



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ**  
**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**  
**ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

Διπλωματική εργασία

---

**ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟΥ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΚΥΜΑΤΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ &  
ΠΡΟΒΛΕΨΗ ΗΛΕΚΤΡΟΠΑΡΑΓΩΓΗΣ : ΘΑΛΑΣΣΙΑ ΠΕΡΙΟΧΗ  
ΑΝΤΙΚΥΘΗΡΩΝ**

---

Συγγραφέας

**Μπουφίδης Μάριος (ΕΕΔ202016)**

Επιβλέποντες Καθηγητές:

Επιβλέπων Καθηγητής Δρ. Ιωάννης Καλδέλλης  
Συνεπιβλέπων Παναγιώτης Κτενίδης

**ΑΙΓΑΛΕΩ ΙΟΥΛΙΟΣ, 2023**



**UNIVERSITY OF WEST ATTICA  
SCHOOL OF ENGINEERING  
DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING**

Master thesis

**ASSESSMENT OF WAVE ENERGY POTENTIAL &  
FORECAST OF ELECTRICITY PRODUCTION IN THE  
ANTIKITHIRA SEA AREA**

**Student name and surname:  
Boufidis Marios (EED2022016)**

**Supervisors:  
Kaldellis Ioannis  
Ktenidis Panagiotis**

**AIGALEO, JULY 2023**

## Μέλη Εξεταστικής Επιτροπής συμπεριλαμβανομένου και του Εισηγητή

Η μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία εξετάστηκε επιτυχώς από την κάτωθι Εξεταστική Επιτροπή

Α/α	ΟΝΟΜΑ ΕΠΩΝΥΜΟ	ΒΑΘΜΙΔΑ/ΙΔΙΟΤΗΤΑ	ΨΗΦΙΑΚΗ ΥΠΟΓΡΑΦΗ
1.	Ιωάννης Καλδέλλης	Καθηγητής/ Δρ.	
2.	Κοσμάς Καββαδίας	Αναπληρωτής Καθηγητής/Δρ.	
3.	Δημήτριος Ζαφειράκης	Επίκουρος Καθηγητής/Δρ.	

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος ΜΠΟΥΦΙΔΗΣ ΜΑΡΙΟΣ του ΘΕΟΔΩΡΟΥ με αριθμό μητρώου ΕΕΔ202016 φοιτητής του Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΑ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΑ ΕΡΓΑ του Τμήματος ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ της Σχολής ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής, δηλώνω ότι:

«Είμαι συγγραφέας αυτής της μεταπτυχιακής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της, είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του πτυχίου μου».

Ο Δηλών





## Περίληψη

Η κλιματική αλλαγή καθιστά επιτακτική την ολοένα και μεγαλύτερη διείσδυση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στο ενεργειακό μίγμα της χώρας. Για το λόγο αυτό, στην παρούσα εργασία εξετάζεται η δυνατότητα κάλυψης των απαιτήσεων σε ηλεκτρική ενέργεια για το νησί των Αντικυθήρων με την αξιοποίηση της κυματικής ενέργειας. Η μελέτη εστιάζει στην εκτίμηση των κυματικών χαρακτηριστικών της θαλάσσιας περιοχής ανοιχτά των Αντικυθήρων με τη χρήση δύο διαφορετικών μεθόδων. Στην πρώτη μέθοδο έγινε η προσομοίωση του κυματικού δυναμικού της περιοχής με τη χρήση του μοντέλου Delft 3D – Wave για το έτος 2005. Κατά τη δεύτερη μέθοδο έγινε χρήση δεδομένων από το μοντέλο MEDSEA WAM του ECMWF, το οποίο είναι διαθέσιμο στην υπηρεσία Copernicus Marine Service για την χρονική περίοδο 2005-2015. Συγκρίνοντας τις δυο αυτές μεθόδους σε ένα σημείο αναφοράς για το 2005, διαπιστώνονται μικρές αποκλίσεις μεταξύ των αποτελεσμάτων, ιδιαίτερα τη χειμερινή περίοδο. Ακολούθως, με βάση τα εκτιμώμενα κυματικά χαρακτηριστικά γίνεται ο υπολογισμός της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με τη χρήση των τεχνολογιών μετατροπών κυματικής ενέργειας Wavedragon, Pelamis και AquaBuoY σε διαφορετικής κλίμακας εκδόσεις. Με βάση την παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια από τον κάθε μετατροπέα προκύπτει αυτός με τον αποδοτικότερο συντελεστή αξιοποίησης. Τέλος ο μετατροπέας αυτός φαίνεται να είναι ο καταλληλότερος προς εγκατάσταση στην περιοχή μελέτης καλύπτοντας σημαντικό μέρος της απαιτούμενης ηλεκτρικής ενέργειας για το νησί των Αντικυθήρων.

Λέξεις κλειδιά: Κυματική ενέργεια, μετατροπείς κυματικής ενέργειας, Αντικύθηρα, Delft-3D Wave Model, MEDSEA WAM, Wavedragon, Pelamis, AquaBuoy, Νόμος ομοιότητας FROYDE

## Abstract

Climate change makes the increasing penetration of renewable energy sources in the country's energy mix imperative. For this reason, this paper examines the feasibility of meeting the electricity requirements for the island of Antikythira by utilizing wave energy. The study focuses on the assessment of the wave characteristics of the marine area off Antikythira using two different methods. In the first method, the wave potential of the area was simulated using the Delft 3D - Wave model for the year 2005. In the second method, data from the ECMWF MEDSEA WAM model, which is available on the Copernicus Marine Service for the period 2005-2015, was used. Comparing these two methods to a reference point for 2005, small deviations between the results are found, especially in the winter period. Subsequently, based on the estimated wave characteristics, the calculation of electricity production is performed using the Wavedragon, Pelamis and AquaBuoY wave energy converter technologies in different scale versions. By comparing the calculated electricity generation from these converters, the converter with the best capacity factor have been obtained. This converter appears to be the most suitable for installation in the study area and covers a significant part of the electricity demand for the island of Antikythira.

**Key words:** Wave energy, wave energy converters, Antikythera, Delft-3D Wave Model, MEDSEA WAM, Wavedragon, Pelamis, AquaBuoy, FROYDE law of similarity



## Περιεχόμενα

Περίληψη .....	2
Abstract .....	2
Περιεχόμενα.....	3
Πίνακας εικόνων.....	4
Πίνακας πινάκων.....	5
Εισαγωγή .....	6
Κυματικό ενεργειακό δυναμικό.....	6
Εκτίμηση της παραγωγής κυματικής ενέργειας.....	9
Εξίσωση κυματικής ισχύος.....	9
Προηγούμενες έρευνες.....	9
Διεθνώς .....	9
Στην Ελλάδα .....	13
Ερευνητικά ερωτήματα – Σκοπός μελέτης .....	17
Περιοχή μελέτης .....	17
Κλιματικά και βιοκλιματικά χαρακτηριστικά.....	18
Μορφολογία πυθμένα - Βαθυμετρία.....	18
Μετατροπείς κυματικής ενέργειας.....	18
Τεχνικά χαρακτηριστικά μετατροπέων.....	20
Pelamis.....	20
Wavedragon .....	21
AquaBuOY .....	22
Νόμος ομοιότητας FROYDE.....	22
Μεθοδολογία.....	23
Εκτίμηση κυματικού δυναμικού .....	23
Το μοντέλο SWAN .....	23
Χρήση του Delft Dashboard .....	25
Δεδομένα ανέμου .....	25
Οριακές συνθήκες.....	25
Προσομοίωση παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.....	26
Αποτελέσματα.....	26
Εκτιμώμενο κυματικό δυναμικό .....	26
Για το 2005 μέσω του DELFT 3D SUITE.....	27
Εποχική διακύμανση κυματικών χαρακτηριστικών.....	28
Για την περίοδο 2005-2015.....	29
Εκτιμώμενη παραγωγή ενέργειας.....	31



Για την περίοδο 2005-2015.....	31
Για το 2005 .....	34
Συγκριτικά αποτελέσματα για το 2005 .....	35
Συμπεράσματα - Προτάσεις.....	36
Βιβλιογραφικές αναφορές.....	37
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ .....	41
Παράρτημα 1. Πίνακες ισχύος μετατροπών κυματικής ενέργειας.....	41
Παράρτημα 2 Αποτελέσματα κυματικού δυναμικού.....	43
2.1 Εποχική διακύμανση κυματικών χαρακτηριστικών για το 2005 σύμφωνα με τα αποτελέσματα του μοντέλου Delft3D Wave Model .....	43
2.2 Οι ωριαίες τιμές που παίρνουν το σημαντικό ύψος κύματος και η περίοδος αιχμής, για το σημείο αναφοράς ανά έτος για την περίοδο 2005-2015 .....	47

## Πίνακας εικόνων

Εικόνα 1 Το δίκτυο πλωτών σηματοδούρων παρατήρησης κατά μήκος των ελληνικών θαλασσών (Πηγή: Ελληνικό Κέντρο Θαλασσιών Ερευνών - Βάση Δεδομένων ΠΟΣΕΙΔΩΝ). .....	8
Εικόνα 2 Πίνακας ισχύος με μειωμένη κλίμακα της παραγωγής ισχύος του Wave Dragon για το τοπικό κυματικό κλίμα στα ανοικτά του Alghero. Η πρώτη γραμμή και η πρώτη στήλη δείχνουν τις μέσες τιμές των $H_s$ και $T_p$ , αντίστοιχα. Τα κελιά περιλαμβάνουν την παραγωγή ισχύος,(πηγή B. Zanuttigh et al.,2016).....	11
Εικόνα 3 Συντελεστής χωρητικότητας των "υποβαθμισμένων" μηχανών στις παράκτιες περιοχές της Μεσογείου σύμφωνα με τους S. Bozzi et al. 2017 .....	12
Εικόνα 4 Η βαθυμετρία περιμετρικά της νήσου Αμοργού (πηγή:EMODnet).....	13
Εικόνα 5 Συσχέτιση μεταξύ της κατανομής της ταχύτητας ανέμου και του σημαντικού ύψους κύματος (George Nomikos et al 2017).....	14
Εικόνα 6 Σηματοδούρες συστήματος Ποσειδών .....	15
Εικόνα 7 Περιοχή μελέτης (πηγή: Google Earth, 2023).....	17
Εικόνα 8 Βυθομετρία της υπό μελέτης περιοχής(πηγή EMODnet μέσω Delft3D Dashboard).....	18
Εικόνα 9 Τεχνολογίες μετατροπών κυματικής ενέργειας(πηγή: Pérez and Iglesias, 2012).....	19
Εικόνα 10 Σχηματική απεικόνιση του τρόπου λειτουργίας ενός μετατροπέα Pelamis (πηγή: Book_OceanWaveEnergy ,2008).....	20
Εικόνα 11 Συσκευές Wavedragon (πηγή: www.wavedragon.net, 2021).....	21
Εικόνα 12 Διάσταση του πρωτοτύπου Wave Dragon και Wave Dragons για διαφορετικές κυματικές συνθήκες (Christensen, L.et al 2005).....	22
Εικόνα 13 Μετατροπέας κυματικής ενέργειας Aquabuoy (πηγή Bazar et al, 2010).....	22
Εικόνα 14 Βαθυμετρία περιοχής μελέτης (πηγή EMODnet μέσω Delft3d Dashboard).....	25
Εικόνα 15 Σημείο αναφοράς.....	27
Εικόνα 16 Δισδιάστατη απεικόνιση του σημαντικού ύψους κύματος στην περιοχή μελέτης (από τον συγγραφέα μέσω Quickplot).....	27
Εικόνα 17 Αριστερά: Οι μέγιστες, ελάχιστες και μέσες τιμές για το σημαντικό ύψος κύματος στα 16 δειγματοληπτικά σημεία προσομοίωσης το 2005, Δεξιά:Οι μέγιστες, ελάχιστες και μέσες τιμές για τη περίοδο αιχμής στα 16 δειγματοληπτικά σημεία προσομοίωσης το 2005.....	28



Εικόνα 18 Η ωριαία διακύμανση του σημαντικού ύψους κύματος και της περιόδου αιχμής για το σημείο J (σημείο αναφοράς) για το έτος 2005.....	29
Εικόνα 19 Δισδιάστατη απεικόνιση της κυρίαρχης κατεύθυνσης διάδοσης των κυμάτων το 2005 στην περιοχή μελέτης (από τον συγγραφέα μέσω Quickplot).....	29
Εικόνα 20 Αριστερά: Η ετήσια διακύμανση για τις μέγιστες, ελάχιστες και μέσες τιμές για το σημαντικό ύψος κύματος στο σημείο αναφοράς για την περίοδο 2005 - 2015, Δεξιά: Η ετήσια διακύμανση για τις μέγιστες, ελάχιστες και μέσες τιμές για τη περίοδο αιχμής στο σημείο αναφοράς για την περίοδο 2005 - 2015 .....	30
Εικόνα 21 Αριστερά: το Σημαντικό ύψος κύματος, Δεξιά: η περίοδος αιχμής κύματος, για το σημείο αναφοράς για το έτος 2010 .....	30
Εικόνα 22 Αριστερά: το Σημαντικό ύψος κύματος, Δεξιά: η περίοδος αιχμής κύματος, για το σημείο αναφοράς για το έτος 2012 .....	30
Εικόνα 23 Εκτιμώμενη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας για την χρονική περίοδο 2005-2015 στο σημείο αναφοράς από τους 6 διαφορετικούς τύπους μετατροπέων.....	31
Εικόνα 24 Ο ετήσιος συντελεστής χωρητικότητας για την χρονική περίοδο 2005-2015 στο σημείο αναφοράς από τους 6 διαφορετικούς τύπους μετατροπέων.....	33
Εικόνα 25 Η μηνιαία παραγωγή για τους μετατροπείς Wavedragon στο σημείο αναφοράς το 2005 ..	34
Εικόνα 26 Η μηνιαία παραγωγή για τους μετατροπείς Pelamis και AquaBuoy στο σημείο αναφοράς το 2005.....	34
Εικόνα 27 Συγκριτικά αποτελέσματα για τη μηνιαία παραγωγή για τους μετατροπείς Pelamis και AquaBuoy στο σημείο αναφοράς το 2005.....	35
Εικόνα 28 Συγκριτικά αποτελέσματα για τη μηνιαία παραγωγή για τους μετατροπείς Wavedragon στο σημείο αναφοράς το 2005.....	35
Εικόνα 29 Pelamis 250kW.....	41
Εικόνα 30 Pelamis 500 kW.....	41
Εικόνα 31 Pelamis 1000 kW.....	41
Εικόνα 32 Wavedragon 1100 kW.....	42
Εικόνα 33 Wavedragon 5900 kW.....	42
Εικόνα 34 Pelamis 750 kW.....	42
Εικόνα 35 AquaBuoy 250 kW.....	43

## Πίνακας πινάκων

Πίνακας 1 Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά και η ονομαστική παραγωγή ισχύος τόσο για το αρχικό όσο και για τα μειωμένης κλίμακας WaveDragon (πηγή Zanuttigh B. et al. (2016)) .....	10
Πίνακας 2 Οι μετατροπείς που αξιολογήθηκαν στην παρούσα μελέτη.....	19
Πίνακας 3 Σημεία λήψεις δεδομένων από την προσομοίωση του κυματικού δυναμικού για το 2005.28	
Πίνακας 4 Η ετήσια παραγωγή για κάθε μετατροπέα κυματικής ενέργειας για την περίοδο 2005-2015 .....	32
Πίνακας 5 Συνολική παραγωγή ανά μετατροπέα για την περίοδο 2005-2015 .....	32
Πίνακας 6 Συντελεστής χωρητικότητας ανά έτος για κάθε μετατροπέα την περίοδο 2005-2015.....	33





## Εισαγωγή

Στο Αιγαίο υπάρχουν πολλά νησιά με λιγότερους από 5000 κατοίκους τα οποία διαθέτουν μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ή είναι διασυνδεδεμένα με γειτονικά νησιά που διαθέτουν μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας μέσω πετρελαίου ή φυσικού αερίου. Καθώς τα επόμενα χρόνια πρέπει να μηδενιστεί η χρήση των μονάδων ηλεκτροπαραγωγής με τη καύση άνθρακα, καθίσταται αναγκαία η διασύνδεσής τους με την ηπειρωτική Ελλάδα, όπου λειτουργούν μονάδες ΑΠΕ ή την εγκατάσταση μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ.

Τέτοιο είναι το παράδειγμα των νησιών του Δήμου Κυθήρων (Κύθηρα και Αντικύθηρα) νοτιοανατολικά της Πελοποννήσου και βορειοδυτικά της Κρήτης, με μόνιμο πληθυσμό κατά την απογραφή του 2021 3.644 άτομα. Ο Δήμος Κυθήρων συνδέεται με το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας με την διασύνδεση του νησιού των Κυθήρων με την ηπειρωτική Ελλάδα μέσω της Πελοποννήσου, ενώ διοικητικά ανήκει στην περιοχή των Μολάων. Τα Αντικύθηρα ανήκουν στα μη διασυνδεδεμένα νησιά με δικό τους Αυτόνομο Σταθμό Παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (ΑΣΠ) που λειτουργεί με 4 θερμικές μονάδες ισχύος 90kW έκαστος με την χρήση καυσίμου diesel και μέση ετήσια κατανάλωση ενέργειας 250 – 300 MWh.

Το νησί των Αντικυθήρων λόγω της γεωγραφικής του θέσης έχει επιλεχθεί από την Ευρωπαϊκή Ένωση για να φιλοξενήσει το Ευρωπαϊκό Παρατηρητήριο Γεωεπιστημών και Κλιματικής Αλλαγής (ΠΑΓΓΑΙΑ) που θα υλοποιήσει το Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών. Λόγω της αναμενόμενης αύξησης της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας από τη λειτουργία του Ευρωπαϊκού Παρατηρητηρίου και για να μειωθεί παράλληλα η χρήση συμβατικών καυσίμων για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, εξετάζεται στην παρούσα εργασία, η εγκατάσταση μονάδας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με την εκμετάλλευση της κυματικής ενέργειας.

## Κυματικό ενεργειακό δυναμικό

Η μοναδική τοποθεσία της Μεσογείου παρέχει πολλούς από τους επιθυμητούς πόρους κυμάτων που είναι απαραίτητοι για να την καταστήσουν ηγέτη στον τομέα των ΑΠΕ. Ως επακόλουθο, τα τελευταία χρόνια υπάρχει αυξανόμενο ενδιαφέρον για τη συγκεκριμένη περιοχή με στόχο τον εντοπισμό κατάλληλων περιοχών για εκμετάλλευση ΑΠΕ. Για το λόγο αυτό καταβάλλεται σημαντική προσπάθεια προκειμένου να βρεθούν τρόποι μείωσης της εξάρτησης από την εισαγόμενη ενέργεια χρησιμοποιώντας σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής που βασίζονται σε ΑΠΕ (Kaldellis, 2021).

Τις περισσότερες φορές είναι απαραίτητη μια μεγάλη ποικιλία δεδομένων ανάλογα με το είδος των σταθμών παραγωγής ενέργειας που εμπλέκονται σε κάθε έργο. Ορισμένοι σημαντικοί παράγοντες που πρέπει να ληφθούν υπόψη όταν αξιολογείται η καταλληλότητα ορισμένων περιοχών για την εγκατάσταση και λειτουργία συσκευών παραγωγής ενέργειας από κύματα είναι το ύψος κύματος (m), η ταχύτητα κύματος (m/sec), το μήκος κύματος (m) και η πυκνότητα του νερού (Clement A. et al, 2002).

Οι τεχνικές συλλογής και επεξεργασίας δεδομένων που χρησιμοποιούνται συνήθως μέχρι σήμερα μπορούν να προκύψουν από τρεις πηγές:

- Επί τόπου μετρήσεις, οι οποίες παρέχουν μετρήσεις των κύριων παραμέτρων των κυμάτων σε συνεχή και τοπική βάση.



## Εκτίμηση ενεργειακού δυναμικού κυματικής ενέργειας & πρόβλεψη ηλεκτροπαραγωγής : θαλάσσια περιοχή Αντικυθήρων

- Τεχνικές αλτιμετρίας (δορυφόροι), που παρέχουν μια συνεχή βάση δεδομένων σε μια σχετικά μεγάλη περιοχή.
- Αριθμητικά μοντέλα πρόβλεψης κυμάτων (αλγόριθμοι προσομοίωσης δεδομένων), τα οποία παρέχουν εκτιμήσεις χρησιμοποιώντας παραμέτρους που σχετίζονται με την περιοχή και το χρόνο.

Τα κύματα δημιουργούνται από τον άνεμο που περνά πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας. Μεταφορά ενέργειας από τον άνεμο στα κύματα υπάρχει όταν τα κύματα διαδίδονται πιο αργά σε σχέση με την ταχύτητα του ανέμου που επικρατεί ακριβώς πάνω από τα κύματα. Τόσο οι διαφορές πίεσης του αέρα μεταξύ της προσήνεμης και της υπήνεμης πλευράς της κορυφής ενός κύματος, όσο και η τριβή στην επιφάνεια του νερού από τον άνεμο, που κάνει το νερό να μπαίνει σε διατμητική τάση, προκαλούν την ανάπτυξη των κυμάτων. Το ύψος των κυμάτων καθορίζεται από την ταχύτητα του ανέμου, τη διάρκεια του χρόνου που πνέει ο άνεμος, το fetch (η απόσταση στην οποία ο άνεμος διεγείρει τα κύματα) και από το βάθος και την τοπογραφία του πυθμένα της θάλασσας (που μπορεί να εστιάσει ή να διασκορπίσει τα κύματα, άρα και την ενέργεια των κυμάτων). Μια δεδομένη ταχύτητα του ανέμου έχει ένα αντίστοιχο πρακτικό όριο στο οποίο ο χρόνος ή η απόσταση δεν θα παράγει μεγαλύτερα κύματα. Όταν αυτό το όριο έχει επιτευχθεί, η θάλασσα λέγεται ότι είναι "πλήρως ανεπτυγμένη".

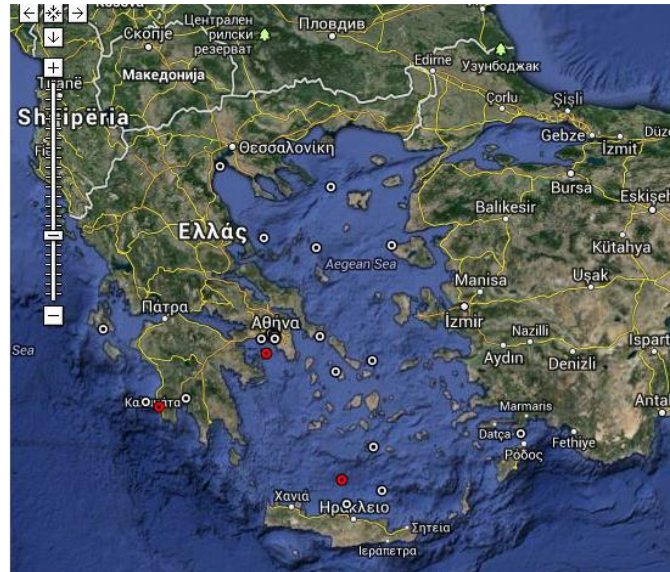
Γενικά, τα μεγαλύτερα κύματα είναι πιο ισχυρά, αλλά η ισχύς των κυμάτων καθορίζεται επίσης από την ταχύτητα των κυμάτων, το μήκος κύματος και την πυκνότητα του νερού. Ο μέσος ρυθμός μεταφοράς της κυματικής ενέργειας μέσω ενός κατακόρυφου επιπέδου μοναδιαίου πλάτους, παράλληλου προς την κορυφή του κύματος, ονομάζεται κυματική ενέργεια flux (η οποία δεν πρέπει να συγχέεται με την ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από μια συσκευή κυματικής ενέργειας).

