χρησιμοποιεί είτε έναν ειδικά σχεδιασμένο στρόβιλο μετατόπισης ως Power Take-Off (PTO) είτε έναν παραδοσιακό στρόβιλο. Η βασική αρχή λειτουργίας αυτού του μετατροπέα, σχετίζεται με την ταυτόχρονη χρήση πίεσης και απορρόφησης που έχει ως επιθυμητό αποτέλεσμα η κάθετη δύναμη στον μετατροπέα να είναι μηδενική όταν ο μετατροπέας εκτείνεται πάνω από περισσότερα από ένα μήκος κύματος (Μανάλης, 2012).

1.5.15. Oceanlinx

Η συσκευή Oceanlinx της Αυστραλιανής εταιρίας Oceanlinx Limited, έχει σχεδιαστεί για να αποσπά την ενέργεια των κυμάτων της θάλασσας και να την μετατρέπει ή σε ηλεκτρισμό ή να τη χρησιμοποιεί για να παράγει αφαλατωμένο γλυκό νερό από το θαλασσινό (Εικόνα 33). Καθώς περνάει η ενέργεια από τη συσκευή Oceanlinx, το νερό μέσα στο OWC, το οποίο είναι ένας θάλαμος, κωνοειδές σχήμα, ανοιχτός κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας, ανεβοκατεβαίνει συμπιέζοντας και μετατοπίζοντας τον αέρα μέσα στον θάλαμο, οδηγώντας τον μέσα από έναν στρόβιλο που στεγάζεται στο στενότερο και ψηλότερο σημείο του

θαλάμου. Λόγω του σχήματός του, ο θάλαμος OWC στενεύει και ο αέρας επιταχύνεται στη μέγιστη ταχύτητά του καθώς διέρχεται μέσα από τον στρόβιλο, επιτρέποντας τη μέγιστη απόσπαση της ενέργειας από τη θάλασσα (Μανάλης, 2012).



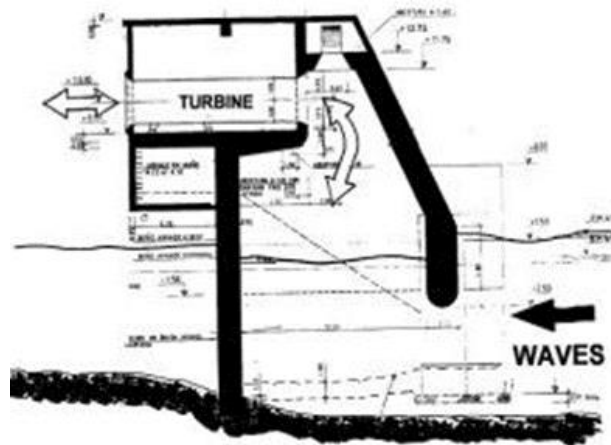
Εικόνα 33. Η συσκευή Oceanlinx (seao2.com)

1.5.16. Sperboy

Η συσκευή Sperboy είναι ένας πλωτός μετατροπέας κυματικής ενέργειας που βασίζεται στην αρχή της ταλαντευόμενης στήλης ύδατος. Ο αέρας που μετατοπίζεται από την ταλάντωση της στήλης του νερού διέρχεται από στροβιλογεννήτριες. Σχεδιάστηκε για να τοποθετείται σε μεγάλες σειρές σε απόσταση που κυμαίνεται από 13 έως 19 km από την ακτή και για να παράγει ηλεκτρική ενέργεια σε μεγάλη κλίμακα με ανταγωνιστικό κόστος. Λόγω των ελάχιστων κινούμενων τμημάτων του που βρίσκονται πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας, οι απαιτήσεις συντήρησης ελαχιστοποιούνται και η ηλεκτρική ενέργεια παράγεται με ανταγωνιστικά υψηλό βαθμό απόδοσης.

1.5.17. European Pilot Plant

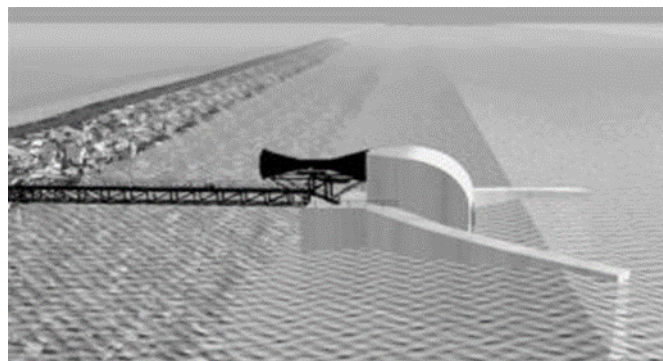
Η διάταξη European Pilot Plant στο νησί Pico στις Αζόρες της Πορτογαλίας, είναι, ένα σύστημα ταλαντευόμενης στήλης νερού 400 kW, το οποίο αναπτύχθηκε από μία ευρωπαϊκή ομάδα που συντονίζεται από το Instituto Superior Tecnico της Πορτογαλίας. Η μονάδα, που σχεδιάστηκε (Εικόνα 34) ως πλήρους κλίμακας εγκατάσταση δοκιμών, είναι πλήρως αυτοματοποιημένη και καλύπτει ένα μεγάλο μέρος της ενεργειακής ζήτησης του νησιού (Clement et al., 2002).



Εικόνα 34. Η συσκευή European Pilot Plant (Clement et al., 2002)

1.5.18. Energetech

Η συσκευή Energetech (Εικόνα 35) σχεδιάστηκε από την Energetech στην Αυστραλία. Πρόκειται για μια συσκευή ταλαντευόμενης στήλης νερού που χρησιμοποιεί έναν καινοτόμο στρόβιλο με μεταβαλλόμενη γεωμετρία και έναν παραβολικό τοίχο στο πίσω μέρος της, ο οποίος κατευθύνει την κυματική ενέργεια στον συλλέκτη. Το σύστημα έχει εφαρμοστεί στο λιμάνι Kembla, που βρίσκεται 80 χιλιόμετρα νότια του Σίδνεϊ, και έχει μια ισχύ εξόδου 500 kW. (Clement et al., 2002).

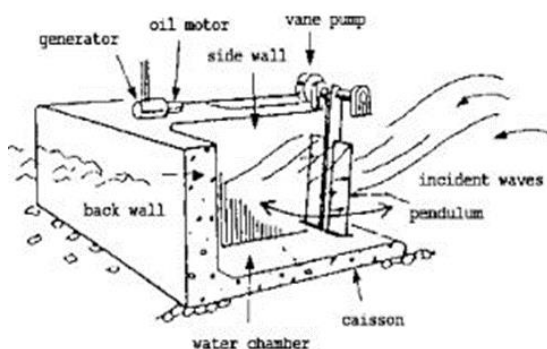


Εικόνα 35. Η συσκευή Energetech (Clement et al., 2002)

1.5.19. Pendulor

Η διάταξη Pendulor (Εικόνα 36) ανήκει στην κατηγορία των συσκευών εκμετάλλευσης κυμάτων και αποτελείται από ένα ορθογώνιο κουτί που είναι ανοιχτό προς τη θάλασσα από τη μία πλευρά. Συγκεκριμένα, υπάρχει ένα εκκρεμές πτερύγιο που στηρίζεται με έναν εύκαμπτο σύνδεσμο στο πάνω μέρος της ανοιχτής πλευράς. Το εκκρεμές πτερύγιο

αναγκάζεται να ταλαντώνεται λόγω των κυμάτων, προκαλώντας την κίνηση μιας υδραυλικής αντλίας και μιας γεννήτριας που παράγει ηλεκτρική ενέργεια. (Ζαφειρίου 2012).



Εικόνα 36. Σχηματική απεικόνιση της συσκευής Pendulor (Clement et al., 2002)

1.5.20. TAPCHAN

Η διάταξη TAPCHAN είναι μια συσκευή υπερχειλίσσης που χρησιμοποιείται στην ακτογραμμή. Αυτή η συσκευή σχεδιάστηκε από την εταιρία Norware AS και αποτελείται από ένα κανάλι με σταδιακή μείωση του πλάτους και ύψους που φτάνει το επίπεδο της πλήρωσης μιας τυπικής δεξαμενής, με ύψος περίπου 3-7 μέτρα. Τα κύματα ενισχύονται καθώς εισέρχονται στο κανάλι μέχρι να προκαλέσουν υπερχειλίσση του νερού στη δεξαμενή. Το TAPCHAN κατασκευάστηκε για πρώτη φορά το 1985 στο Toftesfallen της Νορβηγίας, αλλά υπέστη σοβαρή ζημιά το 1991. (Clement et al., 2002).

1.5.21. OSPREY

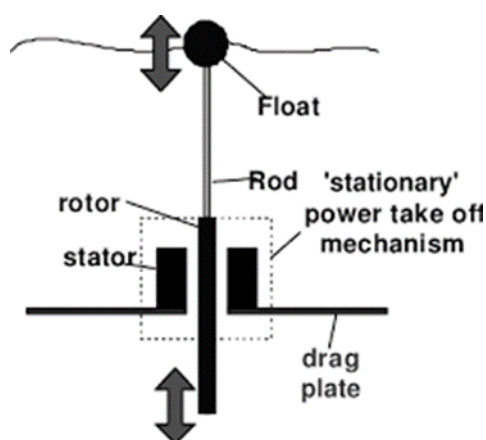
Η κατασκευαστική διάταξη OSPREY αναπτύχθηκε από την εταιρία Wavegen Ltd στο Ηνωμένο Βασίλειο και αποτελεί μια πρωτότυπη συσκευή για χρήση σε μέτριο βάθος νερού έως 20 μέτρα. Πρόκειται για μια συσκευή τύπου ταλαντευόμενης στήλης νερού που σχεδιάστηκε για να εγκαθίσταται στον βυθό της θάλασσας. Η πρώτη κατασκευή OSPREY I ήταν φτιαγμένη από χάλυβα και υπέστη δομικές ατέλειες κατά τη διάρκεια της εγκατάστασής της στο Doune της Σκωτίας το 1996. Από αυτήν την πρώτη δοκιμή αποκτήθηκε πολύτιμη εμπειρία η οποία βοήθησε στην ανάπτυξη ενός νέου σχεδίου, του OSPREY II. (Εικόνα 37). Στη δεύτερη συσκευή OSPREY II, το μεγαλύτερο μέρος της κατασκευής είναι από σκυρόδεμα. Αυτή η συσκευή παράγει ισχύ 2 MW σε βάθος 15 μέτρων και σε απόσταση 1 χιλιόμετρου από την ακτή. (Clement et al., 2002).



Εικόνα 37. Η συσκευή OSPREY II (sciencephoto.com)

1.5.22. Archimedes Wave Swing (AWS)

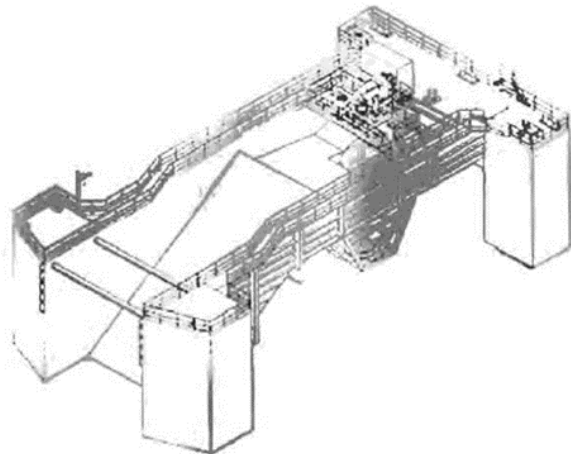
Το σύστημα Archimedes Wave Swing (Εικόνα 38) αναπτύχθηκε στην Ολλανδία από την εταιρία Technology BV. Αποτελείται από μια κοίλη, υπό πίεση κατασκευή με ένα επάνω μέρος που σχεδιάστηκε για να παλλόμενες κινήσεις με την περιοδική αλλαγή της υδροστατικής πίεσης κάτω από ένα κύμα. Το σύστημα Archimedes Wave Swing (AWS) παράγει περίπου 12 GWh ενέργειας ετησίως και το κόστος ανά kWh υπολογίζεται περίπου στα 0,07€. Σε σύγκριση με άλλες τεχνολογίες κυματικής ενέργειας, το AWS έχει υψηλή συγκεντρωμένη ισχύ εξόδου περίπου 5 MW, προσφέρει μεγάλες δυνατότητες τοποθέτησης και είναι λιγότερο ευάλωτο σε καιρικές συνθήκες. Αυτές οι χαρακτηριστικές καθιστούν το σύστημα AWS μια ελκυστική επιλογή για την αξιοποίηση της κυματικής ενέργειας και την παραγωγή βιώσιμης ηλεκτρικής ενέργειας. (Ζαφειρίου, 2012).



Εικόνα 38. Σχηματική απεικόνιση του συστήματος Archimedes Wave Swing (Baker et al., 2001)

1.5.23. Floating Wave Power Vessel

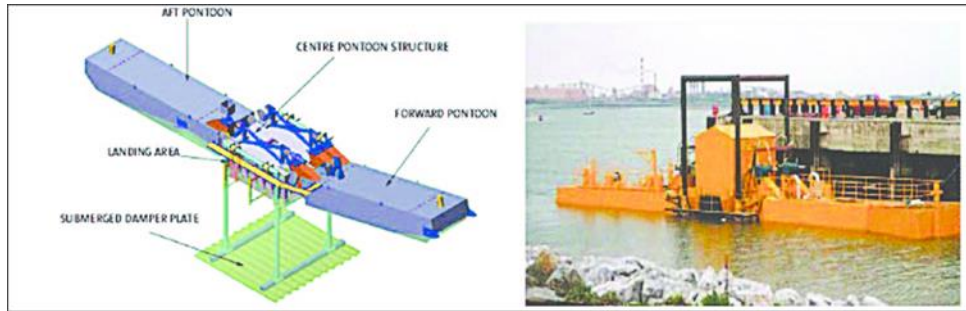
Το Floating Wave Power Vessel (Πλωτό Σκάφος Κυματικής Ενέργειας) αναπτύχθηκε από την Σουηδική εταιρία Sea Power International. Πρόκειται για μια καινοτόμα συσκευή για υπεράκτια δραστηριότητα, που αποτελείται από μια πλωτή λεκάνη που υποστηρίζεται από δεξαμενές έρματος σε τέσσερα τμήματα (Εικόνα 39). Ένα σύστημα πατενταρισμένης άγκυρας επιτρέπει στο σκάφος να προσανατολίζεται προς την κατεύθυνση των κυμάτων μεγαλύτερης ενέργειας. Τη δεκαετία του 1980, εγκαταστάθηκε μια πιλοτική μονάδα κοντά στη Στοκχόλμη για το πλωτό σκάφος κυματικής ενέργειας. Επιπλέον, έχει σχεδιαστεί ένα σκάφος 1,5 MW, ικανό να λειτουργεί σε βάθος που κυμαίνεται μεταξύ 50 και 80 μέτρων, υπεράκτια του Mess Mu στο Shetland της Σκωτίας. Αυτή η τεχνολογία αξιοποιεί την κυματική ενέργεια για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και προσφέρει προηγμένη λύση για την ανάπτυξη ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. (Ζαφειρίου, 2012).



Εικόνα 39. Floating Wave Power Vessel (Lagstroem, 2000)

1.5.24. McCabe Wave Pump

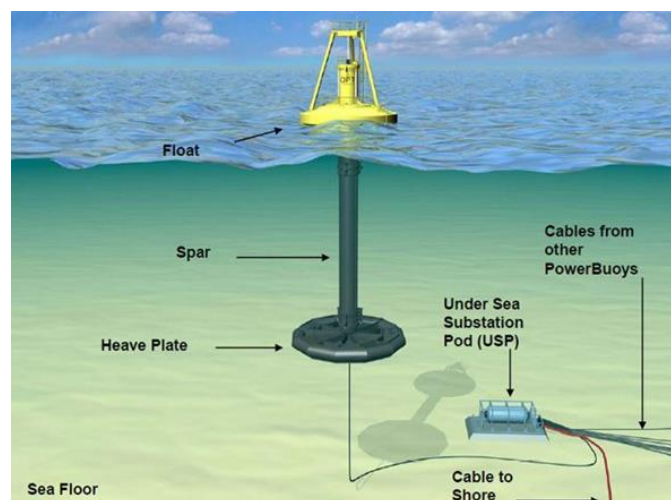
Το 1980, ο Peter McCabe, επινόησε την αντλία συστήματος McCabe Wave Power, η οποία αποτελείται από τρεις ορθογώνιες προβλήτες χάλυβα, που είναι συνδεδεμένες μεταξύ τους (Εικόνα 40). Η πλήρη της σχεδία είναι αγκυροβολημένη χαλαρά και δύο ακόμα πιο χαλαρά αγκυροβόλια είναι προσδεμένα αρκετά κάτω στην πρύνη της σχεδίας. Έτσι, επιτρέπεται στην ευθυγράμμιση του συστήματος να κατευθύνεται προς τα επερχόμενα κύματα. Ένα πρωτότυπο αυτής της αντλίας, μήκους 40 m, αναπτύχθηκε το 1996 ανοιχτά των ακτών της Kilbaha στο Courty Clare της Ιρλανδίας (Ζαφειρίου, 2012).



Εικόνα 40. Η τεχνολογία McCabe Wave Pump (Jackson et al., 2012)

1.5.25. OPT PowerBuoy

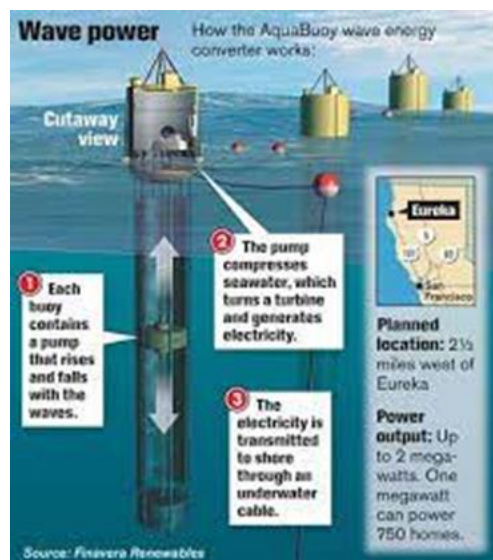
Η διάταξη μετατροπής κυματικής ενέργειας OPT PowerBuoy (Εικόνα 41) αναπτύχθηκε στις Ηνωμένες Πολιτείες. Αυτή η συσκευή παράγει ηλεκτρική ενέργεια από τη σχετική κίνηση ενός πλωτήρα στην επιφάνεια της θάλασσας και ενός ημιβυθισμένου σώματος, χρησιμοποιώντας ένα υδραυλικό σύστημα ανάκτησης. Η συσκευή έχει τη μορφή ενός κυλινδρικού σώματος, κλειστού στην κορυφή και ανοιχτού στην επίδραση της θάλασσας στο κάτω μέρος. Ένα υδραυλικό έμβολο τοποθετείται ανάμεσα στην κορυφή του κυλίνδρου και έναν ατσάλινο πλωτήρα που είναι τοποθετημένος μέσα στον κυλίνδρο. Η λειτουργία του ημιβυθισμένου πλωτήρα είναι να αυξήσει τη δύναμη της αδράνειας. Η σχετική κίνηση του κυλίνδρου σε σχέση με τον πλωτήρα ενεργοποιεί ένα υδραυλικό σύστημα που αντλεί λάδι υψηλής πίεσης προς μια γεννήτρια. Μεμονωμένες συσκευές του OPT PowerBuoy αυτού του τύπου μπορούν να παράγουν ενέργεια που κυμαίνεται μεταξύ 20 και 50 kW, αλλά όταν χρησιμοποιούνται σε σύστημα παράταξης, μπορούν να παράξουν πολλά MW ηλεκτρικής ενέργειας. (Clement et al., 2002).



Εικόνα 41. Αρχή λειτουργίας OPT PowerBuoy (Hossain, 2015)

1.5.26. AquaBuoy

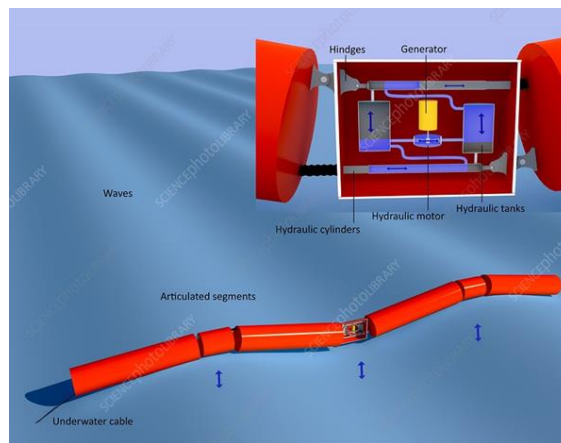
Η διάταξη AquaBuoy (Εικόνα 42) παράγει ενέργεια μέσω νερού υψηλής πίεσης, που δημιουργείται από την σχετική κίνηση ενός πλωτήρα και ενός εμβόλου, μέσω υδροστροβίλου. Το σύστημα αποτελείται από τον πλωτήρα, τον άκαμπτο καθοδικό αγωγό επιτάχυνσης, το έμβολο, τις αντλίες εύκαμπτου σωλήνα (hose rump) και τον υδροστρόβιλο. Το έμβολο επιταχύνεται μέσα στον μακρόστενο, άκαμπτο αγωγό, λόγω της κατακόρυφης δύναμης του κύματος. Ο αγωγός στηρίζεται στον πλωτήρα και είναι ανοιχτός και στα δύο άκρα, ώστε να επιτρέπει την ελεύθερη διέλευση του θαλασσινού νερού. Το έμβολο είναι ένας ημιβυθισμένος πλωτήρας σε σχήμα δίσκου και βρίσκεται στη μέση του αγωγού σε κατάσταση ηρεμίας. Διαμέσου του εμβόλου εισέρχεται ο εύκαμπτος αγωγός της αντλίας, από τον οποίο το νερό, αποκτώντας πίεση λόγω μεταβολής του όγκου του σωλήνα, οδηγείται από το κάτω άκρο στο επάνω, όπου και φέρει υδροστρόβιλο για την ενεργειακή αξιοποίηση (Καρακινάρης, 2017).



Εικόνα 42. Αρχή λειτουργίας της συσκευής AquaBuoy (Baker, 2007)

1.5.27. Pelamis

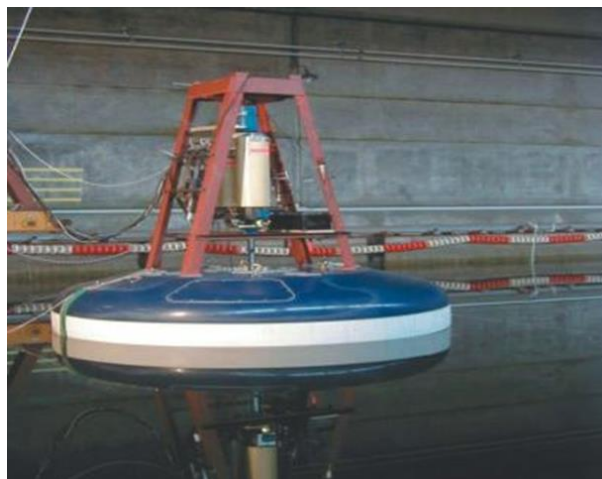
Η συσκευή Pelamis, είναι μία ημιβυθισμένη αρθρωτή κατασκευή, η οποία αποτελείται από κυλινδρικά τμήματα που συνδέονται με στρεφόμενες αρθρώσεις (Εικόνα 43). Η κυματική κίνηση που προκαλείται από αυτές τις αρθρώσεις, δέχεται αντίσταση από τα υδραυλικά έμβολα που αντλούν υψηλής πίεσης λάδι μέσω συσσωρευτών εξομάλυνσης, μέσα από υδραυλικούς κινητήρες. Μία τέτοια συσκευή, μήκους 130 m και διαμέτρου 3,5 m, ισχύος 375 kW, έχει κατασκευαστεί από την Ocean Power Delivery Ltd – OPD και βρίσκεται στην Σκωτία (Ζαφειρίου, 2012).



Εικόνα 43. Συσκευή Pelamis (sciencephoto.com)

1.5.28. Point Absorber Wave Energy Converter

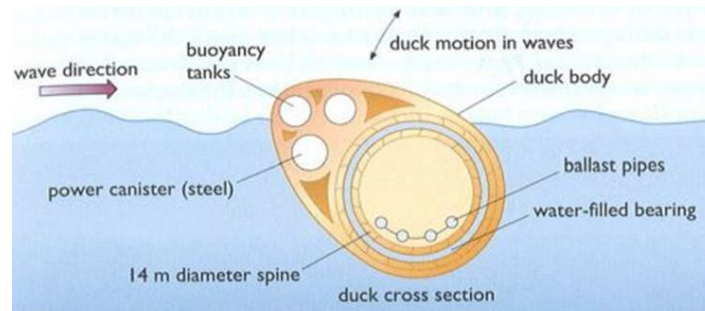
Η συσκευή Point Absorber WEC (Μετατροπέας Σημειακής Απορρόφησης Κυματικής Ενέργειας), που αναπτύχθηκε από τη Ramboll στη Δανία, αποτελείται από έναν πλωτήρα, ο οποίος συνδέεται με την άγκυρα αναρρόφησης κυτέλου από ένα σκοινί πολυεστέρα (Εικόνα 44). Η σχετική κίνηση μεταξύ των πλωτήρων στην επιφάνεια της θάλασσας και της κατασκευής του βυθού, ενεργοποιεί μία εμβολοφόρο αντλία κίνησης, η οποία παρεμβάλλεται μεταξύ του σχοινιού και του πλωτήρα. Ένα μοντέλο κλίμακας 1:10 ελέγχθηκε στη θάλασσα, στον χώρο δοκιμών της Δανίας «Brenning Nissum» κατά τη διάρκεια μιας περιόδου τριών μηνών και ένα μοντέλο κλίμακας 1:4 με διάμετρο 2,5 m έχει κατασκευαστεί για ανοικτή δοκιμή στη θάλασσα (Ζαφειρίου, 2012).



Εικόνα 44. Η συσκευή Point Absorber WEC (Ζαφειρίου, 2012)

1.5.29. Salter Duck

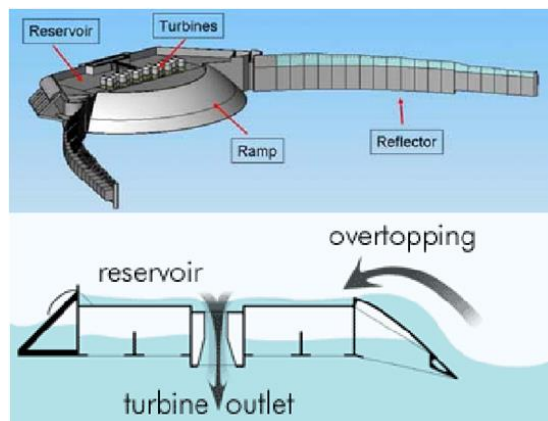
Ο S.Salter παρουσίασε το 1974 την πρωτότυπη ιδέα για τη συσκευή Salter Duck (Εικόνα 45). Αυτή η συσκευή έχει ένα σημαντικό χαρακτηριστικό: μπορεί να μετατρέψει την κινητική και τη δυναμική ενέργεια των κυμάτων ταυτόχρονα, επιτυγχάνοντας πολύ υψηλή αποδοτικότητα απορρόφησης που υπερβαίνει το 90% θεωρητικά. Το σύστημα έχει υποστεί σημαντική ανάπτυξη το 1983 και επανασχεδιασμό το 1993. Το συγκεκριμένο σχέδιο χαρακτηρίζεται από υψηλή διαθεσιμότητα, συνολική αποδοτικότητα και χαμηλό κόστος παραγωγής ενέργειας. (Ζαφειρίου, 2012).



Εικόνα 45. Η διάταξη Salter Duck (baonguyen1994.wordpress.com)

1.5.30. Wave Dragon

Το Wave Dragon (Εικόνα 46) είναι μία υπεράκτια συσκευή μετατροπής της κυματικής ενέργειας, η οποία αναπτύχθηκε από μία ομάδα εταιριών με επικεφαλής την Wave Dragon ApS στη Δανία. Χρησιμοποιεί ένα πατενταρισμένο σχέδιο ανακλαστήρα κύματος για να συγκεντρώσει το κύμα προς μία ράμπα και να καλύψει μία δεξαμενή υψηλότερης στάθμης. Η ηλεκτρική ενέργεια παράγεται από ένα σύνολο χαμηλών τουρμπινών Kaplan. Το πρόγραμμα έχει δοκιμαστεί στο εργαστήριο σε μοντέλο τουρμπίνας κλίμακας 1:50 και 1:3,5 (Ζαφειρίου, 2012).



Εικόνα 46. Αρχή λειτουργίας συσκευής Wave Dragon (Kofoed et al., 2007)

Πέρα από τις ήδη αναφερθείσες συσκευές εκμετάλλευσης θαλάσσιας ενέργειας, υπάρχουν πολλές άλλες που βρίσκονται σε τελικό στάδιο έρευνας και ανάπτυξης. Επιπλέον, σε χώρες με επαρκείς πόρους κυματικής ενέργειας, όπως η Κίνα, η Ιαπωνία και η Ινδία, υπάρχει συνεχής ανάπτυξη αντίστοιχων τεχνολογιών. Πολλές από αυτές τις τεχνολογίες βρίσκονται ακόμα σε φάση εξέλιξης προτού εφαρμοστούν πλήρως στον θαλάσσιο χώρο. Υπάρχει μεγάλο περιθώριο βελτίωσης της τεχνολογίας μετατροπής κυματικής ενέργειας, καθώς η απόδοση και η ανθεκτικότητα πολλών συσκευών, ειδικά των υπεράκτιων, χρήζουν περαιτέρω μελέτης. Επομένως, απαιτείται συνεχής και συντονισμένη προσέγγιση στην αξιοποίηση της κυματικής ενέργειας τόσο σε εθνικό όσο και σε διεθνές επίπεδο. (Clement et al., 2002).

1.6. Λιμενικές και παράκτιες κατασκευές

Οι λιμενικές – παράκτιες κατασκευές, είναι έργα που έχουν ως στόχο την προστασία μιας λιμενολεκάνης και τη δημιουργία ασφαλών συνθηκών για τον ελλιμενισμό των σκαφών ή την προστασία μιας παράκτιας ζώνης από δυσμενείς δράσεις των κυματισμών (Κουτίτας, 1996).

Η διάκριση των παράκτιων κατασκευών γίνεται, ανάλογα με τη διάταξή τους και ανεξάρτητα με την αποστολή τους, σε δύο βασικές κατηγορίες:

- Τα εγκάρσια προς την ακτή έργα (μώλοι, βραχίονες)
- Τα παράλληλα προς την ακτή έργα (κυματοθραύστες, κρηπιδότοιχοι)

1.6.1. Λιμενικές και παράκτιες κατασκευές – Αναλυτική περιγραφή

1.6.1.1. Μώλοι

Οι μώλοι (*Εικόνα 47*) είναι μακρόστενες κατασκευές που ξεκινούν από την ακτή και εκτείνονται προς τη θάλασσα. Αποτελούν κύρια μορφή προστατευτικών έργων που βρίσκονται σε επαφή με την ακτή και έχουν σκοπό να προστατεύουν τις ακτές από τα κύματα και να δημιουργήσουν λιμενολεκάνες για τον ασφαλή ελλιμενισμό των σκαφών.

Ανάλογα με την κυρίαρχη κατεύθυνση του ανέμου και, ως εκ τούτου, την προέλευση των κυμάτων, οι μώλοι χωρίζονται σε προσήνεμους και υπήνεμους. Οι υπήνεμοι μώλοι σχεδιάζονται για να προστατεύουν από τις παράπλευρες κατευθύνσεις των κυμάτων και να διαμορφώνουν την είσοδο του λιμένα και της λεκάνης. (Κουτίτας, 1996).



*Εικόνα 47. Προσήμενος μώλος στην Ικαρία
(<https://www.ergomare.gr/el/erga/epektasi-prosinemou-molou-limena-eydilou-ikarias-eydilos-1997-2014/>)*

1.6.1.2. Βραχίονες

Οι βραχίονες (*Εικόνα 48*) έχουν σκοπό την κατακράτηση άμμου και την ενίσχυση αμμωδών ακτών (αμμοκράτες) ή την προστασία στομίων εκβολών ποταμών και χειμάρρων από προσαμμώσεις, φράξιμο και πρόκληση ανυψώσεως στάθμης ανάντη και πλημμύρων. Δεν έχουν στέψεις και διατομές τόσο πλατιές όσο οι μώλοι και τα υλικά κατασκευής τους μπορεί να είναι προχειρότερα (π.χ. λουκάνικα πολυαιθυλανίου γεμάτα άμμο ή λιθορριπές χωρίς πλατιά στέψη ή και πασσαλοφράγματα ξύλινα ή μεταλλικά).

Οι βραχίονες έχουν μήκος που μπορεί να εκταθεί σε όλο το πλάτος της ζώνης θραύσεως, προκαλώντας μερική έως ολική διακοπή της παράκτιας στερεοπαροχής. Η απόσταση μεταξύ των βραχιόνων είναι 2-3 φορές το μήκος τους και η στέψη τους 0,5-1,0 m πάνω από την ΜΣΗ. Η κατεύθυνσή τους είναι κάθετη στην ακτή ή με μικρή κλίση προς τα κατάντη σε σχέση με την κατεύθυνση της παράκτιας στερεομεταφοράς (Κουτίτας, 1996).



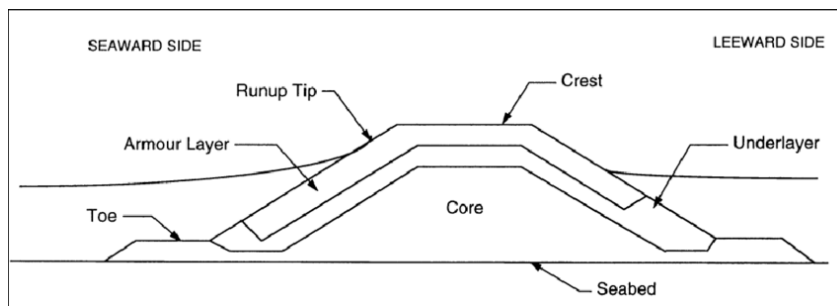
*Εικόνα 48. Βραχίονες σε λιμάνι του Σίδνεϊ
(<https://www.visitsydneyaustralia.com.au/wharves.html>)*

1.6.1.3. Κυματοθραύστες

Οι κυματοθραύστες (Εικόνα 49) είναι παράλληλα με την ακτή έργα που δεν έρχονται σε άμεση επαφή με αυτήν. Όπως και οι μάλιοι, ο κύριος στόχος τους είναι η προστασία των θαλάσσιων περιοχών πίσω από αυτούς από τα κύματα, προκειμένου να δημιουργηθούν ασφαλείς λιμένες για τα σκάφη. Ωστόσο, χρησιμοποιούνται επίσης για την προστασία των διαβρομένων ακτών.

Αν είναι επιθυμητό να διέρχεται μέρος της κυματικής ενέργειας πίσω τους ώστε να κυκλοφορεί και να ανανεώνεται το νερό, αλλά και να μην προσαμμωθεί πολύ η ακτή, τότε ο κυματοθραύστης (Κουτίτας, 1996):

- Κατασκευάζεται βυθισμένος
- Κατασκευάζεται υδραυλικά διαπερατός
- Κατασκευάζεται κατά τμήματα, με τις μεταξύ τους αποστάσεις να είναι μεγαλύτερες από $2L$ (όπου L = μήκος κύματος)



Εικόνα 49. Σχηματική απεικόνιση κυματοθραύστη (Domingo, 2010)

1.6.1.4. Κρηπιδότοιχοι

Οι κρηπιδότοιχοι (Εικόνα 50) είναι κατασκευές που τοποθετούνται παράλληλα προς την ακτή και έχουν ως κύριο σκοπό τη διευκόλυνση της φόρτωσης και εκφόρτωσης πλοίων, καθώς δημιουργούν κάθετες επιφάνειες που επιτρέπουν την προσέγγιση των πλοίων. Στην ουσία, αποτελούν τοίχους αντιστήριξης που υποστηρίζονται από γαιώδεις όγκους (ενεργές ωθήσεις) και αντιστέκονται στην κάθετη πίεση που προκαλείται από το φορτίο των κρηπιδωμάτων. Στην επιφάνειά τους, αντιμετωπίζουν την υδροδυναμική πίεση των κυμάτων που εισέρχονται στις λιμενολεκάνες, ενώ στη φάση του παραβάλλεσθαι των πλοίων

αντιμετωπίζουν τις δυνάμεις των προσκρούσεων, μεταφέροντας τις σε παθητικές πιέσεις στο έδαφος (Κουτίτας, 1996).



Εικόνα 50. Κρηπιδότοιχος (<http://bulkheadbuilders.com/bulkheads-and-retaining-wall-construction/>)

1.7. Ενεργειακές λιμενικές και παράκτιες κατασκευές

Ένας επικερδής τρόπος εκμετάλλευσης της κυματικής ενέργειας, είναι η κατασκευή και λειτουργία εγκαταστάσεων, που με τον κατάλληλο σχεδιασμό είναι:

- Ενσωματωμένες σε λιμενικά και ή παράκτια έργα, όπως κυματοθραύστες, βραχίονες ή κρηπιδότοιχους
- Συνδυαστικά με μηχανισμούς και τεχνολογίες αφαλάτωσης του θαλασσινού νερού σε πόσιμο νερό.

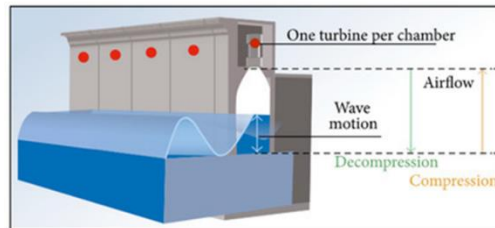
Στη συνέχεια της ενότητας, παρουσιάζονται ορισμένες ενεργειακές κατασκευές αυτού του τύπου οι οποίες είναι σε λειτουργία και ορισμένες οι οποίες έχουν μελετηθεί σε θεωρητικό επίπεδο.

1.7.1. Mutriku Energy Plant

Η πρώτη πόλη στον κόσμο, στην οποία κατασκευάστηκε και λειτούργησε μια εργοστασιακή εγκατάσταση αξιοποίησης της κυματικής ενέργειας, είναι η πόλη Mutriku στην περιοχή Basque της Ισπανίας. Το 2011, σε αυτή την μικρή πόλη, κατασκευάστηκε ένας ενεργειακός κυματοθραύστης, ο οποίος αποτελείται από 16 διατάξεις OWC, παρατεταγμένες η μία μετά την άλλη (Εικόνα 51). Παράγει ενέργεια ίση με 300 kW, η οποία αντιστοιχεί στο 10% των ενεργειακών αναγκών της πόλης (Savvidis et al., 2013).



(a)

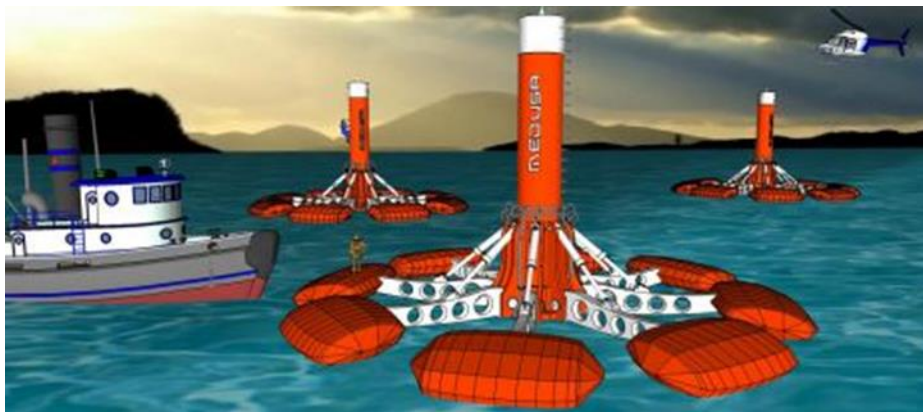


(b)

Εικόνα 51. Η κατασκευή Mutriku Energy plant (a) και οι διατάξεις OWC (b) (Cascajo et al., 2019)

1.7.2. Medusa

Η συσκευή εκμετάλλευσης της κυματικής ενέργειας Medusa είναι ένα σύστημα με 8 βραχίονες με ενσωματωμένους πλωτούς σταθμούς (Εικόνα 53). Το θαλασσινό νερό μεταφέρεται υπό πίεση μέσω αγωγών στην ακτή, σε ένα ειδικό σύστημα το οποίο μετά από κατάλληλη διαδικασία μετατρέπει τη μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική ισχύ, παράγοντας ταυτόχρονα πόσιμο νερό που έχει υποστεί αφαλάτωση. Η συσκευή δεν είναι σε εμπορική χρήση (Savvidis et al., 2013).



Εικόνα 52. Η συσκευή Medusa (wavesenergy.blogspot.com)

1.7.3. Μοντελοποίηση της εκμετάλλευσης της κυματικής ενέργειας από έναν κυματοθραύστη

Η έρευνα αναλύει τον τρόπο παραγωγής κυματικής ενέργειας στον λιμένα με τη χρήση ενός κυματοθραύστη και μιας χαμηλής ισχύος τουρμπίνας. Ο κυματοθραύστης δέχεται τα κύματα και τα κατευθύνει σε μια δεξαμενή, ενώ η τουρμπίνα αξιοποιεί το νερό από τη δεξαμενή για την παραγωγή ενέργειας. Ο κυριότερος παράγοντας που επηρεάζει την παραγόμενη ενέργεια είναι η διάμετρος της οπής προς την τουρμπίνα, ενώ το πλάτος της δεξαμενής δεν έχει σημαντική επίδραση. Η μελέτη αυτή παρέχει μια μαθηματική ανάλυση που μπορεί να εφαρμοστεί σε πρακτικές εφαρμογές, σε συνδυασμό με μια σύγχρονη τουρμπίνα χαμηλού φορτίου, προσφέροντας δωρεάν ενέργεια στην περιοχή του λιμένα. (Koutitas & Savvidis, 2008).

1.7.5. Εκμετάλλευση της κυματικής ενέργειας σε παράκτια τεχνικά έργα

Αυτή η εργασία χρησιμοποιεί την OBREC διάταξη στο λιμάνι του Ρεθύμνου για να προστατεύσει το λιμάνι από τα κύματα και να αξιοποιήσει την ενέργεια των κυματισμών. Η διάταξη περιλαμβάνει μια ειδικά σχεδιασμένη δεξαμενή που συλλέγει το υπερχειλίσαν νερό και το χρησιμοποιεί για να παράγει ηλεκτρική ενέργεια. Αυτή η διάταξη σχεδιάζεται ανάλογα με τις τοπικές κυματικές συνθήκες και η εκτιμώμενη ενεργειακή απόδοσή της είναι μεταξύ 4,39 και 8,78 MWh/m. Η OBREC παρέχει μια απλή και λειτουργική λύση για την παραγωγή ενέργειας και την προστασία από τα κύματα, με περιορισμένες περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Είναι εύκολο να εφαρμοστεί σε υπάρχοντα τεχνικά έργα και το κόστος της είναι σχετικά προσιτό. Η OBREC συνιστάται για περιοχές με έντονους κυματισμούς και μπορεί να εξεταστεί για περιπτώσεις προστασίας κατά τον επανασχεδιασμό τεχνικών έργων (Σισμάνη & Καραμπάς 2015).

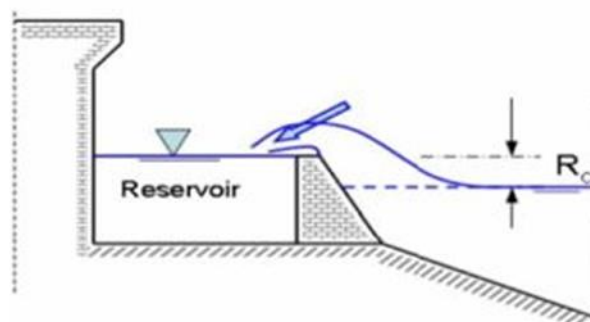
1.7.6. Μελέτη αξιοποίησης της κυματικής ενέργειας στις κατασκευές λιμένα

Αυτή η έρευνα εξετάζει την αξιοποίηση των κυματισμών της θάλασσας που αντανακλώνται στις παράκτιες κατασκευές πέραν του ρόλου τους ως προστασίας των λιμένων και των παράκτιων περιοχών. Οι κατασκευές αυτές, που μπορούν να είναι κυματοθραύστες ή κρηπιδότοιχοι τύπου Caisson, σχεδιάζονται έτσι ώστε να αξιοποιούν την ενέργεια των κυμάτων. Η έρευνα βασίζεται στον σχεδιασμό και την υλοποίηση δύο μαθηματικών μοντέλων (1DV και 2DH) και καταλήγει στα εξής συμπεράσματα: Το ύψος της

κατασκευής και η διάμετρος της οπής εκροής εξαρτώνται από τα κυματικά χαρακτηριστικά και το πλάτος της κατασκευής επηρεάζει την παραγόμενη ισχύ. Επιπλέον, η μελέτη των κυματισμών σε ένα μικρό τμήμα του κυματοθραύστη δείχνει ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως μονάδα παραγωγής ενέργειας, ενώ τα άλλα τμήματα μπορούν να ανακλούν τα κύματα. (Gravas et al., 2012).

1.7.7. Βέλτιστος σχεδιασμός ενός συστήματος υπερπήδησης κυματισμών OBREC σε κυματοθραύστη με τη χρήση Αρμονικού Αλγόριθμου

Η έρευνα εξετάζει τη χρήση μιας διάταξης OBREC για την εξαγωγή ενέργειας από τα κύματα (Εικόνα 53). Μελετήθηκε ο βέλτιστος σχεδιασμός αυτής της διάταξης και εφαρμόστηκε στον λιμένα του Ηρακλείου στην Κρήτη. Τα αποτελέσματα ήταν ενθαρρυντικά, με τη δυνατότητα να καλύψει τις ανάγκες 687 νοικοκυριών και να αυξήσει την απόδοση κατά 20% χάρη στη φουσκοθαλασσιά. Επιπλέον, η διάταξη ήταν αποδοτική για την κυρίαρχη κατεύθυνση των ανέμων. (Kralli et al., 2019).



Εικόνα 53 Η ενέργεια που εισέρχεται σε έναν σύνθετο κρηπιδότοιχο (Stagonas et al., 2010)

1.7.8. Σύνθετοι κρηπιδότοιχοι για την αξιοποίηση της κυματικής ενέργειας: 2D πειραματικά αποτελέσματα

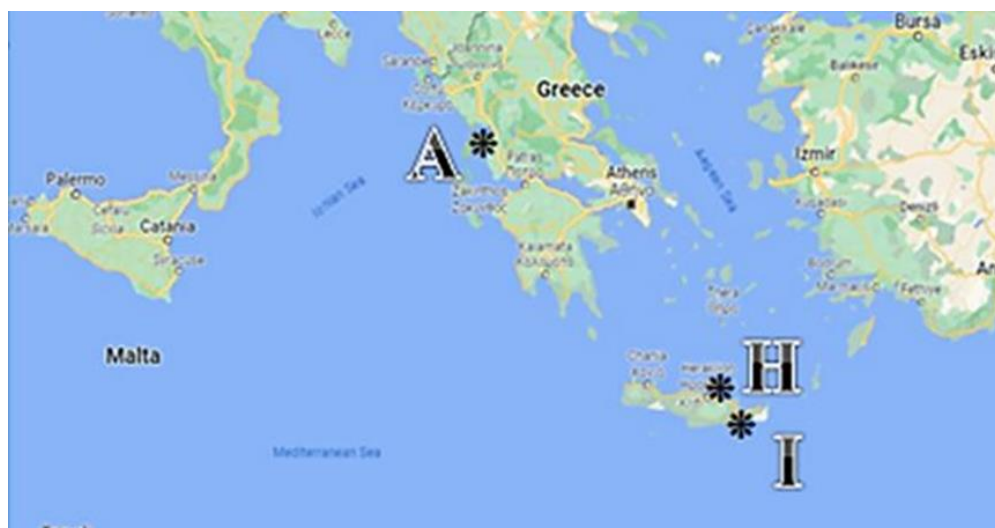
Έχουν γίνει προσπάθειες να αξιοποιηθεί η ενέργεια των κυμάτων στις παράκτιες περιοχές με τη χρήση συγκεκριμένων δομών, όπως πολύπλοκα κρηπιδοτοίχα ή ανακλινόμενους τοίχους. Αυτές οι μέθοδοι σχεδιάζονται έτσι ώστε να μειώνουν τη δύναμη των κυμάτων και να αποκτούν ενέργεια από αυτά. Κατά τη διάρκεια της κατάρτισης των δομών, τα κύματα χτυπούν την επιφάνεια και η ενέργεια τους απορροφάται ή ανακλάται, μερικές φορές με τη χρήση ειδικών περαστικών υλικών. Με αυτόν τον τρόπο, η ενέργεια των κυμάτων

μετατρέπεται σε χρήσιμη μορφή, όπως ηλεκτρική ενέργεια, που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για διάφορους σκοπούς. (Stagonas *et al.*, 2010).

1.8. Σκοπός της εργασίας

Ο ερευνητικός σκοπός της παρούσας εργασίας, εστιάζει στην αξιοποίηση της κυματικής ενέργειας από ανεμογεννείς κυματισμούς μέσω μιας κατασκευής κατακόρυφου παράκτιου μετώπου, είτε κρηπιδότοιχου είτε κυματοθραύστη, σε τρεις παράκτιες περιοχές της Ελλάδας (Εικόνα 54): το Άκτιο στις δυτικές ακτές της Ελλάδας, το Ηράκλειο στις βόρειες ακτές της Κρήτης και την Ιεράπετρα στις νότιες ακτές της Κρήτης. Η μελέτη στηρίζεται αφενός μεν στην εφαρμογή μεθόδων πρόγνωσης ανεμογεννών κυματισμών και αφετέρου στην εφαρμογή ενός μαθηματικού μοντέλου διάδοσης γραμμικού κυματισμού και δέσμευσης – αξιοποίησης της θαλάσσιας κυματικής ενέργειας.

Η επιλογή των συγκεκριμένων θέσεων έγινε αρχικά με βάση τη γεωγραφική τους θέση, αφού και οι τρεις περιοχές βρέχονται από την ανοιχτή θάλασσα και είναι εκτεθειμένες σε κυματισμούς που διαδίδονται προς τις ακτές αυτές με πολύ μεγάλο αποτελεσματικό μήκος ανάπτυξης. Ένας ακόμα λόγος για τον οποίον επιλέχθηκαν, κατά περίπτωση, οι συγκεκριμένες θέσεις είναι το ανεμολογικό κλίμα που επικρατεί στις περιοχές αυτές, αφού κατά περίπτωση καταγράφονται μέσα στο έτος, υψηλής έντασης άνεμοι. Όμως, η σημασία και η βαρύτητα του κριτηρίου αυτού είναι αντικείμενο στατιστικής επεξεργασίας των διαθέσιμων ανεμολογικών δεδομένων.



Εικόνα 54. Οι επιλεγμένες περιοχές (Iprodimatoroulou *et al.*, 2023)

2. ΜΕΘΟΔΟΙ ΚΑΙ ΥΛΙΚΑ

Ο βασικός σκοπός της εργασίας είναι να μελετήσουμε τον τρόπο με τον οποίο μπορούμε να αξιοποιήσουμε την ενέργεια που παράγεται από τα κύματα της θάλασσας, χρησιμοποιώντας έναν κατακόρυφο παράκτιο τοίχο τύπου caisson. Αυτή η κατασκευή βασίζεται σε προηγούμενες έρευνες των Koutitas & Savvidis (2008) και Gravas et al. (2012), και η περιγραφή της έχει ήδη παρουσιαστεί στο προηγούμενο κεφάλαιο. Παρακάτω εξηγείται αναλυτικότερα το μαθηματικό μοντέλο που χρησιμοποιείται για την παραγωγή ενέργειας από τα κύματα.

Πιο συγκεκριμένα, η κατασκευή αυτή μπορεί να περιγραφεί είτε ως ένας κρηπιδότοιχος σε ένα βάθος νερού δύο μέτρων, είτε ως ένας κυματοθραύστης με κατακόρυφες προσόψεις σε ένα βάθος τεσσάρων μέτρων, είτε ακόμα και ως ένας κυματοθραύστης με συνδυασμένη διατομή, με κλίση στο κάτω μέρος της κατασκευής και κατακόρυφες προσόψεις στο πάνω μέρος της κατασκευής. Για τον υπολογισμό απαιτούνται γνώσεις στη θαλάσσια κυματομηχανική και την υδραυλική ανοιχτών αγωγών.

Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για τον υπολογισμό της τελικής εκμετάλλευσης της κυματικής ισχύος είναι η εξής:

- Υπολογίζουμε τα μέσα ανεμολογικά δεδομένα που αντιπροσωπεύουν την εκάστοτε περιοχή.
- Υπολογίζουμε τα κυματικά στοιχεία χρησιμοποιώντας προγνώσεις ανεμογεννών κυματισμών, βασιζόμενοι στις πληροφορίες που έχουμε από το πρώτο βήμα.
- Υπολογίζουμε την ενέργεια που παράγεται από τα κύματα, χρησιμοποιώντας ένα μαθηματικό μοντέλο για την εκμετάλλευση της κυματικής ισχύος μέσω του ενεργειακού κυματοθραύστη ή του κρηπιδοτοίχου, βασιζόμενοι στα δεδομένα που υπολογίζονται στο δεύτερο βήμα.

2.1. Ανεμολογικά δεδομένα

Στην παρούσα εργασία, όπως προαναφέρθηκε, απαιτήθηκε η πρόγνωση των ανεμογεννών κυματισμών στις επιλεγθείσες περιοχές. Για να επιτευχθεί αυτό, χρειάστηκαν τα ανεμολογικά δεδομένα των περιοχών αυτών. Τα δεδομένα αυτά παραχωρήθηκαν από την Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία (Ε.Μ.Υ). Αφορούν τον μετεωρολογικό σταθμό που βρίσκεται στην περιοχή του Ακτίου, τον μετεωρολογικό σταθμό που βρίσκεται στην περιοχή του Ηρακλείου Κρήτης και τον μετεωρολογικό σταθμό που βρίσκεται στην περιοχή της Ιεράπετρας.

Για την περιοχή του Ακτίου, συλλέχθηκαν από τον αντίστοιχο μετεωρολογικό σταθμό, του οποίου το γεωγραφικό πλάτος αντιστοιχεί σε $38,92^\circ$ και το γεωγραφικό του μήκος σε $20,77^\circ$

και βρίσκεται σε υψόμετρο 1 m, ανεμολογικά δεδομένα που αφορούν ένα χρονικό διάστημα 32 ετών, από το έτος 1990 έως και το έτος 2021. Τα δεδομένα καταγράφονται ανά τρίωρο, καθημερινά καθ' όλη τη διάρκεια των ετών. Οι ώρες καταγραφής των μετρήσεων από τον σταθμό είναι από τις 00:00 τα μεσάνυχτα μέχρι και τις 21:00 το βράδυ. Το σύνολο των δεδομένων για το Άκτιο ανέρχεται σε 89.457.

Ο μετεωρολογικός σταθμός του Ηρακλείου βρίσκεται σε υψόμετρο 39 m και το γεωγραφικό του πλάτος αντιστοιχεί σε $35,34^\circ$ και το γεωγραφικό του μήκος σε $25,18^\circ$. Για την περιοχή του Ηρακλείου, συλλέχθηκαν από τον αντίστοιχο μετεωρολογικό σταθμό, δεδομένα που αφορούν ένα χρονικό διάστημα 32 ετών, από το έτος 1990 έως και το έτος 2021. Τα δεδομένα και για το Ηράκλειο, καταγράφονται ανά τρίωρο, καθημερινά καθ' όλη τη διάρκεια των ετών. Οι ώρες καταγραφής των μετρήσεων από τον σταθμό είναι από τις 00:00 τα μεσάνυχτα μέχρι και τις 21:00 το βράδυ. Το σύνολο των δεδομένων για το Ηράκλειο ανέρχεται σε 92.732.

Για την περιοχή της Ιεράπετρας, έχουν συλλεχθεί δεδομένα σε βάθος 21 ετών, εν αντιθέσει με τις προαναφερθείσες περιοχές όπου τα δεδομένα συλλέχθηκαν για 32 έτη, από το έτος 1990 έως και το έτος 2010 όπου και έκλεισε ο συγκεκριμένος μετεωρολογικός σταθμός. Τα δεδομένα συλλέγονταν καθημερινά, ανά τρίωρο. Οι ώρες καταγραφής των μετρήσεων από τον σταθμό είναι από τις 03:00 τα ξημερώματα μέχρι και τις 18:00 το απόγευμα. Επειδή ο σταθμός της Ιεράπετρας, έκλεισε το 2010, τα δεδομένα που έχουμε στη διάθεσή μας είναι λιγότερα από αυτά των άλλων δύο περιοχών, και στα τελευταία έτη λειτουργίας του σταθμού (από το έτος 2005 έως και το έτος 2010) υπήρξαν πολλά κενά στις καταγραφές των δεδομένων. Παρ' όλα αυτά, το σύνολο των δεδομένων για την Ιεράπετρας ανέρχεται σε 29.708, άρα κρίνεται ένα καλό δείγμα για να προχωρήσουμε σε στατιστική επεξεργασία.

Όλα τα δεδομένα και των τριών περιοχών, μετά από κατάλληλη επεξεργασία, χρησιμοποιήθηκαν για την πρόβλεψη των ανεμογεννών κυματισμών στις εν λόγω περιοχές.

Για τη στατιστική επεξεργασία των ανεμολογικών δεδομένων και για τις τρεις προαναφερθείσες περιοχές, χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα SPSS. Λόγω του μεγάλου όγκου των δεδομένων, η επεξεργασία τους έγινε ανά μήνα. Μέσω του προγράμματος SPSS, υπολογίστηκε η κατανομή των συχνοτήτων εμφάνισης κάθε διεύθυνσης ανέμου, σε βάθος 32 ετών για τις περιοχές του Ακτίου και του Ηρακλείου και 21 ετών για την περιοχή της Ιεράπετρας, για κάθε μήνα ξεχωριστά. Επιπλέον, έγινε εκτίμηση της μέσης ταχύτητας του ανέμου για κάθε διεύθυνση ξεχωριστά. Όλα αυτά, αποτυπώθηκαν και στα αντίστοιχα διαγράμματα.

2.2. Μέθοδοι πρόγνωσης ανεμογεννών κυματισμών

Οι κυματισμοί που επηρεάζουν τα θαλάσσια έργα πηγάζουν κυρίως από τον άνεμο, και σε λίγες περιπτώσεις έχουν παρόμοια μορφή με τους ομογενείς, δισδιάστατους κυματισμούς. Έχουν τυχαία μορφή, η οποία μπορεί να περιγραφεί ως ένας συνδυασμός αρμονικών συνιστωσών, αν και η εξέλιξή τους στο χώρο και το χρόνο είναι μη γραμμική και εξαρτάται από τις μη γραμμικές αλληλεπιδράσεις μεταξύ τους. Ως στοχαστικά μεγέθη, ακολουθούν συγκεκριμένες πιθανολογικές κατανομές και καθορίζονται με βάση την περιγραφή βασικών χαρακτηριστικών. Το κύριο ερώτημα είναι η ανίχνευση των συσχετίσεων μεταξύ των μεγεθών που τους περιγράφουν και των μετεωρολογικών και υδρογραφικών στοιχείων, καθώς και η "πρόβλεψη" της εξέλιξής τους βάσει των μετεωρολογικών προβλέψεων.

Ο κύριος παράγοντας που δημιουργεί κυματισμούς είναι η μεταφορά ενέργειας από τα κινούμενα κατώτερα ατμοσφαιρικά στρώματα στις επιφανειακές θαλάσσιες μάζες. Αρχικά, οι κυματισμοί ξεκινούν ως τριχοειδή αρχικά κύματα (capillary waves) και εξελίσσονται σε διαταραχές με μήκος πολλών μέτρων στην επιφάνεια της θάλασσας. Αυτές οι διαταραχές υφίστανται διακυμάνσεις λόγω της τύρβης και υφίστανται δυνάμεις διάτμησης και εγκάρσιας πίεσης από τον αέρα. Η ενέργεια που παρέχεται αρχικά από την ατμόσφαιρα αυξάνεται εκθετικά και στη συνέχεια μειώνεται καθώς οι κυματισμοί αυξάνονται σε περίοδο και μήκος. Κατά αυτόν τον τρόπο, η φασική ταχύτητα των κυματισμών πλησιάζει την ταχύτητα του ανέμου.

Η θεωρία των Phillips (1957) και Miles (1960) είναι μια από τις πρωταρχικές θεωρίες που εξηγούν τη γένεση των ανεμογεννών κυματισμών. Σύμφωνα με αυτήν τη θεωρία, η κυματογένεση ξεκινά με γραμμική αύξηση του κύματος λόγω συντονισμού με τις τυρβώδεις διαταραχές πίεσης και τριβής στην επιφάνεια της θάλασσας. Καθώς η ενέργεια μεταφέρεται από τον αέρα στην επιφάνεια της θάλασσας, οι διαταραχές αυξάνουν σε μέγεθος και ένταση με εκθετικό ρυθμό λόγω υδροδυναμικής αστάθειας. Παρατηρήθηκε ότι ο αέρας που πνέει με μια συγκεκριμένη κατεύθυνση προκαλεί κυματογένεση σε έναν τομέα περίπου $\pm 45^\circ$ από την κατεύθυνση του ανέμου. Αυτό οδηγεί στη δημιουργία ενός τρισδιάστατου πεδίου κυματισμών στην περιοχή (Κουτίτας, 1996).

Τα στατιστικά χαρακτηριστικά μεγέθη των ανεμογεννών κυματισμών είναι συναρτήσεις των εξής ανεξάρτητων μεταβλητών:

F_{eff} = Μήκος αναπτύγματος (Εικόνα 55). Είναι η χαρακτηριστική γραμμική διάσταση του θαλάσσιου πεδίου από ακτή σε ακτή κατά μήκος της οποίας δρα ο κυματισμός. Με βάση την αναφερθείσα επίδραση του ανέμου σε τομέα $\pm 45^\circ$ στην περίπτωση πολύπλοκης

τοπογραφίας ακτών και πλευρικού περιορισμού του πεδίου αναπτύξεως κυματισμών , το ισοδύναμο (effective) μήκος αναπτύξεως ορίζεται σύμφωνα με τον παρακάτω τύπο (7) (Κουτίτας, 1996):

$$F_{eff} = \frac{\sum_i F_i (\cos \alpha_i)^2}{\sum_i \cos \alpha_i} \quad (7)$$

όπου :

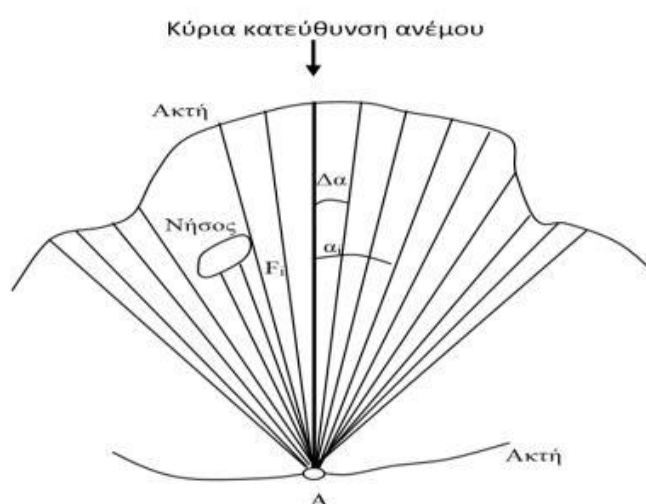
- F_i το μήκος ανάπτυξης κατά την κατεύθυνση που σχηματίζει γωνία
- α_i με την κατεύθυνση του ανέμου
-

Τα στοιχεία του κυματισμού H , T , είναι συναρτήσεις των :

- $t_D = \eta$ διάρκεια πνοής του ανέμου
- U_{10} = η χαρακτηριστική ταχύτητα του ανέμου αναφερόμενη σε ύψος 10m πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας
- F_{eff} που αναλύθηκε παραπάνω

Διακρίνονται τρεις περιπτώσεις ως προς την ανάπτυξη του κυματισμού:

1. ανάπτυξη με περιορισμό χρόνου ή διάρκειας (H και T εξαρτώνται από τα t_D και U_{10})
1. ανάπτυξη με περιορισμό μήκους ανάπτυξης (H και T εξαρτώνται από το F_{eff} και U_{10})
2. πλήρη ανάπτυξη χωρίς περιορισμό μήκους & διάρκειας (H , T εξαρτώνται μόνο από το U_{10}).



Εικόνα 55. Το ισοδύναμο μήκος κύματος F_{eff} (Καραμπάς κ.ά., 2015)

Υπάρχουν πολλές μέθοδοι συσχέτισης των φυσικών συνθηκών (ταχύτητα ανέμου, μήκος ανάπτυξης, διάρκειας πνοής) με τα στοιχεία κύματος (συσχέτιση των H_s, T με τα F_{eff}, t_D και U_{10}). Οι μέθοδοι *JONSWAP (Carter)* και *PM (Pierson-Moskovitz)* είναι δύο από τις πιο ευρέως χρησιμοποιούμενες μεθόδους συσχέτισης των φυσικών συνθηκών με τα στοιχεία του κυματισμού. Ακολουθεί μια σύντομη περιγραφή των δύο μεθόδων (Κουτίτας, 1996):

1. **JONSWAP (Carter):** Η μέθοδος JONSWAP (Joint North Sea Wave Project) αναπτύχθηκε από τον Carter και συσχετίζει τα στοιχεία του κυματισμού (σημαντικό ύψος κύματος H_s και περίοδος μέγιστης ενεργειακής πυκνότητας T_p) με τις φυσικές συνθήκες (F_{eff}, t_D και U_{10}). Η μέθοδος JONSWAP χρησιμοποιείται κυρίως για αναλύσεις και προβλέψεις του κυματισμού σε θάλασσες και ωκεανούς και για κυματισμούς υπό περιορισμό ανάπτυξης.

Με βάση τη μέθοδο JONSWAP, ελέγχεται η ανισότητα $g \cdot t_D / U_A > 68,8(g \cdot F / U_A^2)^{0,66}$ και στη συνέχεια υπολογίζονται τα H_s , και T_p ως εξής (Εξισώσεις 8 & 9) (Κουτίτας, 1996):

$$g \cdot H_s / U_A^2 = 0,0016 \cdot (g \cdot x / U_A^2)^{0,5} \Rightarrow H_s = (U_A^2 / g) \cdot 0,0016 \cdot (g \cdot x / U_A^2)^{0,5} \quad (8)$$

$$g \cdot T_p / U_A = 0,2860 \cdot (g \cdot x / U_A^2)^{0,33} \Rightarrow T_p = (U_A / g) \cdot 0,2860 \cdot (g \cdot x / U_A^2)^{0,33} \quad (9)$$

όπου αν ισχύει

$$g \cdot t_D / U_A > 68,8(g \cdot F / U_A^2)^{0,66} \quad (\text{επαρκής διάρκεια, περιορισμός μήκους}) \quad \text{τότε } x = F_{eff}$$

$$\text{ενώ αν ισχύει } g \cdot t_D / U_A < 68,8(g \cdot F / U_A^2)^{0,66} \quad (\text{επαρκές μήκος, περιορισμός διάρκειας})$$

τότε στο x τίθεται η λύση της εξίσωσης $g \cdot t_D / U_A = 68,8(g \cdot x / U_A^2)^{0,66}$

$$x = ((g \cdot t_D / U_A) / 68,8)^{3/2} \cdot U_A^2 / g$$

2. **PM (Pierson-Moskovitz):** Η μέθοδος PM αναπτύχθηκε από τους Pierson και Moskovitz και επίσης συσχετίζει τα στοιχεία του κυματισμού με τις φυσικές συνθήκες. Αυτή η μέθοδος είναι πιο κλασική και χρησιμοποιείται ευρέως για την ανάλυση και πρόβλεψη του κυματισμού σε θαλάσσιες περιοχές, για κυματισμούς πλήρως ανεπτυγμένους – FDS.

Με βάση τη μέθοδο PM, η οποία ισχύει για $g \cdot F / U_A^2 > 22800$, υπολογίζονται τα H_s και T_p από τις παρακάτω σχέσεις (Εξισώσεις 10 & 11) (Κουτίτας, 1996):

$$g \cdot H_s / U_A^2 = 0,243 \Rightarrow H_s = 0,243 \cdot U_A^2 / g \quad (10)$$

$$g \cdot T_p / U_A = 8,130 \Rightarrow T_p = 8,13 \cdot U_A / g \quad (11)$$

2.3. Μαθηματικό μοντέλο WAVEN

Το WAVEN είναι ένα μαθηματικό μοντέλο που αναπτύχθηκε από τον ομότιμο πλέον καθηγητή Λιμενικών Έργων του τμήματος Πολιτικών Μηχανικών ΑΠΘ κ. Χριστόφορο Κουτίτα, στα μέσα της δεκαετίας του 2000. Το μοντέλο εφαρμόστηκε επιτυχώς και τα σχετικά αποτελέσματα δημοσιεύθηκαν λίγο αργότερα (Koutitas & Savvidis 2008).

Πρόκειται για ένα μοντέλο 1D (μίας διάστασης) που περιγράφει τη διάδοση ενός γραμμικού μακρού, μη θραυόμενου ανεμογεννούς κυματισμού κατά μήκος ενός καναλιού με βάθος d που καταλήγει σε έναν ειδικό τύπο παράκτιου τεχνικού έργου (κυματοθραύστη ή κρηπιδότοιχο τύπου caisson) για την αξιοποίηση της κυματικής ενέργειας και την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Αργότερα, με βάση την ανάπτυξη του εν λόγω μοντέλου μίας διάστασης, έγινε επέκταση του μοντέλου για την περιγραφή του φαινομένου της διάδοσης του κυματισμού σε δύο διαστάσεις και αξιοποίηση της κυματικής ενέργειας με εφαρμογή παρόμοιας προτεινόμενης κατασκευής (Gravas *et al.* 2012).

Ειδικότερα, το εν λόγω μοντέλο των Koutitas & Savvidis 2008, προσομοιώνει τη διάδοση ενός μακρού γραμμικού κύματος κατά μήκος ενός διαύλου - καναλιού 1D από ένα αριστερό όριο πρόσπτωσης και ακτινοβολίας προς τα δεξιά όπου βρίσκεται ένας τοίχος τύπου caisson (είτε κυματοθραύστη είτε κρηπιδότοιχου) που απορροφά το κύμα. Ταυτόχρονα γεμίζει η δεξαμενή στο εσωτερικό της κατασκευής με νερό, ενώ ακολουθεί εκκένωση του ρεζερβουάρ (δεξαμενής) με απαγωγή του νερού στην πλευρά του λιμένα ή της παράκτιας ζώνης πίσω από τον τοίχο - κυματοθραύστη μέσω ενός ανοίγματος (όπου και τοποθετείται ένας αγωγός).

Οι βασικές εξισώσεις διατήρησης της ορμής (εξίσωση ισορροπίας των δυνάμεων) και διατήρησης της μάζας (εξίσωση συνέχειας) που περιγράφουν την διάδοση του κύματος είναι οι εξής (Εξισώσεις 12 & 13):

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + g \cdot h \cdot \frac{\partial \zeta}{\partial x} = 0 \quad (12)$$

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (13)$$

Όπου:

- ζ είναι η διακύμανση της επιφάνειας της θάλασσας από το επίπεδο της μέσης στάθμης της επιφάνειας της θάλασσας

- q ή Q είναι η ειδική παροχή
- h το βάθος του νερού – υδάτινης στήλης (παράμετρος HO)
- t είναι ο χρόνος
- x είναι η απόσταση από την θέση γέννησης του κύματος στο αριστερό άκρο του καναλιού

Οι παραπάνω διαφορικές εξισώσεις (12) και (13) προσεγγίζονται με αλγεβρικές εξισώσεις που προκύπτουν από την εφαρμογή της μεθόδου των πεπερασμένων διαφορών, οι οποίες στη συνέχεια κωδικοποιούνται στο πρόγραμμα για Η/Υ (ηλεκτρονικό υπολογιστή) με τη βοήθεια της γλώσσας προγραμματισμού FORTRAN.

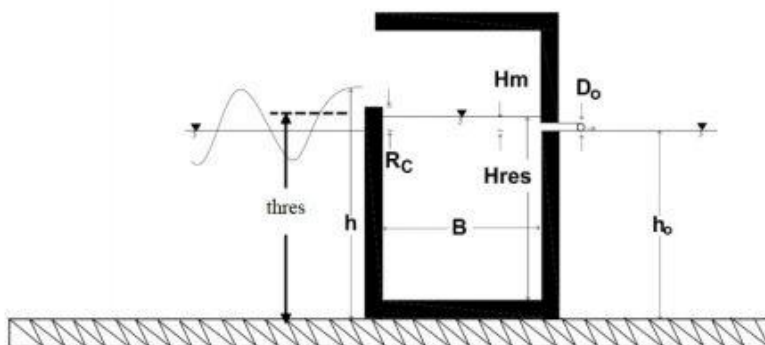
Επιλέγεται ένα μήκος L του καναλιού (από την είσοδο ως και το μέτωπο της κατασκευής) με $L = i_m \cdot \Delta x$ όπου Δx το χωρικό βήμα και i_m ο συνολικός αριθμός των χωρικών βημάτων στο μήκος του καναλιού L και ένας συνολικός χρόνος T_{tot} εξέτασης του φαινομένου με $T_{tot} = n_m \cdot \Delta t$ όπου Δt το χρονικό βήμα και n_m ο αριθμός των χρονικών βημάτων.

Στην είσοδο του καναλιού εισάγεται ένα κύμα ημιτονοειδούς μορφής σύμφωνα με την παρακάτω σχέση (14):

$$\zeta_i = H_w/2 \sin(\omega t) \quad (14)$$

όπου ω είναι η γωνιακή συχνότητα είναι $\omega = 2\pi/T$ (T η περίοδος του κύματος).

Παρακάτω δίνεται σε σκαρίφημα (Εικόνα 56) η μορφή του ενεργειακού τοίχου ή κυματοθραύστη.



Εικόνα 56. Η μορφή του ενεργειακού τοίχου/κυματοθραύστη (Gravas et al., 2012)

Τα σύμβολα είναι ως εξής:

Do: η διάμετρος του αγωγού που αποτελεί το στόμιο εκκένωσης από το caisson που μετληκά φορτίζει τον στρόβιλο χαμηλού φορτίου

ho: το βάθος του νερού (ύψος υδάτινης στήλης από τη ΜΣΘ ως τον πυθμένα)

h : το στιγμιαίο βάθος νερού μπροστά από την είσοδο του τεχνικού έργου (caisson)

B : το πλάτος της δεξαμενής στο εσωτερικό της κατασκευής

Hres: το βάθος του νερού στην εσωτερική δεξαμενή της κατασκευής (caisson)

Thres: το υψόμετρο του κατώφλιου του ανοίγματος στο μπροστινό μέτωπο της κατασκευής από τον πυθμένα

Δh₁: το φορτίο που δημιουργείται από την παροχή υπερχειλίσης [$h - Thres$]

Δh₂: το διαθέσιμο πιεζομετρικό φορτίο [$Hres - ho$]

Ειδικότερα, σύμφωνα με το παραπάνω σχήμα, ο τοίχος έχει ένα άνοιγμα στο μέτωπο προς στη θάλασσα. Το άνοιγμα έχει ένα κατώφλι σε υψόμετρο υψηλότερο από τη μέση στάθμη της θάλασσας (MSL) κατά ένα απόκομμα ίσο με Δh_1 όπου $\Delta h_1 = (h - Thres)$ και $Thres$ το υψόμετρο που αντιστοιχεί στο κατώφλι του μετώπου (στο κάτω όριο του ανοίγματος). Ο κυματοθραύστης έχει πλάτος bb ή "BB" και μπορεί να γεμίσει με νερό που μεταφέρεται από τα κύματα και υπερχειλίζει από (ή υπερπηδά) τη στάθμη όπου βρίσκεται το κατώφλι του ανοίγματος. Ταυτόχρονα γεμίζει η δεξαμενή του και εκκενώνεται επίσης νερό στην κατάντη πλευρά του κυματοθραύστη (ή κρηπιδότοιχου) προς το λιμένα (ή την παράκτια ζώνη) μέσω ενός ανοίγματος.