Η παραγωγή κυματικής ενέργειας δεν αποτελεί επί του παρόντος μια ευρέως χρησιμοποιούμενη εμπορική τεχνολογία, αν και έχουν γίνει προσπάθειες χρήσης της τουλάχιστον από το 1890. Το 2008, το πρώτο πειραματικό κυματικό πάρκο άνοιξε στην Πορτογαλία, στο κυματικό πάρκο Aguadoura (Joao Lima.2008).

Παρά το γεγονός ότι η αξιολόγηση των θαλάσσιων πόρων είναι μια στοχαστική διαδικασία, υπάρχουν πολλές συγκεκριμένες παράμετροι που πρέπει να εξεταστούν ώστε να προκύψει μια ολοκληρωμένη εικόνα συγκεκριμένων χαρακτηριστικών, όπως το δυναμικό κυματικής ενέργειας. Για τον σκοπό αυτό, είναι σημαντικό να υπάρχει ικανός αριθμός δεδομένων για τον υπολογισμό επικυρωμένων αποτελεσμάτων. Όσον αφορά τις υπό διερεύνηση περιοχές, θα πρέπει να είναι εκτεθειμένες στις συνθήκες ανοικτής θάλασσας και ταυτόχρονα να διερευνάται το δυναμικό τους, ώστε να είναι διαθέσιμα αξιόπιστα κυματικά δεδομένα για περαιτέρω επεξεργασία.



## Εκτίμηση ενεργειακού δυναμικού κυματικής ενέργειας & πρόβλεψη ηλεκτροπαραγωγής : θαλάσσια περιοχή Αντικυθήρων



Εικόνα 1 Το δίκτυο πλωτών σηματοδύρων παρατήρησης κατά μήκος των ελληνικών θαλασσών (Πηγή: Ελληνικό Κέντρο Θαλασσίων Ερευνών - Βάση Δεδομένων ΠΟΣΕΙΔΩΝ).

Στην εικόνα (1) παρουσιάζεται η απεικόνιση των ενεργών και προσωρινά ανενεργών σηματοδύρων παρατήρησης, (Ελληνικό Κέντρο Θαλασσίων Ερευνών, 2022). Με αυτόν τον τρόπο είναι δυνατή η συνεχής καταγραφή παραμέτρων που σχετίζονται με τα κυματικά χαρακτηριστικά των ελληνικών θαλασσών. Οι μετρήσεις είναι καθημερινές και συλλέγονται περίπου κάθε τρεις ώρες. Στη συνέχεια τα δεδομένα αυτά μεταδίδονται στο επιχειρησιακό κέντρο, όπου μπορούν να καταχωρηθούν στην κατάλληλη βάση δεδομένων. Στη συνέχεια, με τη χρήση μοντέλων προσομοίωσης που ενημερώνονται με τις ήδη υπάρχουσες μετρήσεις, μπορεί να επιτευχθεί αρκετά αξιόπιστη εκτίμηση του δυναμικού όσον αφορά τα επικρατούντα κυματικά χαρακτηριστικά για όλες τις παράκτιες περιοχές.

Δυστυχώς, στην Ελλάδα το πλήθος των *in situ* μετρήσεων είναι αρκετά περιορισμένο, ενώ τα αριθμητικά μοντέλα πρόβλεψης κυμάτων που έχουν αναπτυχθεί, χρειάζονται αξιόπιστα και ακριβή δεδομένα προκειμένου να προβλέψουν το διαθέσιμο κυματικό δυναμικό.

Ωστόσο, ελλείψει επιτόπιων μετρήσεων, οι τεχνικές αλτιμετρίας με τη χρήση δορυφορικών ραντάρ αποτελούν σημαντικό συμπλήρωμα των επιτόπιων δεδομένων. Τα αλτιμετρικά δορυφορικά ραντάρ εκτιμούν το σημαντικό ύψος κύματος με τη μέτρηση της δορυφορικής τροχιάς από την επιφάνεια των κορυφών των κυμάτων.

Ενώ οι επιτόπιες μετρήσεις παρέχουν χρονοσειρές δεδομένων σε μια συγκεκριμένη θέση, τα δορυφορικά αλτιμέτρα μπορούν να παρέχουν χωρικές σειρές δεδομένων σε ολόκληρες περιοχές με συνεχή καταγραφή που χρονολογείται από τη δεκαετία του 90. Στην πραγματικότητα, τα δορυφορικά αλτιμέτρα βρίσκονται σε τροχιά γύρω από τη γη, ακολουθώντας μια σταθερή διαδρομή σε σχέση με το έδαφος και μετρούν το σημαντικό ύψος κύματος "Hs" και τον συντελεστή οπισθοσκέδασης "σo", τα οποία χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση της περιόδου κύματος.

Σε γενικές γραμμές, τα ραντάρ μπορούν να παρέχουν υψηλής ποιότητας δεδομένα κύματος, τα οποία απαιτούνται για την επίτευξη αξιόπιστων αποτελεσμάτων τα οποία είναι απαραίτητα για μια σειρά από θαλάσσιες εφαρμογές. Είναι σαφές ότι υπάρχουν διάφοροι παράγοντες που επηρεάζουν την ποιότητα των μετρήσεων, συμπεριλαμβανομένων των φαινομένων βροχής,



των φαινομένων λανθασμένης σκόπευσης, της απώλειας εντοπισμού κ.λπ. Ωστόσο, με την πάροδο του χρόνου η ακρίβειά τους έχει τεκμηριωθεί επαρκώς, ιδίως μετά την υιοθέτηση της γραμμικής βαθμονόμησης με βάση τις αντίστοιχες μετρήσεις των σηματοδύρων (Tolman H.L., 1998).

### Εκτίμηση της παραγωγής κυματικής ενέργειας

Η κυματική ενέργεια διαφέρει από τη σταθερή περιδίνηση των θαλάσσιων ρευμάτων και από την ημερήσια ροή της παλιρροιακής ενέργειας.

### Εξίσωση κυματικής ισχύος

Σε βαθιά νερά όπου το βάθος του νερού είναι μεγαλύτερο από το μισό του μήκους κύματος, η κυματική ενέργεια flux είναι:

$$P = \frac{\rho g^2}{64\pi} H_{m0}^2 T_e \approx \left(0.5 \frac{kW}{m^3 s} H_{m0}^2\right) T_e$$

Όπου, P η κυματική ενέργεια flux ανά μονάδα μήκους κορυφής κύματος,  $H_{m0}$  το σημαντικό ύψος κύματος,  $T_e$  η περίοδος κυματικής ενέργειας,  $\rho$  την πυκνότητα του νερού και  $g$  την επιτάχυνση της βαρύτητας. Η παραπάνω εξίσωση δηλώνει ότι η κυματική ισχύς είναι ανάλογη της περιόδου κυματικής ενέργειας και του τετραγώνου του ύψους κύματος. Όταν το σημαντικό ύψος κύματος δίνεται σε μέτρα και η περίοδος κύματος σε δευτερόλεπτα, το αποτέλεσμα είναι η ισχύς του κύματος σε κιλοβάτ (kW) ανά μέτρο μήκους κύματος.

Σε μια θαλάσσια κατάσταση, η μέση πυκνότητα ενέργειας ανά μονάδα επιφάνειας των κυμάτων βαρύτητας στην επιφάνεια του νερού είναι ανάλογη του ύψους κύματος στο τετράγωνο, σύμφωνα με τη θεωρία των γραμμικών κυμάτων (Y. Goda, 2000, Leo H. Holthuijsen, 2007):

$$E = \frac{1}{8} \rho g H_{m0}^2$$

όπου: E είναι η μέση πυκνότητα κυματικής ενέργειας ανά μονάδα οριζόντιας επιφάνειας (J/m<sup>2</sup>), το άθροισμα της πυκνότητας κινητικής και δυναμικής ενέργειας ανά μονάδα οριζόντιας επιφάνειας. Η πυκνότητα δυναμικής ενέργειας είναι ίση με την κινητική ενέργεια (O. M. Phillips, 1977) και οι δύο συνεισφέρουν κατά το ήμισυ στην πυκνότητα κυματικής ενέργειας E, όπως αναμένεται από το θεώρημα ισοκατανομής. Στα ωκεάνια κύματα, οι επιφανειακές επιδράσεις τάσης είναι αμελητέες για μήκη κύματος πάνω από μερικά εκατοστά.

### Προηγούμενες έρευνες

#### Διεθνώς

Οι Zanuttigh B. et al. (2016) μελέτησαν τη δημιουργία μιας νέας μεθόδου πολυκριτηριακής ανάλυσης για την επιλογή των χρήσεων της κατάλληλης τεχνολογίας ΑΠΕ καθώς και τον προκαταρκτικό σχεδιασμό των πλατφορμών πολλαπλών χρήσεων (ΠΠΧ), όπου συνδυάζονται διαφορετικές χρήσεις. Επιπρόσθετα, συστήνουν μεθόδους για τη βελτιστοποίηση του σχεδιασμού αυτών των συστημάτων σε δεδομένες υπεράκτιες θέσεις. Η προσέγγιση που προτείνουν στη μελέτη τους, είναι νέα υπό την έννοια ότι παρέχει αντικειμενικά κριτήρια για την επιλογή συνδυασμών χρήσεων σε μια δεδομένη θέση. Παρέχεται ένα παράδειγμα εφαρμογής σε μια μελέτη περίπτωσης στη Νοτιοδυτική Μεσόγειο, Ιταλία (νήσος Σαρδηνία).



Στα πλαίσια της μελέτης τους εξέτασαν την παραγωγή ενέργειας και την προκαταρκτική διάταξη των συσκευών κυματικής και αιολικής ενέργειας για την τοποθέτησή τους στα ανοικτά του Alghero στη νήσο Σαρδηνία. Αξιολόγησαν το μέγεθος των ενεργειακών συσκευών και την απαραίτητη αμοιβαία απόσταση ώστε να λάβουν υπόψη τις συγκρούσεις χρήσεων και τα φαινόμενα των κυμάτων. Τόσο για τον άνεμο όσο και για τα κύματα επέλεξαν αντίστοιχα μόνο δύο συσκευές, η μεγάλη υπεράκτια ανεμογεννήτρια VESTAS V112 και ο μετατροπέας Wave Dragon.

Κατά την ανάλυσή τους για το κυματικό δυναμικό της περιοχής προέκυψαν τα παρακάτω αποτελέσματα:

- η επικρατούσα κατεύθυνση των κυμάτων στην περιοχή είναι στο εύρος 250 -300 μοιρών N
- το 58% και το 83% των συμβάντων χαρακτηρίζονται από τιμή  $H_s$  χαμηλότερη από 1 m και 2 m αντίστοιχα
- η ετήσια πιθανότητα εμφάνισης  $H_S > 2$  m περιορίζεται σε λιγότερο από 20%- η (ακραία)

Με βάση τα κυματικά χαρακτηριστικά της περιοχής ο σχεδιασμός του WaveDragon που προτείνουν για εγκατάσταση ανοικτά του Alghero λαμβάνει υπόψη το διαφορετικό PW που είναι διαθέσιμο σε αυτή τη θέση σε σχέση με το PW αναφοράς των 24 kW/m για τη μηχανή των 4 MW που αναπτύχθηκε για το τυπικό κυματικό κλίμα της Δανίας. Δεδομένου ότι το ετήσιο τοπικό PW είναι 9,4 kW/ m, υιοθετείται συντελεστής κλίμακας Froude 1,5. Στον παρακάτω πίνακα αναφέρονται τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά και η ονομαστική παραγωγή ισχύος τόσο για το αρχικό όσο και για τα μειωμένης κλίμακας WaveDragon.

Device width	[m]	260	180
Reservoir size	[m <sup>3</sup> ]	5000	1620
Global device weight	[t]	220000	70150
Water depth	[m]	>25	>17
Rated Power	[MW]	4	1.1

Πίνακας 1 Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά και η ονομαστική παραγωγή ισχύος τόσο για το αρχικό όσο και για τα μειωμένης κλίμακας WaveDragon (πηγή Zanuttigh B. et al. (2016))

Για τον υπολογισμό της παραγωγής ενέργειας αξιοποίησαν τον πίνακα ισχύος(power matrix) του μικρότερης κλίμακας Wavedragon, όπως αυτός φαίνεται στην εικόνα 2.



Εκτίμηση ενεργειακού δυναμικού κυματικής ενέργειας & πρόβλεψη ηλεκτροπαραγωγής :  
Θαλάσσια περιοχή Αντικυθήρων

Tp [s]	Hs [m]															
	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5	5.5	6	6.5	7	7.5	8
4	0	55	111	167	303	438	696	954	1272	1590	1590	1590	1590	1590	1590	1590
4.5	0	74	121	167	303	438	696	954	1272	1590	1590	1590	1590	1590	1590	1590
5	0	94	131	167	303	438	696	954	1272	1590	1590	1590	1590	1590	1590	1590
5.5	0	116	166	216	327	438	696	954	1272	1590	1590	1590	1590	1590	1590	1590
6	0	139	202	265	352	438	696	954	1272	1590	1590	1590	1590	1590	1590	1590
6.5	0	164	242	321	434	546	750	954	1272	1590	1590	1590	1590	1590	1590	1590
7	0	188	283	377	516	655	804	954	1272	1590	1590	1590	1590	1590	1590	1590
7.5	0	215	327	438	609	779	967	1155	1373	1590	1590	1590	1590	1590	1590	1590
8	0	242	371	499	701	903	1130	1356	1473	1590	1590	1590	1590	1590	1590	1590
8.5	0	249	386	523	742	960	1211	1462	1526	1590	1590	1590	1590	1590	1590	1590
9	0	257	402	547	783	1018	1293	1568	1579	1590	1590	1590	1590	1590	1590	1590
9.5	0	258	407	556	801	1047	1313	1579	1585	1590	1590	1590	1590	1590	1590	1590
10	0	259	412	564	820	1075	1333	1590	1590	1590	1590	1590	1590	1590	1590	1590
10.5	0	254	405	556	813	1070	1330	1590	1590	1590	1590	1590	1590	1590	1590	1590
11	0	248	398	548	807	1065	1328	1590	1590	1590	1590	1590	1590	1590	1590	1590
11.5	0	235	378	523	719	1023	1306	1589	1590	1590	1590	1590	1590	1590	1590	1590
12	0	221	359	497	739	981	1284	1587	1589	1590	1590	1590	1590	1590	1590	1590
12.5	0	200	326	452	675	898	1179	1460	1525	1590	1590	1590	1590	1590	1590	1590
13	0	179	293	407	611	815	1074	1332	1462	1590	1590	1590	1590	1590	1590	1590
13.5	0	150	246	342	515	688	909	1130	1300	1470	1530	1590	1590	1590	1590	1590
14	0	120	199	277	419	561	744	927	1138	1349	1470	1590	1590	1590	1590	1590

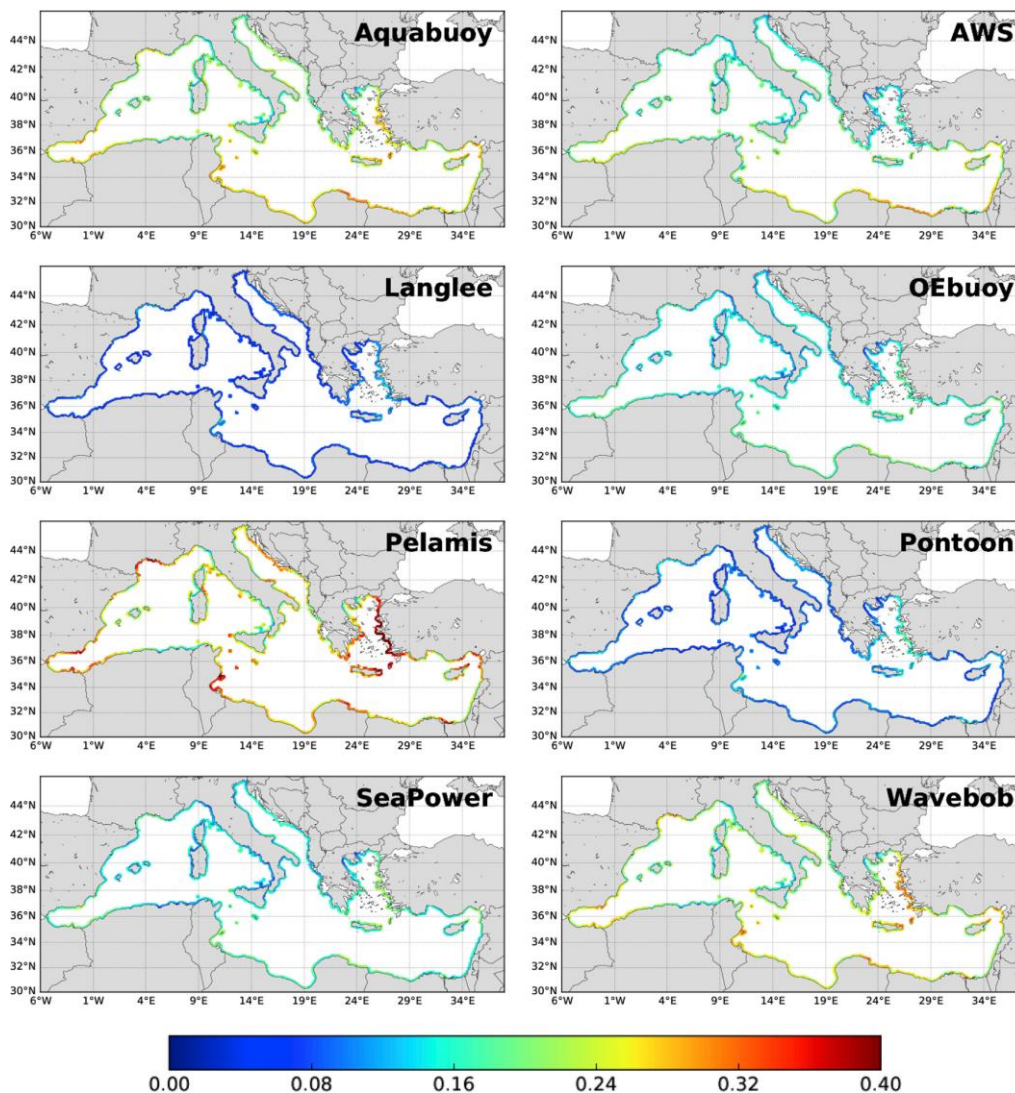
Εικόνα 2 Πίνακας ισχύος με μειωμένη κλίμακα της παραγωγής ισχύος του Wave Dragon για το τοπικό κυματικό κλίμα στα ανοικτά του Alghero. Η πρώτη γραμμή και η πρώτη στήλη δείχνουν τις μέσες τιμές των Hs και Tp, αντίστοιχα. Τα κελιά περιλαμβάνουν την παραγωγή ισχύος, (πηγή B. Zanuttigh et al., 2016)

Οι Bozzi et al. (2017) διερεύνησαν το δυναμικό της υπεράκτιας περιοχής της Μεσογείου για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από κύματα, παρέχοντας αποτελέσματα σε κλίμακα λεκάνης χρήσιμα για μελλοντικές μελέτες μικρότερης κλίμακας σε συγκεκριμένες περιοχές ενδιαφέροντος. Για το σκοπό αυτό, αξιολόγησαν την απόδοση μιας επιλογής υπεράκτιων μετατροπέων κυματικής ενέργειας (WEC) σε όλο το μήκος της μεσογειακής ακτογραμμής (σε ανάλυση 10 km), με βάση δεδομένα κύματος 37 ετών και δημόσια δεδομένα απόδοσης WEC. Καθώς οι τεχνολογίες που αναλύθηκαν σχεδιάστηκαν για πιο ενεργητικά κυματικά κλίματα, εξετάστηκαν μικρότερες συσκευές, οι οποίες «υποβαθμίστηκαν» σύμφωνα με το κριτήριο της ομοιότητας Froude, ώστε να ανταποκρίνονται στις μεσογειακές κυματικές συνθήκες. Σε κάθε τοποθεσία, το καλύτερο μέγεθος συσκευής προσδιορίζεται με την προσομοίωση διαφορετικών εκδόσεων των WEC σε κλίμακα και στη συνέχεια με την επιλογή του συντελεστή κλιμάκωσης, ο οποίος μεγιστοποιεί τον μέσο ετήσιο συντελεστή δυναμικότητας.

Τα αποτελέσματα τους έδειξαν ότι μεγάλο μέρος της ακτογραμμής της Μεσογείου μπορεί να αξιοποιηθεί με επιτυχία από κατάλληλα «υποβαθμισμένες» εκδόσεις των WEC. Πιο συγκεκριμένα, έξι από τις τεχνολογίες κυματικής ενέργειας που μελετήθηκαν μπορούν να επιτύχουν συντελεστή αξιοποίησης μεγαλύτερο από 0,2 κατά μήκος του 40% της ακτογραμμής, ενώ τρεις WEC (AquaBuOY, Pelamis και Wavebob) μπορούν να λειτουργήσουν με συντελεστή αξιοποίησης μεγαλύτερο από 0,3 στο 8% των μελετημένων θέσεων.



## Εκτίμηση ενεργειακού δυναμικού κυματικής ενέργειας & πρόβλεψη ηλεκτροπαραγωγής : Θαλάσσια περιοχή Αντικυθήρων



Εικόνα 3 Συντελεστής χωρητικότητας των "υποβαθμισμένων" μηχανών στις παράκτιες περιοχές της Μεσογείου σύμφωνα με τους S. Bozzi et al. 2017

Σύμφωνα με τη μελέτη αυτή οι παράκτιες περιοχές όπου παρουσιάζονται οι υψηλότερες επιδόσεις των μετατροπέων κυματικής ενέργειας είναι ο Κόλπος του Λιονταριού, ο διάυλος της Σικελίας, η θάλασσα του Αλμποράν, οι ακτές της Λιβύης, η Κρήτη και η Κύπρος. Το βέλτιστο μέγεθος των WEC σε αυτές τις τοποθεσίες είναι μεταξύ του 1/4 και του 1/3 του πλήρους μεγέθους του WEC και η ονομαστική ισχύς που προκύπτει είναι μεταξύ 10 και 30 kW. Τέλος διαπιστώνουν ότι στις πιο ενεργητικές περιοχές της Μεσογείου παρουσιάζονται αρκετά χαμηλές επιδόσεις, επειδή ένα μεγάλο μέρος της διαθέσιμης ενέργειας παρέχεται από ακραία και σπάνια γεγονότα, για τα οποία η απόδοση των WEC είναι πολύ χαμηλή.

Όμοια οι A. Majidi, B. Bingolbali, A. Akpinar et al. το 2020 διερεύνησαν την υπόθεση ότι οι μικρότερης κλίμακας εκδόσεις των WEC μπορεί να είναι πιο κατάλληλες για τέτοιες συνθήκες. Πιο συγκεκριμένα, εξετάστηκαν δεκαπέντε μικρότερης κλίμακας WEC για εγκατάσταση στη Μαύρη Θάλασσα. Η αλλαγή μεγέθους (downscaling) των WECs βασίζεται στο νόμο ομοιότητας Froude. Δέκα τιμές εξετάζονται για τον παράγοντα κλιμάκωσης ( $\lambda_L = 1.0, 0.9, 0.8, \dots, 0.1$ ), και η τιμή που αποδίδει τον υψηλότερο συντελεστή δυναμικότητας επιλέγεται για την επιλογή της κατάλληλης κλίμακας του WEC. Στη συνέχεια, το WEC με την μειωμένη κλίμακα συγκρίνεται με το αρχικό (πλήρους κλίμακας) WEC όσον αφορά την



απόδοση (συντελεστής χωρητικότητας, ώρες πλήρους φορτίου και ονομαστική χωρητικότητα). Η ανάλυση αυτή πραγματοποιήθηκε για δεκαπέντε WEC και 62 θέσεις σε διαφορετικά βάθη νερού (5, 25, 50, 75 και 100 μέτρα), κατανεμημένες σε 13 γραμμές κάθετες στην ακτογραμμή κατά μήκος της νοτιοδυτικής ακτής της Μαύρης Θάλασσας. Πιο συγκεκριμένα αξιολόγησαν τα WECs: HeavBuoy, Oyster2, Oyster, SSG, Seabased AB, WaveDragon, WaveStar, Langlee, Oceantec, Pelamis, WaveBob, AWS, OEBuoy, AquaBuoy, και Pontoon.

### Στην Ελλάδα

Στη χώρα μας έχουν διεξαχθεί κατά καιρούς ορισμένες έρευνες σχετικά με τις δυνατότητες εκμετάλλευσης της κυματικής ενέργειας τόσο σε θεωρητικό επίπεδο όσο και με πειραματικές διατάξεις. Για παράδειγμα, ο Lavidas (2017) εκτιμά ότι στην Ελλάδα οι περισσότεροι μετατροπείς κυματικής ενέργειας επιτυγχάνουν συντελεστή ισχύος 10-17% στα ανοικτά της Κρήτης και 14-20% στο κεντρικό Αιγαίο.

Οι Trikalitis et all (2021) μελέτησαν ένα υβριδικό σύστημα για το νησί της Αμοργού. Το σύστημα αυτό αποτελείται από δύο μονάδες που βασίζονται σε ΑΠΕ σε συνεργασία με ένα σύστημα αποθήκευσης ενέργειας με μπαταρίες, ενώ το υπάρχον σύστημα θα χρησιμοποιείται μόνο ως εφεδρική λύση σε περιπτώσεις περιόδων εξαιρετικά υψηλής ζήτησης. Για τη μελέτη τους, χρησιμοποίησαν τη βαθυμετρία γύρω από το νησί (Εικόνα (3)), δεδομένα ανέμου από λεπτομερείς τοπικές μετρήσεις ταχύτητας ανέμου και για το κυματικό δυναμικό, τα δεδομένα έχουν ληφθεί από τη βάση δεδομένων Poseidon του Ελληνικού Κέντρου Θαλασσίων Ερευνών. Η βάση δεδομένων Poseidon περιλαμβάνει δεδομένα σχετικά με το σημαντικό ύψος κύματος  $H_s$ , το μέγιστο ύψος κύματος  $H_{max}$ , την κατεύθυνση του κύματος, την περίοδο κύματος  $T_z$  και τέλος την περίοδο κύματος αιχμής  $T_p$ . Το υβριδικό σύστημα που μελέτησαν περιλάμβανε τον τοπικό σταθμό παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με εγκατεστημένη ισχύ 6 MW, ο οποίος αποτελείται από εννέα γεννήτριες ντίζελ ονομαστικής ισχύος μεταξύ 100kW και 1 MW, μία ή περισσότερες ανεμογεννήτριες Enercon E-44 ονομαστικής ισχύος 900 kW και έναν ή περισσότερους μετατροπείς κυματικής ενέργειας Wavestar 600 kW και ένα σύστημα αποθήκευσης μπαταριών. Επιπλέον, εξετάστηκαν και διαφορετικοί τύποι μπαταριών, π.χ. NaS. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από 6 διαφορετικά σενάρια, κατέδειξαν αξιοσημείωτη συμπληρωματικότητα μεταξύ των δύο πόρων (αιολική και κυματική ενέργεια), η οποία αν υποστηριχθεί από ένα κατάλληλα διαστασιοποιημένο σύστημα αποθήκευσης αναμένεται να παράγει αυξημένα επίπεδα ενεργειακής αυτονομίας μαζί με λογικά επίπεδα πλεονάσματος.

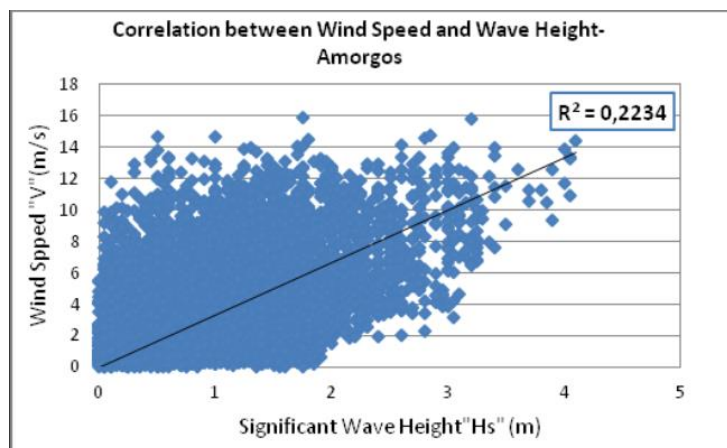


Εικόνα 4 Η βαθυμετρία περιμετρικά της νήσου Αμοργού (πηγή:EMODnet)





Οι Nomikos et al, στην έρευνά τους το 2017, προσπαθούν να αξιολογήσουν τις ευκαιρίες αξιοποίησης της αιολικής και της κυματικής ενέργειας μαζί με τη μείωση των ενεργειακών διακυμάνσεων που προκύπτουν από το συνδυασμό των δύο τεχνολογιών. Για τη μελέτη αυτή στο νησί της Αμοργού οι συγγραφείς χρησιμοποίησαν δεδομένα κυματικής ενέργειας από το σύστημα POSEIDON και την ευρωπαϊκή υπηρεσία Copernicus Marine Service (CMEMS). Για την επιλογή των περιοχών εφάρμοσαν γεωχωρικά κριτήρια, π.χ. περιορισμούς προστατευόμενων περιοχών, περιοχές στρατιωτικών ασκήσεων, και κατάλληλα κλιμακούμενους σταθμισμένους παράγοντες: π.χ. απόσταση από το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας, ύψος κύματος κ.λπ. Τα αποτελέσματα της μελέτης τους είναι ιδιαίτερα αισιόδοξα όσον αφορά τις συνδυασμένες εφαρμογές αιολικής και κυματικής ενέργειας και υποστηρίζουν την ανάπτυξη βιώσιμων δικτύων ηλεκτρικής ενέργειας που λειτουργούν με σχετικά χαμηλό κόστος. Λόγω του περιορισμένου αριθμού μετρήσεων πεδίου στην περιοχή μελέτης, χρησιμοποιήθηκαν τα αποτελέσματα ενός αριθμητικού κυματικού μοντέλου (WAM-cycle 4) για την εξαγωγή του σημαντικού ύψους κύματος για την προτεινόμενη περιοχή. Τα αντίστοιχα δεδομένα ταχύτητας ανέμου ελήφθησαν από τοπικό μετεωρολογικό σταθμό του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών (ΕΑΑ). Οι ερευνητές διερεύνησαν τη συσχέτιση μεταξύ της κατανομής της ταχύτητας ανέμου και του σημαντικού ύψους κύματος, καθώς ο ένας πόρος θα μπορούσε να αντισταθμίσει τη στοχαστική παραγωγή του άλλου, με αποτέλεσμα υψηλότερο επίπεδο διείσδυσης των ΑΠΕ στο δίκτυο (Εικόνα (5)).



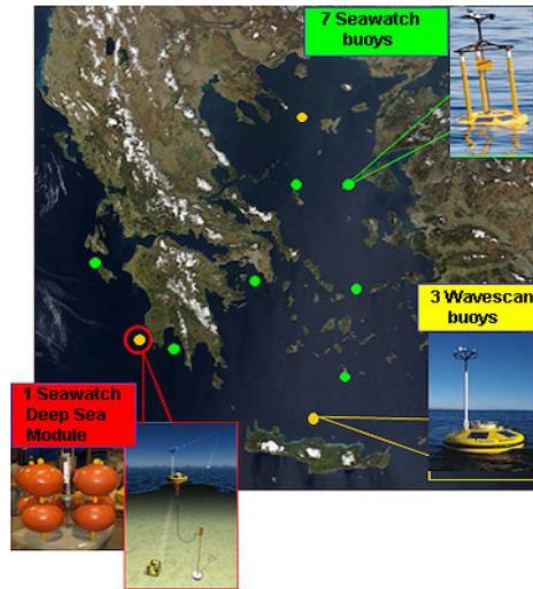
Εικόνα 5 Συσχέτιση μεταξύ της κατανομής της ταχύτητας ανέμου και του σημαντικού ύψους κύματος (George Nomikos et al 2017)

Από τα αποτελέσματα που προέκυψαν από το συνδυασμό της αιολικής και κυματικής ενέργειας για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, συμπεραίνουν ότι η αθροιστική παραγωγή ενέργειας γίνεται λιγότερο μεταβλητή, με ομαλότερη παραγωγή ενέργειας που ελαχιστοποιεί τις διακυμάνσεις της ισχύος των μεμονωμένων αιολικών ή κυματικών σταθμών.

Στη μελέτη των Kaldellis, et al (2017) εξετάζονται λεπτομερώς οι υποψήφιες θέσεις για την ανάπτυξη ενός δυνητικού πάρκου κυματικής ενέργειας στο Βόρειο Αιγαίο, μια υπεράκτια περιοχή στις ανατολικές ακτές της ηπειρωτικής Ελλάδας, μέσω γεωχωρικής Πολυκριτηριακής Ανάλυσης Αποφάσεων (MCDA) , που βασίζεται στην τεχνολογία των Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών. Η έρευνά τους υποβάλλεται σε μια MCDA η οποία βασίζεται στους υφιστάμενους περιορισμούς (θαλάσσιες διαδρομές, περιοχές που χρησιμοποιούνται για στρατιωτικούς σκοπούς, προστατευόμενες περιοχές, αλιεία κ.λπ.), ενώ η προτεινόμενη λύση επεξεργάζεται μια ομάδα σημαντικών παραγόντων (αποστάσεις από λιμάνια και ακτές,



απόσταση για σύνδεση με το δίκτυο, δυναμικό κυματικής ενέργειας και βαθυμετρία). Τα δεδομένα που χρησιμοποιήσαν για το δυναμικό κυματικής ενέργειας έχουν προέλθει από δορυφορικές μετρήσεις (AVISO) καθώς και από in situ μετρήσεις από σημαδούρες του POSEIDON που είναι διασκορπισμένες σε ελληνικές θαλάσσιες περιοχές από το Ελληνικό Κέντρο Θαλασσιών Ερευνών (ΕΛΚΕΘΕ), (Εικόνα 6).



Εικόνα 6 Σημαδούρες συστήματος Ποσειδών

Η μελέτη των Kaldellis και Chrysikos (2019) περιγράφει μια γεωχωρική ανάλυση πολλαπλών κριτηρίων λήψης αποφάσεων, βασισμένη στην τεχνολογία των Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών, για τον προσδιορισμό της καλύτερης θέσης για την ανάπτυξη ενός δυναμικού πάρκου κυματικής ενέργειας στο Ιόνιο Πέλαγος, μια περιοχή που βρίσκεται στα ανοικτά της δυτικής ακτής της ηπειρωτικής Ελλάδας. Η έρευνά τους υποβάλλεται σε μια MCDA η οποία βασίζεται στους υφιστάμενους περιορισμούς (θαλάσσιες διαδρομές, περιοχές που χρησιμοποιούνται για στρατιωτικούς σκοπούς, προστατευόμενες περιοχές, αλιεία κ.λπ.), ενώ η προτεινόμενη λύση επεξεργάζεται μια ομάδα σημαντικών παραγόντων (αποστάσεις από λιμάνια και ακτές, απόσταση για σύνδεση με το δίκτυο, δυναμικό κυματικής ενέργειας και βάθος θάλασσας). Τα απαραίτητα δεδομένα κυματικού δυναμικού που χρησιμοποιήθηκαν στην ανάλυση συγκεντρώθηκαν από επιτόπιες μετρήσεις των σημαδούρων του συστήματος POSEIDON και από τα αποτελέσματα αριθμητικών κυματικών μοντέλων που έχουν παρουσιαστεί στο "Wind and Wave Atlas of the Hellenic Seas" (Soukissian et al. 2007). Η εκτίμηση των κυματικών χαρακτηριστικών ολοκληρώνεται μέσω δεδομένων πραγματικών μετρήσεων και υπολογισμών μέσω του αριθμητικού κυματικού μοντέλου. Πιο συγκεκριμένα, συλλέχθηκαν και αναλύθηκαν κυματικά δεδομένα (σημαντικό ύψος κύματος "Hs" και περίοδος κύματος "Tz") από τη σημαδούρα της Πύλου για το έτος 2011. Από την άλλη πλευρά, παρόμοια δεδομένα από τη σημαδούρα της Ζακύνθου ελήφθησαν για το 2008. Κατά συνέπεια, οι μετρήσεις αυτές χρησιμοποιήθηκαν για τη βαθμονόμηση του αριθμητικού κυματολογικού μοντέλου που εφαρμόστηκε για την περίοδο 2002-2011. Πιο συγκεκριμένα, λόγω του περιορισμένου αριθμού των in situ μετρήσεων στην περιοχή μελέτης, χρησιμοποιήθηκαν τα αποτελέσματα ενός αριθμητικού κυματολογικού μοντέλου τρίτης γενιάς (WAM-cycle 4),



προσπαθώντας να διαμορφώσουν μια ευρύτερη εικόνα της κυματικής κλιματολογίας του Ιονίου Πελάγους. Τα αποτελέσματα εντοπίζουν τις καταλληλότερες περιοχές για την εγκατάσταση των προτεινόμενων σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από κύματα, δηλαδή κοντά στη ΝΔ ακτή της Κέρκυρας, στη δυτική πλευρά των στενών μεταξύ Κεφαλλονιάς και Ζακύνθου και κοντά στην ευρύτερη περιοχή της Πύλου, στη ΝΔ ακτή της Πελοποννήσου.

Οι Friedrich και Lavidas (2015) μελέτησαν ένα υβριδικό σύστημα με μετατροπείς κυματικής ενέργειας, μια ανεμογεννήτρια και έναν κινητήρα ντίτζελ για το νησί της Αστυπάλαιας. Για τη μελέτη τους χρησιμοποίησαν δεδομένα ανέμου από το NCAR/NCEP και διαπίστωσαν ότι το νησί της Αστυπάλαιας έχει πολύ καλό δυναμικό. Για τον υπολογισμό των κυματικών χαρακτηριστικών και του δυναμικού κυματικής ενέργειας χρησιμοποίησαν το μοντέλο SWAN. Το υβριδικό σύστημα που μελέτησαν περιλάμβανε μια γεννήτρια ντίτζελ Perkins 175 kW με μέση κατανάλωση 48 λίτρων ντίτζελ ανά ώρα, μια ανεμογεννήτρια Vestas V27 με ισχύ 225 kW και έναν μετατροπέα κυματικής ενέργειας Wavestar 600 kW. Για να ξεπεράσουν το πρόβλημα της διαφορετικής συχνότητας της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας συμπεριέλαβαν τη χρήση μπαταρίας ως μέσο αποθήκευσης με χωρητικότητα 5-100 ωρών, ενώ υπέθεσαν επίσης ότι η απόδοση των μετατροπέων είναι στο 95%.

Οι Xanthaki, et al.(2017), στη μελέτη τους δίνουν έμφαση στην περιοχή του Αρχιπελάγους του Αιγαίου, όπου πολλά μη διασυνδεδεμένα με το ηπειρωτικό δίκτυο νησιά εξαρτώνται από τα συμβατικά καύσιμα και πιο συγκεκριμένα από την προμήθεια πετρελαίου προκειμένου να καλύψουν τις επείγουσες ανάγκες τους σε ηλεκτρική ενέργεια. Ανέλυσαν, για επιλεγμένες περιοχές, την εποχιακή παρακολούθηση βασικών κυματικών παραμέτρων (π.χ. σημαντικό ύψος κύματος) μαζί με την αντίστοιχη κυματική ισχύ. Επίσης, ανέπτυξαν ένα ολοκληρωμένο μοντέλο για τον υπολογισμό της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας χρησιμοποιώντας το δυναμικό κυματικής ενέργειας και τα λειτουργικά χαρακτηριστικά των υφιστάμενων εμπορικών κυματομηχανών.

Οι Xanthaki, et al.(2017), επικεντρώθηκαν στη χρήση μακροχρόνιων in situ μετρήσεων που ελήφθησαν από σημαδούρες που βρίσκονται σε ορισμένες θαλάσσιες περιοχές στο Αιγαίο Πέλαγος και καταγράφηκαν σε μια βάση δεδομένων (Εικόνα 2). Για το σκοπό αυτό, χρησιμοποίησαν μια χρονοσειρά μετρήσεων ύψους και περιόδου κύματος που ελήφθησαν από τη βάση δεδομένων Poseidon του Ελληνικού Κέντρου Θαλασσίων Ερευνών - Ελλάδα. Προκειμένου να εκτιμήσουν το δυναμικό κυματικής ενέργειας, αξιολόγησαν τη χρήση της μη διαστατικής ισχύος ενός συγκεκριμένου κυματομετατροπέα (π.χ. το μοντέλο Pelamis). Τα αποτελέσματα των υπολογισμών τους, ακόμη και για περιπτώσεις κλειστών θαλασσών, είναι αρκετά ενθαρρυντικά, καθώς με κατάλληλες εγκαταστάσεις μπορούν να επιτευχθούν τιμές συντελεστή ισχύος της τάξης του 25%.

Αντίστοιχα, οι Ioannou et al.(2014) μελέτησαν ένα υβριδικό σύστημα που περιλάμβανε μια ανεμογεννήτρια και έναν μετατροπέα ενέργειας από υπερπήδηση κυμάτων (overtopping wave energy converter) για το νησί της Δονούσας, με σκοπό να καταστήσουν το νησί πλήρως αυτόνομο από ενεργειακή άποψη. Στη μελέτη αυτή αξιολογήθηκαν δύο συνδυασμοί. Στον πρώτο συνδυασμό, μελετήθηκε η συμπεριφορά ενός overtopping μετατροπέα κυματικής ενέργειας 100kW και μιας μικρής μονάδας φυσικού αερίου 80kW, ενώ στον δεύτερο συνδυασμό, μελετήθηκε ο ίδιος μετατροπέας κυματικής ενέργειας με μια ανεμογεννήτρια 200kW.



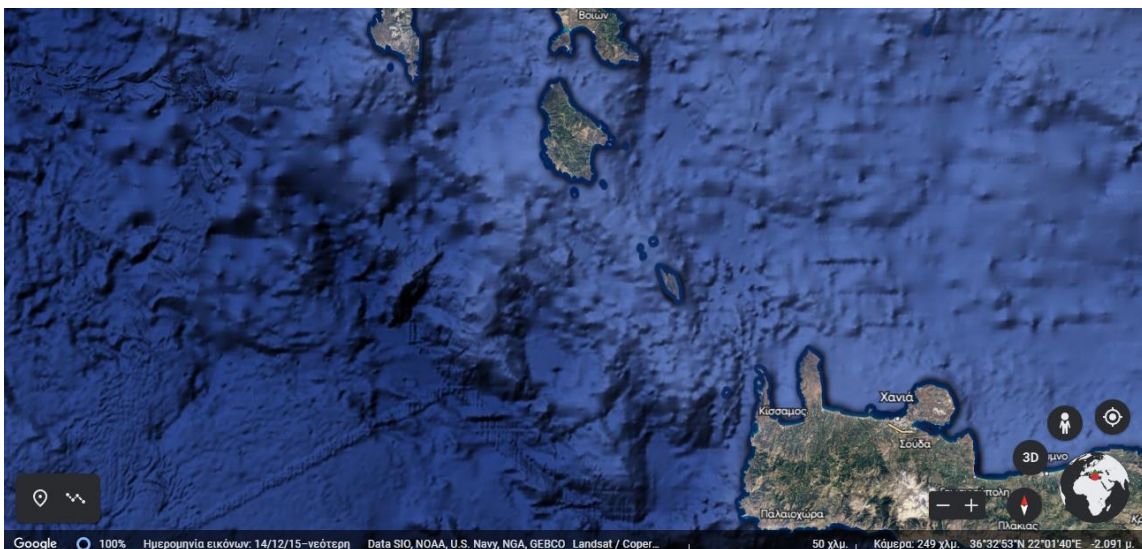
Οι Moschos et al. (2017) μελέτησαν τη συμπεριφορά διαφόρων τύπων μετατροπέων κυματικής ενέργειας στο κεντρικό Αιγαίο και πιο ειδικότερα για το νησί της Αστυπάλαιας. Πιο συγκεκριμένα, για τη μελέτη τους χρησιμοποίησαν δεδομένα από το Ελληνικό Κέντρο Θαλασσιών Ερευνών και το σύστημα POSEIDON για τα χαρακτηριστικά των κυματισμών στην ευρύτερη περιοχή μελέτης. Για τα ανεμολογικά δεδομένα χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο ERA-Interim. Τα δεδομένα βαθυμετρίας και ακτογραμμής της περιοχής ελήφθησαν από την Ελληνική Υδρογραφική Υπηρεσία. Στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκαν αυτά τα δεδομένα στο μοντέλο MIKE 21 Spectral Waves για την εξαγωγή χρονοσειρών 100 ετών της συμπεριφοράς των κυμάτων σε διάφορα σημεία ενδιαφέροντος για την εγκατάσταση του μετατροπέα.

## Ερευνητικά ερωτήματα – Σκοπός μελέτης

Στόχος της παρούσας μελέτης είναι η διερεύνηση της δυνατότητας αξιοποίησης της κυματικής ενέργειας για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στην περιοχή ανοιχτά των Αντικυθήρων. Η μελέτη εστιάζει στην εκτίμηση του κυματικού δυναμικού, την εκτίμηση της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με τη χρήση τριών τύπων κυματογεννητριών (Wavedragon, Pelamis, AquaBouy) και τη συγκριτική αξιολόγηση της απόδοσής τους. Ακόμη, θα γίνει η τεχνικοοικονομική αξιολόγηση του επικρατέστερου τύπου κυματογεννήτριας. Σύμφωνα με το αντικείμενο της παρούσας μελέτης, η εκτίμηση της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας θα γίνει για την κάλυψη των αναγκών των μόνιμων κατοίκων της νήσου των Αντικυθήρων και του Ευρωπαϊκού Παρατηρητηρίου. Στη συνέχεια, θα πρέπει να επιλεγεί το κατάλληλο σημείο για τη χωροθέτηση της μονάδας παραγωγής ενέργειας. Η εκπόνηση μιας τέτοιας μελέτης μπορεί να αποτελέσει οδηγό για την ενσωμάτωση αυτών των τεχνολογιών όχι μόνο σε τοπικό επίπεδο αλλά και στον Εθνικό Ενεργειακό Σχεδιασμό ελαχιστοποιώντας την εξάρτηση της χώρας από ρυπογόνα εργοστάσια ηλεκτροπαραγωγής.

## Περιοχή μελέτης

Η παρούσα μελέτη εστιάζεται στην θαλάσσια περιοχή μεταξύ των νήσων Κυθήρων και Αντικυθήρων, καθώς και την περιοχή περιμετρικά των νησιών όπως φαίνεται στην εικόνα 7.