Η παροχή υπερχειλίσης Q_{in} πάνω από το όριο του κυματοθραύστη προς τη δεξαμενή περιγράφεται από τον τύπο Weir (15), όπως δίνεται παρακάτω:

$$Q_{in} = \mu \cdot b \cdot \Delta h_1^{1.5} = DISHC1 \cdot \Delta h_1^{1.5} \quad (15)$$

(όπου $DISHC1 = \mu \cdot b$)

Όπου:

- μ είναι ένας συντελεστής παροχής υπερχειλίσης, κυμαινόμενος μεταξύ 1,6 και 2,3 (εδώ $\mu=1,8$)
- b είναι το πλάτος του μετώπου της κατασκευής (εδώ $b=1$) (όχι το πλάτος στο εσωτερικό του τοίχου)
- Δh_1 η υψομετρική διαφορά ανάμεσα στη στάθμη h της επιφάνειας του νερού μπροστά στο μέτωπο του τοίχου (στάθμη της επιφάνειας $h = ho + \zeta$ από τον πυθμένα) και το κατώφλι threshold δηλαδή $\Delta h_1 = h - threshold$

Η παροχή εκροής Q_{out} από το εσωτερικό του τοίχου - κυματοθραύστη προς την πλευρά του λιμένα ή της παράκτιας ζώνης περιγράφεται από τη ροή μέσω μίας οπής που δίνει η σχέση Torricelli (16) όπως δίνεται παρακάτω:

$$Q_{out} = c \cdot A \cdot (2g \cdot \Delta h_2)^{0.5} = DISCH2 (20 \Delta h_2)^{0.5} \quad (\text{όπου } DISCH2 = c \cdot A) \quad (16)$$

Όπου:

- c είναι ένας συντελεστής παροχής κυμαινόμενος από 0,6 ως 0,68 (εδώ $c=0,6$)
- A το εμβαδόν της διατομής του αγωγού -ανοίγματος προς το εσωτερικό του λιμένα ή της παράκτιας ζώνης, όπου εδώ το απόκομμα
- Δh_2 δίνεται από τη σχέση $dh = (H_{res} - h_0)$ δηλαδή διαφορά στάθμης του νερού ανάμεσα στην επιφάνεια της εσωτερικής δεξαμενής νερού και τη στάθμη h_0 (το βάθος του νερού της υδάτινης στήλης)

Το μέγεθος H_{res} δηλαδή η στάθμη του νερού στην επιφάνεια της εσωτερικής δεξαμενής νερού υπολογίζεται από τη σχέση (17):

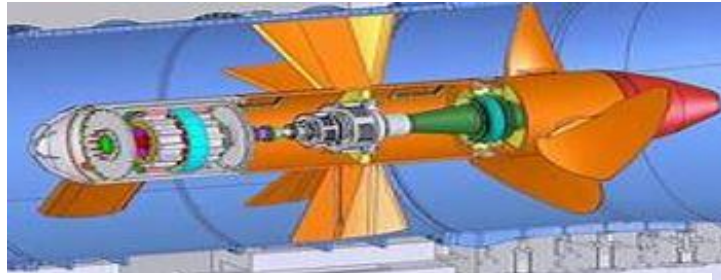
$$H_{res} = H_{res} + (Q_{in} - Q_{out}) \cdot \Delta t / A \quad (17)$$

όπου :

H_{res} , Q_{in} , Q_{out} και A όπως ορίστηκαν παραπάνω και Δt το χρονικό βήμα (με $A = b \cdot bb$, με b το πλάτος του μετώπου της κατασκευής και bb το πλάτος του τοίχου).

2.4. Υπολογισμός ισχύος μέσω του μαθηματικού μοντέλου WAVEN

Ο ερευνητικός στόχος του μοντέλου WAVEN είναι η μεγιστοποίηση της εκμεταλλεύσιμης μηχανικής ισχύος των κυμάτων που φθάνουν στην παράκτια ζώνη και προσκρούουν στο τεχνικό έργο του ενεργειακού τοίχου-κυματοθραύστη. Αυτό επιτυγχάνεται με την τοποθέτηση ενός στρόβιλου χαμηλού φορτίου (Εικόνα 57) στην περιοχή κάτω από την πιεζομετρική επιφάνεια, ο οποίος χρησιμοποιείται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Οι διαστάσεις του στρόβιλου και η απόδοσή του εξαρτώνται από το κυματικό κλίμα στην περιοχή.



Εικόνα 57. Ο στρόβιλος χαμηλού φορτίου (*Mini Hydro Turbine Generator - Trdcorp (ecplaza.net)*)

Τελικά η εκμεταλλεύσιμη κυματική ισχύς P η οποία αφαιρείται από το υγρό και “οδηγείται” προς τον υδροστρόβιλο (τουρμπίνα) δίνεται από την ακόλουθη σχέση (18) (Gravas et al.2012):

$$P = \rho \cdot g \cdot Q_{out} \cdot H_m \text{ (W)} \quad (18)$$

όπου

- Q_{out} όπως ορίσθηκε παραπάνω,
- $H_m = \Delta h_2$ όπως ορίσθηκε παραπάνω ($= H_{res} - h_o$) με τα H_{res} και h_o σε m,
 ρ η πυκνότητα του θαλασσινού νερού με μέση τιμή 1025 kg/m^3 ,
- $g = 9.81 \text{ m/s}^2$ (οπότε και $\rho \cdot g \approx 10000 \text{ N/m}^3$)

Η ισχύς αυτή σε kW είναι τελικά:

$$P = 10 \cdot Q_{out} \cdot H_m \text{ (kW)}$$

Οι παράμετροι που επηρεάζουν την εξέλιξη του φορτίου και της παροχής εκροής σε ένα σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από κύματα είναι οι εξής:

1. Ύψος κύματος (H_w): Το ύψος των κυμάτων που προσπίπτουν στο τεχνικό έργο επηρεάζει τη διαθέσιμη ενέργεια. Όσο μεγαλύτερο είναι το ύψος των κυμάτων, τόσο περισσότερη ενέργεια μεταφέρεται προς το τεχνικό έργο.
2. Περίοδος (T) ή μήκος κύματος (L): Η περίοδος ή το μήκος των κυμάτων είναι σημαντικοί παράγοντες για την παραγωγή ενέργειας. Μεγαλύτερες περίοδοι ή μήκη κύματος μπορούν να επιτρέψουν μεγαλύτερη απόδοση ενέργειας.
3. Ύψος του κατωφλίου του ανοίγματος: Η ύπαρξη κατωφλίου στο τεχνικό έργο επηρεάζει την ροή των κυμάτων και τη διαθέσιμη ενέργεια. Η ύψωση ή το ύψος του κατωφλίου μπορεί να ρυθμιστεί για να επηρεάσει τη ροή των κυμάτων.
4. Πλάτος του τοίχου (bb ή BB): Το πλάτος του τοίχου επηρεάζει την αντίσταση της ροής των κυμάτων και την απόδοση του συστήματος παραγωγής ενέργειας.
5. Εμβαδόν διατομής του αγωγού: Η διατομή του αγωγού που αποβάλλει το νερό προς τη λιμενολεκάνη ή προς την περιοχή πίσω από τον τοίχο επηρεάζει τη ροή του νερού και την απόδοση του συστήματος παραγωγής ενέργειας.

6. Παράμετρος DISCH2: Αναφέρεστε στην τουρμπίνα-στρόβιλο που περιγράφεται από αυτήν την παράμετρο. Η απόδοση της τουρμπίνας και ο τρόπος λειτουργίας της επηρεάζουν την παραγωγή ενέργειας.

Ρυθμίζοντας αυτές τις παραμέτρους, μπορεί να επιτευχθεί συνεχής ροή από το άνοιγμα στο μπροστινό μέτωπο του τεχνικού έργου προς τον στρόβιλο, ελαχιστοποιώντας τη ροή επιστροφής από τον τοίχο/κυματοθραύστη στη θάλασσα (υπερχείλιση), όταν η δεξαμενή είναι πλήρης.

Η τελικώς αποδιδόμενη ισχύς μετατροπή σε ηλεκτρική ενέργεια είναι μειωμένη λόγω των απωλειών ενέργειας εντός του υδροστροβίλου και κατά συνέπεια η τελική ισχύς (Εξίσωση 19) θα είναι:

$$P_{\text{τελ}} = n \cdot P \quad (19)$$

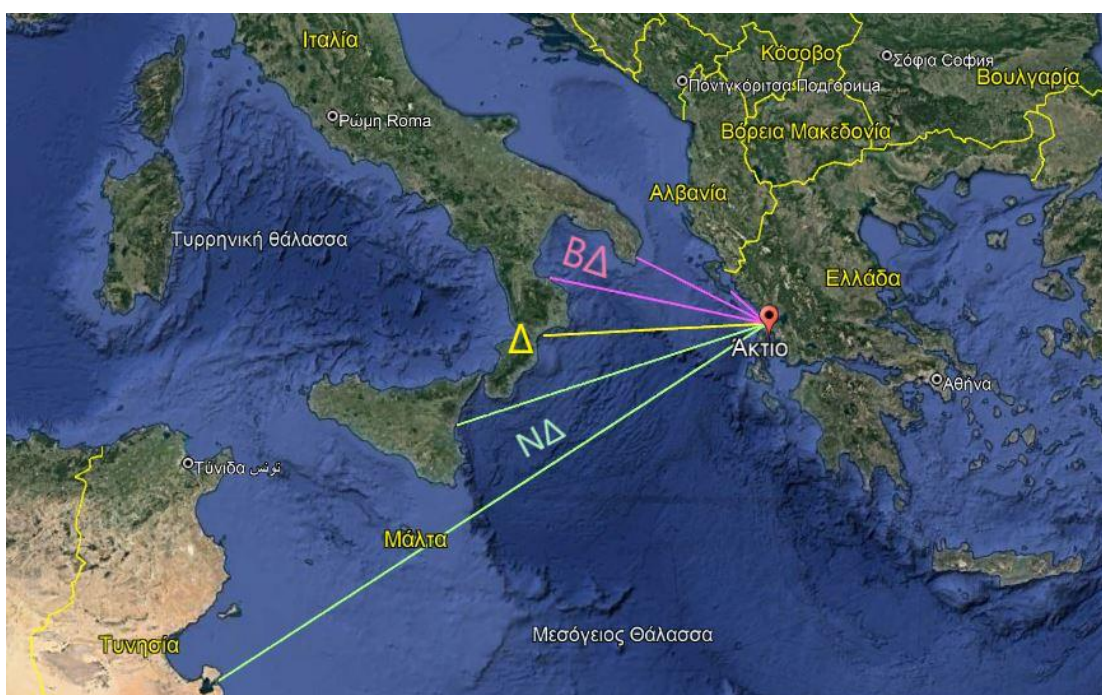
Όπου: n ο βαθμός απόδοσης του στροβίλου (Kralli *et al.*, 2019).

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

3.1 Αποτελέσματα

Όπως έχει προαναφερθεί, για την πρόγνωση των ανεμογεννών κυματισμών και κατ' επέκταση την εφαρμογή του μαθηματικού μοντέλου WAVEN, παραχωρήθηκαν από την Ε.Μ.Υ. ανεμολογικά δεδομένα για τις επιλεχθείσες περιοχές. Η έρευνα στην κάθε περιοχή, επικεντρώθηκε στους ανέμους που δημιουργούν κύματα προς την ακτή. Για την στατιστική επεξεργασία των δεδομένων χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα SPSS.

3.1.1 Περιοχή Ακτίου – Αποτελέσματα

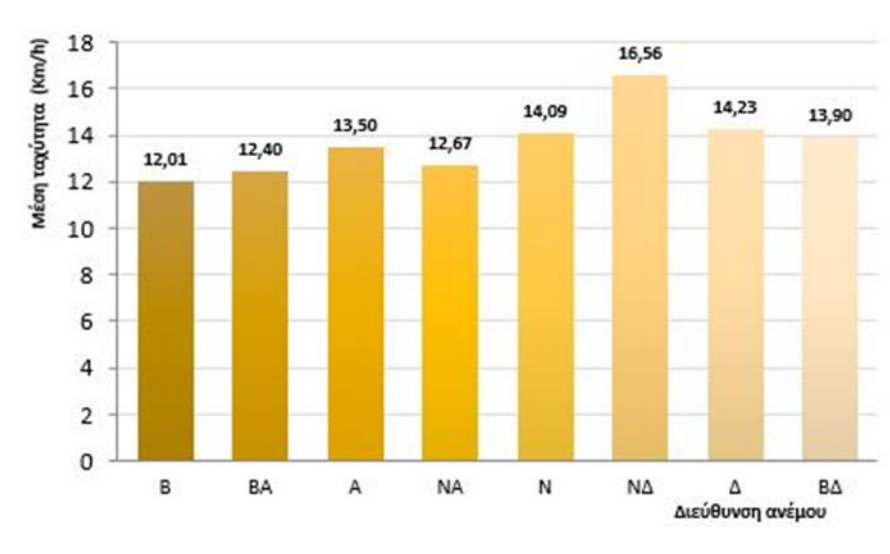


Εικόνα 58. Απεικόνιση της διεύθυνσης των ανέμων που δημιουργούν κύματα προς την ακτή στην περιοχή του Ακτίου, απεικόνιση μέσω Google Earth

Στην περιοχή του Ακτίου οι άνεμοι που δημιουργούν κύματα προς την ακτή είναι **δυτικοί (Δ), νοτιοδυτικοί (NΔ) και βορειοδυτικοί (BΔ)**, όπως απεικονίζεται και στην Εικόνα 58. Για την περιοχή του Ακτίου, συλλέχθηκαν από τον αντίστοιχο μετεωρολογικό σταθμό, δεδομένα που αφορούν ένα χρονικό διάστημα 32 ετών, από το έτος 1990 έως και το έτος 2021. Οι ώρες καταγραφής των μετρήσεων από τον σταθμό είναι από τις 00:00 τα μεσάνυχτα μέχρι και τις 21:00 το βράδυ. Το σύνολο των δεδομένων για το Άκτιο ανέρχεται σε 89.457. Λόγω του όγκου των δεδομένων, η επεξεργασία τους έγινε, αρχικά ανά μήνα και έπειτα, βάσει αυτών των δεδομένων υπολογίστηκαν το ύψος κύματος H_s και η περίοδος T_p για το σύνολο των ετών. Έγινε επεξεργασία και στατιστική ανάλυση του συνόλου των πρωτογενών δεδομένων, και κατόπιν, για τα κύματα που δημιουργούνται από τους προαναφερθέντες ανέμους,

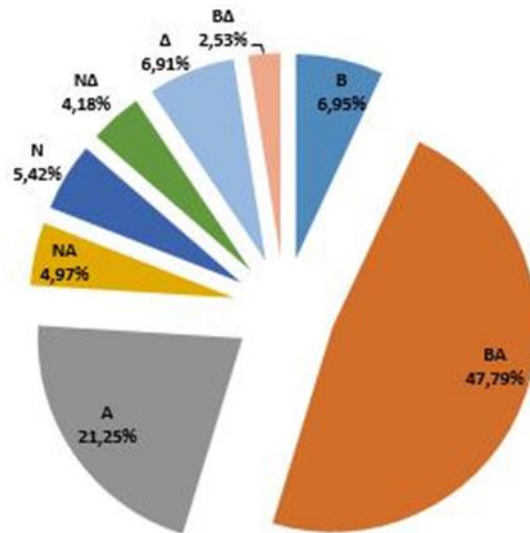
εφαρμόστηκε το αριθμητικό μοντέλο. Τα αποτελέσματα της επεξεργασίας αυτής παρατίθενται παρακάτω:

Ιανουάριος: Τον μήνα Ιανουάριο οι άνεμοι ισχυρότερης έντασης που παρατηρήθηκαν ήταν ο νοτιοδυτικός άνεμος (ΝΔ) με εκτιμώμενη μέση ταχύτητα $16,56 \text{ km/h} = 4,6 \text{ m/s}$, ο δυτικός άνεμος (Δ) με εκτιμώμενη μέση ταχύτητα $14,23 \text{ km/h} = 3,95 \text{ m/s}$ και ο νότιος άνεμος (Ν) με εκτιμώμενη μέση ταχύτητα $14,09 \text{ km/h} = 3,91 \text{ m/s}$. Ο βορειοδυτικός (ΒΔ) άνεμος παρατηρήθηκε να έχει εκτιμώμενη μέση ταχύτητα $13,90 \text{ km/h} = 3,86 \text{ m/s}$ (Εικόνα 59).



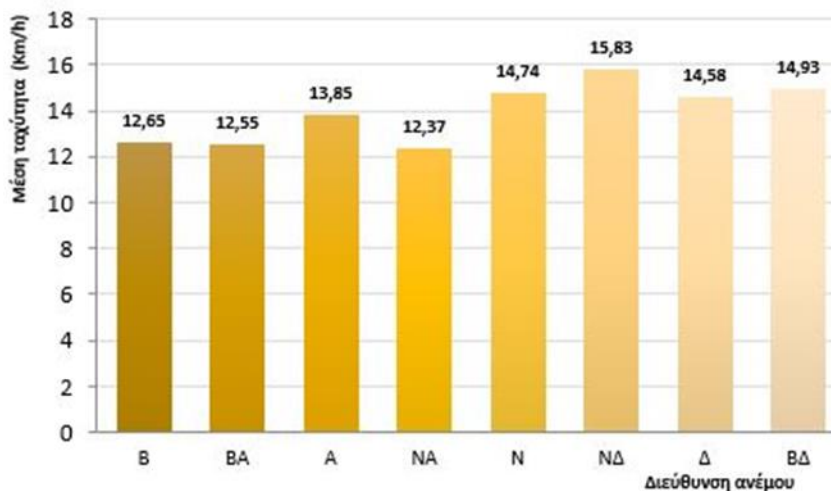
Εικόνα 59. Εκτιμώμενη μέση ταχύτητα ανά διεύθυνση ανέμου για τον μήνα Ιανουάριο στην περιοχή του Ακτίου (έτη 1990 - 2021)

Ωστόσο, η συχνότητα εμφάνισης των ανέμων αυτών, τον μήνα Ιανουάριο στην περιοχή του Ακτίου, είναι χαμηλή. Νοτιοδυτικοί (ΝΔ) άνεμοι εμφανίζονται με συχνότητα 4,18%, δυτικοί (Δ) άνεμοι εμφανίζονται με συχνότητα 6,91% και νότιοι (Ν) άνεμοι εμφανίζονται με συχνότητα 5,42%. Τον μήνα Ιανουάριο στην περιοχή του Ακτίου, οι βορειοανατολικοί (ΒΑ) άνεμοι εμφανίζονται σε ποσοστό 47,79% και ακολουθούν οι ανατολικοί (Α) άνεμοι με ποσοστό 21,25%, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 60.



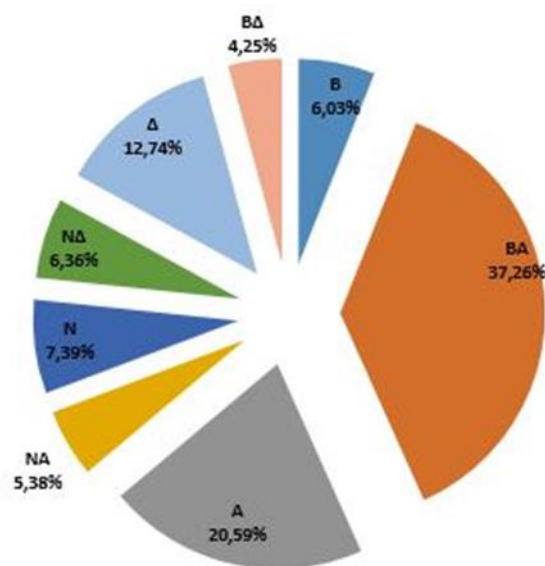
Εικόνα 60. Ποσοστιαία κατανομή των διευθύνσεων των ανέμων για τον μήνα Ιανουάριο (Άκτιο, έτη 1990 - 2021)

Φεβρουάριος: Τον μήνα Φεβρουάριο οι άνεμοι ισχυρότερης έντασης που παρατηρήθηκαν ήταν ο νοτιοδυτικός άνεμος (NΔ) με εκτιμώμενη μέση ταχύτητα $15,83 \text{ km/h} = 4,4 \text{ m/s}$, ο βορειοδυτικός άνεμος (BΔ) με εκτιμώμενη μέση ταχύτητα $14,93 \text{ km/h} = 4,15 \text{ m/s}$, ο νότιος άνεμος (N) με εκτιμώμενη μέση ταχύτητα $14,74 \text{ km/h} = 4,09 \text{ m/s}$ και ο δυτικός (Δ) με εκτιμώμενη μέση ταχύτητα $14,58 \text{ km/h} = 4,05 \text{ m/s}$ (Εικόνα 61).



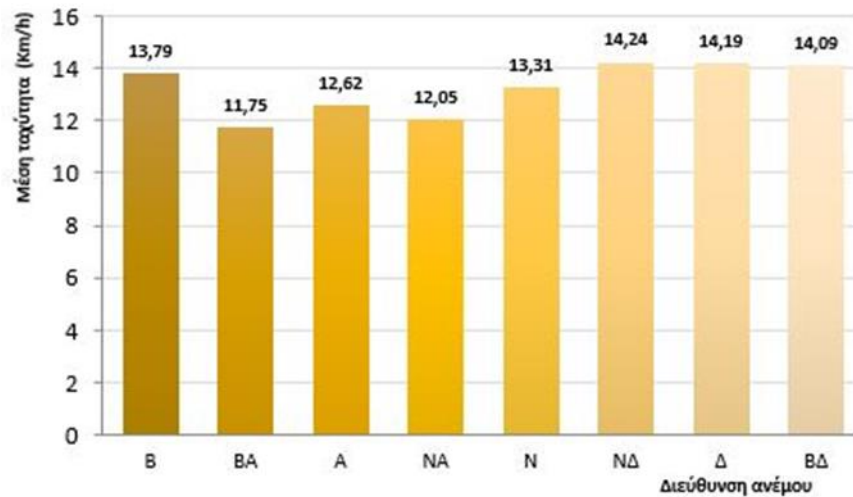
Εικόνα 61. Εκτιμώμενη μέση ταχύτητα ανά διεύθυνση ανέμου για τον μήνα Φεβρουάριο στην περιοχή του Ακτίου (έτη 1990 – 2021)

Ωστόσο, η συχνότητα εμφάνισης των ανέμων αυτών, και για τον μήνα Φεβρουάριο στην περιοχή του Ακτίου, είναι χαμηλή. Νοτιοδυτικοί (ΝΔ) άνεμοι εμφανίζονται με συχνότητα 6,36%, βορειοδυτικοί (ΒΔ) άνεμοι εμφανίζονται με συχνότητα 4,25%, νότιοι (Ν) άνεμοι εμφανίζονται με συχνότητα 7,39%. Οι δυτικοί άνεμοι εμφανίζουν σχετικά καλή συχνότητα εμφάνισης της τάξεως του 12,74%. Τον μήνα Φεβρουάριο στην περιοχή του Ακτίου, οι βορειοανατολικοί (ΒΑ) άνεμοι εμφανίζονται σε ποσοστό 37,26% και ακολουθούν οι ανατολικοί (Α) άνεμοι με ποσοστό εμφάνισης 20,59% (Εικόνα 62).



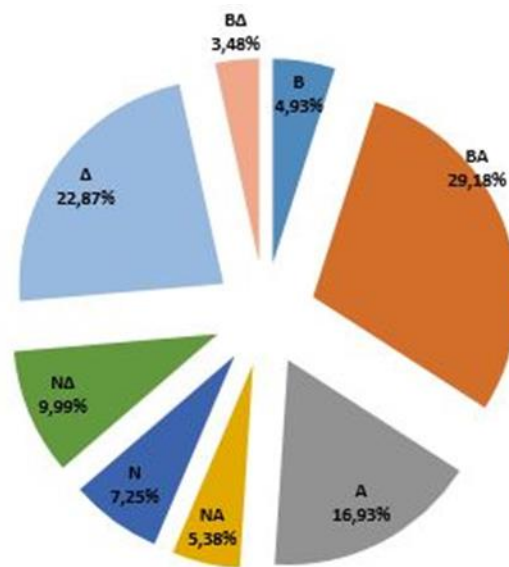
Εικόνα 62. Ποσοστιαία κατανομή των διευθύνσεων των ανέμων για τον μήνα Φεβρουάριο (Ακτιο, έτη 1990 - 2021)

Μάρτιος: Τον μήνα Μάρτιο οι άνεμοι ισχυρότερης έντασης που παρατηρήθηκαν ήταν ο νοτιοδυτικός άνεμος (ΝΔ) με εκτιμώμενη μέση ταχύτητα $14,24 \text{ km/h} = 3,96 \text{ m/s}$, ο δυτικός άνεμος (Δ) με εκτιμώμενη μέση ταχύτητα $14,19 \text{ km/h} = 3,94 \text{ m/s}$, ο βορειοδυτικός άνεμος (ΒΔ) με εκτιμώμενη μέση ταχύτητα $14,09 \text{ km/h} = 3,91 \text{ m/s}$, ενώ σχετικά ισχυρή ένταση παρουσιάζει και ο βόρειος (Β) άνεμος με εκτιμώμενη μέση ταχύτητα $13,79 \text{ km/h} = 3,83 \text{ m/s}$ (Εικόνα 63).



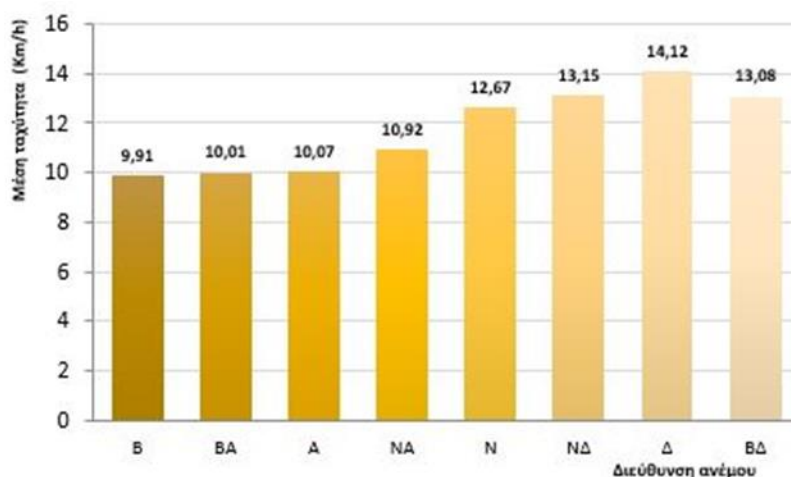
Εικόνα 63. Εκτιμώμενη μέση ταχύτητα ανά διεύθυνση ανέμου για τον μήνα Μάρτιο στην περιοχή του Ακτίου (έτη 1990 – 2021)

Αναφορικά με τη συχνότητα εμφάνισης των ανέμων για τον μήνα Μάρτιο στην περιοχή του Ακτίου, παρατηρήθηκε ότι το 29,18% των παρατηρήσεων ήταν βορειοανατολικοί (BA) άνεμοι και ακολουθούν οι δυτικοί άνεμοι (Δ) με συχνότητα εμφάνισης 22,87%. Οι υπόλοιποι άνεμοι που αναφέρθηκαν παραπάνω, εμφανίζονται με συχνότητα 9,99% οι νοτιοδυτικοί (NΔ) άνεμοι, 4,93% οι βόρειοι (B) άνεμοι και 3,48% οι βορειοδυτικοί (BΔ) άνεμοι (Εικόνα 64).



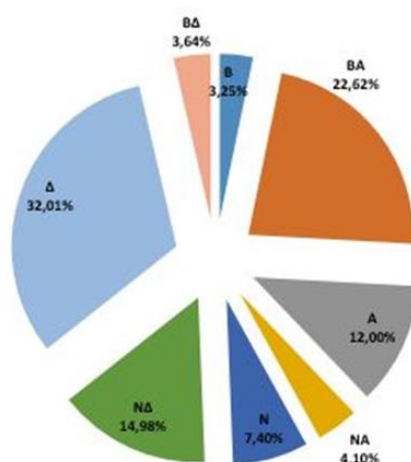
Εικόνα 64. Ποσοστιαία κατανομή των διευθύνσεων των ανέμων για τον μήνα Μάρτιο (Άκτιο, έτη 1990 – 2021)

Απρίλιος: Τον μήνα Απρίλιο, οι άνεμοι ισχυρότερης έντασης που παρατηρήθηκαν στην περιοχή του Ακτίου, ήταν ο δυτικός άνεμος (Δ) με εκτιμώμενη μέση ταχύτητα $14,12 \text{ km/h} = 3,92 \text{ m/s}$. Ακολουθούν με σχετικά ισχυρή ένταση, ο νοτιοδυτικός άνεμος (ΝΔ) με εκτιμώμενη μέση ταχύτητα $13,15 \text{ km/h} = 3,65 \text{ m/s}$ και ο βορειοδυτικός άνεμος (ΒΔ) με εκτιμώμενη μέση ταχύτητα $13,08 \text{ km/h} = 3,63 \text{ m/s}$, ενώ σχετικά ισχυρή ένταση παρουσιάζει και ο νότιος (Ν) άνεμος με εκτιμώμενη μέση ταχύτητα $12,67 \text{ km/h} = 3,52 \text{ m/s}$ (Εικόνα 65).



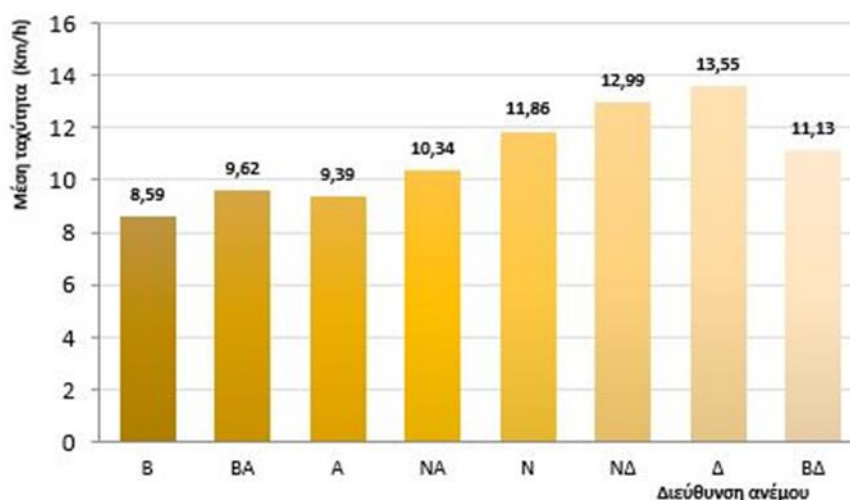
Εικόνα 65. Εκτιμώμενη μέση ταχύτητα ανά διεύθυνση ανέμου για τον μήνα Απρίλιο στην περιοχή του Ακτίου (έτη 1990 – 2021)

Όσον αφορά τη συχνότητα εμφάνισης των ανέμων για τον μήνα Απρίλιο στην περιοχή του Ακτίου, παρατηρήθηκε ότι το 32,01% των παρατηρήσεων ήταν δυτικοί (Δ) άνεμοι και ακολουθούν οι βόρειοανατολικοί άνεμοι με συχνότητα εμφάνισης 22,62%. Οι υπόλοιποι άνεμοι που αναφέρθηκαν παραπάνω, εμφανίζονται με συχνότητα 14,98% οι νοτιοδυτικοί (ΝΔ) άνεμοι, 3,64% οι βορειοδυτικοί (ΒΔ) άνεμοι και 7,40% οι νότιοι (Ν) άνεμοι (Εικόνα 66).



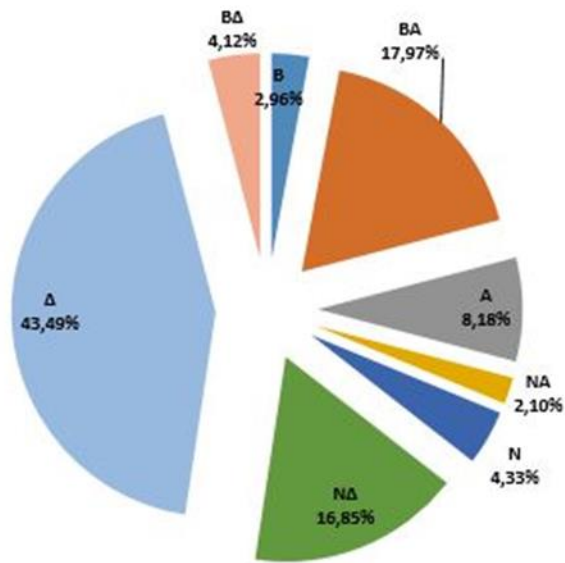
Εικόνα 66. Ποσοστιαία κατανομή των διευθύνσεων των ανέμων για τον μήνα Απρίλιο (Ακτείο, έτη 1990 – 2021)

Μάιος: Τον μήνα Μάιο οι άνεμοι ισχυρότερης έντασης που παρατηρήθηκαν ήταν ο δυτικός άνεμος (Δ) με εκτιμώμενη μέση ταχύτητα $13,55 \text{ km/h} = 3,76 \text{ m/s}$ και ο νοτιοδυτικός άνεμος (ΝΔ) με εκτιμώμενη μέση ταχύτητα $12,99 \text{ km/h} = 3,61 \text{ m/s}$. Σχετικά ισχυρή ένταση παρουσιάζει και ο νότιος άνεμος (Ν) με εκτιμώμενη μέση ταχύτητα $11,86 \text{ km/h} = 3,29 \text{ m/s}$, ενώ οι βορειοδυτικοί (ΒΔ) άνεμοι, έχουν μέση εκτιμώμενη ταχύτητα $11,13 \text{ km/h} = 3,09 \text{ m/s}$ (Εικόνα 67).



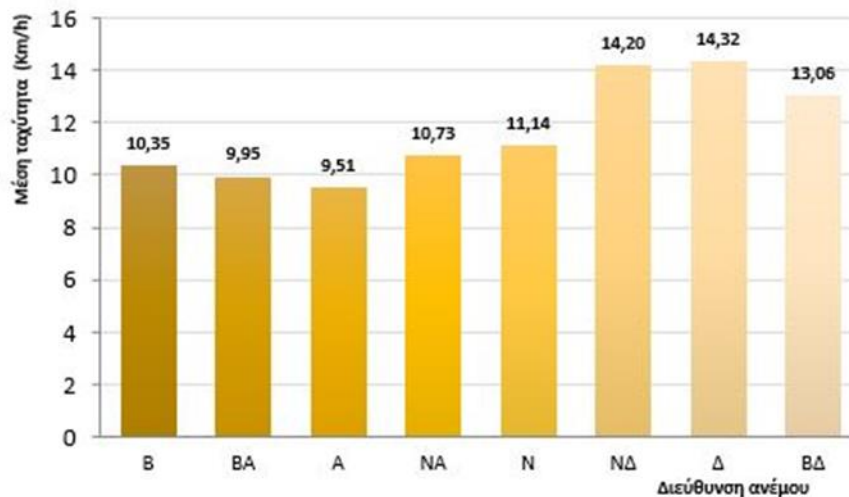
Εικόνα 67. Εκτιμώμενη μέση ταχύτητα ανά διεύθυνση ανέμου για τον μήνα Μάιο στην περιοχή του Ακτίου (έτη 1990 – 2021)

Σχετικά με τη συχνότητα εμφάνισης των ανέμων για τον μήνα Μάιο στην περιοχή του Ακτίου, παρατηρήθηκε ότι το 43,49% των παρατηρήσεων ήταν δυτικοί (Δ) άνεμοι και ακολουθούν οι βόρειοανατολικοί άνεμοι (ΒΑ) με συχνότητα εμφάνισης 17,97%. Οι νοτιοδυτικοί (ΝΔ) άνεμοι εμφανίζονται με συχνότητα 16,85%, ενώ οι νότιοι (Ν) άνεμοι εμφανίζονται με συχνότητα 4,33% και οι βορειοδυτικοί (ΒΔ) με συχνότητα 4,12% (Εικόνα 68).



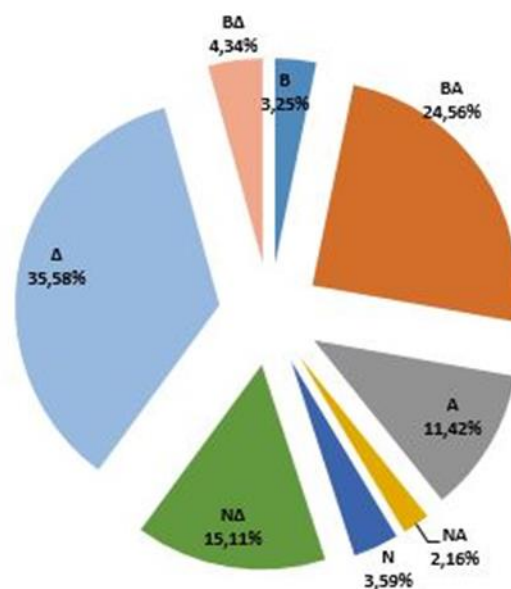
Εικόνα 68. Ποσοστιαία κατανομή των διευθύνσεων των ανέμων για τον μήνα Μάιο (Ακτιο, έτη 1990 – 2021)

Ιούνιος: Τον μήνα Ιούνιο οι άνεμοι ισχυρότερης έντασης που παρατηρήθηκαν ήταν ο δυτικός άνεμος (Δ) με εκτιμώμενη μέση ταχύτητα $14,32 \text{ km/h} = 3,99 \text{ m/s}$ και ο νοτιοδυτικός άνεμος (NΔ) με εκτιμώμενη μέση ταχύτητα $14,20 \text{ km/h} = 3,94 \text{ m/s}$. Σχετικά ισχυρή ένταση παρουσιάζει, επίσης και ο βορειοδυτικό άνεμος (BΔ) με εκτιμώμενη μέση ταχύτητα $13,06 \text{ km/h} = 3,63 \text{ m/s}$ (Εικόνα 69).



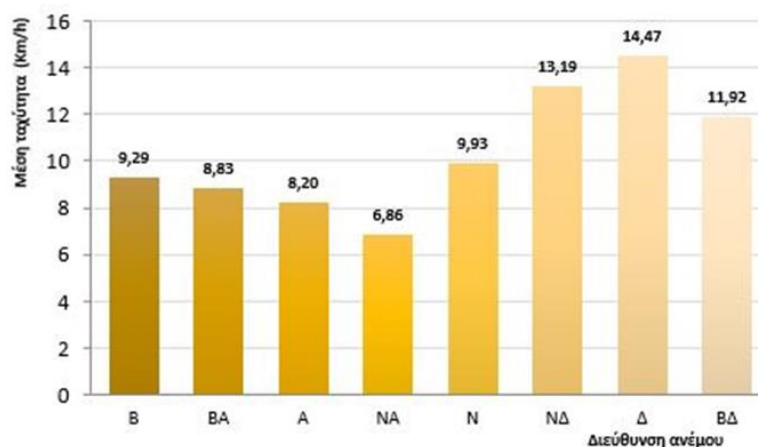
Εικόνα 69. Εκτιμώμενη μέση ταχύτητα ανά διεύθυνση ανέμου για τον μήνα Ιούνιο στην περιοχή του Ακτίου (έτη 1990 – 2021)

Αναφορικά με τη συχνότητα εμφάνισης των ανέμων για τον μήνα Ιούνιο στην περιοχή του Ακτίου, παρατηρήθηκε ότι το 35,58% των παρατηρήσεων ήταν δυτικοί (Δ) άνεμοι και ακολουθούν οι βόρειοανατολικοί άνεμοι (ΒΑ) με συχνότητα εμφάνισης 24,56%. Οι νοτιοδυτικοί (ΝΔ) άνεμοι εμφανίζονται με συχνότητα 15,11%, ενώ οι βορειοδυτικοί (ΒΔ) άνεμοι εμφανίζονται με συχνότητα 4,34% (Εικόνα 70).