Εικόνα 7 Περιοχή μελέτης (πηγή: Google Earth, 2023)

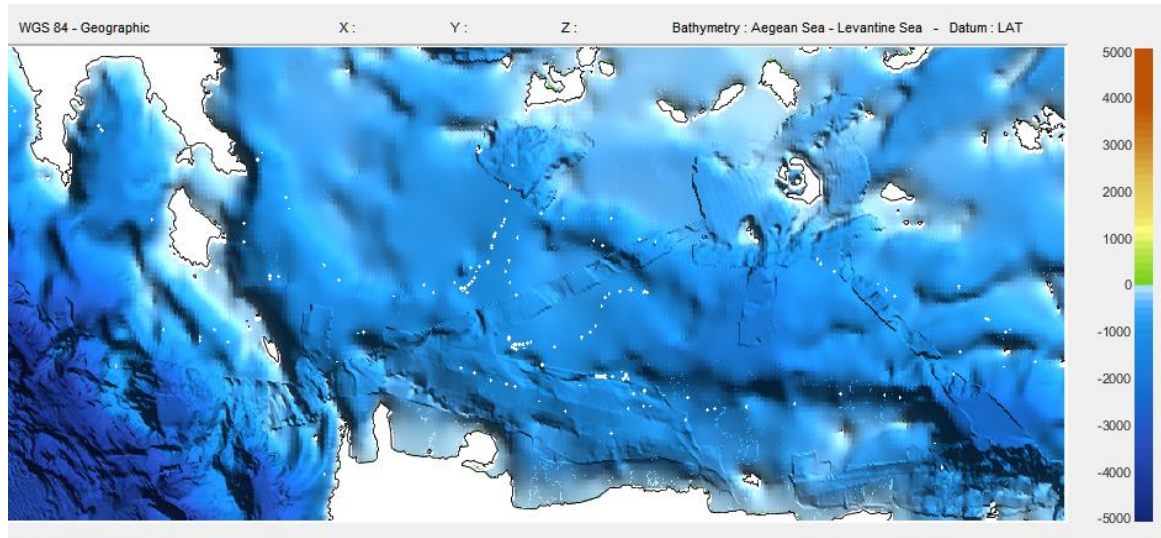


### Κλιματικά και βιοκλιματικά χαρακτηριστικά

Η ευρύτερη περιοχή της Μεσογείου έχει πολύπλοκα ορογραφικά και παράκτια χαρακτηριστικά. Λόγω αυτών των γεωγραφικών χαρακτηριστικών, το κλίμα στην περιοχή της Μεσογείου, που γενικά θεωρείται ότι έχει ήπιους / υγρούς χειμώνες και ξηρά / ζεστά καλοκαίρια, παρουσιάζει ωστόσο πολύπλοκα χωρικά και χρονικά χαρακτηριστικά.

### Μορφολογία πυθμένα - Βαθυμετρία

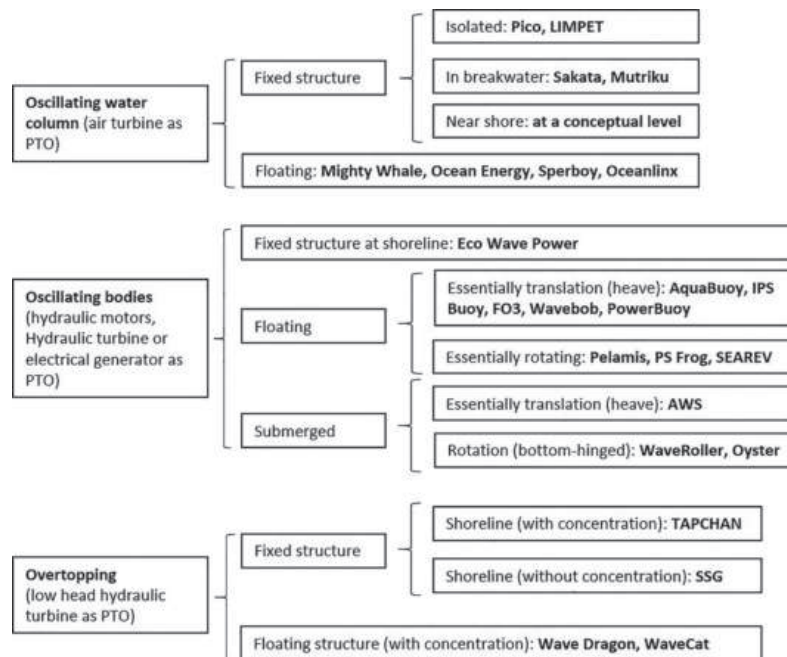
Στην υπό μελέτη περιοχή τα βάθη είναι σχετικά μικρά συγκριτικά με τις γύρω περιοχές. Όπως φαίνεται στον παρακάτω βυθομετρικό χάρτη το βάθος στην περιοχή εγκατάστασης του πάρκου είναι περίπου 500 μέτρα ενώ νοτιότερα τα βάθη φτάνουν τα 4500 μέτρα.



Εικόνα 8 Βυθομετρία της υπό μελέτης περιοχής(πηγή EMODnet μέσω Delft3D Dashboard)

### Μετατροπείς κυματικής ενέργειας

Η απορρόφηση ενέργειας από τα κύματα δεν είναι πρόσφατο φαινόμενο, καθώς οι ερευνητές μελετούν διάφορες έννοιες ή λύσεις από τη δεκαετία του 1970. Σήμερα, η τεχνολογία έχει εξελιχθεί σε μια φάση όπου διάφορα projects δοκιμάζονται σε πλήρη κλίμακα, σε φάση προ-επίδειξης και αναπτύσσονται εμπορικές επιδείξεις. Υπάρχει ένα ευρύ φάσμα τεχνολογιών κυματικής ενέργειας. Κάθε τεχνολογία χρησιμοποιεί διαφορετικές λύσεις για την απορρόφηση της ενέργειας από τα κύματα και μπορεί να εφαρμοστεί ανάλογα με το βάθος του νερού και τη θέση (ακτογραμμή, κοντά στην ακτή, ανοικτά της ακτής),(Cruz, 2008, Falcao, 2010).



Εικόνα 9 Τεχνολογίες μετατροπέων κυματικής ενέργειας(πηγή: Pérez and Iglesias, 2012)

Οι τεχνολογίες κυματικής ενέργειας αποτελούνται από διάφορα στοιχεία: 1) τη δομή και την κινητήρια μηχανή που συλλαμβάνει την ενέργεια του κύματος, 2) τη θεμελίωση ή την πρόσδεση που διατηρεί τη δομή και την κινητήρια μηχανή στη θέση τους, 3) το σύστημα απολαβής ισχύος (PTO) με το οποίο η μηχανική ενέργεια μετατρέπεται σε ηλεκτρική, και 4) τα συστήματα ελέγχου για τη διασφάλιση και τη βελτιστοποίηση της απόδοσης σε συνθήκες λειτουργίας. Υπάρχουν διάφοροι τρόποι με τους οποίους μπορούν να κατηγοριοποιηθούν οι τεχνολογίες κυματικής ενέργειας, π.χ. με βάση τον τρόπο μετατροπής της κυματικής ενέργειας σε μηχανική ενέργεια ή με βάση τη χρησιμοποιούμενη τεχνολογία.

Στην παρούσα μελέτη για την προσομοίωση της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με τη χρήση μετατροπέων κυματικής ενέργειας (Wave Energy Converters-WEC), αξιολογήθηκαν αρχικά τρεις διαφορετικές τεχνολογίες πλωτοί μετατροπείς στο εμπορικό τους μέγεθος (ισχύς και διαστάσεις). Κατόπιν αξιολογήθηκαν οι ίδιοι μετατροπείς σε διαφορετική κλίμακα μεγέθους, η οποία ήταν μικρότερη του αρχικού μεγέθους. Η μείωση της κλίμακας έγινε με σκοπό να αποδείξουμε ότι μικρότερης κλίμακας μηχανές αυτών των τεχνολογιών, μπορούν να λειτουργήσουν και να αποδώσουν καλύτερα σε θαλάσσιες περιοχές με κυματικά χαρακτηριστικά όμοια της περιοχής μελέτης. Πιο συγκεκριμένα αξιολογήθηκαν αρχικά οι μετατροπείς Pelamis ισχύος 750kW, Wavedragon ισχύος 5900kW και Aquabuoy ισχύος 250kW. Ακολούθως αξιολογήθηκαν οι μετατροπείς Pelamis ισχύος 250 KW, Pelamis ισχύος 500 KW και Wavedragon ισχύος 1100kW (πίνακας 1).

Μετατροπέας	Ισχύς Μετατροπέα
Pelamis	250 kW
Pelamis	500 kW
Pelamis	750 kW
Wavedragon	1100 kW
Wavedragon	5900 kW
Aquabuoy	250 kW

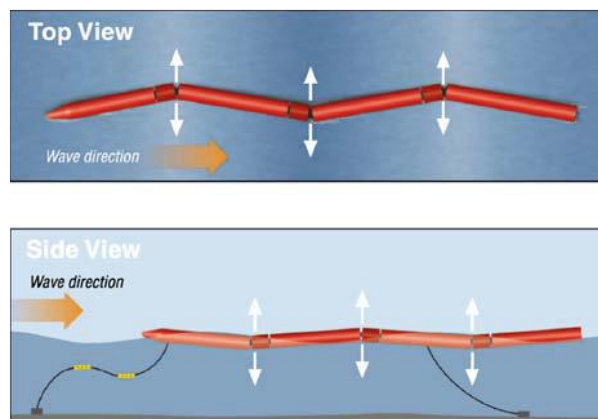
Πίνακας 2 Οι μετατροπείς που αξιολογήθηκαν στην παρούσα μελέτη



## Τεχνικά χαρακτηριστικά μετατροπέων

### Pelamis

Ο μετατροπέας κυματικής ενέργειας Pelamis (εικόνα 10) είναι μια ημι-βυθισμένη κατασκευή που αποτελείται από αρθρωτά κυλινδρικά τμήματα που συνδέονται μεταξύ τους. Συγκρατείται στη θέση του από ένα ευλύγιστο σύστημα πρόσδεσης που επιτρέπει στη μηχανή να ευθυγραμμίζεται μετωπικά με τα εισερχόμενα κύματα (παίρνει την "αναφορά" της από το άνοιγμα διαδοχικών κορυφών κύματος). Καθώς τα κύματα ταξιδεύουν κατά μήκος της μηχανής, προκαλούν την κίνηση των αρθρωτών τμημάτων γύρω από τις ενώσεις. Η επαγωγική κίνηση αυτών των αρθρώσεων αντισταθμίζεται από υδραυλικά έμβολα που αντλούν λάδι υψηλής πίεσης μέσω υδραυλικών κινητήρων με τη χρήση συσσωρευτών εξομάλυνσης. Οι υδραυλικοί κινητήρες αυτοί κινούν ηλεκτρικές γεννήτριες οι οποίες παράγουν την ηλεκτρική ενέργεια. Η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από όλες τις αρθρώσεις διοχετεύεται μέσω ενός ενιαίου ομφάλιου καλωδίου σε έναν κόμβο στον πυθμένα της θάλασσας. Ένας αριθμός συσκευών μπορεί να συνδεθεί μεταξύ τους και το σύνολο τους να συνδεθεί με την ξηρά μέσω ενός ενιαίου καλωδίου στο βυθό.



Εικόνα 10 Σχηματική απεικόνιση του τρόπου λειτουργίας ενός μετατροπέα Pelamis (πηγή: Book\_OceanWaveEnergy ,2008)

Θα πρέπει να επισημανθούν ορισμένα βασικά χαρακτηριστικά:

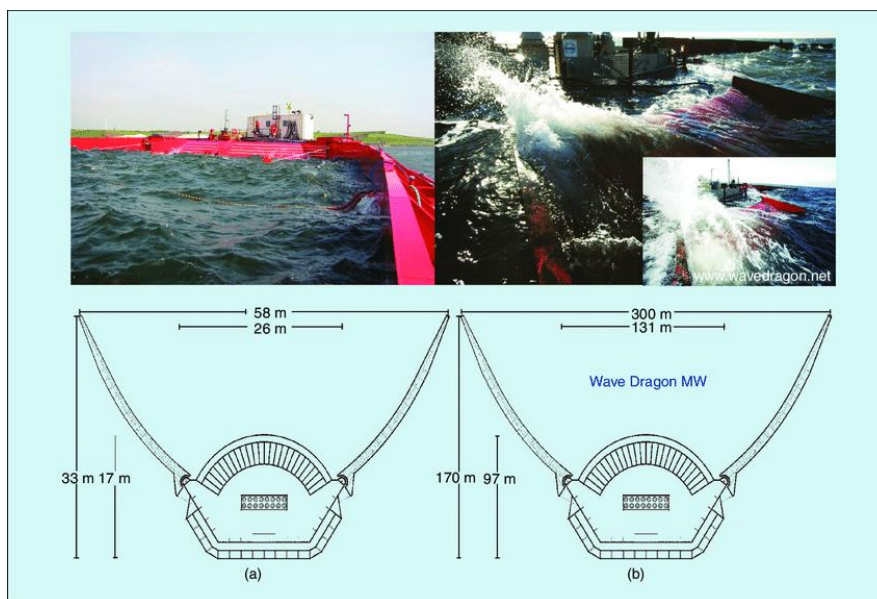
1. Ένα κυματικό πάρκο με μετατροπείς Pelamis μπορεί να εγκατασταθεί σε μια σειρά από υπεράκτιες περιοχές και διαφορετικές συνθήκες θαλάσσιου πυθμένα, επιτρέποντας ευελιξία στην επιλογή των θέσεων εγκατάστασης.
2. Το Pelamis κατασκευάζεται, συναρμολογείται και τίθεται σε λειτουργία μακριά του σημείου εγκατάστασης σε ασφαλείς συνθήκες στην ξηρά ή σε προστατευμένες εγκαταστάσεις αποβάθρας, απαιτώντας έτσι τις απολύτως ελάχιστες απαιτούμενες εργασίες εγκατάστασης στο σημείο εγκατάστασης. Με τον τρόπο αυτό αποφεύγονται οι πιο δαπανηρές εκτεταμένες υπεράκτιες κατασκευαστικές δραστηριότητες, οι οποίες υπόκεινται σε μεγαλύτερες καιρικές καθυστερήσεις.
3. Το Pelamis έχει ταχεία προσάρτηση/αποσύνδεση της ηλεκτρικής σύνδεσης και αγκυροβολίων, η οποία επιτρέπει επίσης τη γρήγορη ανάκτηση του μηχανήματος και τη μεταφορά του σε ασφαλείς εγκαταστάσεις στην προκυμαία για τις απαιτούμενες εργασίες συντήρησης, αποφεύγοντας έτσι δαπανηρές υπεράκτιες εργασίες με εξειδικευμένο εξοπλισμό και σκάφη.



### Wavedragon

Το Wave Dragon (εικόνα 11) είναι ένας μετατροπέας ενέργειας υπεράκτιων κυμάτων τύπου overtopping (υπερπήδησης κυμάτων). Κάθε μονάδα έχει ονομαστική ισχύ 4-10 MW ή μεγαλύτερη ανάλογα με το πόσο ενεργητικό είναι το κλίμα των κυμάτων στον τόπο ανάπτυξης. Η χρήση της αρχής της υπέρβασης σε αντίθεση με την απορρόφηση ισχύος μέσω κινούμενων σωμάτων σημαίνει ότι η αποτελεσματικότητα μεγαλώνει με το μέγεθος του μετατροπέα. Αυτό σημαίνει ότι μόνο πρακτικά θέματα ορίζουν όρια για το μέγεθος αυτού του μετατροπέα. Κάθε Wavedragon αποτελείται από τα παρακάτω τρία κύρια στοιχεία:

- Δύο ανακλαστήρες κύματος που εστιάζουν τα κύματα προς τη ράμπα, που συνδέονται με την κύρια δομή. Οι ανακλαστήρες κύματος έχουν την επαληθευμένη επίδραση της ουσιαστικής αύξησης του σημαντικού ύψους κύματος και έτσι αύξηση της δέσμευσης ενέργειας κατά 70% σε τυπικές συνθήκες κύματος.
- Η κύρια δομή που αποτελείται από μια κατοχυρωμένη διπλή καμπύλη ράμπα και μια δεξαμενή αποθήκευσης νερού.
- Ένα σετ στροβίλων (έλικα) για τη μετατροπή της υδραυλικής ενέργειας στη δεξαμενή σε ηλεκτρική ενέργεια.



Εικόνα 11 Συσκευές Wavedragon (πηγή: [www.wavedragon.net](http://www.wavedragon.net), 2021)

Σε σύγκριση με άλλους τύπους WEC, το Wave Dragon είναι αρκετά μοναδικό καθώς χρησιμοποιεί την ενέργεια στο νερό απευθείας μέσω στροβίλων νερού, δηλαδή ένα σύστημα μετατροπής ενός βήματος, το οποίο αποδίδει μια πολύ απλή κατασκευή και έχει μόνο ένα είδος κινούμενων μερών: τους στροβίλους. Μόλις φτάσει το νερό πάνω από τη δεξαμενή, η ενέργεια συλλέγεται από τους εγκατεστημένους στροβίλους χαμηλής κεφαλής. Το Wave Dragon είναι εξοπλισμένο με σύστημα SCADA που επιτρέπει την απομακρυσμένη χρήση και έλεγχο της τυπικής λειτουργίας του σταθμού παραγωγής ενέργειας. Το Wave Dragon μπορεί να κατασκευαστεί σε οποιοδήποτε μέγεθος (εικόνα 12).





Unit size	Prototype	24 kW/m	36 kW/m	48 kW/m	60 kW/m
Width (between reflector tips), m	57	260	300	390	390
Weight incl. ballast, t	237	22,000	33,000	54,000	54,000
Reservoir, m <sup>3</sup>	55	5,000	8,000	14,000	14,000
Number of turbines	1+3+6	16	16-20	16-20	16-24
Annual power production, GWh/year	0.06	12	20	35	43
Generators (PMG), kW	2.5	250	350-450	460-700	625-940

Εικόνα 12 Διάσταση του πρωτοτύπου Wave Dragon και Wave Dragons για διαφορετικές κυματικές συνθήκες (Christensen, L. et al 2005)

Δεν υπάρχει περιορισμός προς τα πάνω στο μέγεθος της μονάδας Wave Dragon καθώς η απόδοση αυξάνεται σταθερά με το φυσικό μέγεθος. Το επιλεγμένο μέγεθος σε πραγματικές κυματικές συνθήκες είναι αποκλειστικά αποτέλεσμα υπολογισμού κόστους-οφέλους. Υπάρχει πολύ σημαντικό δυναμικό κέρδους σε υψηλότερα κύματα.

### AquaBuOY

Το AquaBuOY είναι μια συσκευή σημειακής απορρόφησης που αναπτύχθηκε από την Finavera Renewables Inc., πρώην AquaEnergy Group Ltd.. Πρόκειται για μια πλωτή σημαδούρα τοποθετημένη πάνω από ένα έμβολο που περιέχεται μέσα σε ένα σωλήνα, ανοιχτό και στα δύο άκρα, με μια αντλία σωλήνα συνδεδεμένη σε κάθε άκρο. Καθώς η σημαδούρα ταλαντώνεται, οι αντλίες εύκαμπτου σωλήνα παράγουν ροή νερού υπό πίεση που κινεί μια τουρμπίνα Pelton, συνδεδεμένη με μια γεννήτρια. Κάθε AquaBuOY είναι βάρους 40 τόνων και έχει ονομαστική ισχύ 250 kW. Η συσκευή είναι αρθρωτή και μπορεί να τοποθετεί από ένα μικρό σύμπλεγμα έως σε εκατοντάδες σημαδούρες που συνδυάζονται σε συστοιχίες και που παράγουν ετήσια παραγωγή ενέργειας από μερικές εκατοντάδες κιλοβάτ έως αρκετές εκατοντάδες μεγαβάτ.



Εικόνα 13 Μετατροπέας κυματικής ενέργειας Aquabuoy (πηγή Bazar et al, 2010)

### Νόμος ομοιότητας FROYDE

Η αύξηση του συντελεστή αξιοποίησης ενός WEC μπορεί να επιτευχθεί με τη μείωση του μεγέθους της συσκευής σε συνάρτηση με την ποσότητα της κυματικής ενέργειας που υπάρχει στις επιλεγμένες θέσεις. Στην περίπτωση αυτή, όπως αναφέρεται προηγουμένως οι Bozzi et al.(2017) συνιστούν την αξιολόγηση συσκευών μειωμένου μεγέθους. Για το σκοπό αυτό, οι WEC και οι πίνακες ισχύος τους, κλιμακώνονται με την εφαρμογή του κριτηρίου ομοιότητας Froude, υποθέτοντας ότι οι βαρυτικές και αδρανειακές δυνάμεις είναι οι σημαντικότερες παράμετροι στην κυματική ενέργεια. Ο νόμος ομοιότητας Froude (C. Iurra et al 2015) συνεπάγεται ότι το μήκος και ο χρόνος κλιμακώνονται κατά :



$$L_{WEC} = \lambda_L L_{WEC,d}$$

$$T_{WEC} = \lambda_L^{0.5} T_{WEC,d}$$

Όπου  $\lambda_L$  είναι ο συντελεστής κλίμακας, ενώ  $L_{WEC,d}$  και  $T_{WEC,d}$  είναι το μειωμένο μήκος και ο χρόνος αντίστοιχα. Σύμφωνα με τις παραπάνω εξισώσεις, ο υπό κλίμακα πίνακας ισχύος μπορεί να εκτιμηθεί ως εξής :

$$P_{WEC} = \lambda_L^{3.5} P_{WEC,d}$$

Εκτός από τη παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια, στα πλαίσια της παρούσας μελέτης εξετάζουμε και την απόδοση των μετατροπέων Pelamis ισχύος 250 KW, Pelamis ισχύος 500 KW και Wavedragon ισχύος 1100kW, ακολουθώντας τις μελέτες των Bozzi et al.(2017) για τις παράκτιες περιοχές της Μεσογείου και των A. Majidi, et al. (2020) για την περιοχή της Μαύρης θάλασσας.

## Μεθοδολογία

### Εκτίμηση κυματικού δυναμικού

Για να εκτιμηθεί η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, θα πρέπει αρχικά να εκτιμηθεί το κυματικό δυναμικό που επικρατεί στην περιοχή ενδιαφέροντος. Στην παρούσα εργασία επιλέχθηκε να γίνει σύγκριση μεταξύ δύο διαφορετικών μεθόδων, μέσω δεδομένων αλτιμετρίας για τη χρονική περίοδο 2005 - 2015 και μέσω προσομοίωσης κυματικού δυναμικού για το έτος 2005. Τα δεδομένα αλτιμετρίας ελήφθησαν για ένα σημείο αναφοράς, από το μοντέλο MEDSEA WAM (ανάλυση 1/24ο x 1/24ο) του ECMWF, το οποίο είναι διαθέσιμο στην υπηρεσία Copernicus Marine Service (product medsea\_multiyear\_wav\_006\_012). Τα δεδομένα αυτά αποτελούνται από ωριαίες χρονοσειρές σημαντικού ύψους κύματος, περιόδου αιχμής (peak period) και της κατεύθυνσης κύματος για την περίοδο 2005 - 2015.

Για τη προσομοίωση των ανεμογενών κυμάτων και του σχηματισμού κυματομορφών στην περιοχή, χρησιμοποιήθηκε το Delft3D Wave Model για το έτος 2005. Το Delft3D είναι μια σουίτα λογισμικού που αναπτύχθηκε για μια διεπιστημονική προσέγγιση των παράκτιων κυματισμών και της μορφοδυναμικής μοντελοποίησης από την Deltares, 2020, παλαιότερα γνωστή ως Delft Hydraulics, για τρισδιάστατους υπολογισμούς σε παράκτιες, ποτάμιες και εκβολικές περιοχές. Καλύπτει την αριθμητική μοντελοποίηση των ροών, της μεταφοράς ιζημάτων, των κυμάτων, της ποιότητας του νερού, των μορφολογικών εξελίξεων και της οικολογίας. Το Delft3D αποτελείται από διάφορες ενότητες οι οποίες μπορούν να εκτελεστούν ανεξάρτητα ή να συνδεθούν και να αλληλεπιδράσουν μεταξύ τους. Ο υπολογισμός των κυμάτων και των κυματογενών επιδράσεων είναι ο τομέας του κυματολογικού μοντέλου (Delft3D-WAVE), το οποίο υποστηρίζει επί του παρόντος ένα κυματολογικό μοντέλο τρίτης γενιάς, δηλαδή το μοντέλο SWAN (Deltares, 2019).

### Το μοντέλο SWAN

Το μοντέλο Simulation Waves Nearshore (SWAN) υπολογίζει τα τυχαία κύματα μικρής κορυφής (short-crested waves) που δημιουργούνται από την αιολική ενέργεια σε παράκτιες περιοχές και εσωτερικά ύδατα. Εκτιμά ένα φάσμα της κυματικής κίνησης σε κάθε σημείο πλέγματος που επικαλύπτει τη γεωγραφική περιοχή στην οποία συμβαίνουν οι φυσικές διεργασίες που καθορίζουν τα φάσματα στην περιοχή ενδιαφέροντος, δηλαδή στην περιοχή όπου απαιτούνται κυματικά δεδομένα για ένα σχέδιο παράκτιας δομής ή για άλλους σκοπούς.



Το SWAN είναι το πιο ευρέως χρησιμοποιούμενο υπολογιστικό μοντέλο για την εκτίμηση ακανόνιστων κυματισμών σε παράκτια περιβάλλοντα, με βάση τις συνθήκες κύματος βαθιάς ροής, τον άνεμο, την τοπογραφία του πυθμένα, τα ρεύματα και τις παλίρροιες (βαθιά και ρηγά νερά). Το SWAN προσμετρά ρητά όλες τις σχετικές διαδικασίες διάδοσης, δημιουργίας ανέμου, αλληλεπιδράσεων μεταξύ των κυμάτων και διάσπασης λόγω θραύσης του πυθμένα και τριβής, ενώ η διάθλαση υπολογίζεται κατά προσέγγιση.

Το κυματικό μοντέλο Simulation Waves Nearshore (SWAN) αναπτύχθηκε (περιγράφεται από τους Booij et al. 1999) για την εκτίμηση των κυματικών συνθηκών σε παράκτιες περιοχές μικρής κλίμακας με ρηγά νερά, νησιά-φράγματα, τοπικό άνεμο και περιβαλλοντικά ρεύματα. Πρόκειται για ένα φασματικό μοντέλο κυματομορφής τρίτης γενιάς που περιγράφει την εξέλιξη του ενεργειακού φάσματος των δύο κυμάτων υπό αυθαίρετες συνθήκες, άνεμο, ρεύματα και βαθυμετρία. Η βασική εξίσωση που χρησιμοποιείται στο μοντέλο SWAN είναι η εξίσωση ισορροπίας δράσης (Hasselmann et al., 1973):

$$\frac{\partial}{\partial t} N + \frac{\partial}{\partial x} c_x N + \frac{\partial}{\partial y} c_y N + \frac{\partial}{\partial \sigma} c_\sigma N + \frac{\partial}{\partial \theta} c_\theta N = \frac{S}{\sigma}$$

όπου  $N(s, \theta, x, y, t)$  είναι η πυκνότητα δράσης ως συνάρτηση της φυσικής συχνότητας  $s$ , της διεύθυνσης  $\theta$ , των οριζόντιων συντεταγμένων  $x$  και  $y$  και του χρόνου  $t$ . Ο πρώτος όρος στην αριστερή πλευρά υποδηλώνει τον τοπικό ρυθμό μεταβολής της πυκνότητας δράσης με την πάροδο του χρόνου, ο δεύτερος και ο τρίτος όρος αντιπροσωπεύουν τη διάδοση της δράσης στους γεωγραφικούς χώρους  $x, y$  αντίστοιχα (με ταχύτητες διάδοσης  $c_x$  και  $c_y$ ). Ο τέταρτος όρος δείχνει τη μετατόπιση της σχετικής συχνότητας εξαιτίας μεταβολών σε βάθη και ρεύματα (με ταχύτητα μετάδοσης  $c_\sigma$  σε χώρο  $s$ ). Ο πέμπτος όρος αντιπροσωπεύει τη διάθλαση που προκαλείται από το βάθος και από τα ρεύματα (με την ταχύτητα διάδοσης  $c_\theta$  με το χώρο  $u$ ), ενώ επισημαίνεται πως η περίθλαση δεν περιλαμβάνεται σε αυτή την έκδοση του μοντέλου. Ο όρος  $S [=S(\sigma, \theta; x, y, t)]$  στη δεξιά πλευρά της εξίσωσης ισορροπίας δράσης είναι ένας όρος πηγής που αντιπροσωπεύει τις αλληλεπιδράσεις δημιουργίας, διασποράς και μη γραμμικών κυμάτων. Για υπολογισμούς μεγάλης κλίμακας, όπως εφαρμογές με ωκεάνια ύδατα ή σε υφαλοκρηπίδες, το SWAN προσφέρει την εξίσωση φασματικής ισορροπίας δράσης διατυπωμένη σε σφαιρικές συντεταγμένες:

$$\frac{\partial \tilde{N}(\lambda, \varphi; \sigma, \theta)}{\partial t} + \frac{\partial c_\lambda \tilde{N}(\lambda, \varphi; \sigma, \theta)}{\partial \lambda} + \frac{\partial c_\varphi \tilde{N}(\lambda, \varphi; \sigma, \theta)}{\partial \varphi} + \frac{\partial c_\sigma \tilde{N}(\lambda, \varphi; \sigma, \theta)}{\partial \sigma} + \frac{\partial c_\theta \tilde{N}(\lambda, \varphi; \sigma, \theta)}{\partial \theta} = \frac{S_{tot}}{\sigma}$$

όπου η πυκνότητα δράσης  $\tilde{N}$  είναι σε σχέση με το γεωγραφικό μήκος  $\lambda$  και το γεωγραφικό πλάτος  $\varphi$ . Σημειώνεται ότι  $\theta$  είναι η κατεύθυνση του κύματος που λαμβάνεται κατά τη φορά των δεικτών του ρολογιού από τη γεωγραφική Ανατολή.

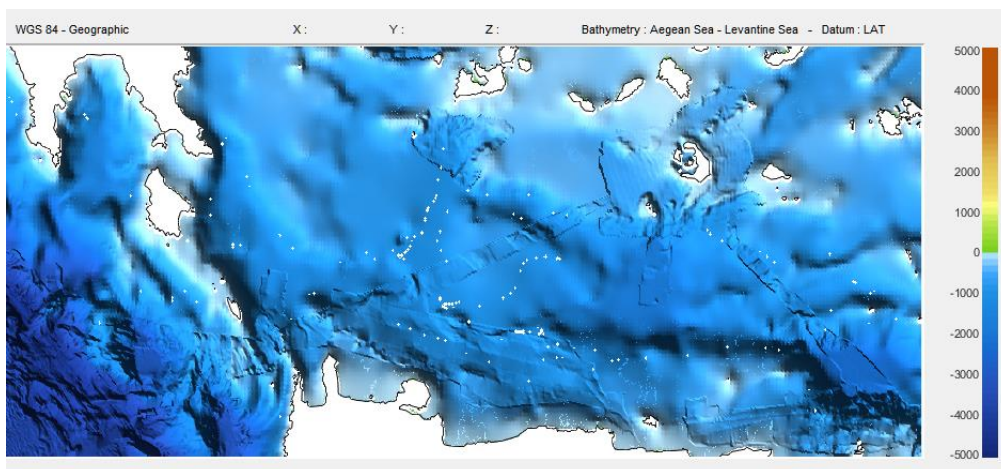
Το μοντέλο SWAN του Delft3D-WAVE μπορεί να χρησιμοποιηθεί για έργα που σχετίζονται με την ανάπτυξη και τη διαχείριση των ακτών, καθώς και για το σχεδιασμό λιμένων και υπεράκτιων εγκαταστάσεων. Μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί ως κυματικό hindcast μοντέλο. Οι τυπικές περιοχές για την εφαρμογή του μοντέλου SWAN μπορεί να ποικίλλουν έως και πάνω από 50 km x 50 km. Γενικά, το μοντέλο μπορεί να εφαρμοστεί στις ακόλουθες περιοχές:



1. εκβολές ποταμών
2. παλιρροϊκοί κόλποι
3. λίμνες
4. νησιά με παλιρροϊκά πεδία
5. κανάλια
6. παράκτιες περιοχές

### Χρήση του Delft Dashboard

Το Delft Dashboard έχει σχεδιαστεί για να υποστηρίζει τους χρήστες στη δημιουργία νέων ή στην αναβάθμιση και εκτέλεση υφιστάμενων μοντέλων. Αρχικά ορίζεται το περίγραμμα του πλέγματος και το μέγεθος των κελιών της οριζόντιας ανάλυσης του πεδίου μοντελοποίησης. Η εργαλειοθήκη δημιουργεί αυτόματα το ορθογώνιο πλέγμα του πεδίου μοντελοποίησης εντός των ορίων που καθορίζονται στην εργαλειοθήκη με την αποτύπωση των κελιών του πλέγματος. Στη συνέχεια, προκειμένου να οριστικοποιηθεί ο προσδιορισμός του πλέγματος, τα βαθυμετρικά δεδομένα αποδίδονται στο παραγόμενο ορθογώνιο πλέγμα. Όταν δεν υπάρχουν λεπτομερή τοπικά βαθυμετρικά δεδομένα, χρησιμοποιούνται τα σύνολα βαθυμετρικών δεδομένων του EMODnet. Το EMODnet Bathymetry αποσκοπεί στην παροχή ενός ενιαίου σημείου πρόσβασης σε βαθυμετρικά προϊόντα, ψηφιακά μοντέλα εδάφους (DTM) και δεδομένα (σύνολα δεδομένων έρευνας και σύνθετα DTM) που συλλέγονται και διαχειρίζονται από έναν αυξανόμενο αριθμό οργανισμών από την κυβέρνηση και την έρευνα, διάσπαρτους σε όλη την Ευρώπη. Στο πλαίσιο του Delft Dashboard, τα σύνολα βαθυμετρικών δεδομένων εισάγονται αρχικά στον τομέα μοντελοποίησης και στη συνέχεια πραγματοποιείται χωρική παρεμβολή από το αρχικό πλέγμα στο πλέγμα του μοντέλου με γραμμική παρεμβολή.



Εικόνα 14 Βαθυμετρία περιοχής μελέτης (πηγή EMODnet μέσω Delft3d Dashboard)

### Δεδομένα ανέμου

Τα δεδομένα ανέμου αποκτήθηκαν από την πλατφόρμα European Wind Atlas σε μορφή χρονοσειράς που περιέχει ωριαία ταχύτητα ανέμου ( $u$ ) και κατεύθυνση ανέμου. Στη συνέχεια, χρησιμοποιώντας τη γλώσσα Matlab, δημιουργήθηκε το αρχείο \*.wnd.

### Οριακές συνθήκες

Για να προκύψει ένα μαθηματικό πρόβλημα που έχει τεθεί σωστά και έχει μοναδική λύση, πρέπει να καθοριστεί ένα σύνολο αρχικών και οριακών συνθηκών για τις στάθμες νερού και τις οριζόντιες ταχύτητες. Το περίγραμμα του πεδίου του μοντέλου αποτελείται από τμήματα κατά μήκος των γραμμών ξηράς-νερού (ακτογραμμές) που ονομάζονται κλειστά όρια και



τμήματα κατά μήκος του πεδίου ροής που ονομάζονται ανοικτά όρια. Τα κλειστά όρια είναι φυσικά όρια. Οι ταχύτητες κάθετα σε ένα κλειστό όριο μηδενίζονται. Τα ανοικτά όρια είναι πάντα τεχνητά όρια "νερού-νερού".

Κατά μήκος κάθε ανοικτού ορίου του μοντέλου, επιβλήθηκε μια χρονικά και χωρικά σταθερή (ενιαία) οριακή συνθήκη κύματος, με ανάκτηση δεδομένων από το μοντέλο MEDSEA WAM (ανάλυση 1/24ο x 1/24ο) του ECMWF, διαθέσιμο στην υπηρεσία Copernicus Marine Service (product medsea\_multiyear\_wav\_006\_012). Τα δεδομένα αυτά αποτελούνται από ωριαίες χρονοσειρές σημαντικού ύψους κύματος, περιόδου αιχμής (peak period) και της κατεύθυνσης κύματος και η επεξεργασία τους έγινε με τη χρήση βάσης δεδομένων μέσω του MS Access και Matlab.

Ακολούθως κατασκευάστηκε ο κάρναβος υπολογισμών ο οποίος αποτελείται από 181 κελιά κατά μήκος του άξονα x (M όπως συμβολίζεται στο Delft Dashboard) και 100 κελιά κατά μήκος του άξονα y (N όπως συμβολίζεται στο Delft Dashboard), με το κάθε κελί να έχει διαστάσεις περίπου 950 x 950 m.

Με την ολοκλήρωση της εισαγωγής των απαιτούμενων δεδομένων έγινε η παραμετροποίηση του μοντέλου προσομοίωσης σύμφωνα με τον οδηγό του μοντέλου (Delft3D – Wave Model, Manual). Η επεξεργασία των αποτελεσμάτων του μοντέλου έγινε με τη χρήση του εργαλείου Quickplot που περιέχεται ενσωματωμένο στην σουίτα Delft 3D Suite.

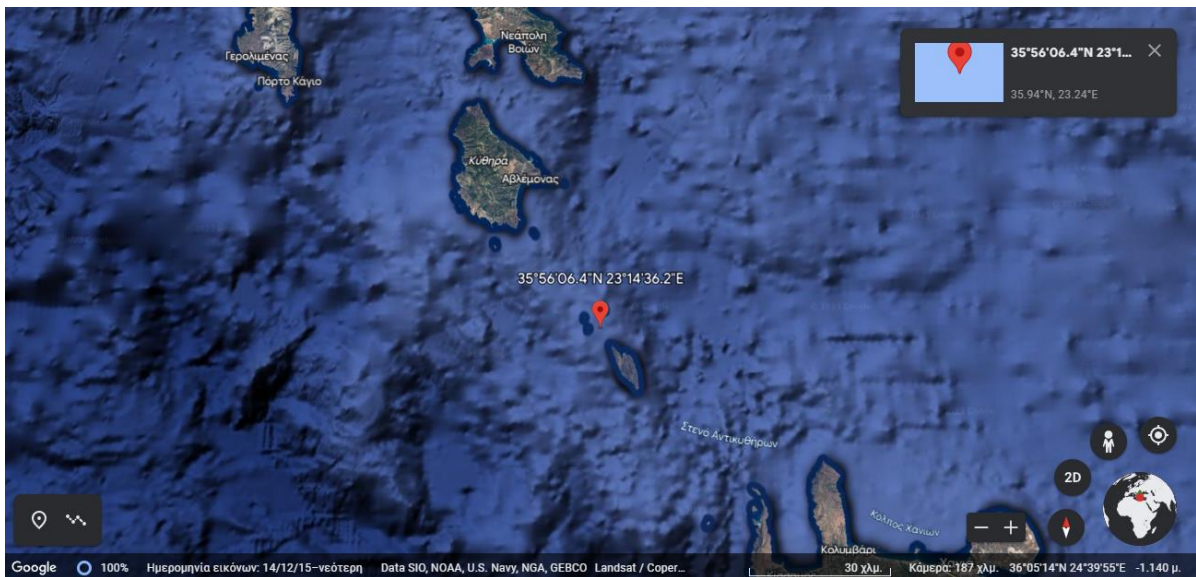
### Προσομοίωση παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας

Για τον υπολογισμό της παραγωγής ενέργειας έγινε αντιστοίχιση των κυματικών χαρακτηριστικών (σημαντικό ύψος κύματος και περίοδος διάδοσης) των επιλεγμένων σημείων προσομοίωσης, με τον πίνακα ισχύος (power matrix) για κάθε μετατροπέα κυματικής ενέργειας (βλέπε Παράρτημα 1), όπως προέκυψαν από τις μελέτες των Bozzi et al.(2017) και των A. Majidi, et al. (2020).

## Αποτελέσματα

### Εκτιμώμενο κυματικό δυναμικό

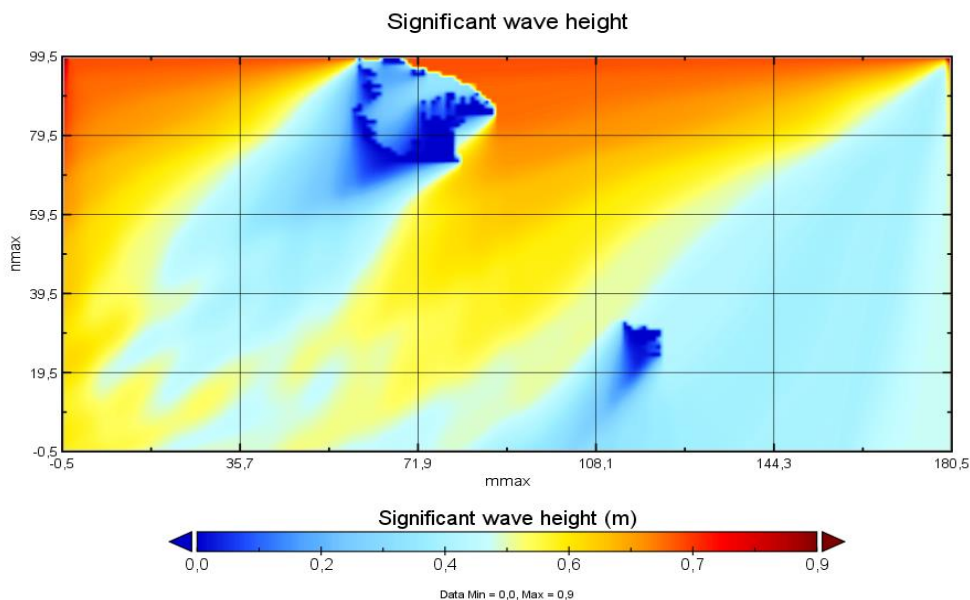
Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενη ενότητα, η εκτίμηση του κυματικού δυναμικού στην περιοχή μελέτης έγινε με τη χρήση δύο διαφορετικών μεθόδων. Αρχικά με τη χρήση δεδομένων για ένα σημείο αναφοράς από το μοντέλο MEDSEA WAM (ανάλυση 1/24ο x 1/24ο) του ECMWF, διαθέσιμο στην υπηρεσία Copernicus Marine Service (product medsea\_multiyear\_wav\_006\_012) για τη χρονική περίοδο 2005 - 2015 και μέσω προσομοίωσης κυματικού δυναμικού για το έτος 2005 με τη χρήση του μοντέλου Delft 3D – Wave model. Το σημείο αναφοράς (εικόνα 15) έχει συντεταγμένες 35.93512, 23.243376 στο γεωγραφικό σύστημα WGS 84, το οποίο αντιστοιχεί στο σημείο J με 108,40 (M,N) στον κάρναβο υπολογισμών που χρησιμοποιήθηκε στο Delft 3D – Wave model. Το σημείο αυτό είναι και το σημείο στο οποίο γίνεται η σύγκριση των αποτελεσμάτων μεταξύ των δύο μεθόδων.



Εικόνα 15 Σημείο αναφοράς

Για το 2005 μέσω του DELFT 3D SUITE

Η προσομοίωση του κυματικού δυναμικού με τη χρήση του μοντέλου Delft 3D – Wave model πραγματοποιήθηκε ανά ώρα σε ένα σύνολο 18.100 κελιών μεγέθους περίπου 950x950 μέτρα, για το έτος 2005. Το σύνολο των κελιών υπολογισμών χωρίστηκαν σε 25 υποπεριοχές για την οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων όπως φαίνεται στην εικόνα 16. Στην εικόνα 16 βλέπουμε επίσης τις διαφορετικές τιμές που μπορεί να πάρει το σημαντικό ύψος κύματος σε όλη την περιοχή μελέτης σε ένα στιγμιότυπο της προσομοίωσης.



Εικόνα 16 Δισδιάστατη απεικόνιση του σημαντικού ύψους κύματος στην περιοχή μελέτης (από τον συγγραφέα μέσω Quickplot)

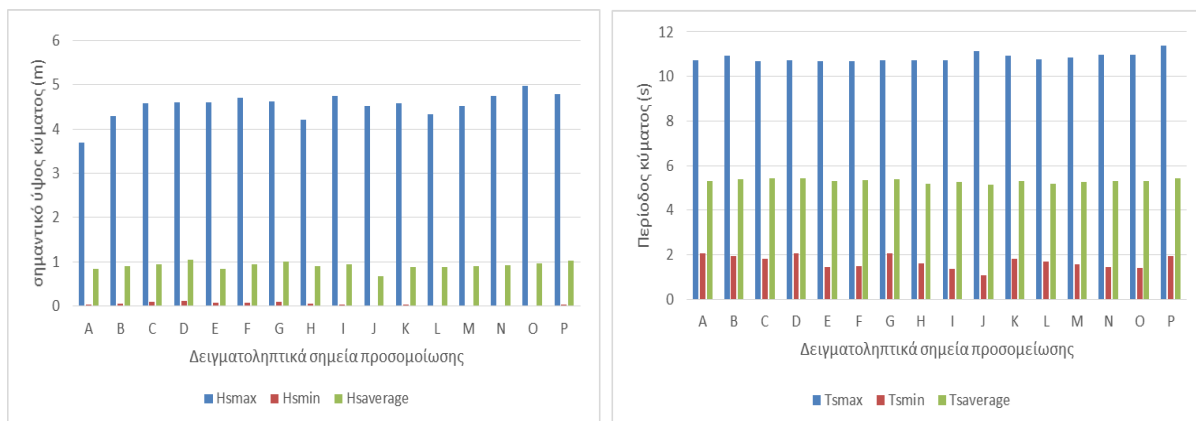
Στην εικόνα 16 βλέπουμε ότι οι 25 υποπεριοχές διασταυρώνονται σε 16 σημεία (πίνακας), τα οποία και επιλέχθηκαν για τη σύγκριση των κυματικών χαρακτηριστικών της περιοχής, ώστε να μπορεί να προταθούν τα κατάλληλα σημεία για τη χωροθέτηση της εγκατάστασης των μετατροπέων κυματικής ενέργειας.



ΣΗΜΕΙΑ ΛΗΨΗΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ											
	N	M		N	M		N	M		N	M
A	80	36	E	60	72	I	60	108	M	60	144
B	60	36	F	40	72	J	40	108	N	40	144
C	40	36	G	20	72	K	20	108	O	20	144
D	20	36	H	80	108	L	80	144	P	1	144

Πίνακας 3 Σημεία λήψης δεδομένων από την προσομοίωση του κυματικού δυναμικού για το 2005

Στα σημεία αυτά παρατηρούμε ότι τα κυματικά χαρακτηριστικά παρουσιάζουν ορισμένες διακυμάνσεις στις μέγιστες και ελάχιστες τιμές τους. Αναλυτικότερα το σημαντικό ύψος κύματος παρουσιάζει τη μεγαλύτερη μέγιστη τιμή (Hsmax) στο σημείο O με 4,974m, ενώ η χαμηλότερη μέγιστη (Hsmax) παρουσιάζεται στο σημείο A με τιμή 3,692m. Η χαμηλότερη ελάχιστη τιμή του σημαντικού ύψους κύματος παρουσιάζεται στο σημείο J με 0,003m και η μεγαλύτερη ελάχιστη τιμή παρουσιάζεται στο σημείο D με 0,115m. Οι τιμές της περιόδου κύματος παρουσιάζουν μικρές διακυμάνσεις ανάμεσα στα σημεία. Οι μέσες τιμές σε όλα τα σημεία παρουσιάζουν μικρές διακυμάνσεις μεταξύ τους και κυμαίνονται κοντά στο 0,91m για το σημαντικό ύψος κύματος και στα 5,3 s για την περίοδο.