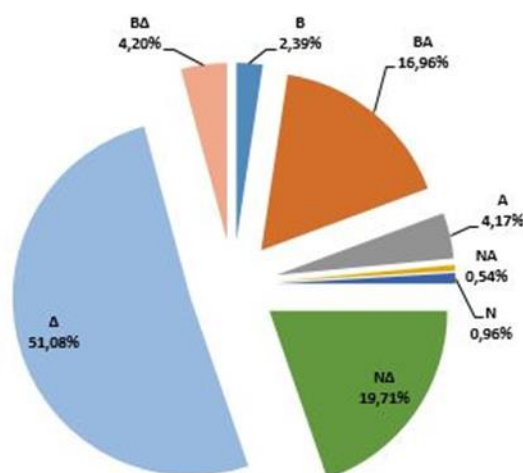
Εικόνα 70. Ποσοστιαία κατανομή των διευθύνσεων των ανέμων για τον μήνα Ιούνιο (Ακτιο, έτη 1990 – 2021)

Ιούλιος: Τον μήνα Ιούλιο οι άνεμοι ισχυρότερης έντασης που παρατηρήθηκαν ήταν ο δυτικός άνεμος (Δ) με εκτιμώμενη μέση ταχύτητα $14,47 \text{ km/h} = 4,02 \text{ m/s}$ και ο νοτιοδυτικός άνεμος (ΝΔ) με εκτιμώμενη μέση ταχύτητα $13,19 \text{ km/h} = 3,66 \text{ m/s}$. Σχετικά ισχυρή ένταση παρουσιάζει, επίσης και ο βορειοδυτικό άνεμος (ΒΔ) με εκτιμώμενη μέση ταχύτητα $11,92 \text{ km/h} = 3,31 \text{ m/s}$ (Εικόνα 71).



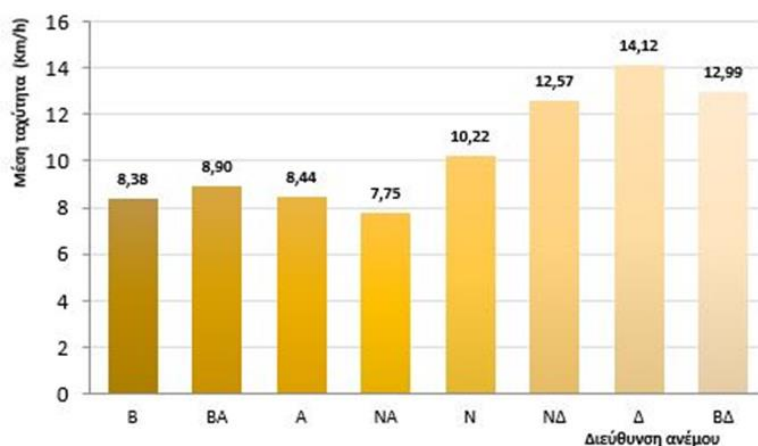
Εικόνα 71. Εκτιμώμενη μέση ταχύτητα ανά διεύθυνση ανέμου για τον μήνα Ιούλιο στην περιοχή του Ακτίου (έτη 1990 – 2021)

Σχετικά με τη συχνότητα εμφάνισης των ανέμων για τον μήνα Ιούλιο στην περιοχή του Ακτίου, παρατηρήθηκε ότι το 51,08% των παρατηρήσεων ήταν δυτικοί (Δ) άνεμοι και ακολουθούν οι νοτιοδυτικοί άνεμοι (ΝΔ) με συχνότητα εμφάνισης 19,71%. Οι βορειοανατολικοί (ΒΑ) άνεμοι, παρουσιάζουν και πάλι υψηλή συχνότητα εμφάνισης, της τάξεως του 16,96%, ενώ από τους προαναφερθέντες ανέμους, οι βορειοδυτικοί (ΒΔ) παρουσιάζουν συχνότητα εμφάνισης 4,20% (Εικόνα 72).



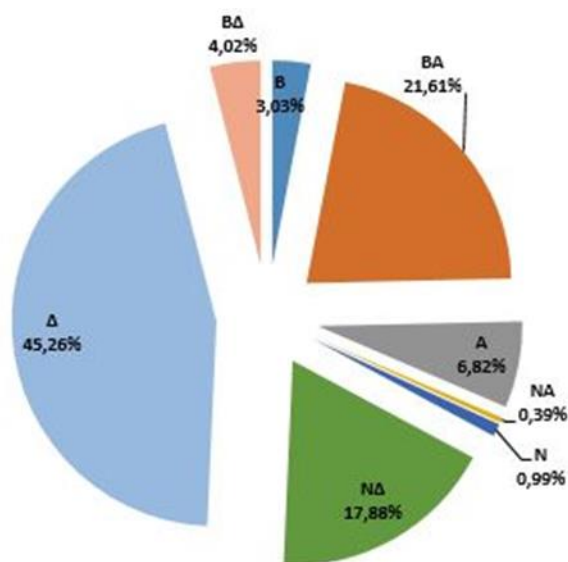
Εικόνα 72. Ποσοστιαία κατανομή των διευθύνσεων των ανέμων για τον μήνα Ιούλιο (έτη 1990 – 2021)

Αύγουστος: Τον μήνα Αύγουστο οι άνεμοι ισχυρότερης έντασης που παρατηρήθηκαν ήταν ο δυτικός άνεμος (Δ) με εκτιμώμενη μέση ταχύτητα 14,12 km/h = 3,92 m/s, ενώ ακολουθούν ο βορειοδυτικός άνεμος (ΒΔ) με εκτιμώμενη μέση ταχύτητα 12,99 km/h = 3,61 m/s και ο νοτιοδυτικός (ΝΔ) άνεμος με εκτιμώμενη μέση ταχύτητα 12,57 km/h = 3,49 m/s (Εικόνα 73).



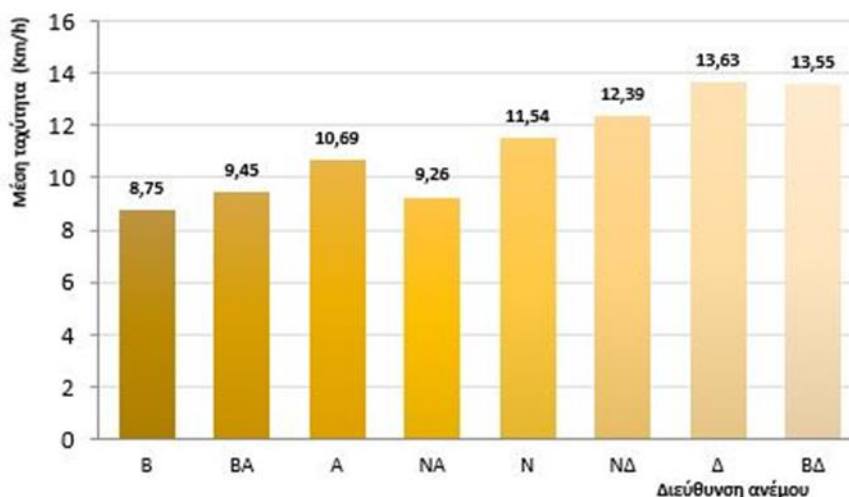
Εικόνα 73. Εκτιμώμενη μέση ταχύτητα ανά διεύθυνση ανέμου για τον μήνα Αύγουστο στην περιοχή του Ακτίου (Ακτιο, έτη 1990 – 2021)

Εξετάζοντας τη συχνότητα εμφάνισης των ανέμων για τον μήνα Αύγουστο στην περιοχή του Ακτίου, παρατηρήθηκε ότι το 45,26% των παρατηρήσεων ήταν δυτικοί (Δ) άνεμοι και ακολουθούν οι βορειοανατολικοί άνεμοι (ΒΑ) με συχνότητα εμφάνισης 21,61%. Οι νοτιοδυτικοί (ΝΔ) άνεμοι, εμφανίζονται με συχνότητα 17,88%, ενώ από τους προαναφερθέντες ανέμους, οι βορειοδυτικοί (ΒΔ) παρουσιάζουν και πάλι μικρή συχνότητα εμφάνισης, ίση με 4,02% (Εικόνα 74).



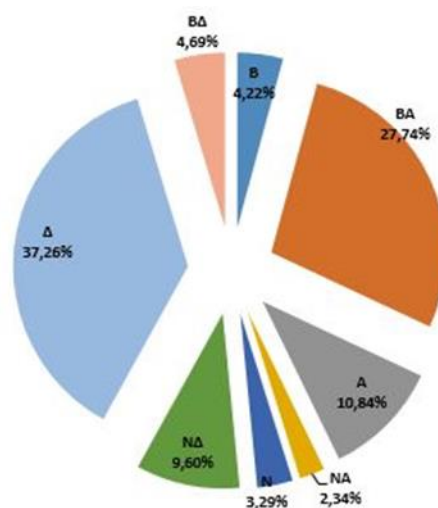
Εικόνα 74. Ποσοστιαία κατανομή των διευθύνσεων των ανέμων για τον μήνα Αύγουστο (Άκτιο, έτη 1990 – 2021)

Σεπτέμβριος: Τον μήνα Σεπτέμβριο οι άνεμοι ισχυρότερης έντασης που παρατηρήθηκαν ήταν ο δυτικός άνεμος (Δ) με εκτιμώμενη μέση ταχύτητα $13,63 \text{ km/h} = 3,77 \text{ m/s}$, ο βορειοδυτικός άνεμος (ΒΔ) με εκτιμώμενη μέση ταχύτητα $13,55 \text{ km/h} = 3,76 \text{ m/s}$, ο νοτιοδυτικός άνεμος (ΝΔ) με εκτιμώμενη μέση ταχύτητα $12,39 \text{ km/h} = 3,44 \text{ m/s}$, ενώ σχετικά ισχυρή ένταση παρουσιάζει και ο νότιος (Ν) άνεμος, με εκτιμώμενη μέση ταχύτητα $11,54 \text{ km/h} = 3,21 \text{ m/s}$ (Εικόνα 75).



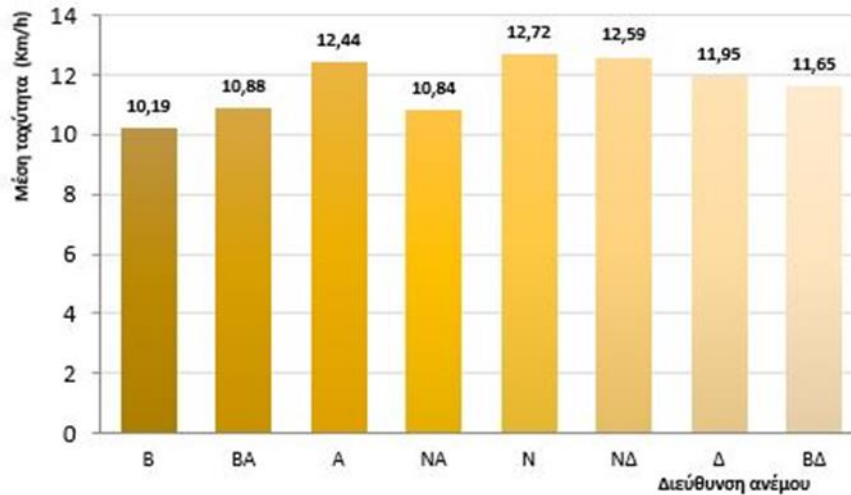
Εικόνα 75. Εκτιμώμενη μέση ταχύτητα ανά διεύθυνση ανέμου για τον μήνα Σεπτέμβριο στην περιοχή του Ακτίου (έτη 1990 – 2021)

Όσον αφορά τη συχνότητα εμφάνισης των ανέμων για τον μήνα Σεπτέμβριο στην περιοχή του Ακτίου, παρατηρήθηκε ότι το 37,26% των παρατηρήσεων ήταν δυτικοί (Δ) άνεμοι και ακολουθούν οι βορειοανατολικοί άνεμοι (BA) με συχνότητα εμφάνισης 27,74%. Οι υπόλοιποι άνεμοι που προαναφέρθηκαν, εμφανίζονται με συχνότητα 9,60% οι νοτιοδυτικοί (NΔ) άνεμοι, ενώ οι βορειοδυτικοί (BΔ) άνεμοι και οι νότιοι (N) άνεμοι εμφανίζονται με συχνότητα 4,69% και 3,29% αντίστοιχα (Εικόνα 76).



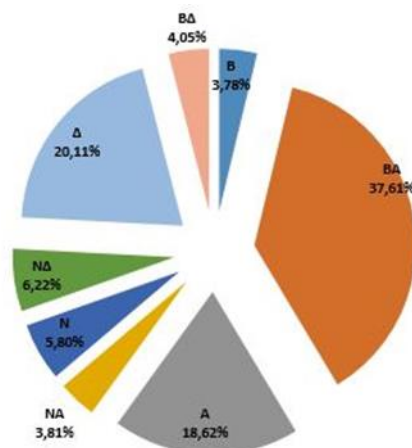
Εικόνα 76. Ποσοστιαία κατανομή των διευθύνσεων των ανέμων για τον μήνα Σεπτέμβριο (Ακτιο, έτη 1990 – 2021)

Οκτώβριος: Τον μήνα Οκτώβριο οι άνεμοι ισχυρότερης έντασης που παρατηρήθηκαν ήταν ο νότιος άνεμος (N) με εκτιμώμενη μέση ταχύτητα $12,72 \text{ km/h} = 3,53 \text{ m/s}$, ο νοτιοδυτικός άνεμος (NΔ) με εκτιμώμενη μέση ταχύτητα $12,59 \text{ km/h} = 3,76 \text{ m/s}$, ενώ υψηλές εντάσεις παρουσιάζουν επίσης ο ανατολικός άνεμος (A) με εκτιμώμενη μέση ταχύτητα $12,44 \text{ km/h} = 3,46 \text{ m/s}$, ο δυτικός (Δ) άνεμος, με εκτιμώμενη μέση ταχύτητα $11,95 \text{ km/h} = 3,32 \text{ m/s}$ και ο βορειοδυτικός (BΔ) άνεμος, με εκτιμώμενη μέση ταχύτητα $11,65 \text{ km/h} = 3,24 \text{ m/s}$ (Εικόνα 77).



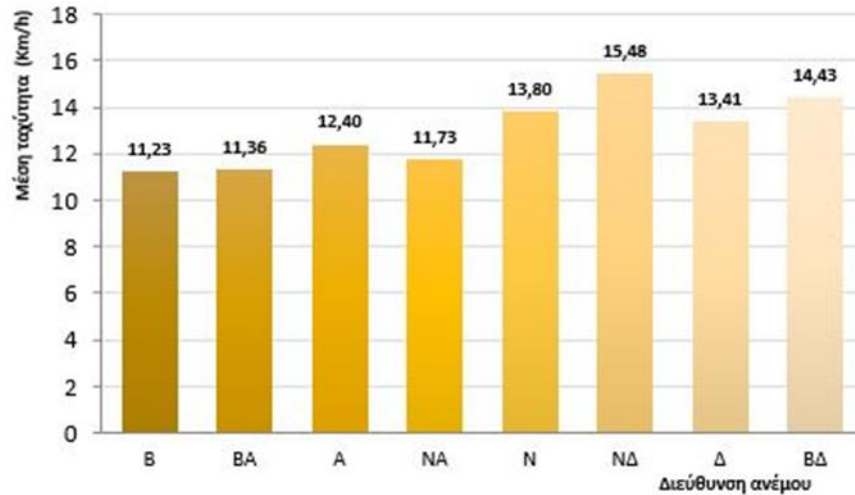
Εικόνα 77. Εκτιμώμενη μέση ταχύτητα ανά διεύθυνση ανέμου για τον μήνα Οκτώβριο στην περιοχή του Ακτίου (έτη 1990 – 2021)

Αναφορικά με τη συχνότητα εμφάνισης των ανέμων για τον μήνα Οκτώβριο στην περιοχή του Ακτίου, παρατηρήθηκε ότι το 37,61% των παρατηρήσεων ήταν βρειοανατολικοί (BA) άνεμοι και ακολουθούν οι δυτικοί (Δ) άνεμοι με συχνότητα εμφάνισης 20,11%. Οι υπόλοιποι άνεμοι που προαναφέρθηκαν, εμφανίζονται με συχνότητα 18,62% οι ανατολικοί (A) άνεμοι, 6,22% οι νοτιοδυτικοί (NΔ) άνεμοι, 5,80% οι νότιοι (N) άνεμοι και 4,05% οι βορειοδυτικοί (BΔ) άνεμοι (Εικόνα 78).



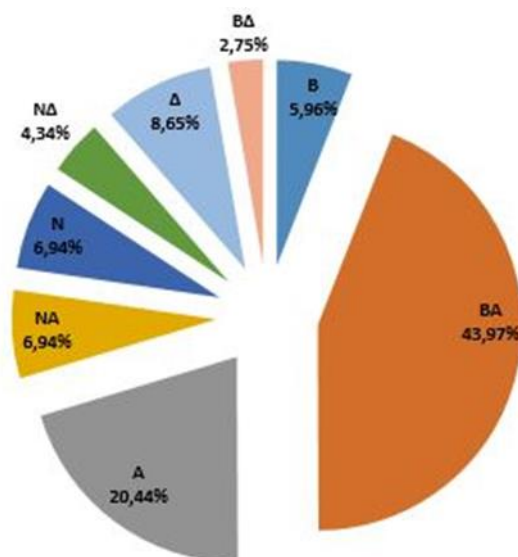
Εικόνα 78. Ποσοστιαία κατανομή των διευθύνσεων των ανέμων για τον μήνα Οκτώβριο (Άκτιο, έτη 1990 – 2021)

Νοέμβριος: Τον μήνα Νοέμβριο οι άνεμοι ισχυρότερης έντασης που παρατηρήθηκαν ήταν ο νοτιοδυτικός άνεμος (ΝΔ) με εκτιμώμενη μέση ταχύτητα $15,48 \text{ km/h} = 4,3 \text{ m/s}$, ο βορειοδυτικός άνεμος (ΒΔ) με εκτιμώμενη μέση ταχύτητα $14,43 \text{ km/h} = 4,01 \text{ m/s}$, ο νότιος άνεμος (Ν) με εκτιμώμενη μέση ταχύτητα $13,80 \text{ km/h} = 3,83 \text{ m/s}$ και ο δυτικός (Δ) άνεμος, με εκτιμώμενη μέση ταχύτητα $13,41 \text{ km/h} = 3,73 \text{ m/s}$ (Εικόνα 79).



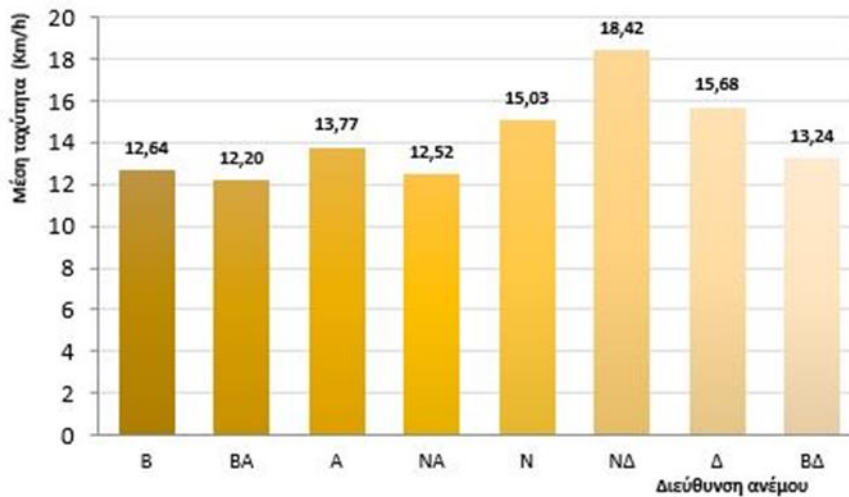
Εικόνα 79. Εκτιμώμενη μέση ταχύτητα ανά διεύθυνση ανέμου για τον μήνα Νοέμβριο στην περιοχή του Ακτίου (έτη 1990 – 2021)

Σχετικά με τη συχνότητα εμφάνισης των ανέμων για τον μήνα Νοέμβριο στην περιοχή του Ακτίου, παρατηρήθηκε ότι το 43,97% των παρατηρήσεων ήταν βορειοανατολικοί (ΒΑ) άνεμοι, ενώ οι άνεμοι που προαναφέρθηκαν, εμφανίζονται με συχνότητα 8,65% οι δυτικοί (Δ) άνεμοι, 6,94% οι νότιοι (Ν) άνεμοι, 4,34% οι νοτιοδυτικοί (ΝΔ) άνεμοι και 2,75% οι βορειοδυτικοί (ΒΔ) άνεμοι (Εικόνα 80).



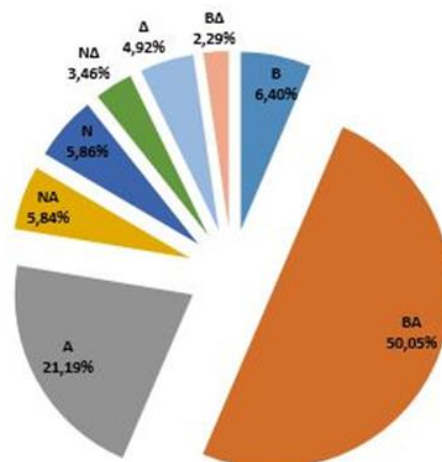
Εικόνα 80. Ποσοστιαία κατανομή των διευθύνσεων των ανέμων για τον μήνα Νοέμβριο (Ακτιο, έτη 1990 – 2021)

Δεκέμβριος: Τον μήνα Δεκέμβριο οι άνεμοι ισχυρότερης έντασης που παρατηρήθηκαν ήταν ο νοτιοδυτικός άνεμος (ΝΔ) με εκτιμώμενη μέση ταχύτητα $18,42 \text{ km/h} = 5,12 \text{ m/s}$, ο δυτικός άνεμος (Δ) με εκτιμώμενη μέση ταχύτητα $15,68 \text{ km/h} = 4,36 \text{ m/s}$ και ο νότιος (Ν) άνεμος με εκτιμώμενη μέση ταχύτητα $15,03 \text{ km/h} = 4,18 \text{ m/s}$, ενώ υψηλές εντάσεις παρουσιάζουν επίσης ο ανατολικός άνεμος (Α) με εκτιμώμενη μέση ταχύτητα $13,77 \text{ km/h} = 3,83 \text{ m/s}$ και ο βορειοδυτικός (ΒΔ) άνεμος, με εκτιμώμενη μέση ταχύτητα $13,24 \text{ km/h} = 3,68 \text{ m/s}$ (Εικόνα 81).



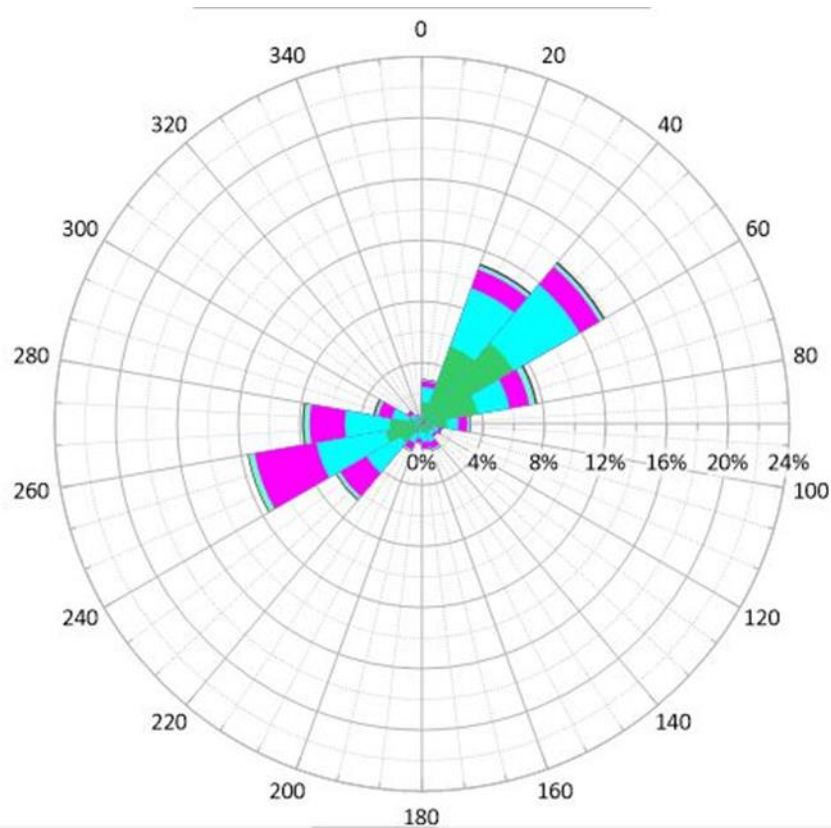
Εικόνα 81. Εκτιμώμενη μέση ταχύτητα ανά διεύθυνση ανέμου για τον μήνα Δεκέμβριο στην περιοχή του Ακτίου (έτη 1990 – 2021)

Αναφορικά με τη συχνότητα εμφάνισης των ανέμων για τον μήνα Δεκέμβριο στην περιοχή του Ακτίου, παρατηρήθηκε ότι το 50,05% των παρατηρήσεων ήταν βρειοανατολικοί (ΒΑ) και το 21,19% ήταν ανατολικοί (Α) άνεμοι, ενώ οι προαναφερθέντες άνεμοι εμφανίζονται με συχνότητα 5,86% οι νότιοι (Ν) άνεμοι, 4,92% οι δυτικοί (Δ) άνεμοι, 3,46% οι νοτιοδυτικοί (ΝΔ) άνεμοι και 2,29% οι βορειοδυτικοί (ΒΔ) άνεμοι (Εικόνα 82).



Εικόνα 82. Ποσοστιαία κατανομή των διευθύνσεων των ανέμων για τον μήνα Δεκέμβριο (Άκτιο, έτη 1990 – 2021)

Από τα πρωτογενή δεδομένα που παραχωρήθηκαν από την Ε.Μ.Υ. για το σύνολο των 32 ετών, προκύπτει το παρακάτω ροδόγραμμα ανέμων για την περιοχή του Ακτίου (Εικόνα 83):



Εικόνα 83. Ροδόγραμμα απεικόνισης ανεμολογικών στοιχείων για την περιοχή του Ακτίου στο σύνολο των ετών μεταξύ 1990 και 2021

Στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 2), παρουσιάζονται αθροιστικά οι συχνότητες εμφάνισης των ανέμων, στο σύνολο των ετών και των μηνών, όπως προέκυψαν μετά από στατιστική επεξεργασία των πρωτογενών δεδομένων. Με κόκκινο χρώμα επισημαίνονται οι άνεμοι που δημιουργούν κύματα προς την ακτή:

Πίνακας 2. Συχνότητες εμφάνισης ανέμων μετά από στατιστική επεξεργασία – Άκτιο
(Irodimatoroulou et al., 2023)

Συχνότητα	B	BA	A	NA	N	NΔ	Δ	ΒΔ
Άπνοια	0.189	0.585	0.586	0.164	0.131	0.112	0.239	0.125
Ασθενής	3.521	26.298	9.979	2.694	3.370	6.810	16.143	2.440
Μέτριος	0.669	5.216	3.309	0.690	1.363	3.552	9.734	1.002
Ισχυρός	0.057	0.301	0.232	0.043	0.064	0.129	0.111	0.093
Ορμητικός	0.003	0.011	0.006	0.008	0.001	0.003	0.006	0.006
ΣΥΝΟΛΟ	4.438	32.421	14.110	3.599	4.928	10.606	26.233	3.665

Στον πίνακα που ακολουθεί (Πίνακας 3) παρουσιάζονται οι ταχύτητες πνοής του ανέμου U_{10} . Η ταχύτητα αφορά μόνο τις διευθύνσεις του ανέμου που δημιουργεί κύματα προς την ακτή. Για την περιοχή του Ακτίου, όπως προαναφέρθηκε, οι άνεμοι αυτοί είναι **δυτικοί (Δ)**, **νοτιοδυτικοί (ΝΔ)** και **βορειοδυτικοί (ΒΔ)**.

Πίνακας 3. Ταχύτητες πνοής ανέμου U_{10} (m/s) ανά διεύθυνση – Άκτιο

Δυτικοί	Νοτιοδυτικοί	Βορειοδυτικοί
3,89	3,97	3,66

Τα μήκη ανάπτυξης που υπολογίσθηκαν για την περιοχή του Ακτίου είναι τα παρακάτω:

$$F_{45} = 351,17 \text{ km}$$

$$F_{30} = 231,5 \text{ km}$$

$$F_{15} = 78,43 \text{ km}$$

$$F_0 = 353,56 \text{ km}$$

$$F_{-15} = 514,8 \text{ km}$$

$$F_{-30} = 1048,02 \text{ km}$$

$$F_{-45} = 7,87 \text{ km}$$

Χρησιμοποιώντας τα παραπάνω δεδομένα, υπολογίζουμε το αποτελεσματικό μήκος ανάπτυξης, υπολογίζεται σε $F_{eff} = 336,65 \text{ km} = 336652,1 \text{ m}$.

Οι υπολογισμοί για το H_s και το T_p γίνονται ξεχωριστά για κάθε διεύθυνση ανέμου που δημιουργεί κύματα προς την ακτή. Οπότε, εφόσον γνωρίζουμε τις αρχικές ταχύτητες U_{10} υπολογίζουμε ακολούθως τη ρυθμισμένη ταχύτητα ανέμου U_A , μέσω του τύπου:

$$U_A = 0,71 \cdot U_{10}^{1,23}$$

Οπότε, οι ρυθμισμένες ταχύτητες ανέμου διαμορφώνονται όπως παρουσιάζονται στον Πίνακα 4:

Πίνακας 4. Ρυθμισμένες ταχύτητες ανέμου U_A (m/s) ανά διεύθυνση - Άκτιο

Δυτικοί	Νοτιοδυτικοί	Βορειοδυτικοί
3,78	3,87	3,50

Κάνοντας τον έλεγχο της ανίσωσης $g \cdot F / U_A^2 > 22800$ παρατηρούμε ότι η ανίσωση ισχύει και στις τρεις περιπτώσεις, οπότε προχωράμε για κάθε περίπτωση ξεχωριστά να υπολογίσουμε με τη μέθοδο **Pierson – Moskowitz** το σημαντικό ύψος του κύματος H_s και την περίοδό του T_p . Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.

Πίνακας 5. Σημαντικά ύψη και περίοδοι κύματος - Άκτιο

	Δυτικοί	Νοτιοδυτικοί	Βορειοδυτικοί
H_s (m)	0,35	0,37	0,30
T_p (sec)	3,13	3,21	2,90

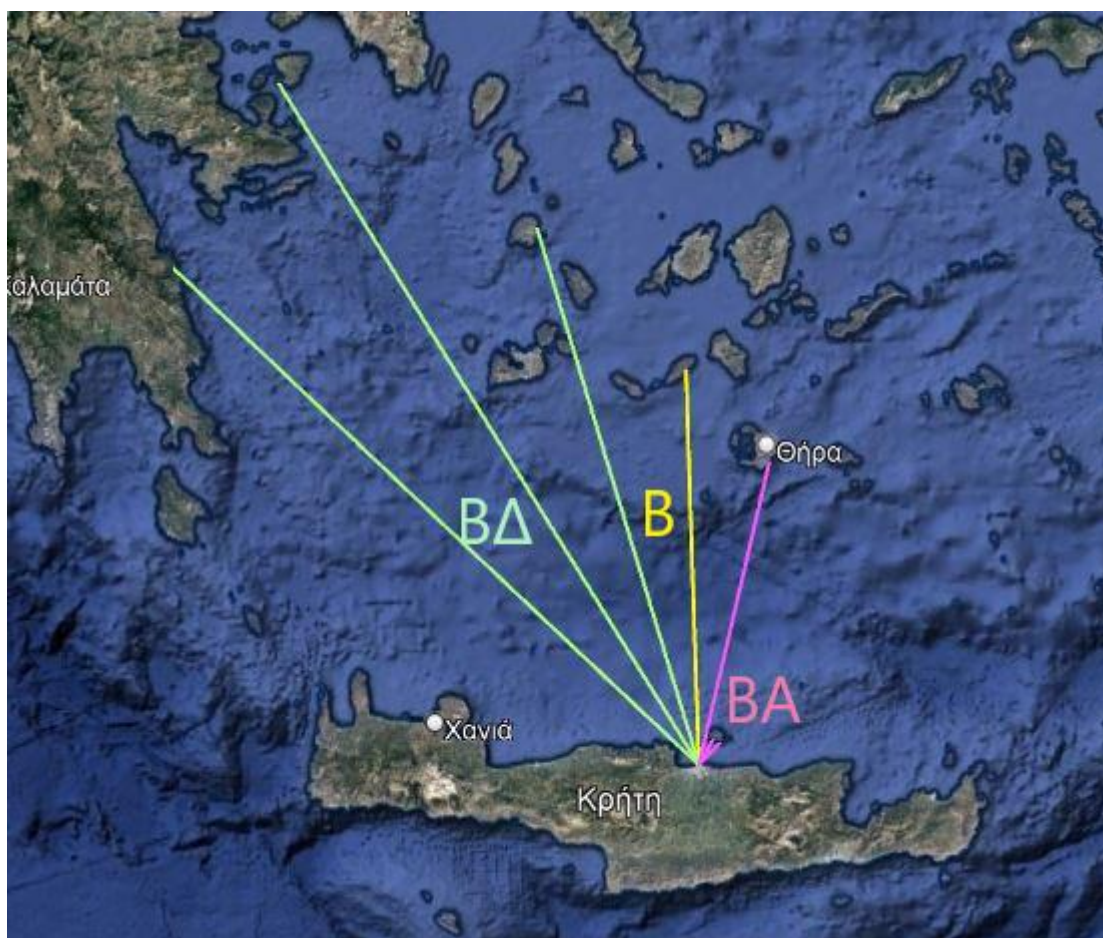
Στον πίνακα που ακολουθεί (Πίνακας 6), παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της εφαρμογής του αριθμητικού μοντέλου WAVEN, για την αξιοποιήσιμη ενέργεια ανά περιοχή ανά μήνα:

Πίνακας 6. Η αξιοποιήσιμη ενέργεια ανά μήνα για την περιοχή του Ακτίου (Irodimatoroulou et al., 2023)

	H	T	Thress	P
Ιανουάριος	0.39	3.28	4.10	0.10
Φεβρουάριος	0.41	3.38	4.10	0.10
Μάρτιος	0.36	3.17	4.10	0.10
Απρίλιος	0.34	3.05	4.10	0.10
Μάιος	0.29	2.84	4.10	0.09
Ιούνιος	0.35	3.12	4.10	0.10
Ιούλιος	0.34	3.06	4.10	0.10
Αύγουστος	0.34	3.05	4.10	0.10
Σεπτέμβριος	0.32	2.99	4.10	0.04
Οκτώβριος	0.24	2.58	4.05	0.03
Νοέμβριος	0.36	3.14	4.10	0.05
Δεκέμβριος	0.46	3.55	4.15	0.14

3.1.2 Περιοχή Ηρακλείου - Αποτελέσματα

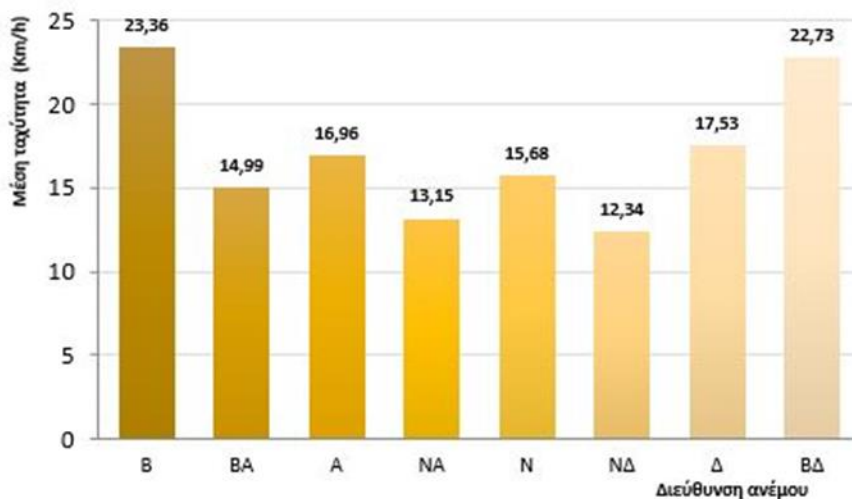
Στην περιοχή του Ηρακλείου οι άνεμοι αυτοί είναι **βόρειοι (B)**, **βορειοδυτικοί (BΔ)** και **βορειοανατολικοί (BA)**, όπως απεικονίζεται και στην *Εικόνα 84*. Λόγω του όγκου των δεδομένων, η επεξεργασία τους έγινε, αρχικά ανά μήνα και έπειτα, βάσει αυτών των δεδομένων υπολογίστηκαν το ύψος κύματος H_s και η περίοδος T_p για το σύνολο των ετών. Έγινε επεξεργασία και στατιστική ανάλυση του συνόλου των πρωτογενών δεδομένων, και κατόπιν, για τα κύματα που δημιουργούνται από τους προαναφερθέντες ανέμους, εφαρμόστηκε το αριθμητικό μοντέλο. Τα αποτελέσματα της επεξεργασίας αυτής παρατίθενται παρακάτω:



Εικόνα 84. Απεικόνιση της διεύθυνσης των ανέμων που δημιουργούν κύματα προς την ακτή στην περιοχή του Ηρακλείου, απεικόνιση μέσω Google Earth

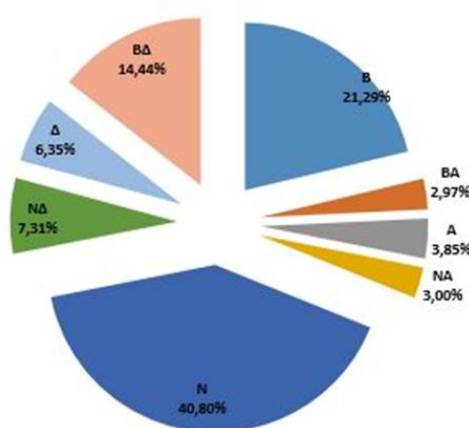
Ιανουάριος: Τον μήνα Ιανουάριο, στην περιοχή του Ηρακλείου, οι άνεμοι ισχυρότερης έντασης που παρατηρήθηκαν ήταν ο **βόρειος (B) άνεμος** με εκτιμώμενη μέση ταχύτητα $23,36 \text{ km/h} = 6,4 \text{ m/s}$ και ο **βορειοδυτικός άνεμος (BΔ)** με εκτιμώμενη μέση ταχύτητα $22,73 \text{ km/h} = 6,31 \text{ m/s}$. Ικανοποιητική ένταση παρουσιάζουν επίσης ο δυτικός άνεμος (Δ) με εκτιμώμενη

μέση ταχύτητα $17,53 \text{ km/h} = 4,87 \text{ m/s}$ και ο ανατολικός (A) άνεμος, με εκτιμώμενη μέση ταχύτητα $16,96 \text{ km/h} = 4,71 \text{ m/s}$. Ο βορειοανατολικός (BA) άνεμος έχει εκτιμώμενη μέση ταχύτητα $14,99 \text{ km/h} = 4,16 \text{ m/s}$ (Εικόνα 85).