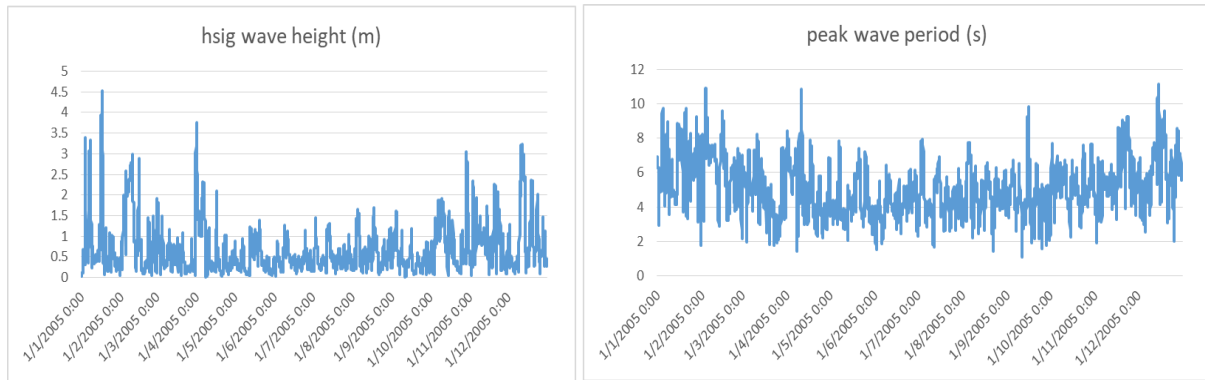
Εικόνα 17 Αριστερά: Οι μέγιστες, ελάχιστες και μέσες τιμές για το σημαντικό ύψος κύματος στα 16 δειγματοληπτικά σημεία προσομοίωσης το 2005, Δεξιά: Οι μέγιστες, ελάχιστες και μέσες τιμές για τη περίοδο αιχμής στα 16 δειγματοληπτικά σημεία προσομοίωσης το 2005

### Εποχική διακύμανση κυματικών χαρακτηριστικών

Στα 16 σημεία μεταξύ των οποίων γίνεται η σύγκριση των κυματικών χαρακτηριστικών, φαίνεται ότι υπάρχει μεγάλη εποχική διακύμανση στις τιμές που παίρνουν. Σε όλα τα σημεία κατά τους θερινούς μήνες (Ιούνιος – Αύγουστος) το σημαντικό ύψος κύματος και η περίοδος αιχμής λαμβάνουν τις χαμηλότερες τιμές τους, ενώ οι υψηλότερες τιμές εμφανίζονται στους χειμερινούς μήνες (Δεκέμβρης – Φεβρουάριος). Στην εικόνα 18 αποτυπώνεται η ωριαία διακύμανση του σημαντικού ύψους κύματος και της περιόδου αιχμής για το σημείο J (σημείο αναφοράς) για το έτος 2005 (τα αντίστοιχα γραφήματα για όλα τα σημεία παρατίθενται στο παράρτημα 2).

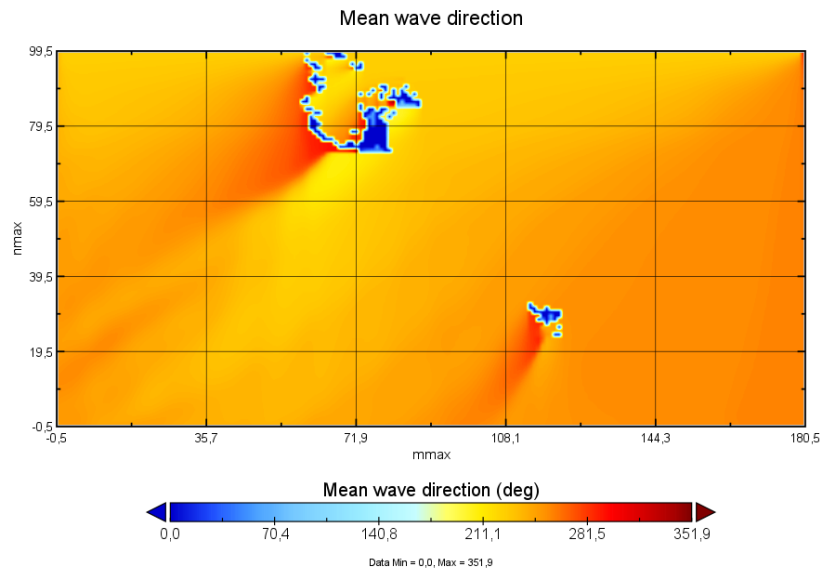


## Εκτίμηση ενεργειακού δυναμικού κυματικής ενέργειας & πρόβλεψη ηλεκτροπαραγωγής : Θαλάσσια περιοχή Αντικυθήρων



Εικόνα 18 Η ωριαία διακύμανση του σημαντικού ύψους κύματος και της περιόδου αιχμής για το σημείο J (σημείο αναφοράς) για το έτος 2005.

Σε αυτό το γράφημα φαίνεται εύκολα αυτή εποχική διακύμανση των τιμών που λαμβάνουν τα κυματικά χαρακτηριστικά, ενώ φαίνεται επίσης ότι παρά το γεγονός ότι τους θερινούς μήνες εντοπίζονται οι χαμηλότερες τιμές τους, παρουσιάζονται και τιμές μεγαλύτερες του μέσου όρου. Αυτό οφείλεται σε εντονότερα καιρικά φαινόμενα από τα κυρίαρχα της εποχής.



Εικόνα 19 Δισδιάστατη απεικόνιση της κυρίαρχης κατεύθυνσης διάδοσης των κυμάτων το 2005 στην περιοχή μελέτης (από τον συγγραφέα μέσω Quickplot)

Όπως βλέπουμε στην εικόνα 18 η κυρίαρχη κατεύθυνση διάδοσης των κυμάτων το 2005 είναι η ΝοτιοΑνατολική, εκφρασμένη σε ένα εύρος 211,1 – 270,00 μοιρών.

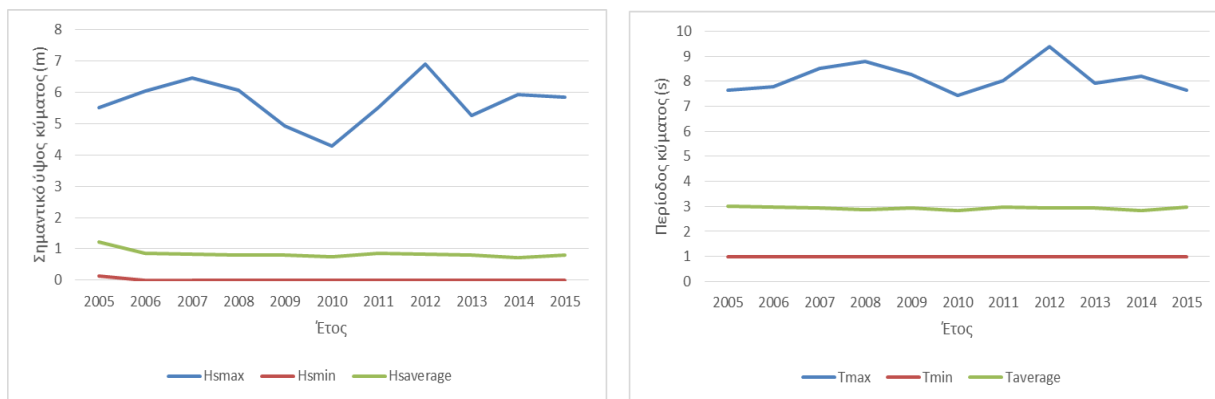
### Για την περίοδο 2005-2015

Εφαρμόζοντας τη δεύτερη μέθοδο για τη χρονική περίοδο 2005-2015, τα κυματικά χαρακτηριστικά ελήφθησαν για το σημείο αναφοράς. Τα δεδομένα αυτά αποτελούνται από ωριαίες χρονοσειρές για το σημαντικό ύψος κύματος, την περίοδο αιχμής (peak period) και την κατεύθυνση του κύματος.



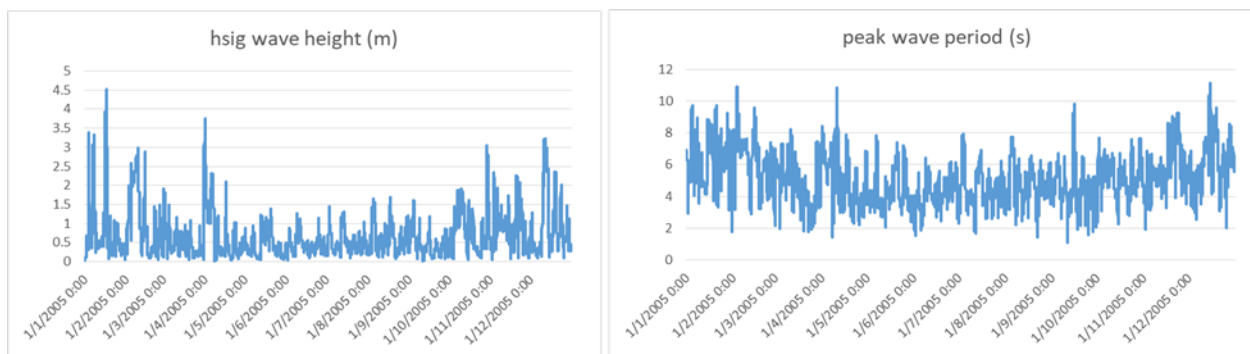


## Εκτίμηση ενεργειακού δυναμικού κυματικής ενέργειας & πρόβλεψη ηλεκτροπαραγωγής : Θαλάσσια περιοχή Αντικυθήρων

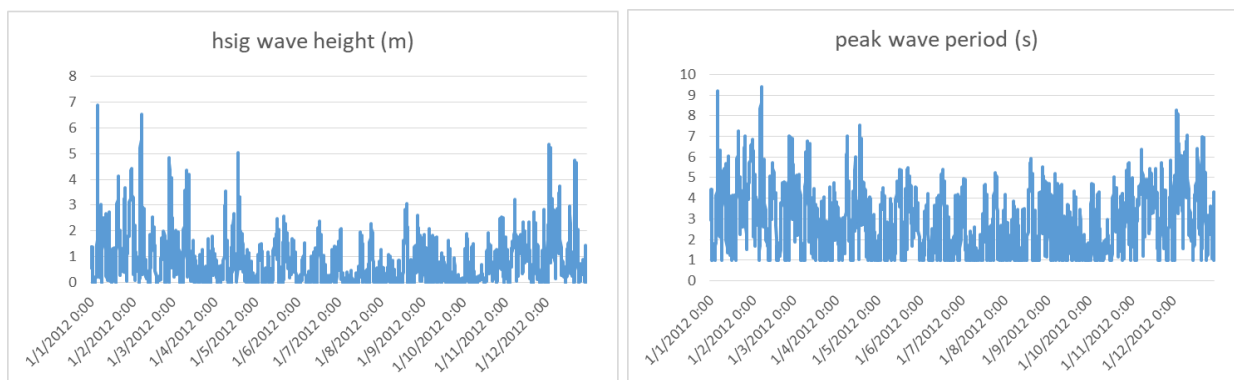


Εικόνα 20 Αριστερά: Η ετήσια διακύμανση για τις μέγιστες, ελάχιστες και μέσες τιμές για το σημαντικό ύψος κύματος στο σημείο αναφοράς για την περίοδο 2005 - 2015, Δεξιά: Η ετήσια διακύμανση για τις μέγιστες, ελάχιστες και μέσες τιμές για τη περίοδο αιχμής στο σημείο αναφοράς για την περίοδο 2005 - 2015

Όπως βλέπουμε και στα παραπάνω γραφήματα οι μεγαλύτερες ανά έτος διακυμάνσεις εμφανίζονται στις μέγιστες τιμές (Hsmax και Tmax) τόσο της περιόδου όσο και του σημαντικού ύψους κύματος. Αντίθετα οι χαμηλότερες τιμές τους (Hsmin και Tmin) και οι μέσες τιμές τους (Haverage και Taverage) παρουσιάζουν πολύ μικρές διακυμάνσεις ανά έτος.



Εικόνα 21 Αριστερά: το Σημαντικό ύψος κύματος, Δεξιά: η περίοδος αιχμής κύματος, για το σημείο αναφοράς για το έτος 2005



Εικόνα 22 Αριστερά: το Σημαντικό ύψος κύματος, Δεξιά: η περίοδος αιχμής κύματος, για το σημείο αναφοράς για το έτος 2012

Στα παραπάνω γραφήματα αποτυπώνονται για τα έτη 2005 και 2012, οι ωριαίες τιμές που παίρνουν το σημαντικό ύψος κύματος και η περίοδος αιχμής, για το σημείο αναφοράς (τα γραφήματα για κάθε έτος παρατίθενται στο Παράρτημα 2). Βλέπουμε πως το σημαντικό ύψος κύματος παρουσιάζει τιμές μεγαλύτερες των 4 m σε αρκετά περιορισμένο αριθμό περιπτώσεων, ενώ οι περισσότερες τιμές είναι από 0 έως 2 m τους θερινούς μήνες και από 1-3m τους χειμερινούς μήνες. Επιπλέον παρατηρούμε ότι οι τιμές που παίρνει το σημαντικό ύψος



κύματος παρουσιάζουν σχετικά μικρό εύρος διακύμανσης, σε αντίθεση με την περίοδο αιχμής, όπου οι ωριαίες διακυμάνσεις των τιμών που παίρνει είναι μεγαλύτερες.

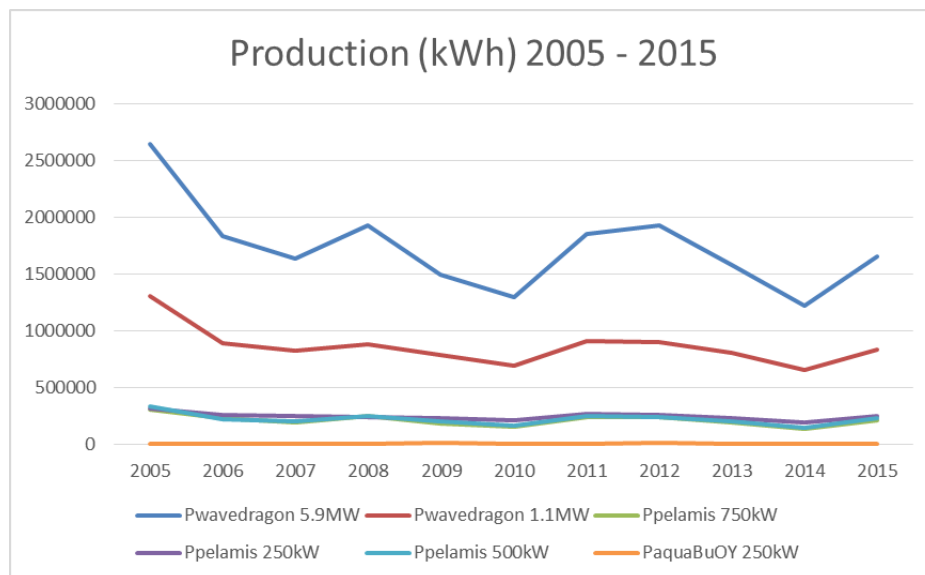
### Εκτιμώμενη παραγωγή ενέργειας

Η εκτίμηση της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, όπως είδαμε σε προηγούμενο κεφάλαιο, θα γίνει με τη χρήση των τριών τύπων μετατροπέων κυματικής ενέργειας σε διαφορετικά μεγέθη (πίνακας 1).

Αρχικά έγινε η εκτίμηση της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας για την χρονική περίοδο 2005-2015 για το σημείο αναφοράς, με τη χρήση των δεδομένων κυματικών χαρακτηριστικών που περιγράφονται στο προηγούμενο κεφάλαιο. Ακολούθως έγινε η εκτίμηση της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας για το έτος 2005 με δεδομένα τα κυματικά χαρακτηριστικά που προέκυψαν από την προσομοίωση μέσω του Delft3D – Wave model για τα 16 σημεία που αναλύθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο. Χρησιμοποιήθηκε ο πίνακας ισχύος(power matrix) για κάθε μετατροπέα κυματικής ενέργειας (βλέπε Παράρτημα 1), όπως προέκυψαν από τις μελέτες των Bozzi et al.(2017) και των A. Majidi, et al. (2020) για την αντιστοίχιση των κυματικών χαρακτηριστικών (σημαντικό ύψος κύματος και περίοδος διάδοσης) των επιλεγμένων σημείων προσομοίωσης και την εκτίμηση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας.

### Για την περίοδο 2005-2015

Με την ολοκλήρωση της εκτίμησης της παραγωγής για τους έξι διαφορετικούς τύπους μετατροπέων κυματικής ενέργειας για την περίοδο 2005-2015 μπορούμε εύκολα να διαπιστώσουμε πως οι μετατροπείς Pelamis, ανεξαρτήτως ισχύος, παράγουν ίδιας τάξης μεγέθους ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας (εικόνα 23).



Εικόνα 23 Εκτιμώμενη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας για την χρονική περίοδο 2005-2015 στο σημείο αναφοράς από τους 6 διαφορετικούς τύπους μετατροπέων

Αυτό φαίνεται καλύτερα και στον πίνακα 4 όπου αποτυπώνεται η ετήσια παραγωγή για κάθε μετατροπέα κυματικής ενέργειας. Τη χαμηλότερη παραγωγή παρουσιάζει ο μετατροπέας Aquabuoy ισχύος 250kW, ενώ ο μετατροπέας Pelamis ισχύος 250 kW, προκύπτει να έχει πολλαπλάσια παραγωγή.



Εκτίμηση ενεργειακού δυναμικού κυματικής ενέργειας & πρόβλεψη ηλεκτροπαραγωγής :  
Θαλάσσια περιοχή Αντικυθήρων

Production (MWh)	Pwavedragon 5.9MW	Pwavedragon 1.1MW	Ppelamis 750kW	Ppelamis 500kW	Ppelamis 250kW	PaquaBuOY 250kW
2005	2648	1307	305	340.2	316.4	4.7
2006	1832	889.3	231.3	227	264.8	5.982
2007	1638	825.8	196.8	206.3	247.3	6.967
2008	1930	886.6	246.7	248.2	240.2	9.051
2009	1495	791	187.9	206	232.9	12.87
2010	1293	694.2	156.9	163	211.5	5.572
2011	1853	906.6	241.6	248.4	267.9	6.814
2012	1926	900.6	244.8	241.9	259.7	12.89
2013	1582	806.3	195.9	201.9	236.5	8.525
2014	1224	655.1	135.8	142.7	198.7	3.922
2015	1652	839	217.3	230.6	247.7	8.399

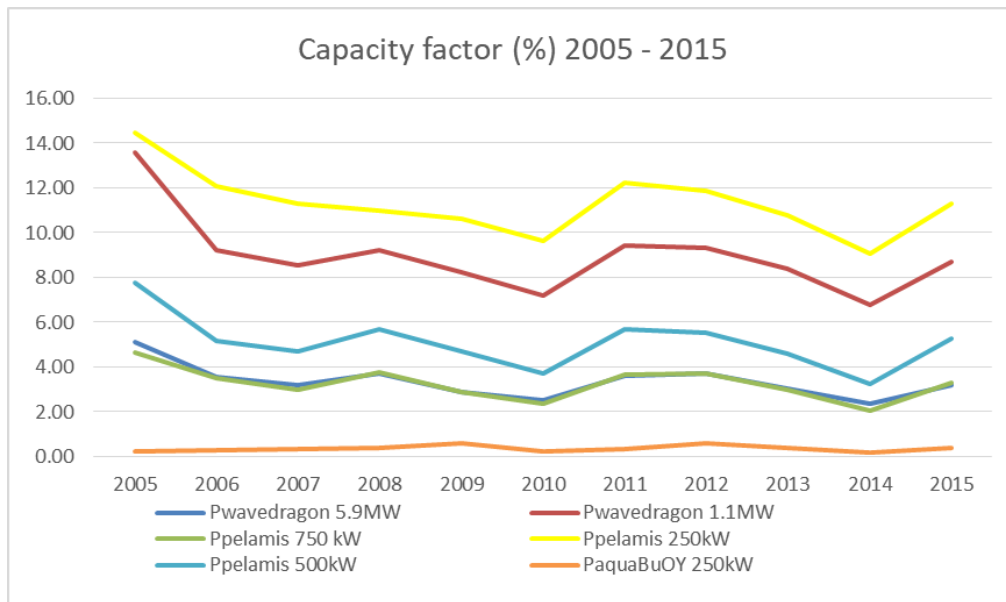
Πίνακας 4 Η ετήσια παραγωγή για κάθε μετατροπέα κυματικής ενέργειας για την περίοδο 2005-2015

Επιπλέον παρατηρούμε ότι τη μεγαλύτερη παραγωγή παρουσιάζουν οι μετατροπείς Wavedragon με τον μετατροπέα Wavedragon 5.9MW να εμφανίζει τη μεγαλύτερη παραγωγή. Μεταξύ των μετατροπέων Pelamis μεγαλύτερη παραγωγή στο σύνολο των 10 ετών φαίνεται να έχει ο Pelamis των 250 kW ενώ ο μετατροπέας Pelamis ισχύος 750kW παράγει λιγότερη ηλεκτρική ενέργεια ανάμεσα στις τρεις διαφορετικές εκδοχές αυτού του τύπου μετατροπέα, όπως φαίνεται συγκεντρωτικά στον πίνακα 5.

WEC	Total Production (MWh)
Pwavedragon 5.9MW	19073.97
Pwavedragon 1.1MW	9502.063
Ppelamis 750kW	2359.953
Ppelamis 500kW	2723.652
Ppelamis 250kW	2456.224
PaquaBuOY 250kW	85.697

Πίνακας 5 Συνολική παραγωγή ανά μετατροπέα για την περίοδο 2005-2015

Τα παραπάνω αποτελέσματα υποδηλώνουν ότι η καλύτερη επιλογή μετατροπέα θα ήταν αυτή του Wavedragon ισχύος 5.9kW, ωστόσο βλέποντας τον συντελεστή αξιοποίησης κάθε μετατροπέα ανά έτος, όπως παρουσιάζεται στην εικόνα 24, βγαίνει το συμπέρασμα ότι η καλύτερη επιλογή είναι ο Pelamis ισχύος 250 kW.



Εικόνα 24 Ο ετήσιος συντελεστής αξιοποίησης για την χρονική περίοδο 2005-2015 στο σημείο αναφοράς από τους 6 διαφορετικούς τύπους μετατροπέων

Οι μετατροπείς Pelamis ισχύος 250 kW και Wavedragon ισχύος 1.100kW, παρουσιάζουν τους μεγαλύτερους συντελεστές αξιοποίησης συγκριτικά με τους υπόλοιπους μετατροπείς, ενώ ο AquaBuoy εμφανίζει τον μικρότερο συντελεστή αξιοποίησης με τιμή κάτω του 0,5% εκτός από το 2009 που έχει 0,588%. Αναλυτικότερα ο μετατροπέας Pelamis ισχύος 250 kW όπως φαίνεται και στον πίνακα 5 κάθε χρόνο παρουσιάζει συντελεστή αξιοποίησης από 10,64 - 14,45% εκτός από το 2010 που ο συντελεστής αξιοποίησης είναι 9,656% και το 2014 που είναι 9,075%. Ο μετατροπέας Pelamis ισχύος 500kW παρουσιάζει συντελεστή αξιοποίησης από 3,259% (το 2014) έως 7,766% (το 2005), ενώ ο μετατροπέας Pelamis ισχύος 750 kW παρουσιάζει συντελεστή αξιοποίησης από 2,067% το 2014 έως 4,642%

CF (%)	Pwavedragon 5.9MW	Pwavedragon 1.1MW	Ppelamis 750 kW	Ppelamis 250kW	Ppelamis 500kW	PaquaBuOY 250kW
2005	5.124	13.57	4.642	14.45	7.766	0.215
2006	3.545	9.229	3.52	12.09	5.184	0.273
2007	3.169	8.57	2.995	11.29	4.711	0.318
2008	3.735	9.201	3.756	10.97	5.666	0.413
2009	2.893	8.209	2.859	10.64	4.704	0.588
2010	2.502	7.205	2.388	9.656	3.722	0.254
2011	3.586	9.409	3.678	12.24	5.67	0.311
2012	3.727	9.347	3.726	11.86	5.524	0.589
2013	3.062	8.368	2.982	10.8	4.609	0.389
2014	2.368	6.799	2.067	9.075	3.259	0.179
2015	3.196	8.707	3.308	11.31	5.264	0.384

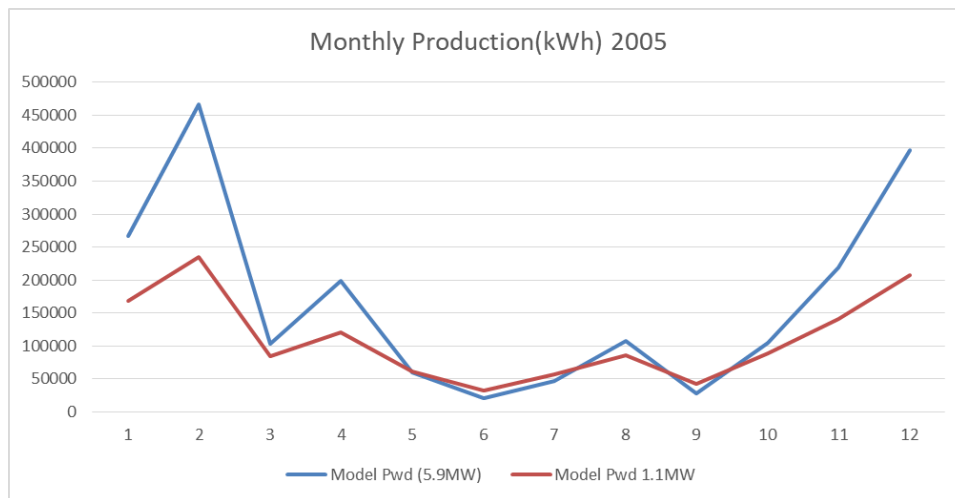
Πίνακας 6 Συντελεστής χωρητικότητας ανά έτος για κάθε μετατροπέα την περίοδο 2005-2015

Ο μετατροπέας Wavedragon ισχύος 1.1 MW παρουσιάζει συντελεστή αξιοποίησης από 6,799% (το 2014) έως 13,57% (το 2005), ο μετατροπέας Wavedragon ισχύος 5.9 MW έχει συντελεστή αξιοποίησης από 2,502% (το 2010) έως 5,124% (το 2005).



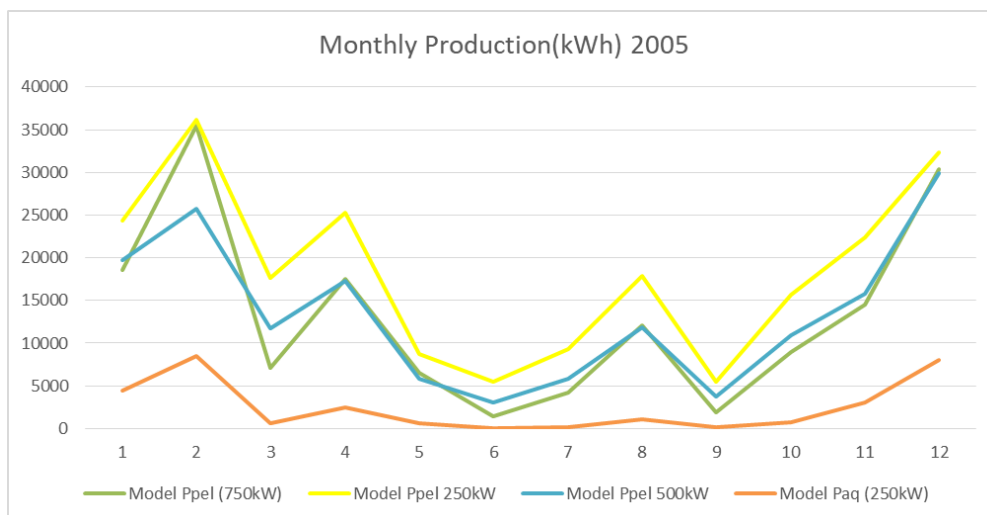
### Για το 2005

Ανάλογα με την εποχική διακύμανση των κυματικών χαρακτηριστικών κυμαίνεται και η μηνιαία παραγωγή για τους μετατροπείς Wavedragon (εικόνα 25) στο σημείο αναφοράς.



Εικόνα 25 Η μηνιαία παραγωγή για τους μετατροπείς Wavedragon στο σημείο αναφοράς το 2005

Ειδικότερα η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας κορυφώνεται τον Φεβρουάριο και τον Δεκέμβριο, ενώ τους θερινούς μήνες παρουσιάζει σημαντική μείωση, αντίστοιχη της μείωσης του ύψους κύματος. Επιπλέον φαίνεται ότι η παραγωγή του μετατροπέα Wavedragon ισχύος 5,9MW παρουσιάζει πολύ μεγάλη διακύμανση στην παραγωγή, σε αντίθεση με τον μετατροπέα Wavedragon ισχύος 1,1MW που η παραγωγή κατανέμεται πιο ομοιόμορφα στο έτος με μικρότερες διακυμάνσεις.



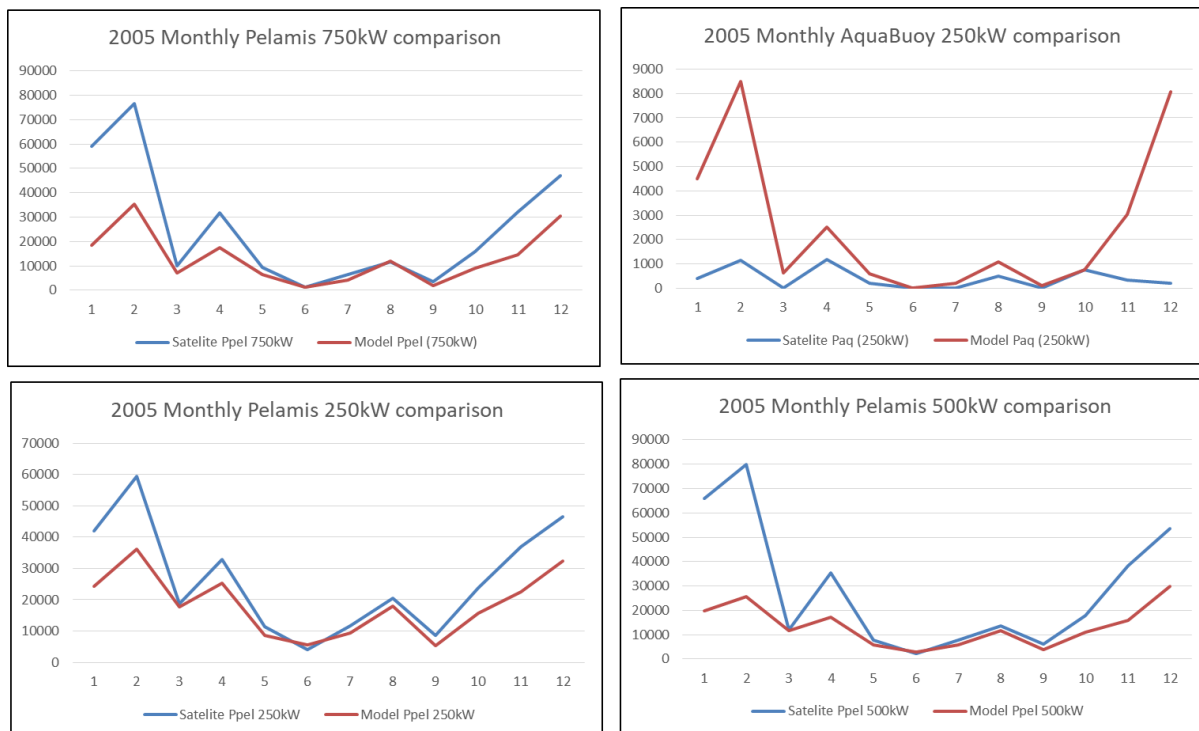
Εικόνα 26 Η μηνιαία παραγωγή για τους μετατροπείς Pelamis και AquaBioog στο σημείο αναφοράς το 2005

Αντίστοιχη συμπεριφορά σχετικά με την παραγωγή παρουσιάζουν και οι υπόλοιποι 4 μετατροπείς κυματικής ενέργειας, με την παραγωγή να εμφανίζει μέγιστα τον Φεβρουάριο και τον Δεκέμβριο (εικόνα 26). Τους θερινούς μήνες κι εδώ μειώνεται σημαντικά η παραγωγή εκτός από τον Αύγουστο. Από αυτά τα αποτελέσματα, επιβεβαιώνεται το γεγονός ότι καλύτερη προσαρμοστικότητα στα κυματικά χαρακτηριστικά της περιοχής έχει ο μετατροπέας Pelamis ισχύος 250kW, όπως φάνηκε και στην προηγούμενη ενότητα.



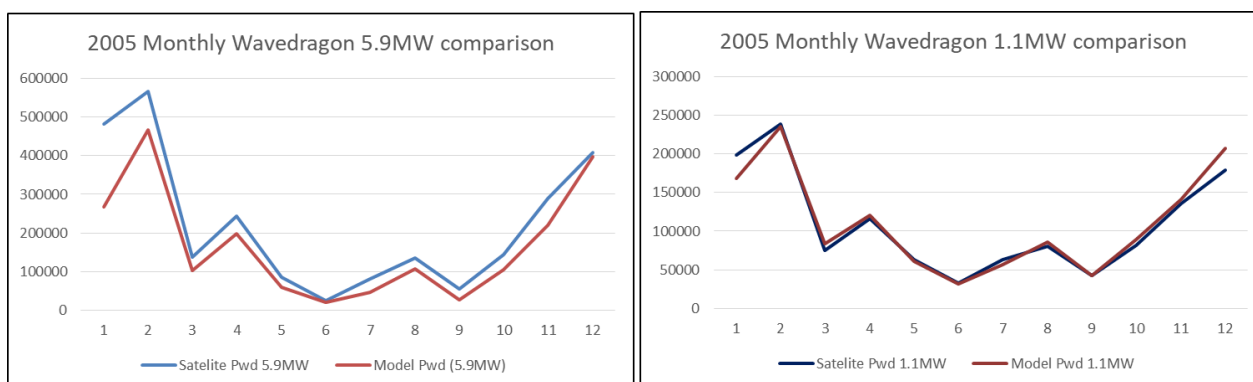
### Συγκριτικά αποτελέσματα για το 2005

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα της εκτίμησης παραγωγής ενέργειας με βάση τα αποτελέσματα των δύο μεθόδων για την εκτίμηση του κυματικού δυναμικού, παρατηρούντε αποκλίσεις, κυρίως τη χειμερινή περίοδο.



Εικόνα 27 Συγκριτικά αποτελέσματα για τη μηνιαία παραγωγή για τους μετατροπείς Pelamis και AquaBuoy στο σημείο αναφοράς το 2005

Όπως φαίνεται στην εικόνα 27 σε όλες τις περιπτώσεις όπου χρησιμοποιήθηκαν τα αποτελέσματα του Delft3D Wave Model, εκτός από την περίπτωση του μετατροπέα AquaBuoy, η εκτιμώμενη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας είναι μικρότερη συγκριτικά με τις περιπτώσεις όπου έγινε χρήση των δεδομένων από τη βάση δεδομένων Copernicus. Ωστόσο την περίοδο από τον Μάρτιο έως τον Σεπτέμβριο, οι αποκλίσεις αυτές είναι μικρές, ενώ μεγαλύτερη ομοιότητα έχουν τα αποτελέσματα για τους μετατροπείς Wavedragon.



Εικόνα 28 Συγκριτικά αποτελέσματα για τη μηνιαία παραγωγή για τους μετατροπείς Wavedragon στο σημείο αναφοράς το 2005

Ιδιαίτερα στην περίπτωση του μετατροπέα Wavedragon ισχύος 1.1 MW τα αποτελέσματα φαίνονται σχεδόν ταυτόσημα.



## Συμπεράσματα - Προτάσεις

Τα κυματικά χαρακτηριστικά στην περιοχή μελέτης που προκύπτουν από τις δύο διαφορετικές μεθόδους εκτίμησης, δεν παρουσιάζουν σημαντικές αποκλίσεις, εκτός από τους χειμερινούς μήνες. Οι αποκλίσεις οφείλονται στο γεγονός ότι η προσομοίωση, που έγινε στην παρούσα εργασία, εστιάζει στην περιοχή μελέτης. Ενώ τα δεδομένα που αντλήθηκαν από μοντέλο MEDSEA WAM της υπηρεσίας Copernicus Marine Service έχουν προέλθει από προσομοίωση σε όλη τη Μεσόγειο, συνυπολογίζοντας όλους τους μηχανισμούς δημιουργίας και διάδοσης κυμάτων (άνεμος, ρεύματα, κλπ). Αυτές οι αποκλίσεις των κυματικών χαρακτηριστικών, αποτυπώνονται καλύτερα στην εκτίμηση της παραγωγής ενέργειας.

Από την εκτίμηση της παραγωγής ενέργειας για την περίοδο 2005-2015 με τη χρήση 6 διαφορετικών μετατροπέων βλέποντας μόνο την παραγόμενη ενέργεια, φαίνεται πως η καλύτερη επιλογή είναι ο μετατροπέας Wavedragon ισχύος 5,9 MW. Αξιολογώντας, ωστόσο, τον συντελεστή αξιοποίησης βγαίνει το συμπέρασμα ότι καλύτερη επιλογή είναι ο μετατροπέας Pelamis ισχύος 250 kW. Επιπλέον αποδεικνύεται πως σε περιοχές με ήπια κυματικά χαρακτηριστικά, όπως σε αυτή τη μελέτη, βέλτιστη προσαρμοστικότητα έχουν οι μετατροπείς σε μικρότερη κλίμακα αντί των αρχικών μεγεθών.

Η ετήσια παραγωγή ενέργειας με τη χρήση του μετατροπέα Pelamis ισχύος 250 kW φαίνεται ότι καλύπτει ένα πολύ μεγάλο μέρος της μέσης ετήσιας κατανάλωσης ενέργειας στο νησί των Αντικυθήρων (250-300 MWh), καθώς η μέση ετήσια παραγωγή για την περίοδο 2005-2015 είναι 245,63 MWh ανά έτος. Ο μόνος μετατροπέας του οποίου η χρήση δείχνει να καλύπτει πολύ χαμηλό ποσοστό της μέσης ετήσιας κατανάλωσης ενέργειας στα Αντικύθηρα, είναι ο μετατροπέας AquabuoY με μέση παραγωγή 8,57 MWh ανά έτος.

Για την περαιτέρω διερεύνηση και την τελική επιλογή του κατάλληλου μετατροπέα από αυτούς που εξετάστηκαν στην παρούσα εργασία, θα χρειαστεί να γίνει βαθμονόμηση του μοντέλου Delft-3D και υπολογισμός των κυματικών χαρακτηριστικών σε όλη την περιοχή μελέτης για περίοδο τουλάχιστον δέκα ετών. Με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης αυτής μπορεί να γίνει η επιλογή των κατάλληλων σημείων για την εγκατάσταση της μονάδας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Επιπλέον προτείνεται να γίνει μια πολυκριτηριακή ανάλυση με χρήση γεωχωρικών δεδομένων (πχ θαλάσσιες οδοί διέλευσης πλοίων, περιοχές Natura, κλπ) για την ακριβέστερη χωροθέτηση της εγκατάστασης.

Ακολούθως θα χρειαστεί να εκπονηθεί μια οικονομική ανάλυση, ώστε η επένδυση που θα γίνει να είναι αποδοτική για τον μελλοντικό επενδυτή. Σε αυτή την οικονομική ανάλυση πρέπει να ληφθούν υπόψιν τόσο το κόστος της αρχικής εγκατάστασης όσο και του κόστους λειτουργίας της προς εγκατάσταση μονάδας παραγωγής ενέργειας.



## Βιβλιογραφικές αναφορές

- B.Drew, A.R.Plummer and M.N. Sahinkaya. «A review of wave energy converter technology.» 2009.
- Basar, Mohd & Ab, Azhan & Rahman, Azhan & Din, Asri & Sharil, Muhammad & Mahmud, Zubir. «Design and Development of Green Electricity Generation System Using Ocean Surface Wave.» *PEA-AIT International Conference on Energy and Sustainable Development: Issues and Strategies* , 2010: The Empress Hotel, Chiang Mai, Thailand. 2-4 June 2010.
- Booij, N., Ris, R.C., Holthuijsen, L.H.,. «A third generation wave model for coastal regions: Part 1. Model description and validation.» *J. Geophys. Res.* 104 (C4), 1999: 7649–7666.
- Boyd, G.A. and Pang, J.X. «“Estimating the linkage between energy efficiency and productivity”.» *Energy Policy*, (2000), Vol. 28 No. 5 εκδ.: pp. 289-296.
- Bozzi S, Besio G, Passoni G. «Wave power technologies for the Mediterranean offshore: Scaling and performance analysis.» *Coastal Engineering, Volume 136*,, 2018: Pages 130-146,.
- Bozzi, S., Archetti, R., Passoni, G. «Wave electricity production in Italian offshore: a preliminary investigation.» *Renew. Energy* 62, 2014: 407–416.
- C. Iuppa, L. Cavallaro, E. Foti, D. Vicinanza. «Potential wave energy production by different wave energy converters around Sicily.» *J. Renew. Sustain. Energy* 7, 2015: <https://doi.org/10.1063/1.4936397>, 061701.
- Christensen, L., Friis-Madsen, E., Kofoed, Jens Peter. «The Wave Energy Challenge the Wave Dragon case.» *Proceedings of the POWER-GEN 2005 Europe Conference*, 2005.
- Cruz, J. «Ocean Wave Energy Current Status and Future Prepectives.» 2008, Springer, Heidelberg.
- Dalton, G., R. Alcorn, and T. Lewis. «Case study feasibility analysis of the Pelamis wave energy convertor in Ireland, Portugal and North America.» *Renewable Energy* 35:433–55, 2010.
- Dalton, Gordon & Alcorn, Raymond & Lewis, Tony. «A 10 year installation program for wave energy in Ireland: A case study sensitivity analysis on financial returns. .» *Renewable Energy*. 40. 80-89. 10.1016/j.renene.2011.09.025. , 2012.
- Deltares. «Delft3D - WAVE. Simulation of short-crested waves with SWAN.» *Delft*, 2020.
- Deltares Swan team. «Swan scientific and technical documentation.» *Delft University of Technology, Delft, Netherlands.*, 1993-2019.
- Evangelos Moschos, Georgia Manou, Panayiotis Dimitriadis, Vasileios Afentoulis, Demetris Koutsoyiannis, Vasiliki K. Tsoukala,. «Harnessing wind and wave resources for a Hybrid Renewable Energy System in remote islands: a combined stochastic and deterministic approach.» *Energy Procedia* 125 (2017): 415-424.
- Falcao, A.F.O. «Wave Energy Utilization: A Review of the Technologies.» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2010: Vol. 14, pp. 899-918.
- Friedrich, Daniel, and George Lavidas. «Combining offshore and onshore renewables with energy storage and diesel generators in a standalone.» *OSES*, (2015).
- George Nomikos, Dimitris Zafirakis, Wolf Gerrit Früha, John K. Kaldellis. «Combined Wave & Wind Energy Exploitation for Remote Islands.» *International Conference on Energy, Environment and Economics*, 2017.





- Goda, Y. «Random seas and design of maritime structures.» *World Scientific ISBN 978-981-02-3256-6*, 2000.
- H.L., Tolman. «Effect of observation errors in linear regression and bin-average analyses.» *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1998.: 124(547):897-917.
- Hasselmann, K., Barnett, T.P., Bouws, E., Carlson, H., Cartwright, D.E., Enke, K., Ewing, J.A., Gienapp, H., Hasselmann, D.E., Kruseman, P., Meerburg, A., Müller, P., Olbers, D.J., Richter, K., Sell, W., Walden, H.,. «Measurements of wind-wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP).» *Dtsch. Hydrogr. Z 12, A8 (Suppl.)*, 1973.
- Hellenic Centre for Marine Research Poseidon Data, Base(Athens), c2008-2012. n.d.  
<http://www.poseidon.hcmr.gr/listview.php?id=136>.
- Hellenic, Association for Energy Economics. «Greek Energy Market Report.» 2020.
- Henriques, Falcao και. «Oscillating-water-column wave energy converters and air turbines: A review.» 2015.
- Holthuijsen, Leo H. «Waves in oceanic and coastal waters.» *Cambridge University Press*, 2007.
- Iglesias, S. Astariz & G. «Wave energy vs. other energy sources: A reassessment of the economics.» *International Journal of Green Energy*, 13:7, 747-755, 2016.
- Interior, United States Department of the. «Wave energy potential on the u.s. outer continental shelf.» 2008.
- Ioannou, Artemis, Anestis I. Kalfas, and Theofanis V. Karambas. «Integrated Overtopping Wave Energy Converter in a Hybrid Offshore.» *ASME Turbo Expo 2014: Turbine Technical Conference and Exposition. American Society of*, 2014.
- Iuppa, C., Cavallaro, L., Vicinanza, D., Foti, E. «Investigation of suitable .» *sites for wave energy converters around Sicily (Italy)*, 2015: Ocean Sci. 11, 543–557.
- J. Kofoed, J. Tedd, E. Friis-Madsen, M. Nimskov. «Influence of Buoyancy Control Performance On Power Production By the Wave Dragon Nissum Bredning Prototype.» 2007.
- Kaldellis J. «Supporting the Clean Electrification for Remote Islands: The Case of the Greek Tilos Island.» *Energies*, 2021,: 14, 1336. <https://doi.org/10.3390/en14051336>.
- Kaldellis J., Chrysikost. «Wave energy exploitation in the Ionian Sea Hellenic coasts: spatial planning of potential wave power stations.» *International Journal of Sustainable Energy*, 38:4, 312-332,, 2019.
- Kaldellis J.K., Efstratiou Chr, Nomikos G., Kondili E. «Wave Energy Exploitation in the North Aegean Sea: Spatial Planning of Potential Wave Power Stations.» *15th International Conference on Environmental Science and Technology*, 2017.
- KALDELLIS J.K., KONDILI E., LIAROS St., SCHORETSANITIS K. «CARBON DIOXIDE TARGETS OF GREEK ELECTRICITY SECTOR FOR 2020: EVALUATION AND PROSPECTS.» 2015.
- Korres G., Ravdas M., Zacharioudaki A., Denaxa D., Sotiropoulou M. «Mediterranean Sea Waves Reanalysis (CMEMS Med-Waves, MedWAM3 system).» *(Copernicus Monitoring Environment Marine Service (CMEMS)) 2021*, n.d.