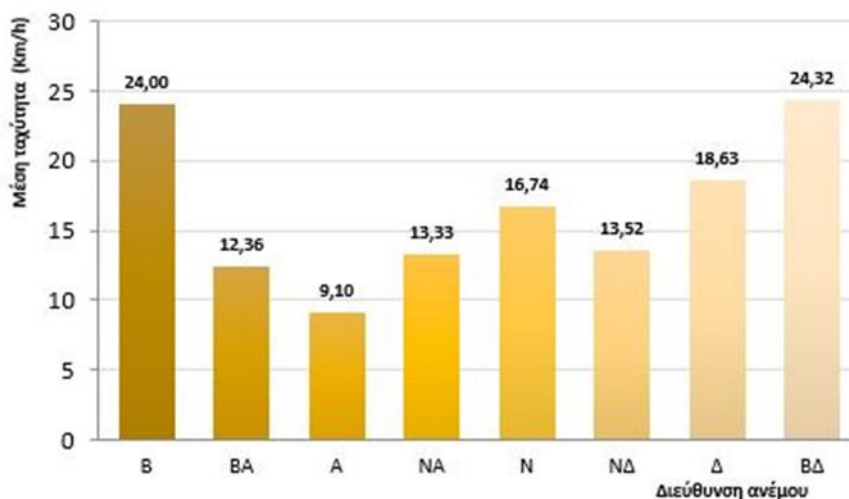
Εικόνα 85. Εκτιμώμενη μέση ταχύτητα ανά διεύθυνση ανέμου για τον μήνα Ιανουάριο στην περιοχή του Ηρακλείου (έτη 1990 – 2021)

Αναφορικά με τη συχνότητα εμφάνισης των ανέμων για τον μήνα Ιανουάριο στην περιοχή του Ηρακλείου, παρατηρήθηκε ότι το 40,80% των παρατηρήσεων ήταν νότιοι (N) άνεμοι και το 21,29% ήταν βόρειοι (B) άνεμοι, ενώ οι προαναφερθέντες άνεμοι εμφανίζονται με συχνότητα 14,44% οι βορειοδυτικοί (ΒΔ) άνεμοι, 6,35% οι δυτικοί (Δ) άνεμοι, 3,85% οι ανατολικοί (A) άνεμοι και 2,97% οι βορειοανατολικοί (BA) άνεμοι. (Εικόνα 86)



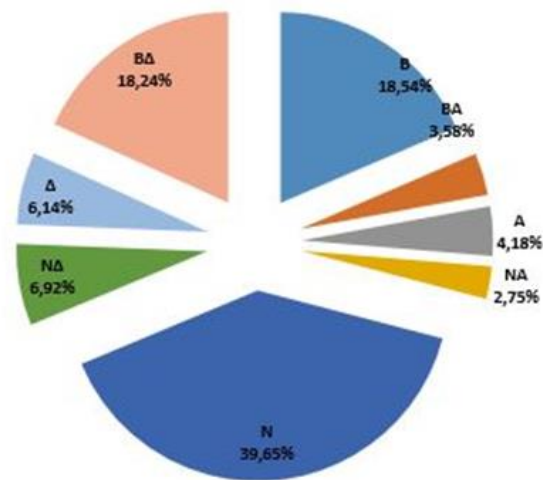
Εικόνα 86. Ποσοστιαία κατανομή των διευθύνσεων των ανέμων για τον μήνα Ιανουάριο (Ηράκλειο, έτη 1990 – 2021)

Φεβρουάριος: Τον μήνα Φεβρουάριο οι άνεμοι ισχυρότερης έντασης που παρατηρήθηκαν στην περιοχή του Ηρακλείου, ήταν ο βορειοδυτικός άνεμος (ΒΔ) με εκτιμώμενη μέση ταχύτητα $24,32 \text{ km/h} = 6,76 \text{ m/s}$, ο βόρειος άνεμος (Β) με εκτιμώμενη μέση ταχύτητα $24,00 \text{ km/h} = 6,67 \text{ m/s}$, ενώ ικανοποιητικές εντάσεις παρουσιάζουν επίσης, ο νότιος άνεμος (Ν) με εκτιμώμενη μέση ταχύτητα $16,74 \text{ km/h} = 4,65 \text{ m/s}$ και ο δυτικός (Δ) άνεμος με εκτιμώμενη μέση ταχύτητα $18,63 \text{ km/h} = 5,18 \text{ m/s}$. Ο βορειοανατολικός (ΒΑ) άνεμος, έχει μέση εκτιμώμενη ταχύτητα $12,36 \text{ km/h} = 3,43 \text{ m/s}$ (Εικόνα 87).



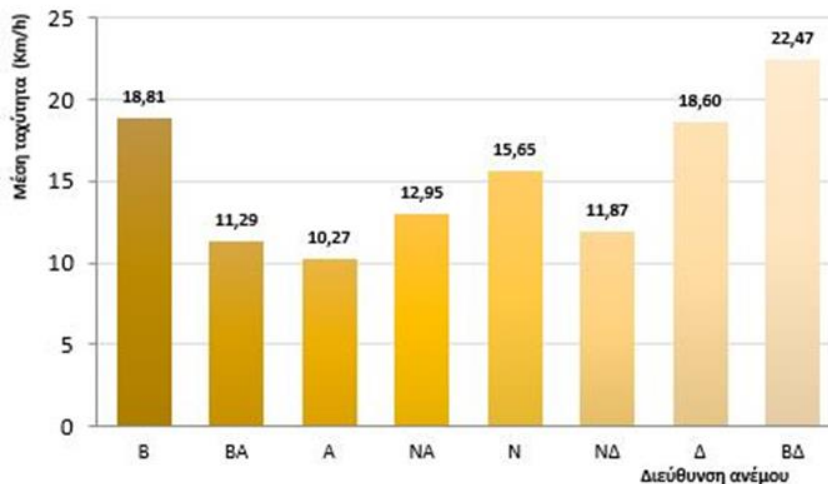
Εικόνα 87. Εκτιμώμενη μέση ταχύτητα ανά διεύθυνση ανέμου για τον μήνα Φεβρουάριο στην περιοχή του Ηρακλείου (έτη 1990 – 2021)

Σχετικά με τη συχνότητα εμφάνισης των ανέμων τον μήνα Φεβρουάριο στην περιοχή του Ηρακλείου, παρατηρήθηκε ότι οι νότιοι (Ν) άνεμοι εμφανίζονται με συχνότητα 39,65%, οι βορειοδυτικοί (ΒΔ) άνεμοι εμφανίζονται με συχνότητα 18,24%, και οι βόρειοι (Β) άνεμοι εμφανίζονται με συχνότητα 18,54%. Η συχνότητα εμφάνισης των δυτικών (Δ) ανέμων, που αναφέρθηκαν παραπάνω, είναι 6,14% και των βορειοανατολικών 3,58% (Εικόνα 88).



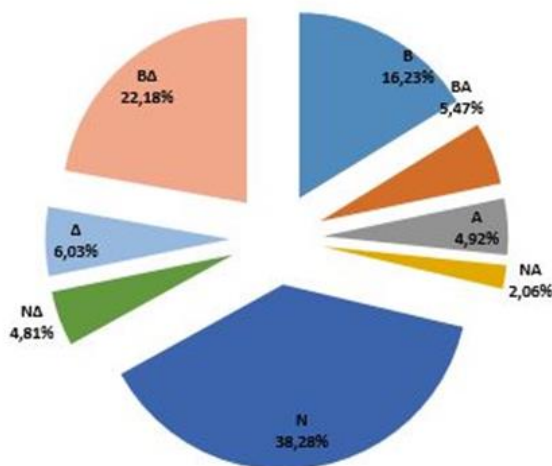
Εικόνα 88. Ποσοστιαία κατανομή των διευθύνσεων των ανέμων για τον μήνα Φεβρουάριο (Ηράκλειο, έτη 1990 – 2021)

Μάρτιος: Τον μήνα Μάρτιο οι άνεμοι ισχυρότερης έντασης που παρατηρήθηκαν ήταν ο βορειοδυτικός άνεμος (BΔ) με εκτιμώμενη μέση ταχύτητα $22,47 \text{ km/h} = 6,24 \text{ m/s}$ και ο βόρειος άνεμος (B) με εκτιμώμενη μέση ταχύτητα $18,81 \text{ km/h} = 5,23 \text{ m/s}$, ενώ σχετικά ισχυρή ένταση παρουσιάζει ο δυτικός (Δ) άνεμος με εκτιμώμενη μέση ταχύτητα $18,60 \text{ km/h} = 5,17 \text{ m/s}$ και ο νότιος (N) άνεμος με εκτιμώμενη μέση ταχύτητα $15,65 \text{ km/h} = 4,35 \text{ m/s}$. Ο βορειοανατολικός (BA) άνεμος έχει μέση εκτιμώμενη ταχύτητα $11,29 \text{ km/h} = 3,14 \text{ m/s}$ (Εικόνα 89).



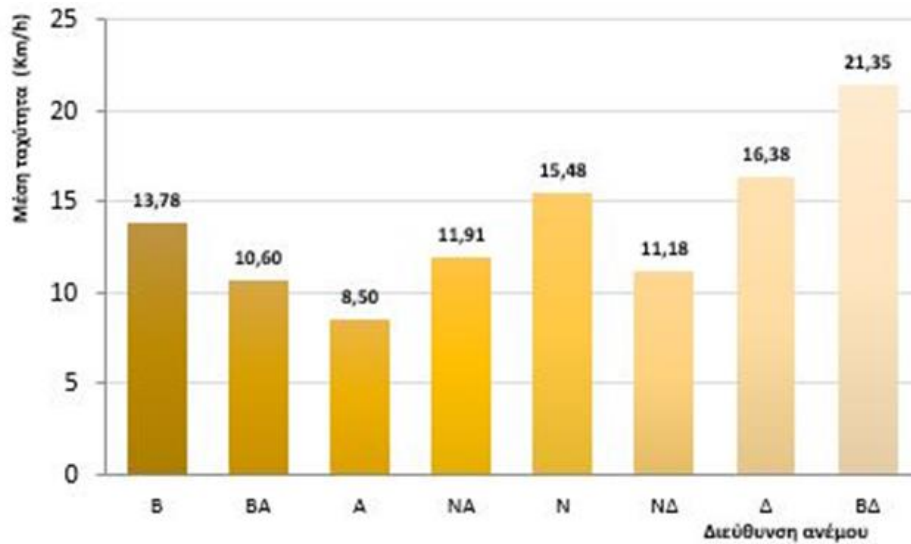
Εικόνα 89. Εκτιμώμενη μέση ταχύτητα ανά διεύθυνση ανέμου για τον μήνα Μάρτιο στην περιοχή του Ηρακλείου (έτη 1990 – 2021)

Αναφορικά με τη συχνότητα εμφάνισης των ανέμων για τον μήνα Μάρτιο στην περιοχή του Ηρακλείου, παρατηρήθηκε ότι το 38,28% των παρατηρήσεων ήταν νότιοι (N) άνεμοι και ακολουθούν οι βορειοδυτικοί (ΒΔ) άνεμοι με συχνότητα εμφάνισης 22,18%. Οι υπόλοιποι άνεμοι που αναφέρθηκαν παραπάνω, εμφανίζονται με συχνότητα 6,03% οι δυτικοί (Δ) άνεμοι και 16,23% οι βόρειοι (B) άνεμοι. Οι βορειοανατολικοί (ΒΑ) άνεμοι παρατηρήθηκαν σε συχνότητα 5,47% (Εικόνα 90).



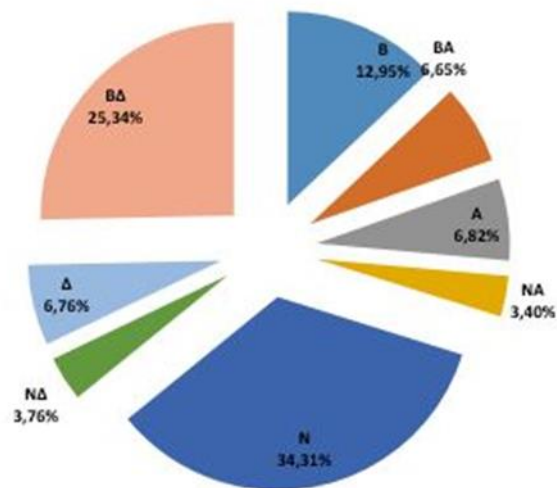
Εικόνα 90. Ποσοστιαία κατανομή των διευθύνσεων των ανέμων για τον μήνα Μάρτιο (Ηράκλειο, έτη 1990 – 2021)

Απρίλιος: Τον μήνα Απρίλιο, ο άνεμος ισχυρότερης έντασης που παρατηρήθηκε στην περιοχή του Ηρακλείου, ήταν ο βορειοδυτικός άνεμος (ΒΔ) με εκτιμώμενη μέση ταχύτητα $21,35 \text{ km/h} = 5,93 \text{ m/s}$. Ακολουθούν με σχετικά ισχυρή ένταση, ο δυτικός άνεμος (Δ) με εκτιμώμενη μέση ταχύτητα $16,38 \text{ km/h} = 4,55 \text{ m/s}$ και ο νότιος άνεμος (N) με εκτιμώμενη μέση ταχύτητα $15,48 \text{ km/h} = 4,3 \text{ m/s}$. Ο βόρειος (B) και ο βορειοανατολικός άνεμος, έχουν μέση εκτιμώμενη ταχύτητα $13,78 \text{ km/h} = 3,83 \text{ m/s}$ και $10,60 \text{ km/h} = 2,94 \text{ m/s}$ αντίστοιχα (Εικόνα 91).



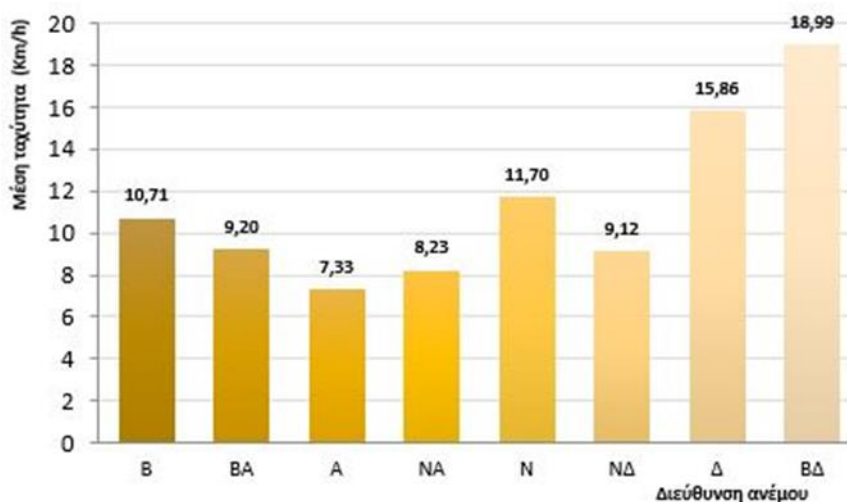
Εικόνα 91. Εκτιμώμενη μέση ταχύτητα ανά διεύθυνση ανέμου για τον μήνα Απρίλιο στην περιοχή του Ηρακλείου (έτη 1990 – 2021)

Όσον αφορά τη συχνότητα εμφάνισης των ανέμων για τον μήνα Απρίλιο στην περιοχή του Ακτίου, παρατηρήθηκε ότι το 34,31% των παρατηρήσεων ήταν νότιοι (N) άνεμοι και ακολουθούν οι βορειοανατολικοί (BA) άνεμοι με συχνότητα εμφάνισης 25,34%, ενώ οι δυτικοί (Δ) άνεμοι εμφανίζονται με συχνότητα 6,76%. Οι βόρειοι (B) άνεμοι έχουν συχνότητα εμφάνισης 12,95% και οι βορειοδυτικοί (BΔ) 25,34% (Εικόνα 92).



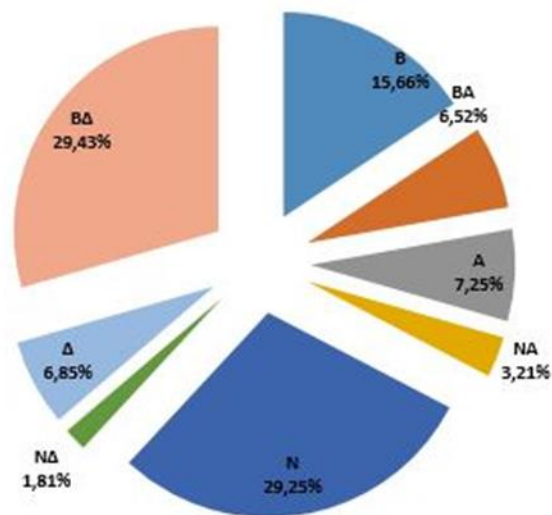
Εικόνα 92. Ποσοστιαία κατανομή των διευθύνσεων των ανέμων για τον μήνα Απρίλιο (Ηράκλειο, έτη 1990 – 2021)

Μάιος: Τον μήνα Μάιο οι άνεμοι ισχυρότερης έντασης που παρατηρήθηκαν ήταν ο βορειοδυτικός άνεμος (ΒΔ) με εκτιμώμενη μέση ταχύτητα $18,99 \text{ km/h} = 5,28 \text{ m/s}$ και ο δυτικός άνεμος (Δ) με εκτιμώμενη μέση ταχύτητα $15,86 \text{ km/h} = 4,41 \text{ m/s}$. Σχετικά ισχυρή ένταση παρουσιάζει και ο νότιος άνεμος (Ν) με εκτιμώμενη μέση ταχύτητα $11,70 \text{ km/h} = 3,25 \text{ m/s}$. Ο βόρειος (Β) άνεμος έχει μέση εκτιμώμενη ταχύτητα $10,71 \text{ km/h} = 2,98 \text{ m/s}$ και ο βορειοανατολικός (ΒΑ) άνεμος έχει μέση εκτιμώμενη ταχύτητα $9,20 \text{ km/h} = 2,56 \text{ m/s}$ (Εικόνα 93).



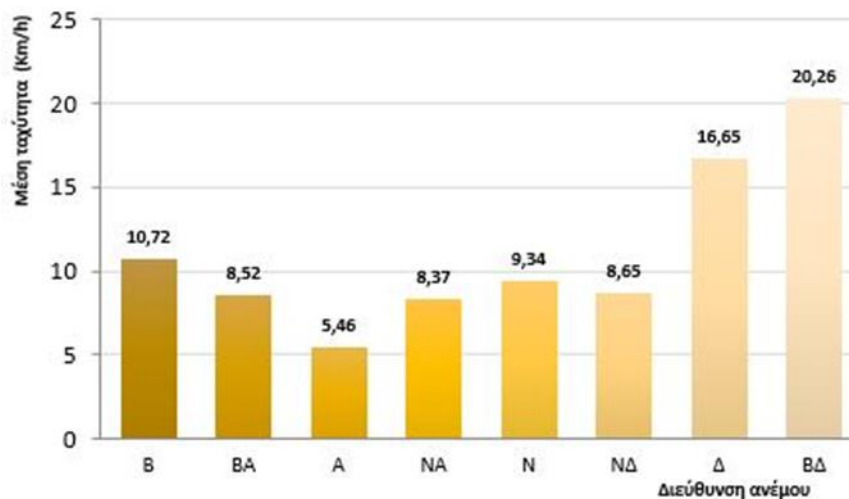
Εικόνα 93. Εκτιμώμενη μέση ταχύτητα ανά διεύθυνση ανέμου για τον μήνα Μάιο στην περιοχή του Ηρακλείου (έτη 1990 – 2021)

Σχετικά με τη συχνότητα εμφάνισης των ανέμων για τον μήνα Μάιο στην περιοχή του Ηρακλείου, παρατηρήθηκε ότι το 29,43% των παρατηρήσεων ήταν βορειοδυτικοί (ΒΔ) άνεμοι και ακολουθούν οι νότιοι άνεμοι (Ν) με συχνότητα εμφάνισης 29,25%. Οι δυτικοί (Δ) άνεμοι εμφανίζονται με συχνότητα 6,85%. Η συχνότητα εμφάνισης των βόρειων και των βορειοανατολικών ανέμων είναι 15,66% και 6,52% αντίστοιχα (Εικόνα 94).



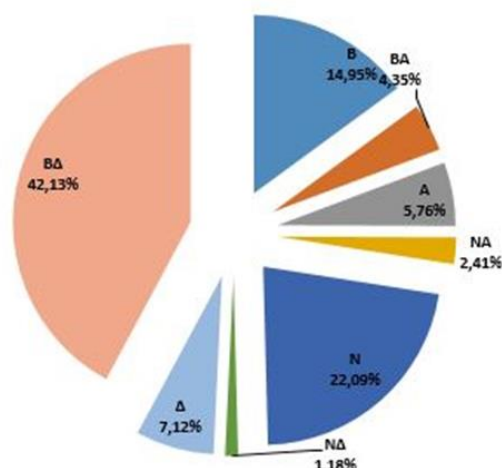
Εικόνα 94. Ποσοστιαία κατανομή των διευθύνσεων των ανέμων για τον μήνα Μάιο (Ηράκλειο, έτη 1990 – 2021)

Ιούνιος: Τον μήνα Ιούνιο οι άνεμοι ισχυρότερης έντασης που παρατηρήθηκαν ήταν ο βορειοδυτικός άνεμος (BΔ) με εκτιμώμενη μέση ταχύτητα $20,26 \text{ km/h} = 5,63 \text{ m/s}$ και ο δυτικός άνεμος (Δ) με εκτιμώμενη μέση ταχύτητα $16,65 \text{ km/h} = 4,63 \text{ m/s}$. Ο βόρειος (B) και ο βορειοανατολικός (BA) άνεμος έχουν μέση εκτιμώμενη ταχύτητα $10,72 \text{ km/h} = 2,98 \text{ m/s}$ και $8,52 \text{ km/h} = 2,37 \text{ m/s}$ αντίστοιχα (Εικόνα 95).



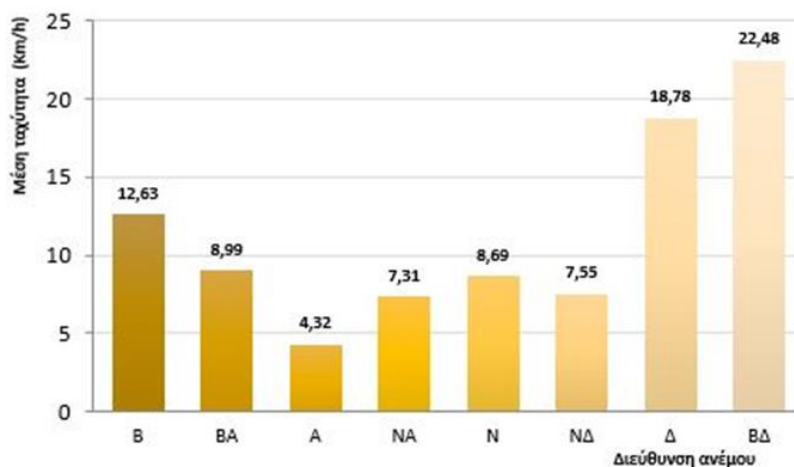
Εικόνα 95. Εκτιμώμενη μέση ταχύτητα ανά διεύθυνση ανέμου για τον μήνα Ιούνιο στην περιοχή του Ηρακλείου (έτη 1990 – 2021)

Αναφορικά με τη συχνότητα εμφάνισης των ανέμων για τον μήνα Ιούνιο στην περιοχή του Ακτίου, παρατηρήθηκε ότι το 42,13% των παρατηρήσεων ήταν βορειοδυτικοί (ΒΔ) άνεμοι και ακολουθούν οι νότιοι άνεμοι (Ν) με συχνότητα εμφάνισης 22,09%. Επίσης, οι βόρειοι (Β) άνεμοι εμφανίζονται με συχνότητα 14,95%, ενώ οι βορειοανατολικοί (ΒΑ) άνεμοι εμφανίζονται με συχνότητα 4,35% (Εικόνα 96).



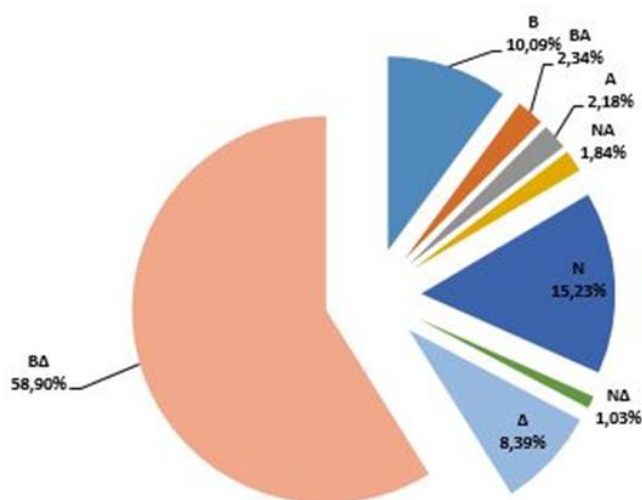
Εικόνα 96. Ποσοστιαία κατανομή των διευθύνσεων των ανέμων για τον μήνα Ιούνιο (Ηράκλειο, έτη 1990 – 2021)

Ιούλιος: Τον μήνα Ιούλιο οι άνεμοι ισχυρότερης έντασης που παρατηρήθηκαν ήταν ο βορειοδυτικός άνεμος (ΒΔ) με εκτιμώμενη μέση ταχύτητα $22,48 \text{ km/h} = 6,24 \text{ m/s}$ και ο δυτικός άνεμος (Δ) με εκτιμώμενη μέση ταχύτητα $18,78 \text{ km/h} = 5,22 \text{ m/s}$. Ο βόρειος (Β) άνεμος έχει μέση εκτιμώμενη ταχύτητα $12,63 \text{ km/h} = 3,51 \text{ m/s}$ και ο βορειοανατολικός (ΒΑ) άνεμος έχει μέση εκτιμώμενη ταχύτητα $8,99 \text{ km/h} = 2,50 \text{ m/s}$ (Εικόνα 97).



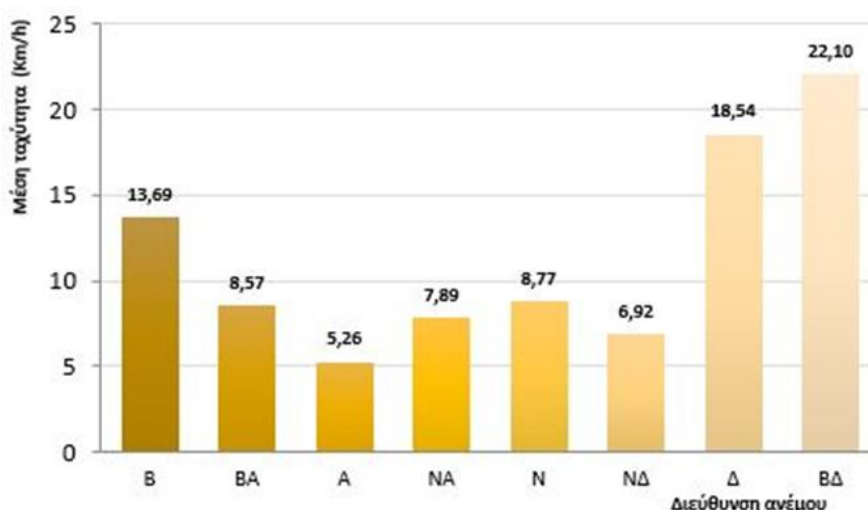
Εικόνα 97. Εκτιμώμενη μέση ταχύτητα ανά διεύθυνση ανέμου για τον μήνα Ιούλιο στην περιοχή του Ηρακλείου (έτη 1990 – 2021)

Σχετικά με τη συχνότητα εμφάνισης των ανέμων για τον μήνα Ιούλιο στην περιοχή του Ηρακλείου, παρατηρήθηκε ότι το 58,90% των παρατηρήσεων ήταν βορειοδυτικοί (ΒΔ) άνεμοι, γεγονός υποδεικνύει ότι στο νησί της Κρήτης, τον μήνα Ιούλιο, επιρατούν τα μελτέμια. Ακολουθούν οι νότιοι άνεμοι (N) με συχνότητα εμφάνισης 15,23%, ενώ και οι βόρειοι (B) άνεμοι παρουσιάζουν σχετικά υψηλή συχνότητα εμφάνισης, της τάξεως του 10,09%, ενώ οι βορειοανατολικοί (BA) άνεμοι παρουσιάζουν συχνότητα 2,34% (Εικόνα 98).



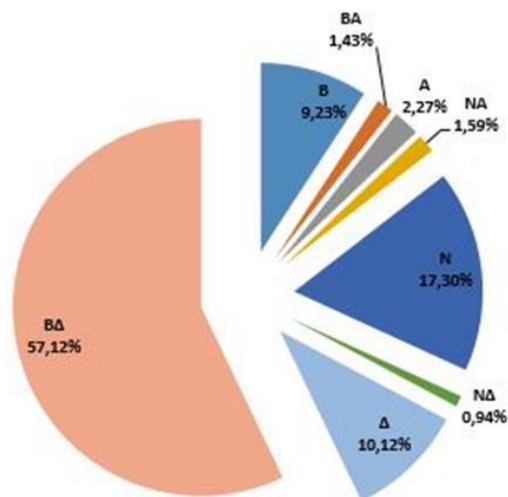
Εικόνα 98. Ποσοστιαία κατανομή των διευθύνσεων των ανέμων για τον μήνα Ιούλιο (Ηράκλειο, έτη 1990 – 2021)

Αύγουστος: Τον μήνα Αύγουστο οι άνεμοι ισχυρότερης έντασης που παρατηρήθηκαν ήταν ο βορειοδυτικός άνεμος (ΒΔ) με εκτιμώμενη μέση ταχύτητα 22,10 km/h = 6,14 m/s και ο δυτικός άνεμος (Δ) με εκτιμώμενη μέση ταχύτητα 18,54 km/h = 5,15 m/s. Ο βόρειος (B) άνεμος παρουσιάζει εκτιμώμενη μέση ταχύτητα 13,69 km/h = 3,80 m/s και ο βορειοανατολικός (BA) 8,57 km/h = 2,38 m/s (Εικόνα 99).



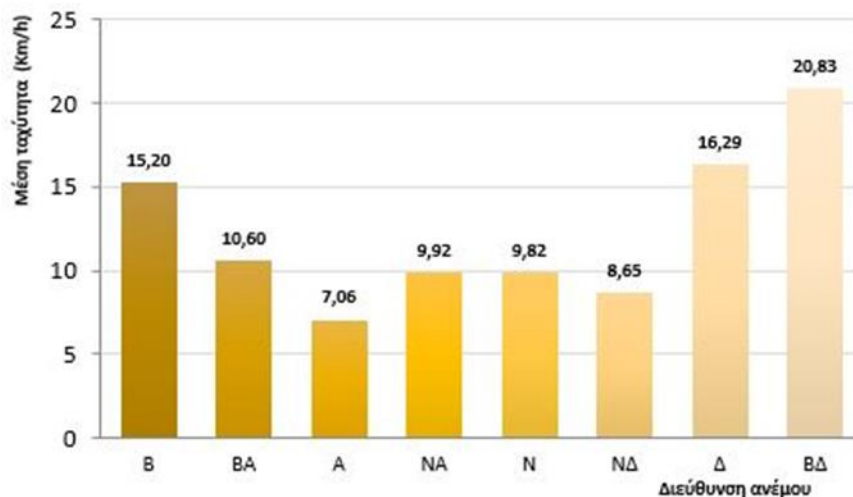
Εικόνα 99. Εκτιμώμενη μέση ταχύτητα ανά διεύθυνση ανέμου για τον μήνα Αύγουστο στην περιοχή του Ηρακλείου (έτη 1990 – 2021)

Εξετάζοντας τη συχνότητα εμφάνισης των ανέμων για τον μήνα Αύγουστο στην περιοχή του Ακτίου, παρατηρήθηκε ότι το 57,12% των παρατηρήσεων ήταν βορειοδυτικοί (ΒΔ) άνεμοι, γεγονός που οφείλεται επίσης στα μελέμια που επικρατούν στο νησί τους τελευταίους καλοκαιρινούς μήνες, και ακολουθούν οι νότιοι άνεμοι (Ν) με συχνότητα εμφάνισης 17,30%, οι δυτικοί (Δ) άνεμοι με συχνότητα 10,12%, και οι βόρειοι (Β) άνεμοι με συχνότητα εμφάνισης 9,23% (Εικόνα 100).



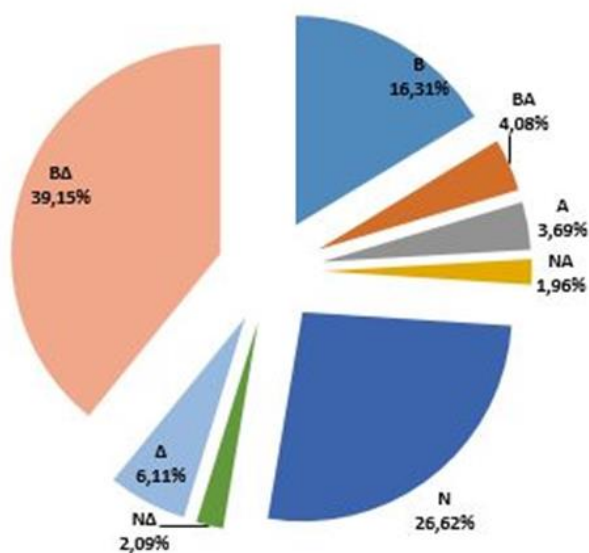
Εικόνα 100. Ποσοστιαία κατανομή των διευθύνσεων των ανέμων για τον μήνα Αύγουστο (Ηράκλειο, έτη 1990 – 2021)

Σεπτέμβριος: Τον μήνα Σεπτέμβριο οι άνεμοι ισχυρότερης έντασης που παρατηρήθηκαν ήταν ο βορειοδυτικός άνεμος (ΒΔ) με εκτιμώμενη μέση ταχύτητα $20,83 \text{ km/h} = 5,79 \text{ m/s}$, ο δυτικός άνεμος (Δ) με εκτιμώμενη μέση ταχύτητα $16,29 \text{ km/h} = 5,53 \text{ m/s}$, καθώς επίσης και ο βόρειος (Β) άνεμος με εκτιμώμενη μέση ταχύτητα $15,20 \text{ km/h} = 4,22 \text{ m/s}$. Ο βορειοανατολικός (ΒΑ) άνεμος έχει εκτιμώμενη μέση ταχύτητα $10,60 \text{ km/h} = 2,94 \text{ m/s}$ (Εικόνα 101).



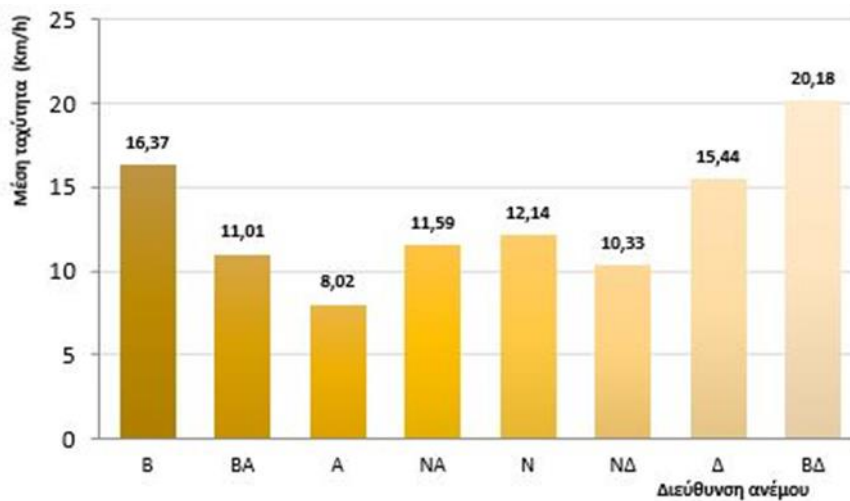
Εικόνα 101. Εκτιμώμενη μέση ταχύτητα ανά διεύθυνση ανέμου για τον μήνα Σεπτέμβριο στην περιοχή του Ηρακλείου (έτη 1990 – 2021)

Όσον αφορά τη συχνότητα εμφάνισης των ανέμων για τον μήνα Σεπτέμβριο στην περιοχή του Ακτίου, παρατηρήθηκε ότι το 39,15% των παρατηρήσεων ήταν βορειοδυτικοί (ΒΔ) άνεμοι και ακολουθούν οι νότιοι άνεμοι (N) με συχνότητα εμφάνισης 26,62%. Σημαντικό ποσοστό εμφάνισης παρουσιάζουν και οι βόρειοι (B) άνεμοι, της τάξεως του 16,31%, ενώ οι βορειοανατολικοί εμφανίζονται σε ποσοστό 4,08% (Εικόνα 102).



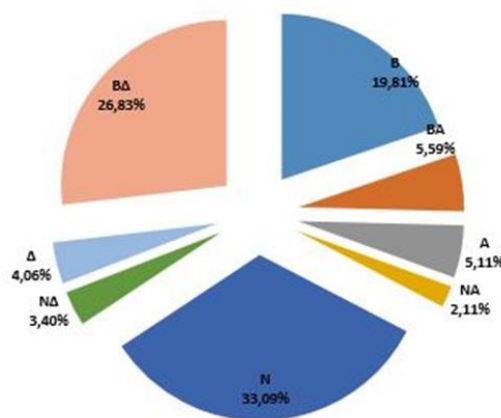
Εικόνα 102. Ποσοστιαία κατανομή των διευθύνσεων των ανέμων για τον μήνα Σεπτέμβριο (Ηράκλειο, έτη 1990 – 2021)

Οκτώβριος: Τον μήνα Οκτώβριο οι άνεμοι ισχυρότερης έντασης που παρατηρήθηκαν ήταν ο βορειοδυτικός (ΒΔ) άνεμος, με εκτιμώμενη μέση ταχύτητα $20,18 \text{ km/h} = 5,61 \text{ m/s}$, ο βόρειος (Β) άνεμος, με εκτιμώμενη μέση ταχύτητα $16,37 \text{ km/h} = 4,55 \text{ m/s}$, ενώ υψηλές εντάσεις παρουσιάζει επίσης και ο δυτικός (Δ) άνεμος, με εκτιμώμενη μέση ταχύτητα $15,44 \text{ km/h} = 4,29 \text{ m/s}$. Ο βορειοανατολικός (ΒΑ) άνεμος έχει με εκτιμώμενη μέση ταχύτητα $11,01 \text{ km/h} = 3,06 \text{ m/s}$ (Εικόνα 103).



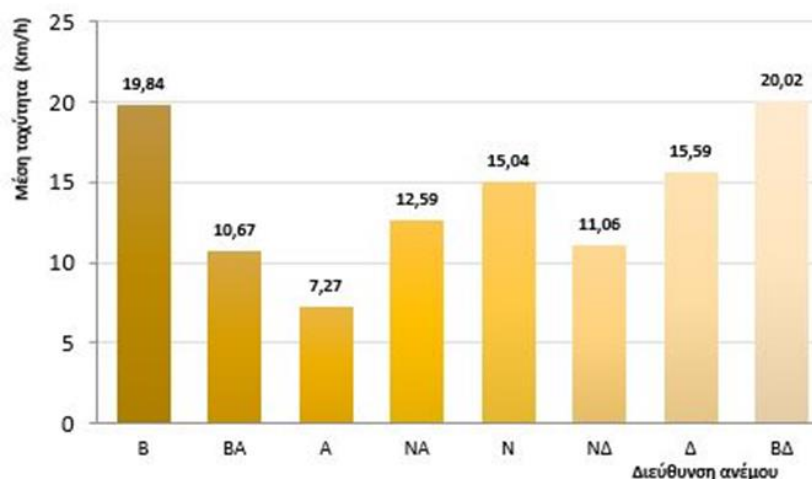
Εικόνα 103. Εκτιμώμενη μέση ταχύτητα ανά διεύθυνση ανέμου για τον μήνα Οκτώβριο στην περιοχή του Ηρακλείου (έτη 1990 – 2021)

Αναφορικά με τη συχνότητα εμφάνισης των ανέμων για τον μήνα Οκτώβριο στην περιοχή του Ακτίου, παρατηρήθηκε ότι το 33,09% των παρατηρήσεων ήταν νότιοι (N) άνεμοι και ακολουθούν οι βορειοδυτικοί (ΒΔ) άνεμοι με συχνότητα εμφάνισης 26,83%. Υψηλή συχνότητα εμφάνισης, παρουσιάζουν επίσης και οι βόρειοι (B) άνεμοι, με ποσοστό της τάξεως του 19,81%. Οι βορειοανατολικοί (ΒΑ) άνεμοι έχουν συχνότητα εμφάνισης 5,59% (Εικόνα 104).



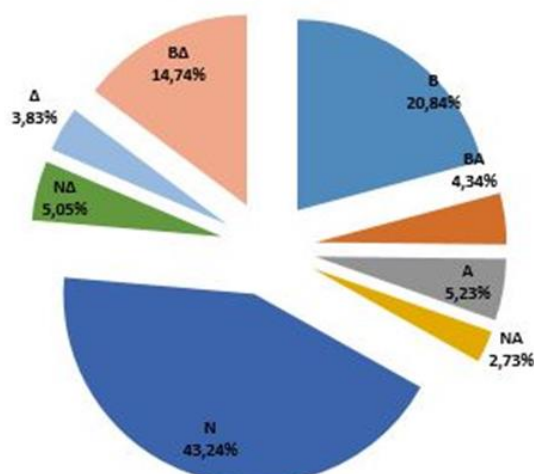
Εικόνα 104. Ποσοστιαία κατανομή των διευθύνσεων των ανέμων για τον μήνα Οκτώβριο (Ηράκλειο, έτη 1990 – 2021)

Νοέμβριος: Τον μήνα Νοέμβριο οι άνεμοι ισχυρότερης έντασης που παρατηρήθηκαν ήταν ο βορειοδυτικός άνεμος (ΒΔ) με εκτιμώμενη μέση ταχύτητα $20,02 \text{ km/h} = 5,56 \text{ m/s}$ και ο βόρειος άνεμος (Β) με εκτιμώμενη μέση ταχύτητα $19,84 \text{ km/h} = 5,51 \text{ m/s}$. Ικανοποιητικές εντάσεις παρουσιάζει και ο δυτικός άνεμος (Δ) με εκτιμώμενη μέση ταχύτητα $15,59 \text{ km/h} = 4,33 \text{ m/s}$ και ο νότιος (Ν) άνεμος, με εκτιμώμενη μέση ταχύτητα $15,04 \text{ km/h} = 4,56 \text{ m/s}$. Ο βορειοανατολικός (ΒΑ) άνεμος έχει μέση εκτιμώμενη ταχύτητα $10,67 \text{ km/h} = 2,96 \text{ m/s}$ (Εικόνα 105).



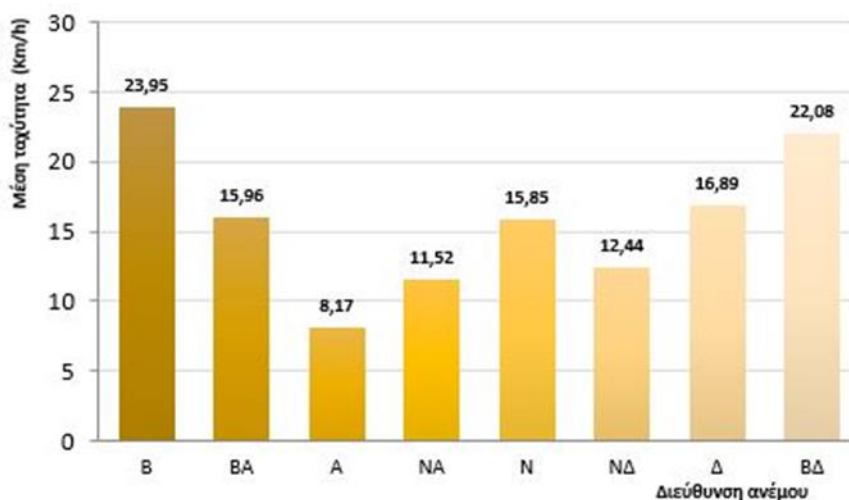
Εικόνα 105. Εκτιμώμενη μέση ταχύτητα ανά διεύθυνση ανέμου για τον μήνα Νοέμβριο στην περιοχή του Ηρακλείου (έτη 1990 – 2021)

Σχετικά με τη συχνότητα εμφάνισης των ανέμων για τον μήνα Νοέμβριο στην περιοχή του Ηρακλείου, παρατηρήθηκε ότι το 43,24% των παρατηρήσεων ήταν νότιοι (Ν) άνεμοι, ενώ με υψηλή συχνότητα εμφανίζεται επίσης ο βόρειος (Β) άνεμος, με ποσοστό εμφάνισης 20,84% και ο βορειοδυτικός (ΒΔ) άνεμος με συχνότητα 14,74%. Ο βορειοανατολικός (ΒΑ) άνεμος έχει συχνότητα εμφάνισης 4,34% (Εικόνα 106).



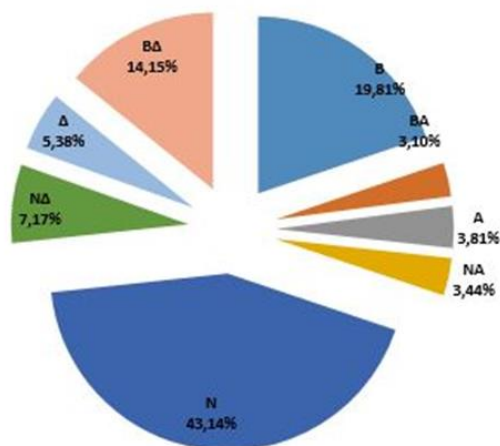
Εικόνα 106. Ποσοστιαία κατανομή των διευθύνσεων των ανέμων για τον μήνα Νοέμβριο (Ηράκλειο, έτη 1990 – 2021)

Δεκέμβριος: Τον μήνα Δεκέμβριο, οι άνεμοι ισχυρότερης έντασης που παρατηρήθηκαν από τον μετεωρολογικό σταθμό του Ηρακλείου, ήταν ο βόρειος άνεμος (B) με εκτιμώμενη μέση ταχύτητα $23,95 \text{ km/h} = 6,65 \text{ m/s}$ και ο βορειοδυτικός άνεμος (BΔ) με εκτιμώμενη μέση ταχύτητα $22,08 \text{ km/h} = 6,13 \text{ m/s}$. Ικανοποιητικές εντάσεις παρουσιάζουν και άλλοι άνεμοι, όπως ο δυτικός (Δ) άνεμος με εκτιμώμενη μέση ταχύτητα $16,89 \text{ km/h} = 5,12 \text{ m/s}$, ο βορειοανατολικός άνεμος (BA) με εκτιμώμενη μέση ταχύτητα $15,96 \text{ km/h} = 4,43 \text{ m/s}$ και ο νότιος (N) άνεμος, με εκτιμώμενη μέση ταχύτητα $15,85 \text{ km/h} = 4,40 \text{ m/s}$ (Εικόνα 107).



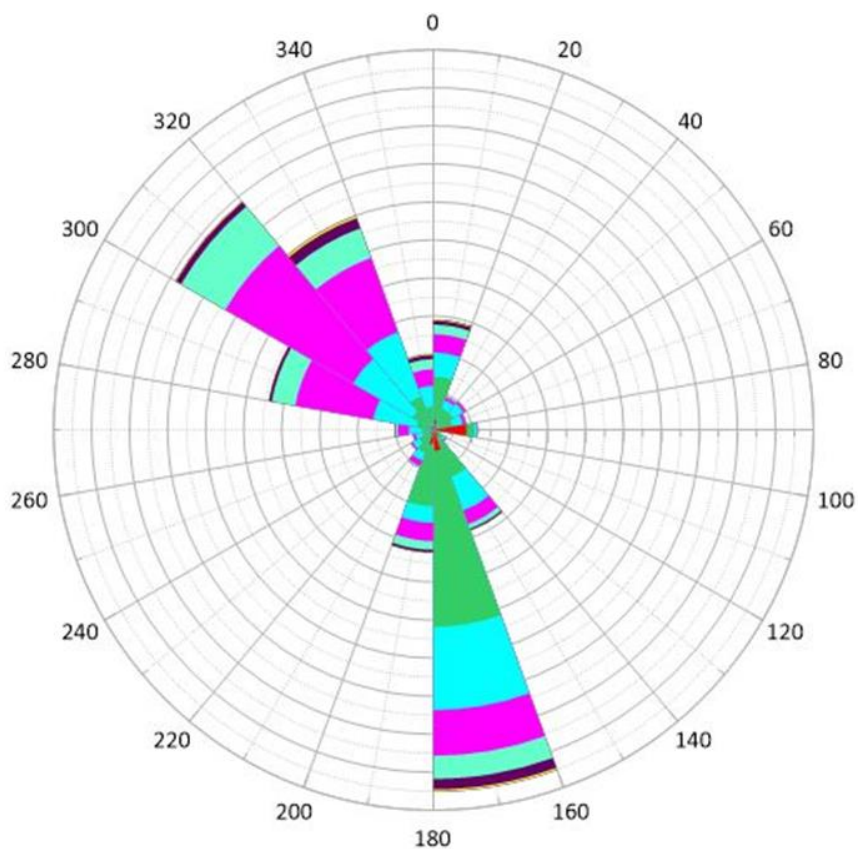
Εικόνα 107. Εκτιμώμενη μέση ταχύτητα ανά διεύθυνση ανέμου για τον μήνα Δεκέμβριο στην περιοχή του Ηρακλείου (έτη 1990 – 2021)

Αναφορικά με τη συχνότητα εμφάνισης των ανέμων για τον μήνα Δεκέμβριο στην περιοχή του Ακτίου, παρατηρήθηκε ότι το 43,14% των παρατηρήσεων ήταν νότιοι (N) άνεμοι, το 19,81% ήταν βόρειοι (B) άνεμοι και το 14,15% βορειοδυτικοί (BΔ) άνεμοι. Επίσης, οι βορειοανατολικοί (BA) άνεμοι, που δημιουργούν επίσης κύματα προς την ακτή, παρατηρήθηκαν σε ποσοστό 3,10% (Εικόνα 108).



Εικόνα 108. Ποσοστιαία κατανομή των διευθύνσεων των ανέμων για τον μήνα Δεκέμβριο (Ηράκλειο, έτη 1990 – 2021)

Από τα πρωτογενή δεδομένα που παραχωρήθηκαν από την Ε.Μ.Υ. για το σύνολο των 32 ετών, προκύπτει το παρακάτω ροδόγραμμα ανέμων για την περιοχή του Ηρακλείου (Εικόνα 109):



Εικόνα 109. Ροδόγραμμα απεικόνισης ανεμολογικών στοιχείων για την περιοχή του Ηρακλείου στο σύνολο των ετών μεταξύ 1990 και 2021

Στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 7), παρουσιάζονται αθροιστικά οι συχνότητες εμφάνισης των ανέμων, στο σύνολο των ετών και των μηνών, όπως προέκυψαν μετά από στατιστική επεξεργασία των πρωτογενών δεδομένων. Με κόκκινο χρώμα καταγράφονται οι άνεμοι που δημιουργούν κύματα προς την ακτή:

Πίνακας 7. Συχνότητες εμφάνισης ανέμων μετά από στατιστική επεξεργασία – Ηράκλειο (Iprodimatoroulou et al., 2023)

Συχνότητα	B	BA	A	NA	N	ΝΔ	Δ	ΒΔ
Άπνοια	0.886	0.511	1.966	0.417	2.203	0.473	0.254	0.383
Ασθενής	8.979	3.228	2.207	1.690	22.458	2.741	3.474	9.995
Μέτριος	5.496	0.497	0.322	0.306	6.266	0.551	2.585	19.182
Ισχυρός	0.944	0.034	0.014	0.012	0.969	0.023	0.021	0.840
Ορμητικός	0.023	0.000	0.003	0.000	0.030	0.000	0.002	0.013
ΣΥΝΟΛΟ	16.328	4.271	4.512	2.425	31.927	3.789	6.336	30.412

Στον πίνακα που ακολουθεί (Πίνακας 3) παρουσιάζονται οι ταχύτητες πνοής του ανέμου U_{10} . Η ταχύτητα αφορά μόνο τις διευθύνσεις του ανέμου που δημιουργεί κύματα προς την ακτή. Για την περιοχή του Ηρακλείου, όπως προαναφέρθηκε, οι άνεμοι αυτοί είναι **βόρειοι (B)**, **βορειοδυτικοί (ΒΔ)** και **βορειοανατολικοί (BA)**.

Πίνακας 8. Ταχύτητες πνοής ανέμου U_{10} (m/s) ανά διεύθυνση – Ηράκλειο

Βόρειοι	Βορειοδυτικοί	Βορειοανατολικοί
4,70	5,97	3,07

Τα μήκη ανάπτυξης που υπολογίσθηκαν για την περιοχή του Ηρακλείου είναι τα παρακάτω:

$$F_{45} = 11,98 \text{ km}$$

$$F_{30} = 11,58 \text{ km}$$

$$F_{15} = 115,9 \text{ km}$$

$$F_0 = 147,04 \text{ km}$$

$$F_{-15} = 210,06 \text{ km}$$

$$F_{-30} = 301,31 \text{ km}$$

$$F_{-45} = 273,12 \text{ km}$$

Χρησιμοποιώντας τα παραπάνω δεδομένα, υπολογίζουμε το αποτελεσματικό μήκος ανάπτυξης, υπολογίζεται σε $F_{\text{eff}} = 136,29 \text{ km} = 136289,2 \text{ m}$.

Οι υπολογισμοί για το H_s και το T_p γίνονται ξεχωριστά για κάθε διεύθυνση ανέμου που δημιουργεί κύματα προς την ακτή. Οπότε, εφόσον γνωρίζουμε τις αρχικές ταχύτητες U_{10} υπολογίζουμε ακολούθως τη ρυθμισμένη ταχύτητα ανέμου U_A , μέσω του τύπου:

$$U_A = 0,71 \cdot U_{10}^{1,23}$$

Οπότε, οι ρυθμισμένες ταχύτητες ανέμου διαμορφώνονται όπως παρουσιάζονται στον Πίνακα 9:

Πίνακας 9. Ρυθμισμένες ταχύτητες ανέμου U_A (m/s) ανά διεύθυνση - Ηράκλειο

Βόρειοι	Βορειοδυτικοί	Βορειοανατολικοί
4,76	6,39	2,82

Κάνοντας τον έλεγχο της ανίσωσης $g \cdot F / U_A^2 > 22800$ παρατηρούμε ότι η ανίσωση ισχύει και στις τρεις περιπτώσεις, οπότε προχωράμε για κάθε περίπτωση ξεχωριστά να υπολογίσουμε με τη μέθοδο **Pierson – Moskowitz** το σημαντικό ύψος του κύματος H_s και την περίοδό του T_p . Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 10.

Πίνακας 10. Σημαντικά ύψη και περίοδοι κύματος - Ηράκλειο

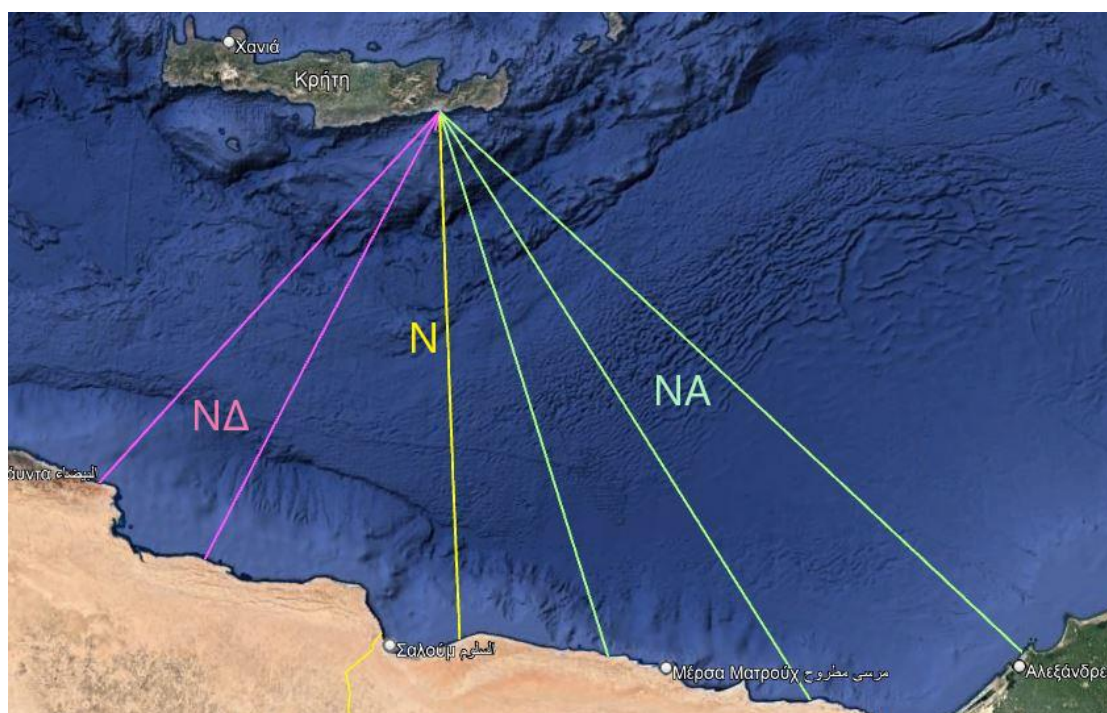
	Βόρειοι	Βορειοδυτικοί	Βορειοανατολικοί
H_s (m)	0,56	1,01	0,19
T_p (sec)	3,95	5,30	2,34

Στον πίνακα που ακολουθεί (Πίνακας 11), παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της εφαρμογής του αριθμητικού μοντέλου WAVEN, για την αξιοποιήσιμη ενέργεια ανά περιοχή ανά μήνα. Με κόκκινο χρώμα επισημαίνεται ο μήνας με την υψηλότερη παραγόμενη ισχύ:

Πίνακας 11. Η αξιοποιήσιμη ενέργεια ανά μήνα για την περιοχή του Ηρακλείου
(Iprodimatoroulou et al., 2023)

	H	T	Thress	P
Ιανουάριος	1.21	5.79	4.50	1.16
Φεβρουάριος	1.35	6.12	4.60	1.53
Μάρτιος	0.96	5.13	4.35	0.68
Απρίλιος	0.77	4.52	4.30	0.54
Μάιος	0.55	3.75	4.20	0.24
Ιούνιος	0.69	4.23	4.25	0.41
Ιούλιος	1.00	5.18	4.45	0.90
Αύγουστος	0.98	5.14	4.40	0.72
Σεπτέμβριος	0.79	4.62	4.30	0.54
Οκτώβριος	0.72	4.43	4.25	0.39
Νοέμβριος	0.84	4.82	4.35	0.68
Δεκέμβριος	1.22	5.81	4.50	1.16

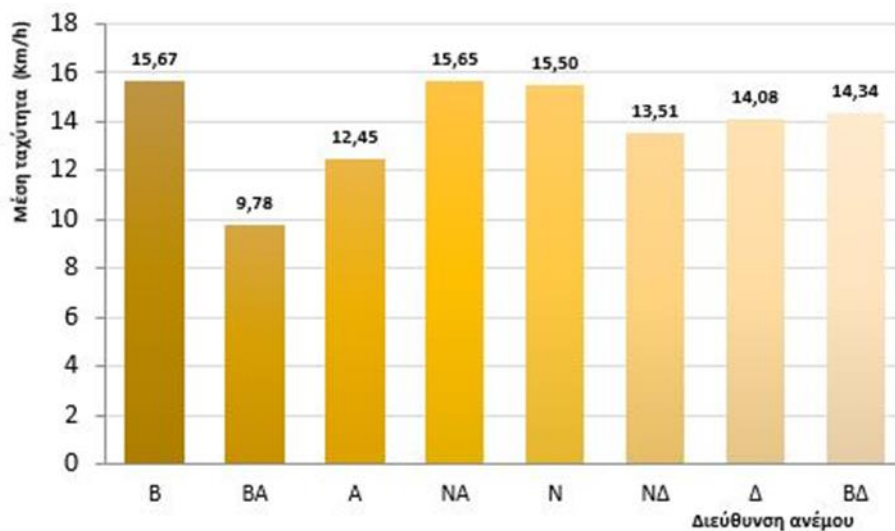
3.1.3 Περιοχή Ιεράπετρας – Αποτελέσματα



Εικόνα 110. Απεικόνιση της διεύθυνσης των ανέμων που δημιουργούν κύματα προς την ακτή στην περιοχή της Ιεράπετρας, απεικόνιση μέσω Google Earth

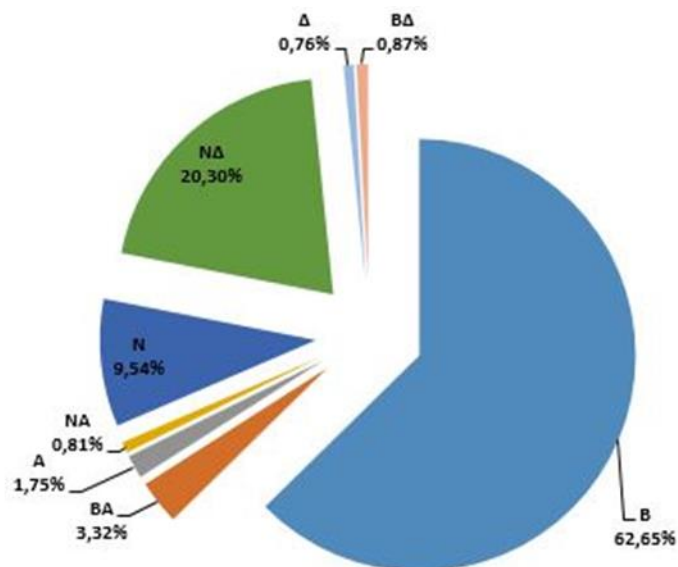
Στην περιοχή της Ιεράπετρας οι άνεμοι που δημιουργούν κύματα προς την ακτή είναι οι **νότιοι (N)**, **νοτιοδυτικοί (ND)** και **νοτιοανατολικοί (NA)**, όπως απεικονίζεται και στην Εικόνα 110. Λόγω του όγκου των δεδομένων, η επεξεργασία τους έγινε, αρχικά ανά μήνα και έπειτα, βάσει αυτών των δεδομένων υπολογίστηκαν το ύψος κύματος H_s και η περίοδος T_p για το σύνολο των ετών. Έγινε επεξεργασία και στατιστική ανάλυση του συνόλου των πρωτογενών δεδομένων, και κατόπιν, για τα κύματα που δημιουργούνται από τους προαναφερθέντες ανέμους, εφαρμόστηκε το αριθμητικό μοντέλο. Τα αποτελέσματα της επεξεργασίας αυτής παρατίθενται παρακάτω:

Ιανουάριος: Τον μήνα Ιανουάριο, στην περιοχή της Ιεράπετρας, οι άνεμοι ισχυρότερης έντασης που παρατηρήθηκαν ήταν ο βόρειος (B) άνεμος με εκτιμώμενη μέση ταχύτητα $15,67 \text{ km/h} = 4,52 \text{ m/s}$, ο νοτιοανατολικός άνεμος (NA) με εκτιμώμενη μέση ταχύτητα $15,65 \text{ km/h} = 4,35 \text{ m/s}$ και ο νότιος (N) άνεμος με εκτιμώμενη μέση ταχύτητα $15,50 \text{ km/h} = 4,3 \text{ m/s}$. Ικανοποιητική ένταση παρουσιάζουν επίσης ο βορειοδυτικός (BD) άνεμος με εκτιμώμενη ταχύτητα $14,34 \text{ km/h} = 3,98 \text{ m/s}$ και ο δυτικός άνεμος (Δ) με εκτιμώμενη μέση ταχύτητα $14,08 \text{ km/h} = 3,91 \text{ m/s}$. Ο νοτιοδυτικός άνεμος (ND) έχει εκτιμώμενη μέση ταχύτητα $13,51 \text{ km/h} = 3,75 \text{ m/s}$ (Εικόνα 111).



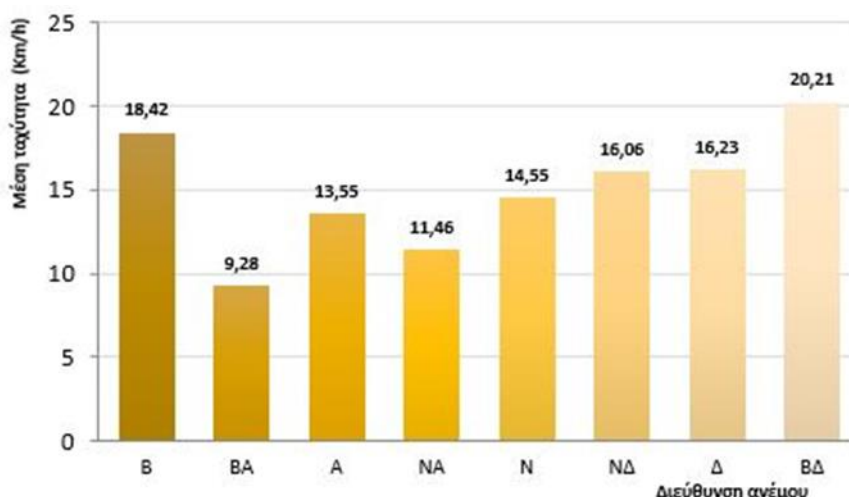
Εικόνα 111. Εκτιμώμενη μέση ταχύτητα ανά διεύθυνση ανέμου για τον μήνα Ιανουάριο στην περιοχή της Ιεράπετρας (έτη 1990 - 2010)

Μελετώντας τη συχνότητα εμφάνισης των ανέμων αυτών, τον μήνα Ιανουάριο στην περιοχή της Ιεράπετρας, παρατηρούμε πως το 62,65% των πνεόντων ανέμων είναι βόρειοι (B) και πως το επόμενο μεγάλο ποσοστό εμφάνισης, 20,30% ανήκει στους νοτιοδυτικούς (NΔ) ανέμους. Οι δυτικοί (Δ) άνεμοι έχουν συχνότητα εμφάνισης 0,76% και οι νοτιοανατολικοί (NA) 0,81% (Εικόνα 112).



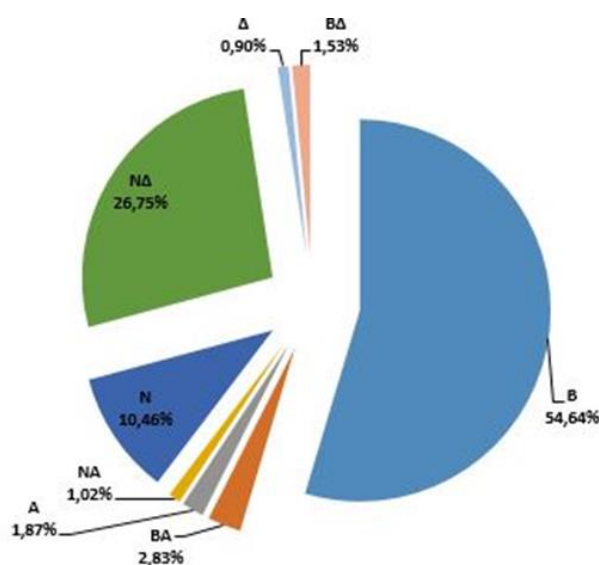
Εικόνα 112. Ποσοστιαία κατανομή των διευθύνσεων των ανέμων για τον μήνα Ιανουάριο (Ιεράπετρα, έτη 1990 - 2010)

Φεβρουάριος: Τον μήνα Φεβρουάριο οι άνεμοι ισχυρότερης έντασης που παρατηρήθηκαν ήταν ο βορειοδυτικός άνεμος (ΒΔ) με εκτιμώμενη μέση ταχύτητα $20,21 \text{ km/h} = 5,61 \text{ m/s}$ και ο βόρειος άνεμος (Β) με εκτιμώμενη μέση ταχύτητα $18,42 \text{ km/h} = 5,12 \text{ m/s}$. Οι άνεμοι που δημιουργούν κύματα προς την ακτή παρατηρήθηκαν να έχουν τις παρακάτω εντάσεις: ο νότιος άνεμος (Ν) με εκτιμώμενη μέση ταχύτητα $14,55 \text{ km/h} = 4,04 \text{ m/s}$, ο νοτιοδυτικός (ΝΔ) με εκτιμώμενη μέση ταχύτητα $16,06 \text{ km/h} = 4,46 \text{ m/s}$ και ο νοτιοανατολικός (ΝΑ) με εκτιμώμενη μέση ταχύτητα $11,46 \text{ km/h} = 3,18 \text{ m/s}$ (Εικόνα 113).



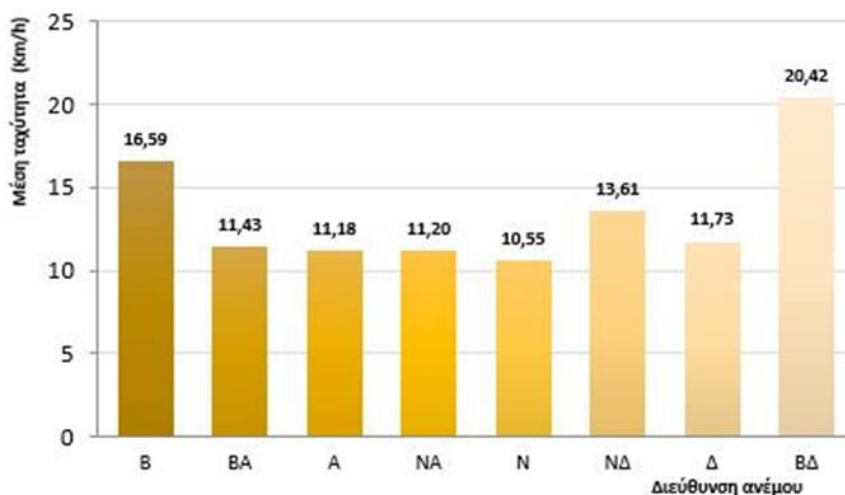
Εικόνα 113. Εκτιμώμενη μέση ταχύτητα ανά διεύθυνση ανέμου για τον μήνα Φεβρουάριο στην περιοχή της Ιεράπετρας (έτη 1990 – 2010)

Όσον αφορά τη συχνότητα εμφάνισης των ανέμων, για τον μήνα Φεβρουάριο στην περιοχή της Ιεράπετρας, παρατηρήθηκε ότι οι βόρειοι (Β) άνεμοι εμφανίζονται σε ποσοστό 54,64% και ακολουθούν οι νοτιοδυτικοί (ΝΔ) άνεμοι με ποσοστό 26,75%. Οι νότιοι (Ν) άνεμοι έχουν ποσοστό εμφάνισης 10,46% και οι νοτιοανατολικοί (ΝΑ) 1,02% (Εικόνα 114).



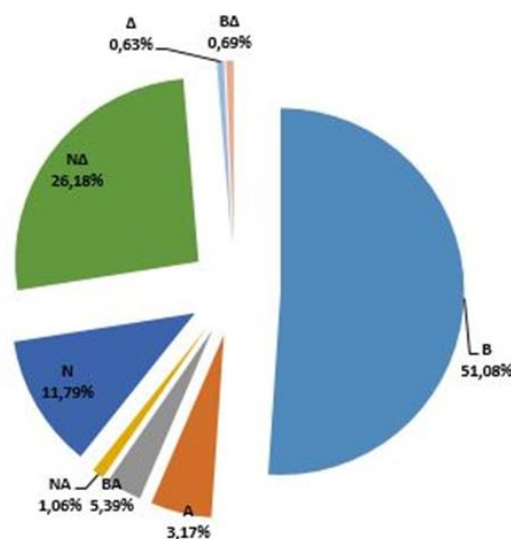
Εικόνα 114. Ποσοστιαία κατανομή των διευθύνσεων των ανέμων για τον μήνα Φεβρουάριο (Ιεράπετρα, έτη 1990 - 2010)

Μάρτιος: Τον μήνα Μάρτιο οι άνεμοι ισχυρότερης έντασης που παρατηρήθηκαν ήταν ο βορειοδυτικός άνεμος (ΒΔ) με εκτιμώμενη μέση ταχύτητα $20,42 \text{ km/h} = 5,67 \text{ m/s}$ και ο βόρειος άνεμος (Β) με εκτιμώμενη μέση ταχύτητα $16,59 \text{ km/h} = 4,61 \text{ m/s}$. Ο νοτιοδυτικός άνεμος (ΝΔ) έχει εκτιμώμενη μέση ταχύτητα $13,61 \text{ km/h} = 3,78 \text{ m/s}$, ο νότιος (Ν) άνεμος έχει εκτιμώμενη μέση ταχύτητα $10,55 \text{ km/h} = 2,93 \text{ m/s}$ και ο νοτιοανατολικός (ΝΑ) άνεμος έχει μέση εκτιμώμενη ταχύτητα $11,20 \text{ km/h} = 3,11 \text{ m/s}$ (Εικόνα 115).



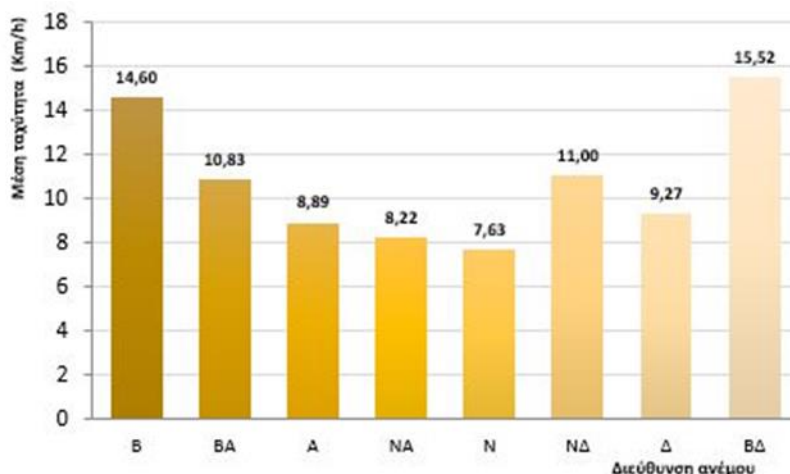
Εικόνα 115. Εκτιμώμενη μέση ταχύτητα ανά διεύθυνση ανέμου για τον μήνα Μάρτιο στην περιοχή της Ιεράπετρας (έτη 1990 – 2010)

Αναφορικά με τη συχνότητα εμφάνισης των ανέμων για τον μήνα Μάρτιο στην περιοχή του Ακτίου, παρατηρήθηκε ότι το 51,08% των παρατηρήσεων ήταν βόρειοι (Β) άνεμοι και ακολουθούν οι νοτιοδυτικοί (ΝΔ) άνεμοι με συχνότητα εμφάνισης 26,18%. Οι υπόλοιποι άνεμοι που δημιουργούν κύματα προς την ακτή, εμφανίζονται με συχνότητα 11,79% οι νότιοι (Ν) άνεμοι και 1,06% οι νοτιοανατολικοί (ΝΑ) άνεμοι, όπως φαίνεται στην Εικόνα 116.



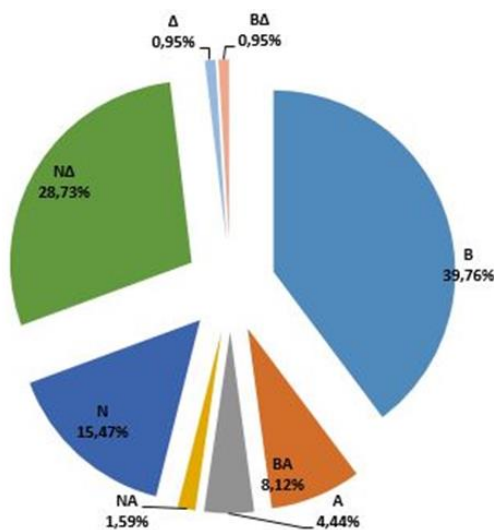
Εικόνα 116. Ποσοστιαία κατανομή των διευθύνσεων των ανέμων για τον μήνα Μάρτιο (Ιεράπετρα, έτη 1990 – 2010)

Απρίλιος: Τον μήνα Απρίλιο, οι άνεμοι ισχυρότερης έντασης που παρατηρήθηκαν στην περιοχή της Ιεράπετρας, ήταν ο βορειοδυτικός άνεμος (ΒΔ) με εκτιμώμενη μέση ταχύτητα $15,52 \text{ km/h} = 4,31 \text{ m/s}$ και ο βόρειος (Β) άνεμος με μέση εκτιμώμενη ταχύτητα $14,60 \text{ km/h} = 4,01 \text{ m/s}$. Οι μέσες εκτιμώμενες ταχύτητες των ανέμων που δημιουργούν κύματα προς την ακτή διαμορφώνονται ως εξής: $11,00 \text{ km/h} = 3,01 \text{ m/s}$ για τους νοτιοδυτικούς ανέμους (ΝΔ), $8,22 \text{ km/h} = 2,28 \text{ m/s}$ και $7,63 \text{ km/h} = 2,12 \text{ m/s}$ για τους νότιους (Ν) ανέμους (Εικόνα 117).



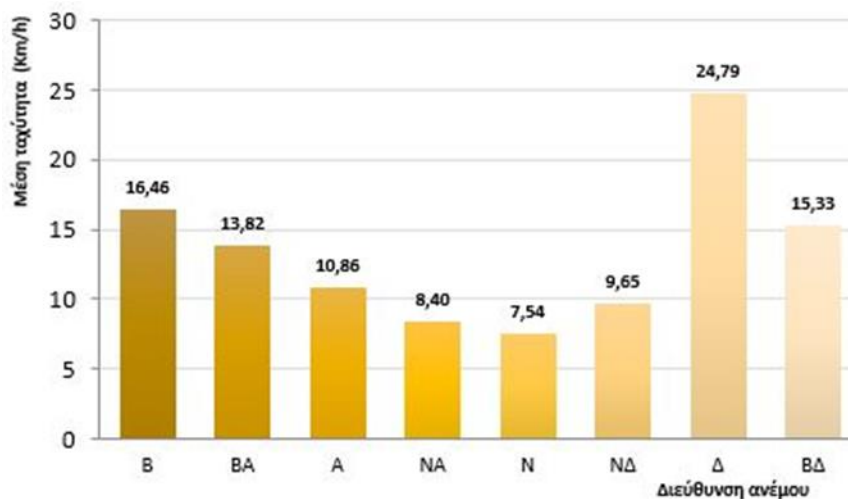
Εικόνα 117. Εκτιμώμενη μέση ταχύτητα ανά διεύθυνση ανέμου για τον μήνα Απρίλιο στην περιοχή της Ιεράπετρας (έτη 1990 – 2010)

Όσον αφορά τη συχνότητα εμφάνισης των ανέμων για τον μήνα Απρίλιο στην περιοχή του Ακτίου, παρατηρήθηκε ότι το 39,76% των παρατηρήσεων ήταν βόρειοι (Β) άνεμοι και ακολουθούν οι νοτιοδυτικοί (ΝΔ) άνεμοι με συχνότητα εμφάνισης 28,73%. Υψηλό ποσοστό εμφάνισης έχουν και οι νότιοι (Ν) άνεμοι, της τάξεως του 15,47%, ενώ οι νοτιοανατολικοί (ΝΑ) άνεμοι παρουσιάζουν χαμηλό ποσοστό εμφάνισης, 1,59% (Εικόνα 118).



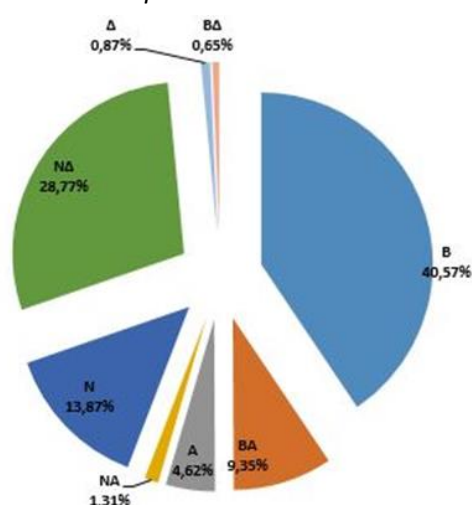
Εικόνα 118. Ποσοστιαία κατανομή των διευθύνσεων των ανέμων για τον μήνα Απρίλιο (Ιεράπετρα, έτη 1990 – 2010)

Μάιος: Τον μήνα Μάιο οι άνεμοι ισχυρότερης έντασης που παρατηρήθηκαν ήταν ο δυτικός άνεμος (Δ) με εκτιμώμενη μέση ταχύτητα 24,79 km/h = 6,89 m/s, ενώ ακολουθούν ο βόρειος (B) άνεμος και ο βορειοδυτικός άνεμος (ΒΔ) με εκτιμώμενες μέσες ταχύτητες 16,46 km/h = 4,57 m/s και 15,33 km/h = 4,26 m/s αντίστοιχα. Ο νότιος (N) άνεμος έχει μέση εκτιμώμενη ταχύτητα 7,54 km/h = 2,09 m/s, ο νοτιοανατολικός (ΝΑ) άνεμος 8,40 km/h = 2,33 m/s και ο νοτιοδυτικός (ΝΔ) άνεμος 9,65 km/h = 2,68 m/s (Εικόνα 119).



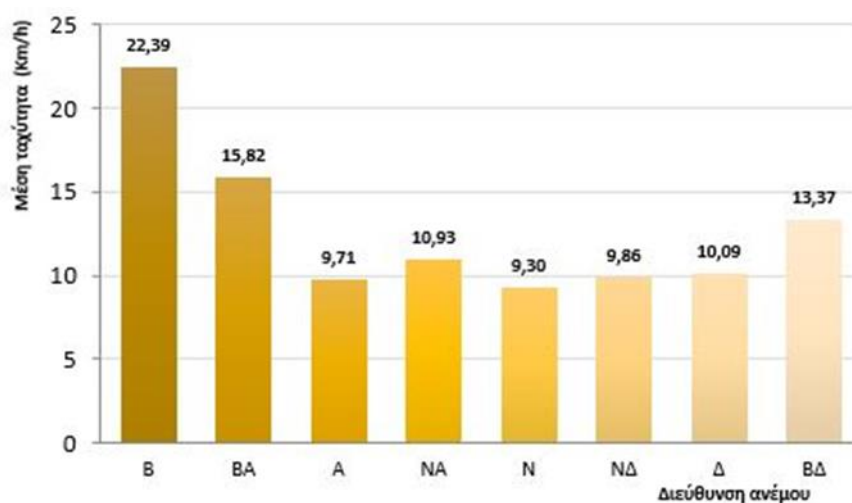
Εικόνα 119. Εκτιμώμενη μέση ταχύτητα ανά διεύθυνση ανέμου για τον μήνα Μάιο στην περιοχή της Ιεράπετρας (έτη 1990 – 2010)

Σχετικά με τη συχνότητα εμφάνισης των ανέμων για τον μήνα Μάιο στην περιοχή του Ακτίου, παρατηρήθηκε ότι το 40,57% των παρατηρήσεων ήταν βόρειοι (B) άνεμοι και ακολουθούν οι νοτιοδυτικοί άνεμοι (ΝΔ) με συχνότητα εμφάνισης 28,77%. Οι νότιοι (N) άνεμοι εμφανίζονται με συχνότητα 13,87%, ενώ οι νοτιοανατολικοί (ΝΑ) άνεμοι εμφανίζονται με συχνότητα 1,31% όπως φαίνεται και στην Εικόνα 120.



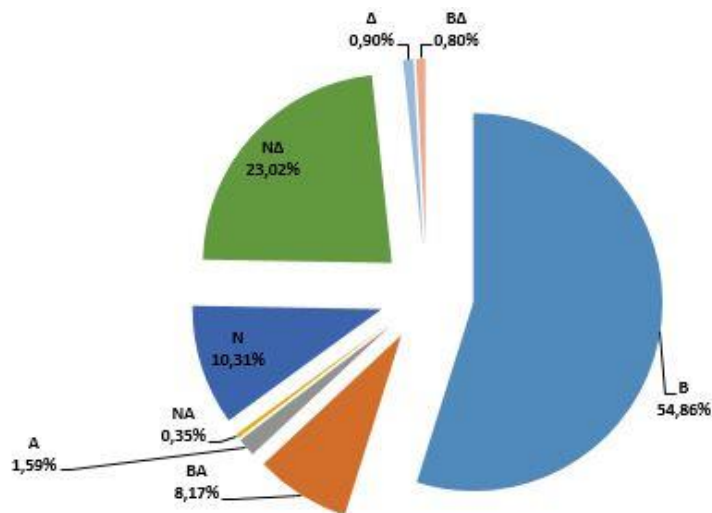
Εικόνα 120. Ποσοστιαία κατανομή των διευθύνσεων των ανέμων για τον μήνα Μάιο (Ιεράπετρα, έτη 1990 – 2010)

Ιούνιος: Τον μήνα Ιούνιο οι άνεμοι ισχυρότερης έντασης που παρατηρήθηκαν ήταν ο βόρειος άνεμος (B) με εκτιμώμενη μέση ταχύτητα $22,39 \text{ km/h} = 6,22 \text{ m/s}$ και ο βορειοανατολικός άνεμος (BA) με εκτιμώμενη μέση ταχύτητα $15,82 \text{ km/h} = 4,39 \text{ m/s}$ και ο βορειοδυτικός (BΔ) άνεμος με εκτιμώμενη μέση ταχύτητα $13,37 \text{ km/h} = 3,71 \text{ m/s}$. Ο νότιος (N) άνεμος έχει εκτιμώμενη μέση ταχύτητα $9,30 \text{ km/h} = 2,58 \text{ m/s}$, ο νοτιοανατολικός (NA) εκτιμώμενη μέση ταχύτητα $10,93 \text{ km/h} = 3,04 \text{ m/s}$ και ο νοτιοδυτικός (NΔ) άνεμος εκτιμώμενη μέση ταχύτητα $9,86 \text{ km/h} = 2,74 \text{ m/s}$ (Εικόνα 121).



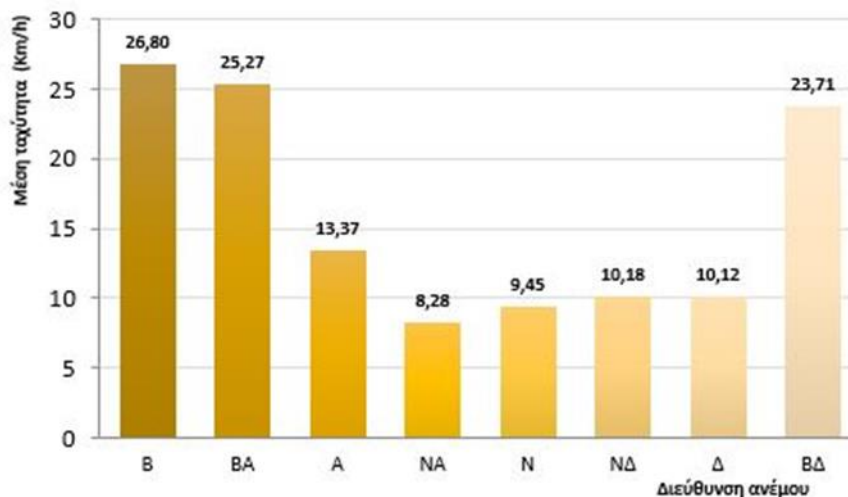
Εικόνα 121. Εκτιμώμενη μέση ταχύτητα ανά διεύθυνση ανέμου για τον μήνα Ιούνιο στην περιοχή της Ιεράπετρας (έτη 1990 – 2010)

Αναφορικά με τη συχνότητα εμφάνισης των ανέμων για τον μήνα Ιούνιο στην περιοχή της Ιεράπετρας, παρατηρήθηκε ότι το 54,86% των παρατηρήσεων ήταν βόρειοι (B) άνεμοι και ακολουθούν οι νοτιοδυτικοί άνεμοι (NΔ) με συχνότητα εμφάνισης 23,02%. Οι νότιοι (N) άνεμοι εμφανίζονται με συχνότητα 10,31%, ενώ οι νοτιοανατολικοί (NA) άνεμοι εμφανίζονται με συχνότητα 0,35% (Εικόνα 122).



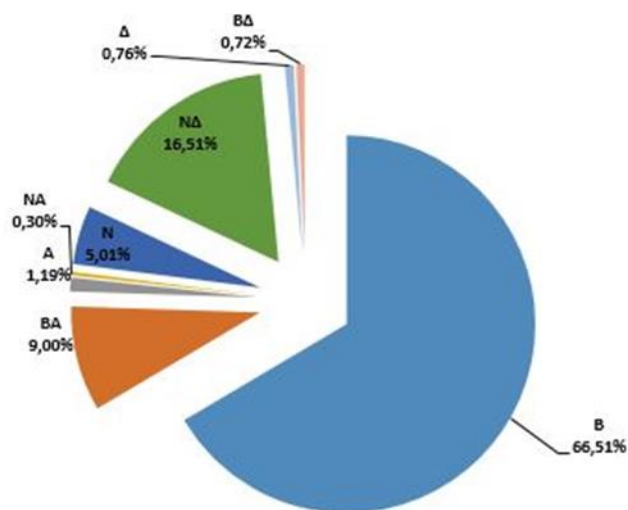
Εικόνα 122. Ποσοστιαία κατανομή των διευθύνσεων των ανέμων για τον μήνα Ιούνιο (Ιεράπετρα, έτη 1990 – 2010)

Ιούλιος: Τον μήνα Ιούλιο οι άνεμοι ισχυρότερης έντασης που παρατηρήθηκαν ήταν ο βόρειος άνεμος (B) με εκτιμώμενη μέση ταχύτητα $26,80 \text{ km/h} = 7,44 \text{ m/s}$, ο βορειοανατολικός άνεμος (BA) με εκτιμώμενη μέση ταχύτητα $25,27 \text{ km/h} = 7,02 \text{ m/s}$ και ο βορειοδυτικός (BΔ) άνεμος με εκτιμώμενη μέση ταχύτητα $23,71 \text{ km/h} = 6,59 \text{ m/s}$. Ο νότιος (N) άνεμος έχει εκτιμώμενη μέση ταχύτητα $9,45 \text{ km/h} = 2,63 \text{ m/s}$, ο νοτιοανατολικός (NA) εκτιμώμενη μέση ταχύτητα $8,28 \text{ km/h} = 2,3 \text{ m/s}$ και ο νοτιοδυτικός (NΔ) άνεμος εκτιμώμενη μέση ταχύτητα $10,18 \text{ km/h} = 2,83 \text{ m/s}$ (Εικόνα 123).



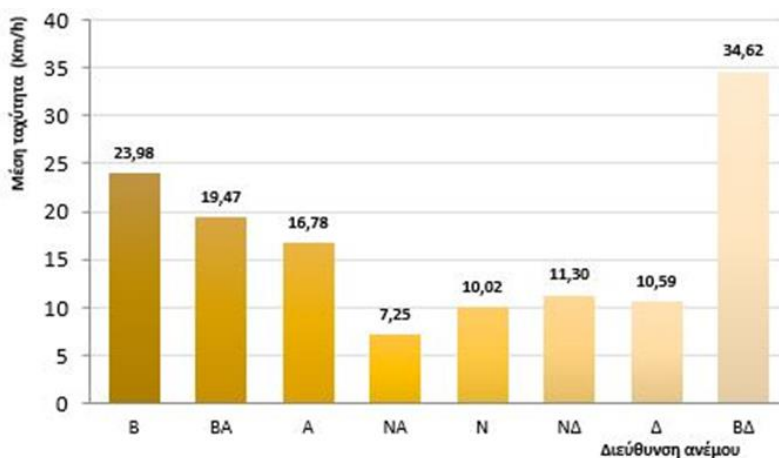
Εικόνα 123. Εκτιμώμενη μέση ταχύτητα ανά διεύθυνση ανέμου για τον μήνα Ιούλιο στην περιοχή της Ιεράπετρας (έτη 1990 – 2010)

Σχετικά με τη συχνότητα εμφάνισης των ανέμων για τον μήνα Ιούλιο στην περιοχή της Ιεράπετρας, παρατηρήθηκε ότι το 66,51% των παρατηρήσεων ήταν βόρειοι (B) άνεμοι και ακολουθούν οι νοτιοδυτικοί άνεμοι (NΔ) με συχνότητα εμφάνισης 16,51%. Οι νοτιοανατολικοί (NA) άνεμοι εμφανίζονται με συχνότητα 0,30% και οι νότιοι (N) άνεμοι, εμφανίζονται με συχνότητα 5,01% (Εικόνα 124).



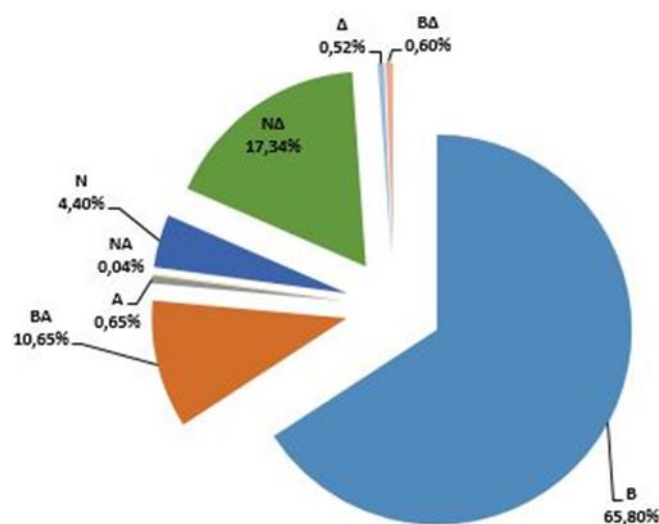
Εικόνα 124. Ποσοστιαία κατανομή των διευθύνσεων των ανέμων για τον μήνα Ιούλιο (Ιεράπετρα, έτη 1990 – 2010)

Αύγουστος: Τον μήνα Αύγουστο οι άνεμοι ισχυρότερης έντασης που παρατηρήθηκαν ήταν ο βορειοδυτικός άνεμος (BΔ) με εκτιμώμενη μέση ταχύτητα 34,62 km/h = 9,62 m/s και ο βόρειος άνεμος (B) με εκτιμώμενη μέση ταχύτητα 23,98 km/h = 6,66 m/s. Ο νότιος (N) άνεμος έχει εκτιμώμενη μέση ταχύτητα 10,02 km/h = 2,78 m/s, ο νοτιοανατολικός (NA) εκτιμώμενη μέση ταχύτητα 7,25 km/h = 2,01 m/s και ο νοτιοδυτικός (NΔ) άνεμος εκτιμώμενη μέση ταχύτητα 11,30 km/h = 3,14 m/s (Εικόνα 125).



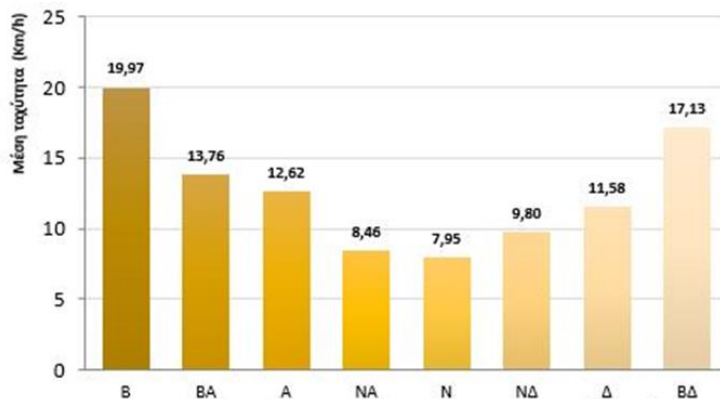
Εικόνα 125. Εκτιμώμενη μέση ταχύτητα ανά διεύθυνση ανέμου για τον μήνα Αύγουστο στην περιοχή της Ιεράπετρας (έτη 1990 – 2010)

Εξετάζοντας τη συχνότητα εμφάνισης των ανέμων για τον μήνα Αύγουστο στην περιοχή του Ακτίου, παρατηρήθηκε ότι το 65,80% των παρατηρήσεων ήταν βόρειοι (B) άνεμοι. Οι νοτιοδυτικοί (NΔ) άνεμοι, εμφανίζονται με συχνότητα 17,34%, οι νότιοι (N) άνεμοι εμφανίζονται με συχνότητα 4,40% και οι νοτιοανατολικοί (NA) άνεμοι εμφανίζονται με συχνότητα 0,04% (Εικόνα 126).



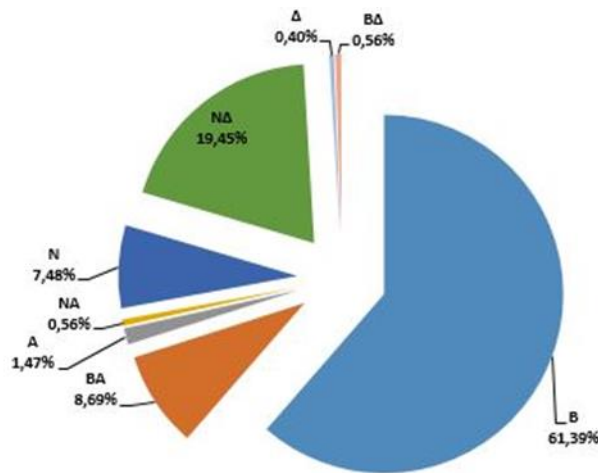
Εικόνα 126. Ποσοστιαία κατανομή των διευθύνσεων των ανέμων για τον μήνα Αύγουστο (Ιεράπετρα, έτη 1990 – 2010)

Σεπτέμβριος: Τον μήνα Σεπτέμβριο οι άνεμοι ισχυρότερης έντασης που παρατηρήθηκαν ήταν ο βόρειος άνεμος (B) με εκτιμώμενη μέση ταχύτητα 19,97 km/h = 5,55 m/s και ο βορειοδυτικός άνεμος (BΔ) με εκτιμώμενη μέση ταχύτητα 17,13 km/h = 4,76 m/s. Ο νότιος (N) άνεμος έχει εκτιμώμενη μέση ταχύτητα 7,95 km/h = 2,21 m/s, ο νοτιοανατολικός (NA) εκτιμώμενη μέση ταχύτητα 8,46 km/h = 2,35 m/s και ο νοτιοδυτικός (NΔ) άνεμος εκτιμώμενη μέση ταχύτητα 9,80 km/h = 2,72 m/s (Εικόνα 127).



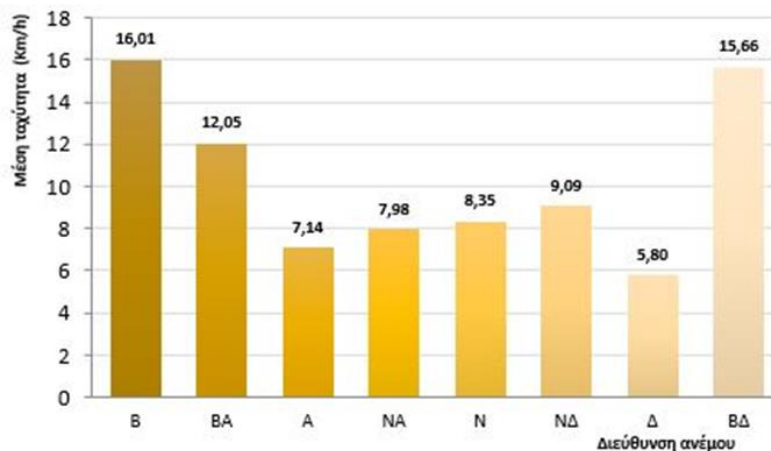
Εικόνα 127. Εκτιμώμενη μέση ταχύτητα ανά διεύθυνση ανέμου για τον μήνα Σεπτέμβριο στην περιοχή της Ιεράπετρας (έτη 1990 – 2010)

Όσον αφορά τη συχνότητα εμφάνισης των ανέμων για τον μήνα Σεπτέμβριο στην περιοχή της Ιεράπετρας, παρατηρήθηκε ότι το 61,39% των παρατηρήσεων ήταν βόρειοι (B) άνεμοι. Οι νοτιοδυτικοί (ΝΔ) άνεμοι, παρατηρήθηκε ότι εμφανίζονται με συχνότητα 19,45%, οι νότιοι (N) άνεμοι με συχνότητα 7,48% και οι νοτιοανατολικοί (NA) άνεμοι εμφανίζονται με συχνότητα 0,56% (Εικόνα 128).



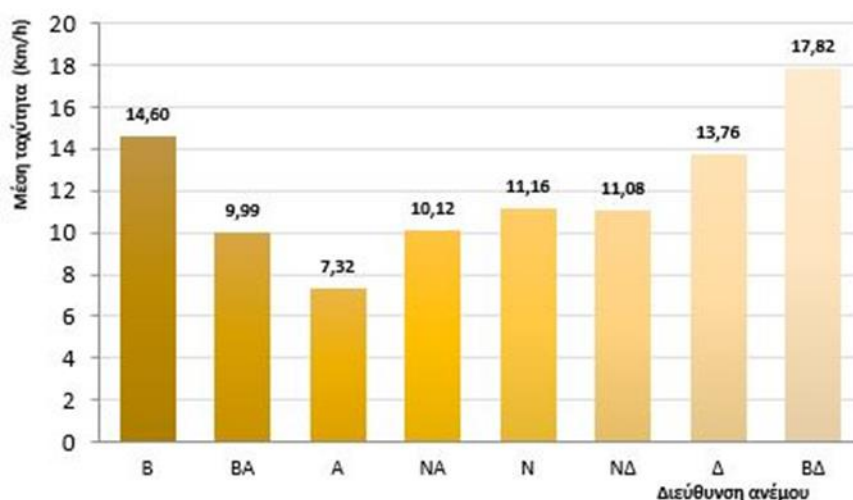
Εικόνα 128. Ποσοστιαία κατανομή των διευθύνσεων των ανέμων για τον μήνα Σεπτέμβριο (Ιεράπετρα, έτη 1990 – 2010)

Οκτώβριος: Τον μήνα Οκτώβριο οι άνεμοι ισχυρότερης έντασης που παρατηρήθηκαν ήταν ο βόρειος άνεμος (B) με εκτιμώμενη μέση ταχύτητα $16,01 \text{ km/h} = 4,45 \text{ m/s}$ και ο βορειοδυτικός άνεμος (BΔ) με εκτιμώμενη μέση ταχύτητα $15,66 \text{ km/h} = 4,35 \text{ m/s}$. Ο νότιος (N) άνεμος έχει εκτιμώμενη μέση ταχύτητα $8,35 \text{ km/h} = 2,32 \text{ m/s}$, ο νοτιοανατολικός (NA) εκτιμώμενη μέση ταχύτητα $7,98 \text{ km/h} = 2,22 \text{ m/s}$ και ο νοτιοδυτικός (ΝΔ) άνεμος εκτιμώμενη μέση ταχύτητα $9,09 \text{ km/h} = 2,53 \text{ m/s}$ (Εικόνα 129).



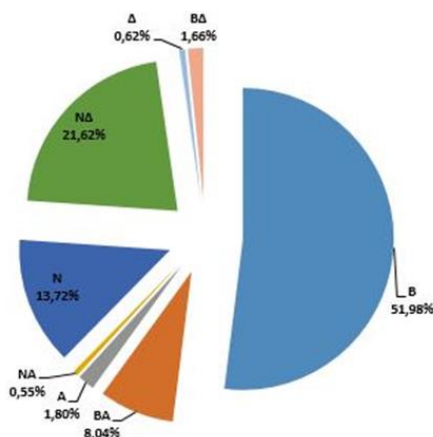
Εικόνα 129. Εκτιμώμενη μέση ταχύτητα ανά διεύθυνση ανέμου για τον μήνα Οκτώβριο στην περιοχή της Ιεράπετρας (έτη 1990 – 2010)

Νοέμβριος: Τον μήνα Νοέμβριο οι άνεμοι ισχυρότερης έντασης που παρατηρήθηκαν ήταν ο βορειοδυτικός άνεμος (ΒΔ) με εκτιμώμενη μέση ταχύτητα $17,82 \text{ km/h} = 4,95 \text{ m/s}$ και ο βόρειος άνεμος (Β) με εκτιμώμενη μέση ταχύτητα $14,60 \text{ km/h} = 4,01 \text{ m/s}$. Ο νότιος (Ν) άνεμος έχει εκτιμώμενη μέση ταχύτητα $11,16 \text{ km/h} = 3,1 \text{ m/s}$, ο νοτιοανατολικός (ΝΑ) εκτιμώμενη μέση ταχύτητα $10,12 \text{ km/h} = 2,81 \text{ m/s}$ και ο νοτιοδυτικός (ΝΔ) άνεμος εκτιμώμενη μέση ταχύτητα $11,08 \text{ km/h} = 3,08 \text{ m/s}$ (Εικόνα 130).



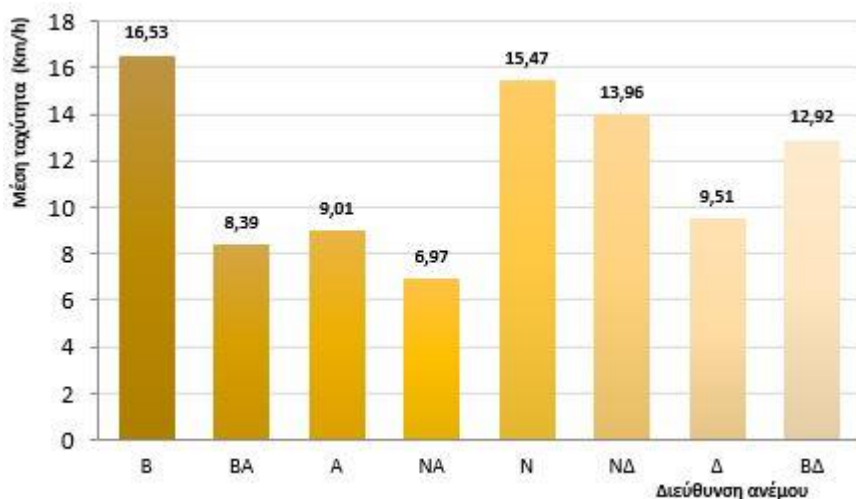
Εικόνα 130. Εκτιμώμενη μέση ταχύτητα ανά διεύθυνση ανέμου για τον μήνα Νοέμβριο στην περιοχή της Ιεράπετρας (έτη 1990 – 2010)

Σχετικά με τη συχνότητα εμφάνισης των ανέμων για τον μήνα Νοέμβριο στην περιοχή της Ιεράπετρας, παρατηρήθηκε ότι το 51,98% των παρατηρήσεων ήταν βόρειοι (Β) άνεμοι, με τα αμέσως μεταλύτερα ποσοστά εμφάνισης να ανήκουν στους νοτιοδυτικούς (ΝΔ) και τους νότιους (Ν) ανέμους, με ποσοστά εμφάνισης 21,62% και 13,72% αντίστοιχα. Οι νοτιοανατολικοί (ΝΑ) άνεμοι εμφανίζονται με συχνότητα 0,55% όπως φαίνεται και στην Εικόνα 131.



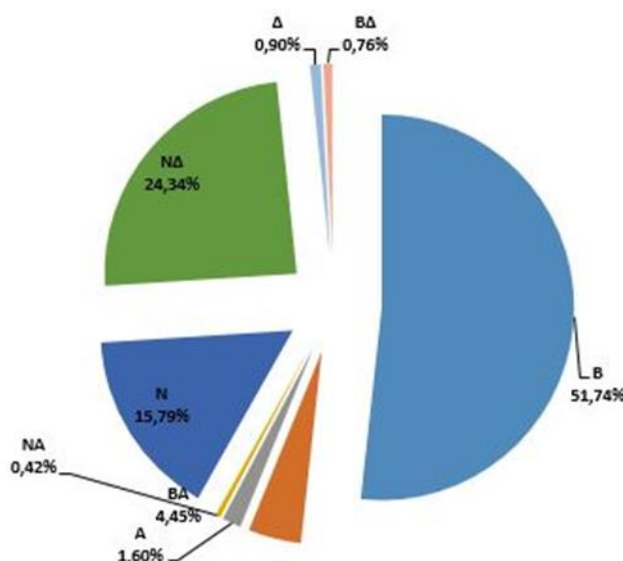
Εικόνα 131. Ποσοστιαία κατανομή των διευθύνσεων των ανέμων για τον μήνα Νοέμβριο (Ιεράπετρα, έτη 1990 – 2010)

Δεκέμβριος: Τον μήνα Δεκέμβριο οι άνεμοι ισχυρότερης έντασης που παρατηρήθηκαν ήταν ο βόρειος άνεμος (B) με εκτιμώμενη μέση ταχύτητα $16,53 \text{ km/h} = 4,59 \text{ m/s}$, ο νότιος άνεμος (N) με εκτιμώμενη μέση ταχύτητα $15,47 \text{ km/h} = 4,30 \text{ m/s}$ και ο νοτιοδυτικός (NΔ) άνεμος με εκτιμώμενη μέση ταχύτητα $13,96 \text{ km/h} = 3,88 \text{ m/s}$. Ο νοτιοανατολικός (NA) άνεμος εμφανίζεται με εκτιμώμενη μέση ταχύτητα $6,97 \text{ km/h} = 1,93 \text{ m/s}$ (Εικόνα 132).



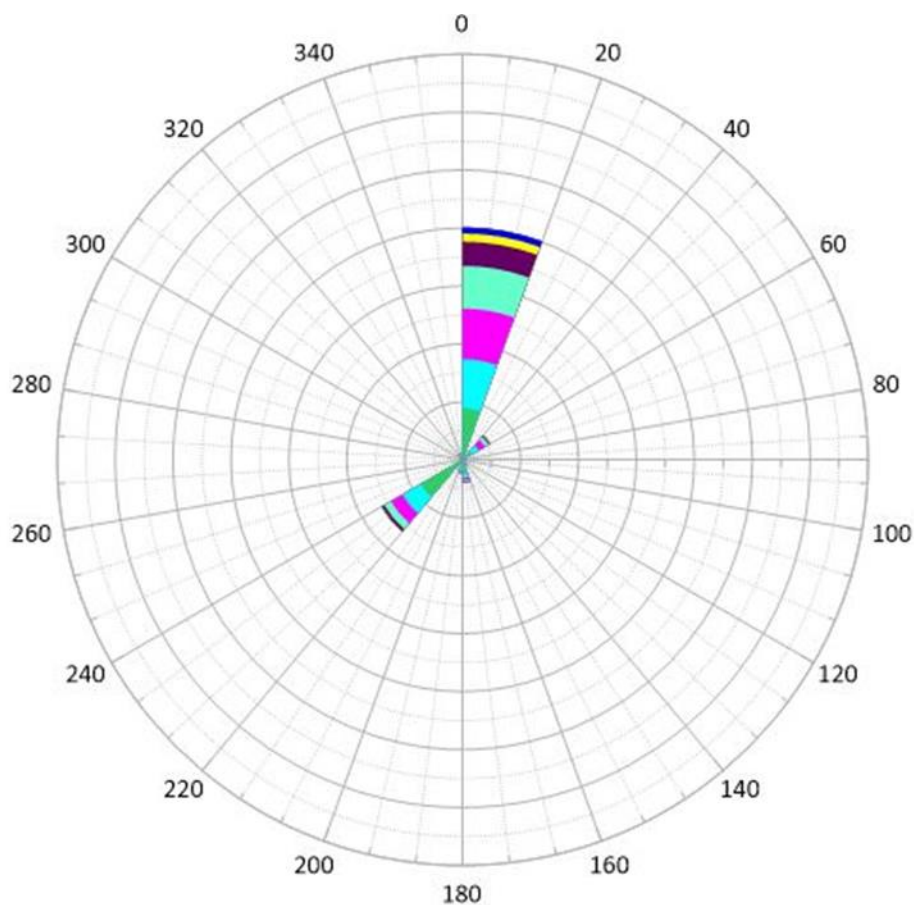
Εικόνα 132. Εκτιμώμενη μέση ταχύτητα ανά διεύθυνση ανέμου για τον μήνα Δεκέμβριο στην περιοχή της Ιεράπετρας (έτη 1990 – 2010)

Αναφορικά με τη συχνότητα εμφάνισης των ανέμων για τον μήνα Δεκέμβριο στην περιοχή της Ιεράπετρας, παρατηρήθηκε ότι το 51,74% των παρατηρήσεων ήταν βόρειοι (B) άνεμοι, με τους νοτιοδυτικούς (NΔ) ανέμους να ακολουθούν με ποσοστό εμφάνισης 24,34% και τους νότιους (N) ανέμους έπειτα με ποσοστό εμφάνισης 15,79%. Οι νοτιοανατολικοί (NA) άνεμοι εμφανίζονται με συχνότητα 0,42% (Εικόνα 133).



Εικόνα 133. Ποσοστιαία κατανομή των διευθύνσεων των ανέμων για τον μήνα Δεκέμβριο (Ιεράπετρα, έτη 1990 – 2010)

Από τα πρωτογενή δεδομένα που παραχωρήθηκαν από την Ε.Μ.Υ. για το σύνολο των 21 ετών, προκύπτει το παρακάτω ροδόγραμμα ανέμων για την περιοχή της Ιεράπετρας (Εικόνα 134):



Εικόνα 134. Ροδόγραμμα απεικόνισης ανεμολογικών στοιχείων για την περιοχή της Ιεράπετρας στο σύνολο των ετών μεταξύ 1990 και 2010

Στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 12), παρουσιάζονται αθροιστικά οι συχνότητες εμφάνισης των ανέμων, στο σύνολο των ετών και των μηνών, όπως προέκυψαν μετά από στατιστική επεξεργασία των πρωτογενών δεδομένων. Με κόκκινο χρώμα σημειώνονται οι άνεμοι που δημιουργούν κύματα προς την ακτή:

Πίνακας 12. Συχνότητες εμφάνισης ανέμων μετά από στατιστική επεξεργασία – Ιεράπετρα (Irodimatopoulou et al., 2023)

Συχνότητα	B	BA	A	NA	A	NA	Δ	ΒΔ
Άπνοια	0.000	0.004	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Ασθενής	23.913	4.403	1.602	0.521	8.070	16.292	0.539	0.399
Μέτριος	22.194	2.697	0.386	0.108	1.566	4.897	0.117	0.283
Ισχυρός	7.845	0.426	0.031	0.004	0.355	0.785	0.723	0.126
Ορμητικός	1.521	0.022	0.013	0.004	0.081	0.027	0.013	0.031
ΣΥΝΟΛΟ	55.473	7.554	2.033	0.637	10.071	22.001	1.391	0.839

Στον πίνακα που ακολουθεί (Πίνακας 13) παρουσιάζονται οι ταχύτητες πνοής του ανέμου U_{10} . Η ταχύτητα αφορά μόνο τις διευθύνσεις του ανέμου που δημιουργεί κύματα προς την ακτή. Για την περιοχή της Ιεράπετρας, όπως προαναφέρθηκε, οι άνεμοι αυτοί είναι **νότιοι (N)**, **νοτιοανατολικοί (NA)** και **νοτιοδυτικοί (ND)**,

Πίνακας 13. Ταχύτητες πνοής ανέμου U_{10} (m/s) ανά διεύθυνση – Ιεράπετρα

Νότιοι	Νοτιοδυτικοί	Νοτιοανατολικοί
2,95	3,22	2,66

Τα μήκη ανάπτυξης που υπολογίσθηκαν για την περιοχή της Ιεράπετρας είναι τα παρακάτω:

$$F_{45} = 363,98 \text{ km}$$

$$F_{30} = 363,28 \text{ km}$$

$$F_{15} = 14,1 \text{ km}$$

$$F_0 = 377,8 \text{ km}$$

$$F_{-15} = 408,32 \text{ km}$$

$$F_{-30} = 498,9 \text{ km}$$

$$F_{-45} = 573,27 \text{ km}$$

Χρησιμοποιώντας τα παραπάνω δεδομένα, υπολογίζουμε το αποτελεσματικό μήκος ανάπτυξης, υπολογίζεται σε $F_{\text{eff}} = 310,49 \text{ km} = 310488 \text{ m}$.

Οι υπολογισμοί για το H_s και το T_p γίνονται ξεχωριστά για κάθε διεύθυνση ανέμου που δημιουργεί κύματα προς την ακτή. Οπότε, εφόσον γνωρίζουμε τις αρχικές ταχύτητες U_{10} υπολογίζουμε ακολούθως τη ρυθμισμένη ταχύτητα ανέμου U_A , μέσω του τύπου:

$$U_A = 0,71 \cdot U_{10}^{1,23}$$

Οπότε, το πινακάκι με τις ρυθμισμένες ταχύτητες ανέμου διαμορφώνεται ως εξής (Πίνακας 14):

Πίνακας 14. Ρυθμισμένες ταχύτητες ανέμου U_A (m/s) ανά διεύθυνση - Ιεράπετρα

Νότιοι	Νοτιοδυτικοί	Νοτιοανατολικοί
2,69	2,99	2,37

Κάνοντας τον έλεγχο της ανίσωσης $g \cdot F / U_A^2 > 22800$ παρατηρούμε ότι η ανίσωση ισχύει και στις τρεις περιπτώσεις, οπότε προχωράμε για κάθε περίπτωση ξεχωριστά να υπολογίσουμε με τη μέθοδο **Pierson – Moskowitz** το σημαντικό ύψος του κύματος H_s και την περίοδό του T_p . Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 15).

Πίνακας 15. Σημαντικά ύψη και περίοδοι κύματος - Ιεράπετρα

	Νότιοι	Νοτιοδυτικοί	Νοτιοανατολικοί
H_s (m)	0,18	0,22	0,14
T_p (sec)	2,23	2,48	1,96

Στον πίνακα που ακολουθεί (Πίνακας 16), παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της εφαρμογής του αριθμητικού μοντέλου WAVEN, για την αξιοποιήσιμη ενέργεια ανά περιοχή ανά μήνα:

Πίνακας 16. Η αξιοποιήσιμη ενέργεια ανά μήνα για την περιοχή της Ιεράπετρας. (Irodimatoroulou et al., 2023)

	H	T	Thress	P
Ιανουάριος	0.37	3.18	4.15	0.12
Φεβρουάριος	0.46	3.55	4.15	0.14
Μάρτιος	0.28	2.78	4.10	0.07
Απρίλιος	0.15	2.02	4.05	0.01
Μάιος	0.12	1.80	4.05	0.00
Ιούνιος	0.14	1.99	4.05	0.01
Ιούλιος	0.15	2.06	4.05	0.00
Αύγουστος	0.20	2.33	4.05	0.01
Σεπτέμβριος	0.13	1.88	4.05	0.00
Οκτώβριος	0.11	1.77	4.05	0.03
Νοέμβριος	0.20	2.35	4.05	0.03
Δεκέμβριος	0.39	3.25	4.15	0.16

3.2 Αποτελέσματα εφαρμογής μοντέλου

Από την εφαρμογή του αριθμητικού μοντέλου WAVEN, σύμφωνα με τα στατιστικώς επεξεργασμένα δεδομένα που παρουσιάστηκαν παραπάνω, ανά περιοχή μελέτης, τα αποτελέσματα που προέκυψαν και υποδεικνύουν τη μέση κατάσταση που ισχύει για τις εν λόγω περιοχές σε βάθος 32 ετών για τις περιοχές του Ακτίου και του Ηρακλείου και 21 ετών για την περιοχή της Ιεράπετρας, παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 17):

Πίνακας 17. Αποτελέσματα παραγόμενης και αξιοποιήσιμης ενέργειας για κάθε περιοχή, μετά από εφαρμογή του μοντέλου WAVEN

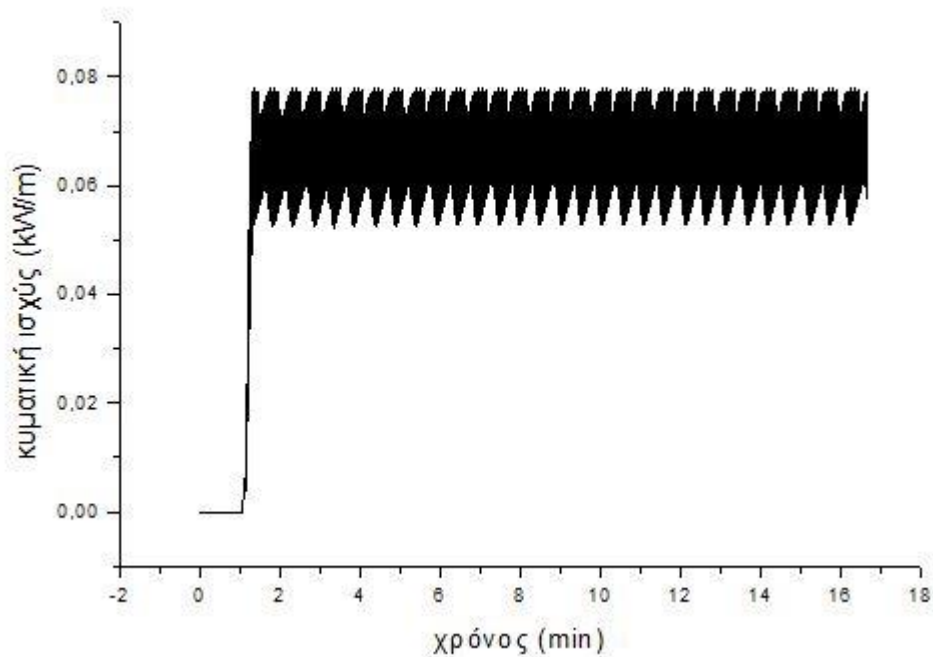
	H (m)	T (s)	Thress (m)	Harnessed P (kW/m)	Incident P (H²T) (kW/m)
Άκτιο	0.35	3.10	4.12	0.12	0.38
Ηράκλειο	0.92	4.96	4.35	0.68	4.24
Ιεράπετρα	0.23	2.91	4.04	0.023	0.15

Τα δεδομένα, βάσει των οποίων έγιναν οι εφαρμογές στο αριθμητικό μοντέλο, συμπληρωματικά με όσα ήδη δίνονται στον Πίνακα 17 (H,T, Thress), είναι τα εξής:

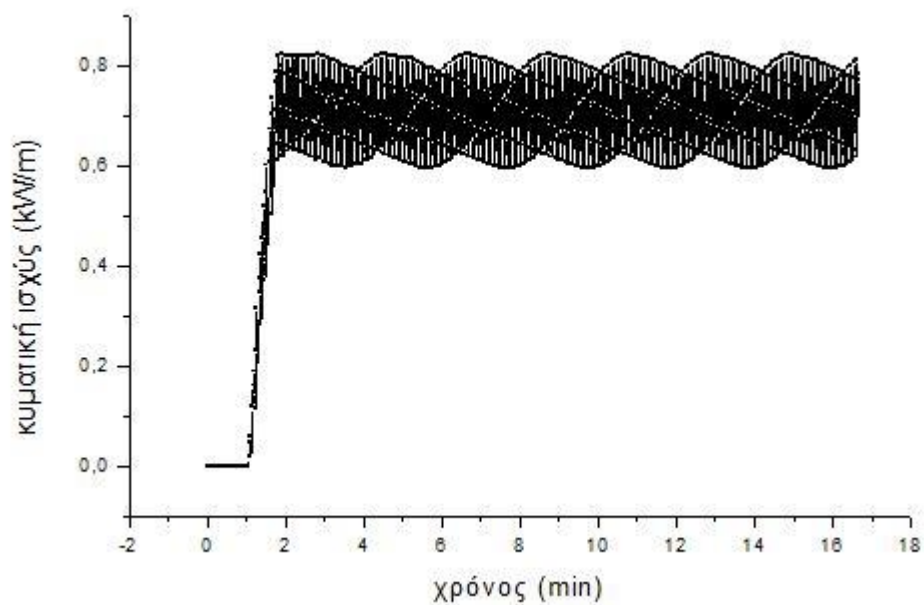
- $\Delta t = 0.1 \text{ sec}$

- $\Delta x = 2 \text{ m}$
- $H_0 = 4 \text{ m}$
- $im = 200$ χωρικά βήματα
- $nm = 10000$ χρονικά βήματα
- $disch1 = 2,3 \text{ m}^2$
- $cc = 0,68$
- $D = 0,4 \text{ m}$ (διάμετρος αγωγού)
- $disch2 = cc \cdot \pi \cdot D^2 / 4 = 0,085$
- $bb = 10 \text{ m}$ (πλάτος τοίχου)

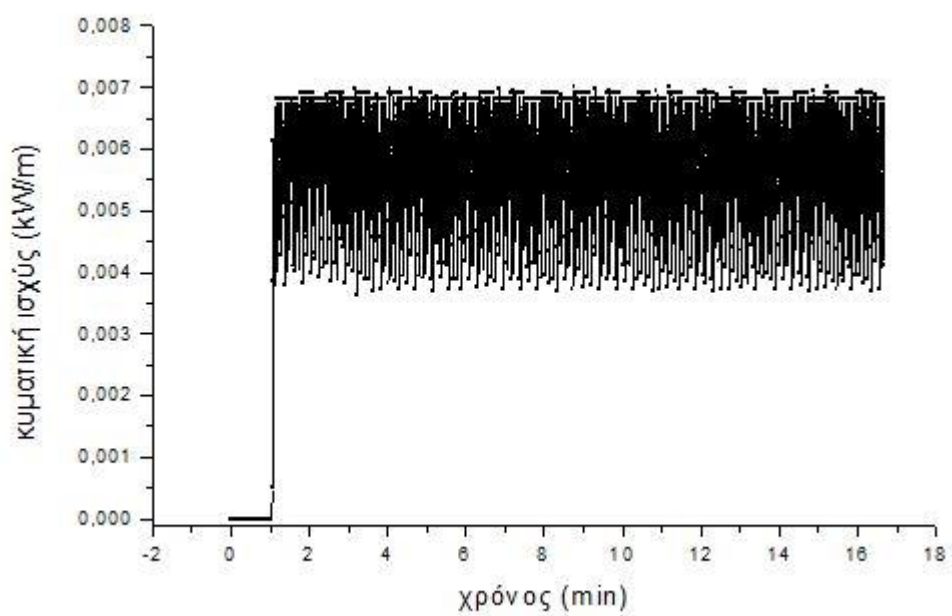
Παρακάτω, παρατίθενται τα οι γραφικές αναπαραστάσεις διακύμανσης της κυματικής ισχύος με την πάροδο του χρόνου, για κάθε περιοχή, όπως προέκυψαν μετά την εφαρμογή του μαθηματικού μοντέλου WAVEN (Εικόνα 135, Εικόνα 136, Εικόνα 137).



Εικόνα 135. Διακύμανση της κυματικής ισχύος που αποδίδεται από την κατασκευή - Άκτιο



Εικόνα 136. Διακύμανση κυματικής ισχύος που αποδίδεται από την κατασκευή - Ηράκλειο



Εικόνα 137. Διακύμανση της κυματικής ισχύος που αποδίδεται από την κατασκευή – Ιεράπετρα

Η κυματική ισχύς για κάθε περιοχή, πριν την εφαρμογή του μαθηματικού μοντέλου, υπολογίζεται ως εξής (Λιακόπουλος, 2014):

Άκτιο:

$$P = H^2 \cdot T = 0,35^2 \cdot 3,1 \Rightarrow P = 0,38 \text{ kW/m} \quad (\text{Για κανονικά κύματα})$$

$$P = 0.5 \cdot H^2 \cdot T = 0.5 \cdot 0,35^2 \cdot 3,10 \Rightarrow P = 0.19 \text{ kW/m} \quad (\text{Για μη κανονικά κύματα})$$

Ηράκλειο:

$$P = H^2 \cdot T = 0,92^2 \cdot 4,96 \Rightarrow P = 4,20 \text{ kW/m} \quad (\text{Για κανονικά κύματα})$$

$$P = 0.5 \cdot H^2 \cdot T = 0.5 \cdot 0,92^2 \cdot 4,96 \Rightarrow P = 2,1 \text{ kW/m} \quad (\text{Για μη κανονικά κύματα})$$

Ιεράπετρα:

$$P = H^2 \cdot T = 0,23^2 \cdot 2,91 \Rightarrow P = 0,154 \text{ kW/m} \quad (\text{Για κανονικά κύματα})$$

$$P = 0.5 \cdot H^2 \cdot T = 0.5 \cdot 0,23^2 \cdot 2,91 \Rightarrow P = 0,077 \text{ kW/m} \quad (\text{Για μη κανονικά κύματα})$$

Εφαρμόζοντας, όμως, το μαθηματικό μοντέλο, οι τιμές της ισχύος διαμορφώνονται όπως αυτές του Πίνακα 17, οπότε υπολογίζεται μέσω αυτών η μέση ετήσια παραγόμενη ενέργεια:

Άκτιο: $0,12 \text{ kW/m} \rightarrow$ μέση παραγόμενη ενέργεια $E_{\text{Άκτιο}} = 0,12 \cdot (365 \cdot 24) \approx 1050 \text{ kWh/m}$

Ηράκλειο: $0,68 \text{ kW/m} \rightarrow$ μέση παραγόμενη ενέργεια $E_{\text{Ηρακλ}} = 0,68 \cdot (365 \cdot 24) \approx 6000 \text{ kWh/m}$

Ιεράπετρα: $0,023 \text{ kW/m} \rightarrow$ μέση παραγόμενη ενέργεια $E_{\text{Ιεπ}} = 0,023 \cdot (365 \cdot 24) \approx 200 \text{ kWh/m}$

Όπως γίνεται εύκολα αντιληπτό από τα αποτελέσματα, η περιοχή του Ηρακλείου δίνει σαφώς πιο ικανοποιητικά αποτελέσματα σχετικά με την παραγόμενη και την αξιοποιήσιμη ενέργεια, συγκριτικά με τις άλλες δύο περιοχές. Όμως, είναι γνωστό ότι από τις παραπάνω τιμές, μόνο ένα μέρος τους θα μετατραπεί τελικώς σε αξιοποιήσιμη ηλεκτρική ενέργεια. Αν θεωρήσουμε ότι ο ενεργειακός κυματοθραύστης ή κρηπιδότοιχος θα έχει μήκος 100 m, η μέση ενέργεια που θα μπορούσε να παραχθεί από το σύνολο του μήκους του τοίχου. Θα διαμορφωνόταν για την κάθε περιοχή ως εξής:

Άκτιο: $E_{100} = 1050 \cdot 100 = 105000 \text{ kWh} = 105 \text{ MWh}$

Ηράκλειο: $E_{100} = 6000 \cdot 100 = 600000 \text{ kWh} = 600 \text{ MWh}$

Ιεράπετρα: $E_{100} = 200 \cdot 100 = 20000 \text{ kWh} = 20 \text{ MWh}$

Ενώ η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια για την κάθε περιοχή, από έναν ενεργειακό κυματοθραύστη/κρηπιδότοιχο μήκους 100 μέτρων, διαμορφώνεται ως εξής:

Άκτιο: $E_{\text{el}100} = E_{100} \cdot \eta_{\text{gen}} = 105 \cdot 0,45 = 47,25 \text{ MWh}$

Ηράκλειο: $E_{el100} = E_{100} \cdot \eta_{gen} = 600 \cdot 0,45 = 270 \text{ MWh}$

Ιεράπετρα: $E_{el100} = E_{100} \cdot \eta_{gen} = 20 \cdot 0,45 = 9 \text{ MWh}$

Όπου η_{gen} ένας συντελεστής απόδοσης της ηλεκτρικής γεννήτριας, $\eta_{gen} = \mathbf{0,45}$ (Kralli et al., 2019)

Εστιάζοντας στην περίπτωση του Ηρακλείου, όπου η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια είναι ίση με 270 MWh, ποσό το οποίο δεν μπορεί να θεωρηθεί υψηλό, ωστόσο, σε περίπτωση κλίσης μπροστά από την κατασκευή, η τιμή αυτή θα μπορούσε να διαμορφωθεί στα 540 MWh, τιμή συγκρίσιμη με τις αντίστοιχες τιμές που παρουσιάστηκαν σε έρευνα των Kralli et al., (2019) και αφορούσαν τη συγκεκριμένη περιοχή και την ενέργεια που μπορούσε να παραχθεί από ενεργειακό τοίχο μήκους 100 m.

3.3 Συμπεράσματα - Προτάσεις

Είναι εμφανές ότι το Ηράκλειο αποτελεί ένα ιδανικό μέρος για την κατασκευή ενός ενεργειακού τοίχου, αφού οι τιμές της αξιοποιήσιμης ενέργειας για τη συγκεκριμένη περιοχή, είναι σαφώς υψηλότερες από τις άλλες δύο περιοχές που εξετάζουμε. Τα αποτελέσματα αυτά, έρχονται να επιβεβαιώσουν την έρευνα που είχε γίνει από τους Soukissian et al., (2011) όπου μελετώντας τα ανεμολογικά στοιχεία της Ελλάδος, σε βάθος δεκαετίας (τα δεδομένα της εν λόγω έρευνας ήταν από το 1995 έως και το 2004), επισήμανε την περιοχή του νοτιοανατολικού Αιγαίου, μεταξύ Κρήτης και Κάσου, ως το σημείο από το οποίο θα μπορούσε κανείς να αντλήσει υψηλότερα ποσοστά ενέργειας από τα κύματα. Σύμφωνα με τη μελέτη των Soukissian et al., (2011), η μέση ετήσια διαθέσιμη ισχύς από τα κύματα στις βόρειες ακτές της Κρήτης, όπου βρίσκεται και το Ηράκλειο, **κυμαίνεται μεταξύ 1 και 3 kW/m κοντά στις ακτές και από 3 έως 4 kW/m για μεγαλύτερες αποστάσεις από τις ακτές**, γεγονός που αντικατοπτρίζεται και στην παρούσα μελέτη, αφού όπως παρουσιάζεται και στον *Πίνακα 17*, **η μέση ετήσια διαθέσιμη ισχύς από τα κύματα της θάλασσας, για την περιοχή του Ηρακλείου, ισούται με 4,24 kW/m για κανονικά κύματα και 2,1 kW/m για μη κανονικά κύματα.**

Για την περιοχή της Ιεράπετρας, θα μπορούσε να ισχύει κάτι ανάλογο με το Ηράκλειο, όμως η μεγάλη έλλειψη δεδομένων για την περιοχή (≈ 30000 δεδομένα για την Ιεράπετρα έναντι ≈ 93000 δεδομένων για την περιοχή του Ηρακλείου) δεν μας αφήνει να οδηγηθούμε σε ασφαλή συμπεράσματα. Από τα διαθέσιμα δεδομένα, πάντως, προκύπτει ότι οι άνεμοι που δημιουργούν κύματα προς την ακτή, στην περιοχή της Ιεράπετρας, εμφανίζονται με αρκετά μεγάλη συχνότητα καθ' όλη τη διάρκεια του έτους, γεγονός που υποδηλώνει ότι ενδεχομένως να είναι και η Ιεράπετρα μια ιδανική περιοχή για κατασκευή ενός ενεργειακού τοίχου. Με τα δεδομένα που είχαμε στη διάθεσή μας, **υπολογίσθηκε η παραγόμενη ισχύς ανά μονάδα μήκους για την περιοχή της Ιεράπετρας, 0,12 kW/m**. Σε ανάλογη έρευνα των Soukissian et al., (2011), φαίνεται πως η μέση διαθέσιμη ισχύς στη θαλάσσια περιοχή κοντά στις ακτές της Ιεράπετρας **κυμαίνεται μεταξύ 2-3 kW/m**. Η απόκλιση που υπάρχει ανάμεσα στις δύο μελέτες είναι πολύ μεγάλη και μπορεί να οφείλεται στη μεγάλη έλλειψη καταγραφής δεδομένων που υπήρχε στον μετεωρολογικό σταθμό της Ιεράπετρας από το 2005 και μετά.

Τα αποτελέσματα της παρούσας έρευνας, έδειξαν ότι **η μέση ετήσια διαθέσιμη ισχύς στις ακτές του Ακτίου είναι $\approx 0,38$ kW/m**. Στην *ανάλογη έρευνα των Soukissian et al. (2011)*, τα

στοιχεία έδειξαν ότι η μέση κυματική ισχύς στη συγκεκριμένη περιοχή, κυμαίνεται από 0-1 kW/m.

Τα αποτελέσματα της υπολογιστικής μελέτης, επιβεβαιώνονται σε γενικές γραμμές από αντίστοιχα αποτελέσματα προηγούμενων ερευνών, γεγονός που τεκμηριώνει την αξία και την υπολογιστική και προγνωστική δυνατότητα του μοντέλου που εφαρμόστηκε. Οι μικρότερες ή μεγαλύτερες διαφοροποιήσεις στις τιμές που έχουν βρεθεί από προηγούμενες έρευνες, μπορεί να οφείλονται στο γεγονός της διαφορετικής χρονικής περιόδου και του εύρους των περιόδων από τις οποίες έχουν αντληθεί τα δεδομένα για την εκάστοτε μελέτη, όπως επίσης και στην πληρότητα ή έλλειψη δεδομένων που τροφοδότησαν τη μελέτη της κάθε περίπτωσης.

Συγκρίνοντας τα παραπάνω αποτελέσματα, είναι εμφανώς πιο συμφέρον να κατασκευαστεί ένας ενεργειακός κυματοθραύστης στην παράκτια περιοχή του Ηρακλείου, αφού η συγκεκριμένη περιοχή παρουσιάζει ένα αρκετά υψηλό κυματικό δυναμικό. Αυτό συμβαίνει γιατί οι άνεμοι που πνέουν στην περιοχή του Ηρακλείου, δημιουργώντας κύματα προς την ακτή (B, ΒΔ, ΒΑ) εμφανίζονται με υψηλή συχνότητα και με υψηλή ένταση. Το κυματικό δυναμικό στην περιοχή του Ακτίου, παρουσιάζεται αρκετά χαμηλό, οπότε η συγκεκριμένη περιοχή δεν προτείνεται για την εγκατάσταση ενός ενεργειακού κυματοθραύστη/κρηπιδότοιχου. Το ίδιο ισχύει και για την περιοχή της Ιεράπετρας, όπου η κυματική ισχύς που υπολογίσθηκε ότι μπορεί να παραχθεί στις ακτές της περιοχής, είναι εξαιρετικά χαμηλή. Αυτό συμβαίνει γιατί στις εν λόγω περιοχές, οι άνεμοι που δημιουργούν κύματα προς την ακτή (Δ, ΒΔ, ΝΔ για το Άκτιο και Ν, ΝΔ, ΝΑ για την Ιεράπετρα) παρουσιάζονται με χαμηλή συχνότητα ή/και με χαμηλή ένταση.

Για την καλύτερη εκμετάλλευση της κυματικής ενέργειας, ανάλογα με τις διαφορετικές συνθήκες των κυματικών χαρακτηριστικών που αντιστοιχούν σε διαφορετικές χρονικές περιόδους, μπορεί να επιδιώκεται η βέλτιστη λειτουργία της ενεργειακής κατασκευής με την εφαρμογή ενός κινούμενου στελέχους, το οποίο θα άλλαζε το επίπεδο της στάθμης της υπερχειλίσης, δηλαδή του ανοίγματος στο κατακόρυφο μέτωπο του ενεργειακού τοίχου. Η προτεινόμενη αυτή διάταξη φαίνεται να είναι ρεαλιστική και αρκετά πρακτική και οπωσδήποτε οδηγεί στην αποτελεσματικότερη λειτουργία με τη μεγαλύτερη δυνατή εκμετάλλευση της ενέργειας των κυμάτων που προσπίπτουν στην κατασκευή.

Επίσης, προτείνεται η εφαρμογή του εν λόγω αριθμητικού μοντέλου και σε άλλες περιοχές της Ελλάδας με υψηλό κυματικό δυναμικό, όπως η περιοχή του νοτιοανατολικού Αιγαίου, μεταξύ Κρήτης και Κάσου ή το νοτιοδυτικό Αιγαίο, κοντά στα Κύθηρα. Αξιόλογα αποτελέσματα αναμένονται και από την ενδεχόμενη εφαρμογή του μοντέλου στο κεντρικό – νότιο Αιγαίο, κοντά στις ακτές της Νάξου.

4. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

4.1 Ξένη βιβλιογραφία

- Baker, N. J., & Mueller, M. (2001). Direct Drive Wave Energy Converters.
- Blackledge, J., Coyle, E. D., Kearney, D., & Norton, B. 2013. Estimation of Wave Energy from Wind Velocity.
- Cascajo R., García e., Quiles E., Correcher A. & Morant F., (2019). Integration of Marine Wave Energy Converters into Seaports: A Case Study in the Port of Valencia.
- Clément A, McCullen P, Falcão A, Fiorentino A, Gardner F, Hammarlund K, Lemonis G, Lewis T., Nielsen K, Petroncini S, Pontes, M., Schild P, SjöströmBengt O, Sørensen H, Thorpe T, 2002. «Wave energy in Europe: current status and perspectives» *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 6, 405- 431
- Curto, D. Franzitta, V. Guercio, A. 2021. «Sea Wave Energy. A Review of the Current Technologies and Perspectives» *Energies* 2021, 14, 6604
- Dialyna, E., Tsoutsos, T. 2021. «Wave Energy in the Mediterranean Sea: Resource Assessment, Deployed WECs and Prospects» *Energies* 2021, 14, 4764.
- Domingo Vilaplana A., (2010). Evaluation of the Volume-Exchange Model using Van der Meer Laboratory Test Results.
- Dzhonova, D., Popov, R., & Georgiev, A. (2013). Challenges of Marine Power in the Balkan Region.
- Gravas A., Savvidis Y., Koutitas C, 2012. «Modelling Study on wave energy harnessing port structures» *Fresenius Environmental Bulletin*, vol. 21, No 8, pp. 3069 – 3076
- Goswami, P. (2015). Ocean Energy For Electricity Generation And Its Potential In India.
- Heller, V., Chaplin, J. R., & Hearn, G. E. (2010). Physical model tests of the anaconda wave energy converter. IAHR Member.
- Hossain M. J. (2015). Possibility and Methodology Investigation of Ocean Wave Power Generation
- Huckerby J., (2012). *Ocean Energy Systems: Development of Marine Energy in the Global Context*, New York
- Ipodimatopoulou S., Syrpi M., Savvidis Y., 2023. «Exploitation of marine wave energy. Application in selected Greek coastal areas» 2nd International Conference Design and Management of Port, Coastal and Offshore Works, Thessaloniki, 24-27 May 2023

- Jackson, G. A., & Boxx, W. R. (2012). Persistence and Survival in Entrepreneurship: The Case of the Wave Energy Conversion Corporation of America.
- Kofoed, J., Tedd, J., Jasiński, M., Morris, A., Friis-Madsen, E., Wiśniewski, R., & Bendtsen, J. (2007). Advanced Control Techniques for WEC Wave Dragon. Aalborg Universitet.
- Koutitas C.G & Savvidis Y.G., 2008. «Modelling of a Wave Energy Harnessing Breakwater» Department of Civil Engineering, Aristotle University of Thessaloniki, Thessaloniki, Greece
- Kralli V., Theodossiou N, Karambas T, 2019. Optimal Design of Overtopping Breakwater for Energy Conversion (OBREC) Systems Using the Harmony Search Algorithm Front Energ Res.7:80.doi:10.3389/fenrg.00080
- Lagstroem, G. (2000). Sea Power International - Floating wave power vessel, FWPV. In "Wave power - Moving towards commercial viability", 4th European Wave Energy Conference, Aalborg, Denmark.
- Leishman, J. M., & Scobie, G. 1976. The Development of Wave Power: A Techno-Economic Study.
- Lewis, T., 1999. «A strategic review of the wave energy resource in Ireland. Wave Energy – Moving towards commercial viability» IMECHE Seminar, London, UK
- Muchtar, M., Manjang, S., Suriamihardja, D. A., & Thaha, A. 2016. Model of Ocean Wave Energy Converter Based on Water Mass Gravity Force as a Renewable Energy Source.
- Ortega-Achury, S. L., Mcanally, W., Davis, T., & Martin, J. L. (2007). Hydrokinetic Power Review. Mississippi State University.
- Pecher, A., & Kofoed, J. P. 2016. «Handbook of Ocean Wave Energy». ScriptaBooks.
- Renzi, E., Abdolali, A., Bellotti, G., & Dias, F. (2012). Mathematical Modelling of the Oscillating Wave Surge Converter.
- Rithy, V., Phalkun, Y., Leakhena, Y., & Thort, Y. (2014). Wave Energy. Institute of Technology of Cambodia, Department of electrical and energy engineering.
- Savvidis Y.G., Zafiriou S.V., Keramaris E, 2013. «Energy production from sea waves and currents. A general review» Journal of Environmental Protection and Ecology 14, No 3.922 - 932

- Soukissian, T., Hatzinaki, M., Korres, G., Papadopoulos, A., Kallos, G., Anadranistakis, E., 2007: Wind and Wave Atlas of the Hellenic Seas, Hellenic Centre for Marine Research Publ., 300 pp
- Soukissian T., Gizari N. & Hatzinaki M, 2011. «*Wave Potential of the Greek seas, Energy and Sustainability*»
- Stagonas, D., Müller, G., Maravelakis, N., Magagn, D., & Warbrick, D. 2010. «Composite seawalls for wave energy conversion: 2D experimental results» 3rd International Conference on Ocean Energy, 6 October, Bilbao. Sustainable Energy Research Group, School of Civil Engineering and the Environment, University of Southampton, Southampton, SO17 1BJ, United Kingdom
- Valério, D., Da Costa, J. S., & Beirdol, P. (2007). Linear model identification of the Archimedes Wave Swing.
- Vicinanza, D., Margheritini, L., & Frigaard, P. 2008. «SSG wave energy converter: Design, reliability and hydraulic performance of an innovative overtopping device» Department of Civil Engineering, Aalborg University, Sohngaardsholmsvej 57, DK-9000 Aalborg, Denmark, Department of Civil Engineering - CIRIAM, Seconda Università di Napoli, Via Roma 29, 81031 Aversa (Caserta), Italy.
- Vicinanza, D., Margheritini, L., Kofoed, J. P., & Buccino, M. (2012). The SSG Wave Energy Converter: Performance, Status and Recent Developments. *Energies*, 5(2), 193-226.
- Zodiatis, G., Galanis, G., Nikolaidis, A., Kalogeri, C., Hayes, D., Georgiou, G. C., Chu, P. C., & Kallos, G. 2013. «Wave energy potential in the Eastern Mediterranean Levantine Basin: An integrated 10-year study» Oceanography Centre, University of Cyprus, Nicosia 1678, Cyprus; Hellenic Naval Academy, Section of Mathematics, Hatzikiriakion, Piraeus 18539, Greece; University of Athens, Department of Physics, Atmospheric Modeling and Weather Forecasting Group, University Campus, Bldg. PHYS-V, Athens 15784, Greece; Naval Postgraduate School, Graduate School of Engineering & Applied Science, Department of Oceanography, Monterey, CA 93943, USA.

4.2 Ελληνική βιβλιογραφία

- Γαλάνης Γ., Ζωδιάτης Γ., Hayes D., Νικολαΐδης Α., Γεωργίου Γ., Στυλιανού Σ., Κάλλος Γ., Καλογερή Χ., Chu P.C., Χαραλάμπους Α., Σαββίδου Κ., Μιχαηλίδης Σ., 2012. «Το Πρόγραμμα EWAVE: Εκτίμηση του Θαλάσσιου Ενεργειακού Δυναμικού στην περιοχή της Κύπρου» 10th Panhellenic Oceanographic and Fisheries Symposium, Athens.

- Δραγανίδης Γ., 2020. «Διερεύνηση για την αξιοποίηση της θαλάσσιας κυματικής ενέργειας. Εφαρμογή στον Θερμαϊκό κόλπο μέσω κατασκευής παράκτιου τεχνικού έργου με κατακόρυφα μέτωπα» Διπλωματική Εργασία στο τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος του ΔΙΠΑΕ, Θεσσαλονίκη
- Ζαφειρίου Σ., 2012. Πτυχιακή Εργασία: “Παραγωγή ενέργειας από θαλάσσια κύματα και ρεύματα” Πτυχιακή Εργασία στο τμήμα Τεχνολογίας Αλιείας και Υδατοκαλλιεργειών του ΑΤΕΙΘ, Νέα Μουδανιά
- Καρακινάρης Δ., 2017. «Παραγωγή ενέργειας από θαλάσσια κύματα» Πτυχιακή Εργασία στο τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών Τ.Ε. του ΤΕΙ Δυτικής Ελλάδας.
- Καραμπάς Θ, Δήμας Αθ. και Λουκογεωργάκη Ε., 2020. Ακτομηχανική και Λιμενικά Έργα, Εκδόσεις Δίσιγμα
- Καραμπάς Θ., Κρεστενίτης Ι., Κουτίτας Χ., 2015. «Ακτομηχανική – Έργα προστασίας ακτών», Εκδόσεις Ελληνικά Ακαδημαϊκά Ηλεκτρονικά Συγγράμματα και Βοηθήματα.
- Κουρτζής Χ., 2013. «Αριθμητική μοντελοποίηση και διερεύνηση λειτουργίας και ενεργειακής απόδοσης μη εμβολοφόρου αντλητικής διάταξης για ανάκτηση κυματικής ενέργειας με σύστημα πλωτήρα και εμβυθισμένου κατακόρυφου σωλήνα», Πτυχιακή Εργασία στο τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών του ΕΜΠ.
- Κουτίτας Γ. Χ., 1996. Εισαγωγή στην Παράκτια Τεχνική και τα Λιμενικά Έργα. Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη
- Λιακόπουλος Αν., 2014. Υδραυλική, Εκδόσεις Τζιόλα
- Μαμάσης Ν., Ευστρατιάδης Α., 2018. «Εισαγωγή στην Ενεργειακή Τεχνολογία – Θαλάσσια Ενέργεια», Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
- Μαμάσης Ν., Στεφανάκος Ι., 2014. «Εισαγωγή στην Ενεργειακή Τεχνολογία – Υδροηλεκτρική Ενέργεια», Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
- Μανάλης Α., 2012. «Κυματική και ωκεάνια ενέργεια, σημερινή πραγματικότητα και μελλοντικές προοπτικές», Πτυχιακή Εργασία στο τμήμα Ηλεκτρολογίας ΤΕΙ Καβάλας
- Νικολάου Ε., 2015. «Ενέργεια μέσω θαλασσών» Διπλωματική Εργασία στο τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών του ΑΠΘ, Θεσσαλονίκη.
- Παναγιωτόπουλος Μ., 2015. «Πρόσφατες τεχνολογικές εξελίξεις συστημάτων αξιοποίησης Κυματικής Ενέργειας. Προώθηση της εισαγωγής ενέργειας από θαλάσσιο κυματισμό στην Ευρωπαϊκή αγορά Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας», Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας, ΚΑΠΕ

- Σισμάνη Γ., Καραμπάς Θ., 2015. «Εκμετάλλευση της κυματικής ενέργειας σε παράκτια έργα» 11^ο Πανελλήνιο Συμπόσιο Ωκεανογραφίας & Αλιείας, Μυτιλήνη, Λέσβος, Ελλάδα
- Τέγος Ε., 2011. «Τεχνολογίες Αποθήκευσης Ενέργειας Παραγόμενης από Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας», Πτυχιακή Εργασία στο Τμήμα Ηλεκτρολογίας ΤΕΙ Πειραιά

4.3 Ηλεκτρονικές πηγές

- Caisson Quay and Breakwater Construction Technology. Διαθέσιμο σε: <https://www.aomi.co.jp/en/tech/cason.html#:~:text=A%20caisson%20is%20a%20box%20made%20out%20of,includin%20as%20breakwaters%2C%20quays%2C%20and%20as%20bridge%20foundations>. Τελευταία πρόσβαση: 26/6/2023
- [Microsoft Word - EY03STUDY ON ENERGY CRISIS AND THE FUTURE OF FOSSIL FUELS \(researchgate.net\)](#)
- Ενεργειακή κρίση: Οι αιτίες και οι παράγοντες κινδύνου. Διαθέσιμο σε: <https://www.ot.gr/2022/07/26/aporseis/experts/energeiaki-krisi-oi-aities-kai-oi-paragontes-kindynou/> Τελευταία πρόσβαση: 26/6/2023
- Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Διαθέσιμο σε: <http://www.allaboutenergy.gr/Piges23.html> Τελευταία πρόσβαση: 26/6/2023
- Στα 13.994 kWh η μέση ετήσια κατανάλωση ενέργειας ανά νοικοκυριό. Διαθέσιμο σε: <https://energypress.gr/news/sta-13994-kwh-i-mesi-etisia-katanalosi-energeias-ana-noikokyrio> Τελευταία πρόσβαση: 26/6/2023
- Η Ενεργειακή Κρίση Στην Ελλάδα. Διαθέσιμο σε: <https://www.dianeosis.org/2022/11/i-energeiaki-krisi-stin-ellada/> Τελευταία πρόσβαση: 26/6/2023

- Δελτίο Τύπου: Έρευνα Κατανάλωσης στα νοικοκυριά. Διαθέσιμο σε:
https://www.statistics.gr/el/statistics?p_p_id=documents_WAR_publicationsportlet_INSTANCE_qDQ8fBKKo4IN&p_p_lifecycle=2&p_p_state=normal&p_p_mode=view&p_p_cacheability=cacheLevelPage&p_p_col_id=column-2&p_p_col_count=4&p_p_col_pos=1&documents_WAR_publicationsportlet_INSTANCE_qDQ8fBKKo4IN_javax.faces.resource=document&documents_WAR_publicationsportlet_INSTANCE_qDQ8fBKKo4IN_in=downloadResources&documents_WAR_publicationsportlet_INSTANCE_qDQ8fBKKo4IN_documentID=105418&documents_WAR_publicationsportlet_INSTANCE_qDQ8fBKKo4IN_locale=el Τελευταία πρόσβαση: 26/6/2023
- Ενεργειακή Κατανάλωση Κτιρίων: Κατανάλωση ενέργειας στα νοικοκυριά. Διαθέσιμο σε:
<http://www.cres.gr/energyhubforall/2.2.1.html> Τελευταία πρόσβαση: 26/6/2023
- Breakwater | marine engineering. Διαθέσιμο σε:
<https://www.britannica.com/technology/breakwater>
 Τελευταία πρόσβαση: 26/6/2023
- Κύματα. Διαθέσιμο σε:
http://www.aquaret.com/indexbf8e.html?option=com_content&view=article&id=137&Itemid=280&lang=el Τελευταία πρόσβαση: 26/6/2023
- HELMEPA (2012), «Δαμάζοντας τα κύματα» διαθέσιμο:
[Damazontaskymata.pdf \(helmepacadets.gr\)](http://www.helmepacadets.gr/Damazontaskymata.pdf) Τελευταία πρόσβαση: 26/6/2023
- Salter's Nodding Duck Διαθέσιμο σε:
<https://baonguyen1994.wordpress.com/introduction-to-wave-energy/ocean-wave-technologies/terminators/salters-nodding-duck/> Τελευταία πρόσβαση: 26/6/2023