- Kramer, Morten, Laurent Marquis, and Peter Frigaard. «Performance evaluation of the wavestar prototype.» *The 9th European Wave and Tidal Energy Conference: EWTEC 2011*, 2011.
- Lavidas, G., Venugopal, V. «A 35 year high-resolution wave atlas for nearshore energy production and economics at the Aegean Sea.» *Renew. Energy* 103, 2017: 401–417.
- Lavidas, George. «Energy and socio-economic benefits from the development of wave energy in Greece.» 2017.
- M. J. Tucker, E. G. Pitt and M. E. McCormick. «Waves in ocean engineering (1st ed.).» *Oxford: Elsevier*, 2001: page 3536.
- M., Previsic. «System level design, performance, and costs of California Pelamis wave power plant.» *EPRI*, 2004.
- Majidi A., Bingölbali B., Akpınar A., Iglesias G., Jafali H., «Downscaling wave energy converters for optimum performance in low-energy seas,» *Renewable Energy, Volume 168,,* 2021: Pages 705-722.
- Miller, Christine. «Wave and tidal energy experiments in san francisco and santa cruz.» August 2004.
- N. Booij, R. C. Ris, • and L. H. Holthuijsen. «SWAN: A third-generation wave model for coastal regions Part1: Model description and validation.» *JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH, VOL. 104, NO. C4, PAGES 7649-7666, APRIL 15, , 1999.*
- Nomikos G., Zafirakis D., Früha W., Kaldellis J. «Combined Wave & Wind Energy Exploitation for Remote Islands.» *International Conference on Energy, Environment and Economics,,* 2017.
- O'Connor, M., Lewis, T., Dalton, G. «Techno-economic performance of the Pelamis P1 and Wavestar at different ratings and various locations in Europe.» *Renew. Energy*, 2013: 889–900.
- Pérez, C. and Iglesias, G. «Integration of Wave Energy Converters and Offshore Windmills.» *ICOE (The International Conference on Ocean Energy) 2012 Proceedings, (2012), : www.icoe-conference.com/publication/integration\_.*
- Perst, Daniell και Ostendorf. «Using GIS to evaluate the impact of exclusion zones on the connection cost of wave energy to the electricity grid.» *Energy Policy* 35:4516–28, 2007.
- Phillips, O. M. «The dynamics of the upper ocean.» *Cambridge University Press., , 1977. : 2nd ed.*
- Rusu, E. «Evaluation of the wave energy conversion efficiency in various coastal environments. .» *Energies* 7, 2014: 4002–4018.
- Rusu, L., Onea, F. «Assessment of the performances of various wave energy converters along the European continental coasts.» *Energy* 82, , 2015: 889–904.
- Soukissian, T., M. Hatzinaki, G. Korres, A. Papadopoulos, G. Kallos, and E. Anadranistakis. «Wind and Wave Atlas of the Hellenic Seas.» *Athens: Hellenic Centre for Marine Research*, 2007.
- Springer. «2008 Ocean Wave Energy.» *Springer*, 2008.
- Spyridon Trikalitis, George Lavidas, and John K. Kaldellis. «Energy Analysis of A Hybrid Wind-Wave Solution For Remote Islands.» *Renew. Energy Environ. Sustain.* 6, 34 , 2021.



- Stathatou, P.M., F.K. Gad, E. Kampragou, H. Grigoropoulou, και D Assimacopoulos. «Treated wastewater reuse potential: Mitigating water scarcity problems in the Aegean islands.» *Desalin. Water Treat.* 53, 2014, : 3272–3282.
- Strathclyde, University of. «Wave power.» <http://www.strath.ac.uk/library/>, n.d.
- SWAN TEAM. «Swan User Manual version 40.51.» *Department of Civil Engineering and Geosciences, Delft University of Technology, Delft, The Netherlands*, 111 p., 2006, .
- Trikalitis S, Lavidas G., Kaldellis J. «"Energy Analysis of A Hybrid Wind-Wave Solution For Remote Islands.» *Renew. Energy Environ. Sustain.* 6, 34 ,, 2021.
- Veigas, M., Lopez, M., Iglesias, G. «Assessing the optimal location for a shoreline wave energy converter.» *Appl. Energy* 132,, 2014: 404–411.
- Xanthaki, F., Giannaraki, C., Zafeiraki, E.F., Kaldellis, J.K. «Exploitation of Wave Energy Potential in Aegean Sea: Greece.» *Sayigh, A. (eds) Mediterranean Green Buildings & Renewable Energy. Springer.*, 2017.
- Zanuttigh B., Angelelli E., Kortenhaus A., Koca K, Krontira Y, Koundouri P,. «A methodology for multi-criteria design of multi-use offshore platforms for marine renewable energy harvesting.» *Renewable Energy Volume 85*, 2016: Pages 1271-1289.





Εκτίμηση ενεργειακού δυναμικού κυματικής ενέργειας & πρόβλεψη ηλεκτροπαραγωγής :  
Θαλάσσια περιοχή Αντικυθήρων

Τρ / Hs	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5	5.5	6	6.5	7	7.5	8
4	0	55	111	167	303	438	696	954	1272	1590	1590	1590	1590	1590	1590	1590
4.5	0	74	121	167	303	438	696	954	1272	1590	1590	1590	1590	1590	1590	1590
5	0	94	131	167	303	438	696	954	1272	1590	1590	1590	1590	1590	1590	1590
5.5	0	116	166	216	327	438	696	954	1272	1590	1590	1590	1590	1590	1590	1590
6	0	139	202	265	352	438	696	954	1272	1590	1590	1590	1590	1590	1590	1590
6.5	0	164	242	321	434	546	750	954	1272	1590	1590	1590	1590	1590	1590	1590
7	0	188	283	377	516	655	804	954	1272	1590	1590	1590	1590	1590	1590	1590
7.5	0	215	327	438	609	779	967	1155	1373	1590	1590	1590	1590	1590	1590	1590
8	0	242	371	499	701	903	1130	1356	1473	1590	1590	1590	1590	1590	1590	1590
8.5	0	249	386	523	742	960	1211	1462	1526	1590	1590	1590	1590	1590	1590	1590
9	0	257	402	547	783	1018	1293	1568	1579	1590	1590	1590	1590	1590	1590	1590
9.5	0	258	407	556	801	1047	1313	1579	1585	1590	1590	1590	1590	1590	1590	1590
10	0	259	412	564	820	1075	1333	1590	1590	1590	1590	1590	1590	1590	1590	1590
10.5	0	254	405	556	813	1070	1330	1590	1590	1590	1590	1590	1590	1590	1590	1590
11	0	248	398	548	807	1065	1328	1590	1590	1590	1590	1590	1590	1590	1590	1590
11.5	0	235	378	523	719	1023	1306	1589	1590	1590	1590	1590	1590	1590	1590	1590
12	0	221	359	497	739	981	1284	1587	1589	1590	1590	1590	1590	1590	1590	1590
12.5	0	200	326	452	675	898	1179	1460	1525	1590	1590	1590	1590	1590	1590	1590
13	0	179	293	407	611	815	1074	1332	1462	1590	1590	1590	1590	1590	1590	1590
13.5	0	150	246	342	515	688	909	1130	1300	1470	1530	1590	1590	1590	1590	1590
14	0	120	199	277	419	561	744	927	1138	1349	1470	1590	1590	1590	1590	1590

Εικόνα 32 Wavedragon 1100 kW

Hs (m)/T(s)	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	203	348	516	699	896	953	962	919	820	663	446
1.5	412	485	750	1049	1375	1491	1527	1477	1332	1086	737
2	621	621	983	1398	1853	2029	2092	2034	1844	1509	1028
2.5	1123	1123	1304	1914	2602	2903	3041	2993	2743	2266	1555
3	1624	1624	1624	2430	3350	3776	3989	3951	3641	3022	2082
3.5	2581	2581	2581	2984	4191	4796	4945	4926	4765	3983	2761
4	3538	3538	3538	3538	5032	5816	5900	5900	5889	4943	3439
4.5	4719	4719	4719	4719	5466	5858	5900	5900	5895	5422	4222
5	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5004
5.5	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5452
6	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900
6.5	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900
7	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900
7.5	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900
8	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900

Εικόνα 33 Wavedragon 5900 kW

Hs (m)/T(s)	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1		29	37	38	35	29	23		
1.5	32	65	83	86	78	65	53	42	33
2	57	115	148	152	138	116	93	74	59
2.5	89	180	231	238	216	181	146	116	92
3	129	260	332	332	292	240	210	167	132
3.5		354	438	424	377	326	260	215	180
4		462	540	530	475	384	339	267	213
4.5		544	642	628	562	473	382	338	266
5			726	707	670	557	472	369	328
5.5			750	750	737	658	530	446	355
6			750	750	750	711	619	512	415
6.5			750	750	750	750	658	579	481
7				750	750	750	750	613	525
7.5				750	750	750	750	686	593
8					750	750	750	750	625
8.5						750	750	750	750
9							750	750	750
9.5								750	750
10									750

Εικόνα 34 Pelamis 750 kW



## Εκτίμηση ενεργειακού δυναμικού κυματικής ενέργειας & πρόβλεψη ηλεκτροπαραγωγής : Θαλάσσια περιοχή Αντικυθήρων

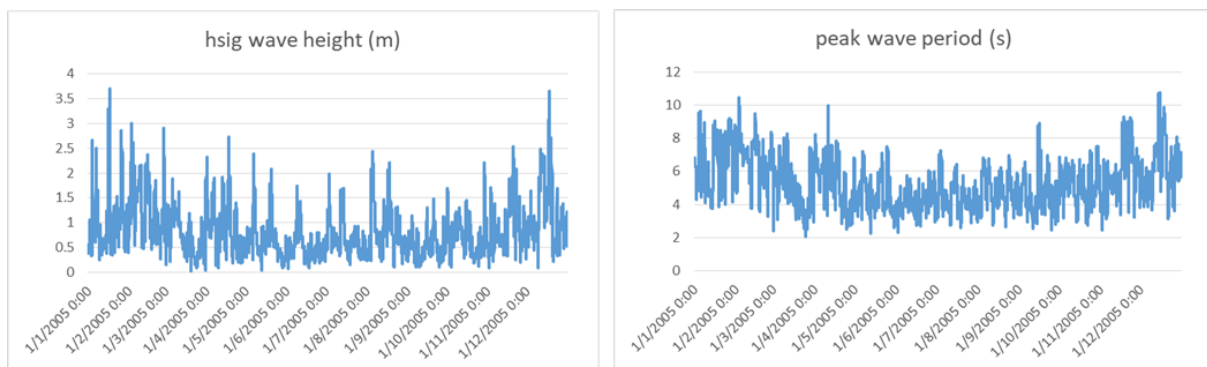
Hs (m)/T(s)	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
1		8	11	12	11	10	8	7				
1.5	13	17	25	27	26	23	19	15	12	12	12	7
2	24	30	44	49	47	41	34	28	23	23	23	12
2.5	37	47	69	77	73	64	54	43	36	36	36	19
3	54	68	99	111	106	92	77	63	51	51	51	27
3.5		93	135	152	144	126	105	86	70	70	70	38
4			122	176	198	188	164	137	112	91	91	49
4.5			223	250	239	208	173	142	115	115	115	62
5			250	250	250	250	214	145	142	142	142	77
5.5			250	250	250	250	250	211	172	172	172	92

Εικόνα 35 AquaBuoy 250 kW

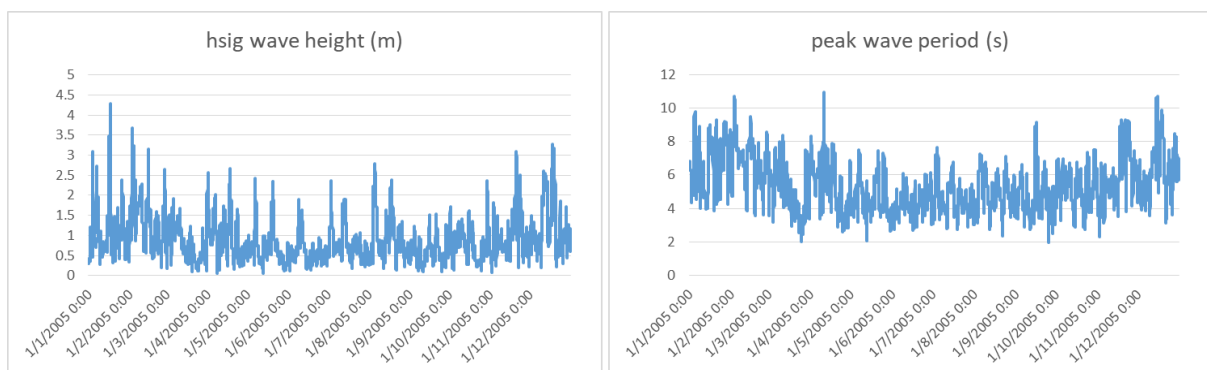
### Παράρτημα 2 Αποτελέσματα κυματικού δυναμικού

#### 2.1 Εποχική διακύμανση κυματικών χαρακτηριστικών για το 2005 σύμφωνα με τα αποτελέσματα του μοντέλου Delft3D Wave Model

Σε αυτό το παράρτημα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης, μέσω του μοντέλου Delft3D Wave Model, των κυματικών χαρακτηριστικών (σημαντικό ύψος κύματος και περίοδος αιχμής) για τα δεκαέξι σημεία (A – P) για το έτος 2005.



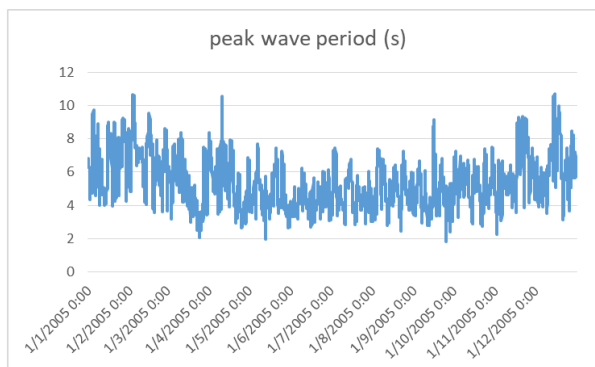
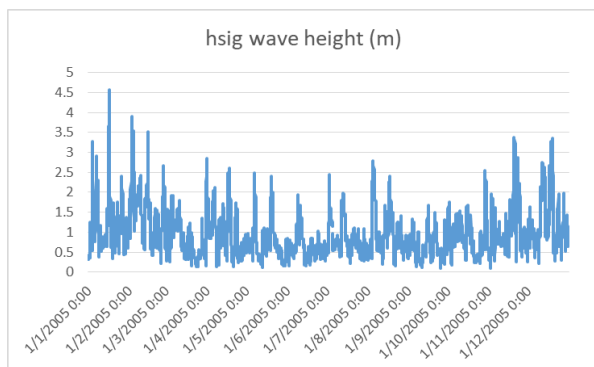
Γράφημα 1 Αριστερά: το Σημαντικό ύψος κύματος, Δεξιά: η περίοδος αιχμής κύματος, για το σημείο A για το έτος 2005



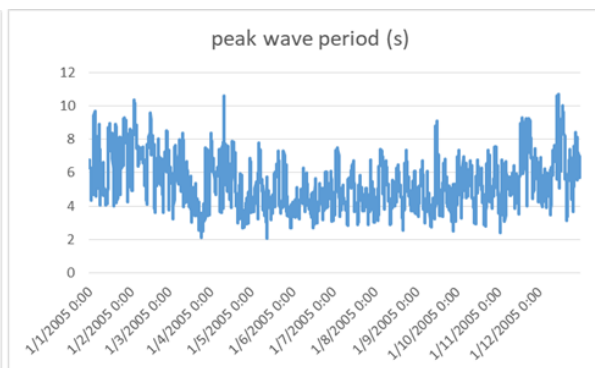
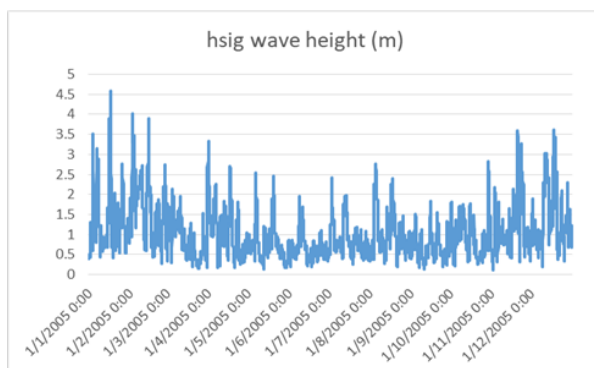
Γράφημα 2 Αριστερά: το Σημαντικό ύψος κύματος, Δεξιά: η περίοδος αιχμής κύματος, για το σημείο B για το έτος 2005



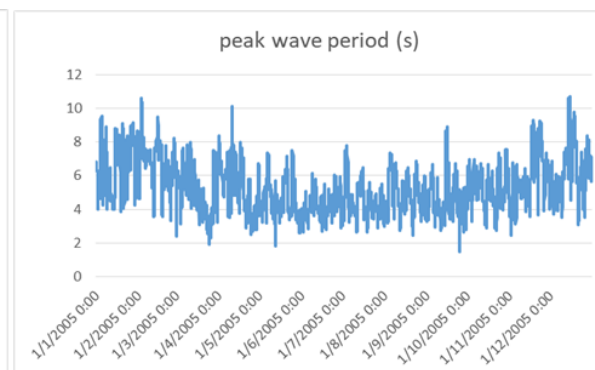
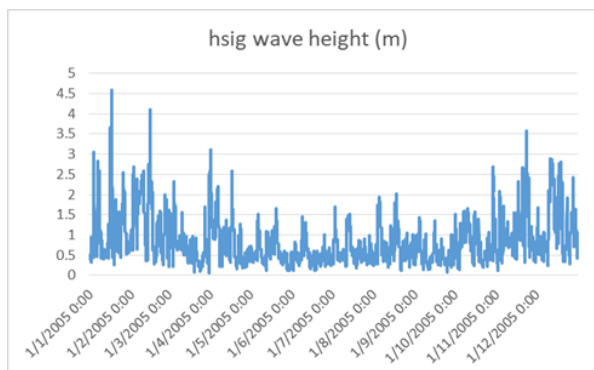
## Εκτίμηση ενεργειακού δυναμικού κυματικής ενέργειας & πρόβλεψη ηλεκτροπαραγωγής : Θαλάσσια περιοχή Αντικυθήρων



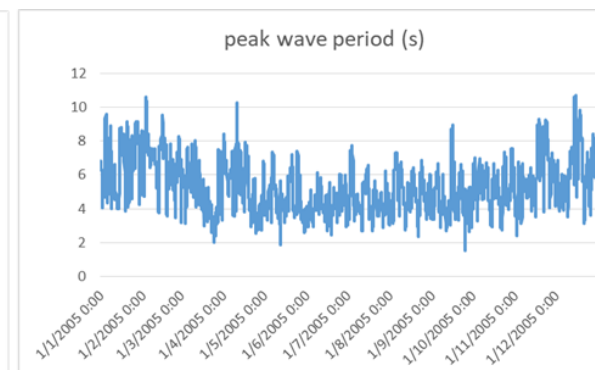
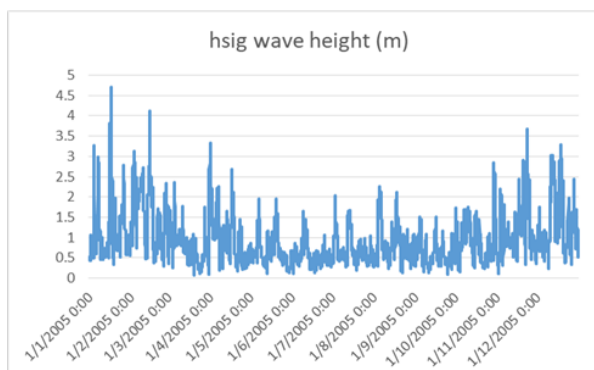
Γράφημα 3 Αριστερά: το Σημαντικό ύψος κύματος, Δεξιά: η περίοδος αιχμής κύματος, για το σημείο C για το έτος 2005



Γράφημα 4 Αριστερά: το Σημαντικό ύψος κύματος, Δεξιά: η περίοδος αιχμής κύματος, για το σημείο D για το έτος 2005



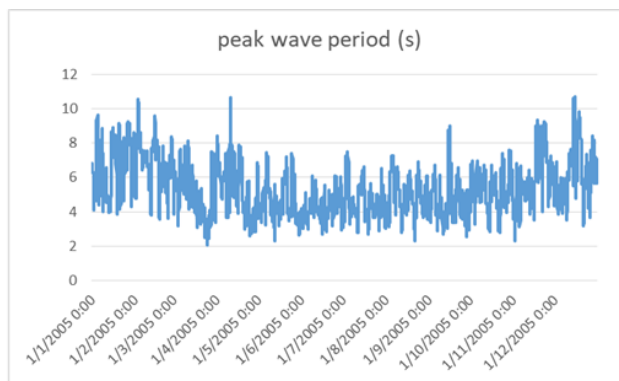
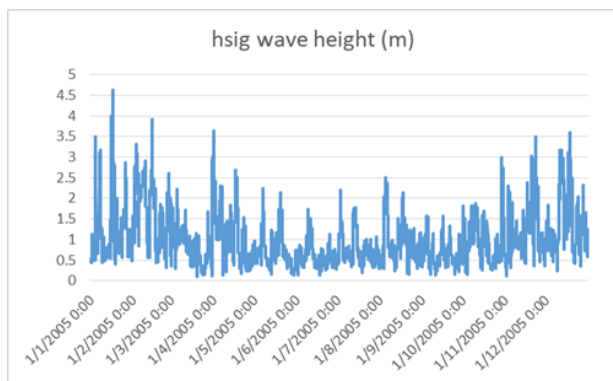
Γράφημα 5 Αριστερά: το Σημαντικό ύψος κύματος, Δεξιά: η περίοδος αιχμής κύματος, για το σημείο E για το έτος 2005



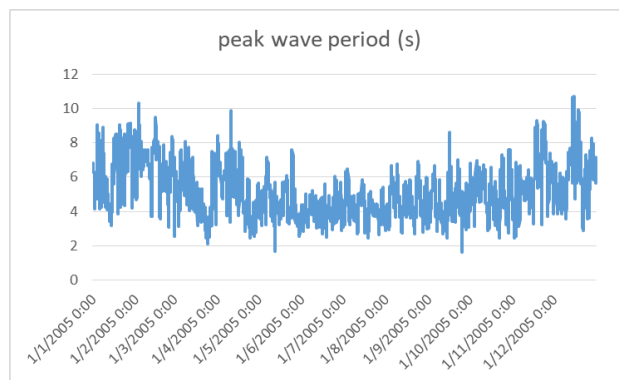
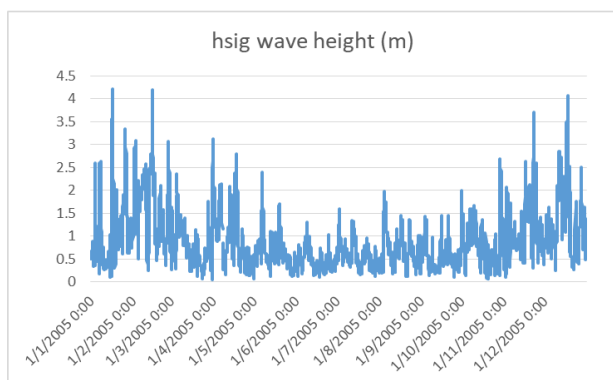
Γράφημα 6 Αριστερά: το Σημαντικό ύψος κύματος, Δεξιά: η περίοδος αιχμής κύματος, για το σημείο F για το έτος 2005



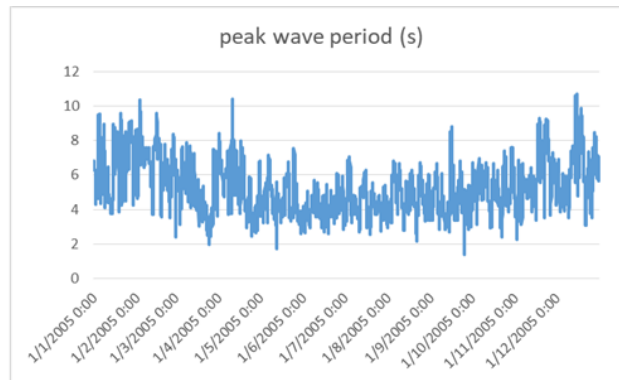
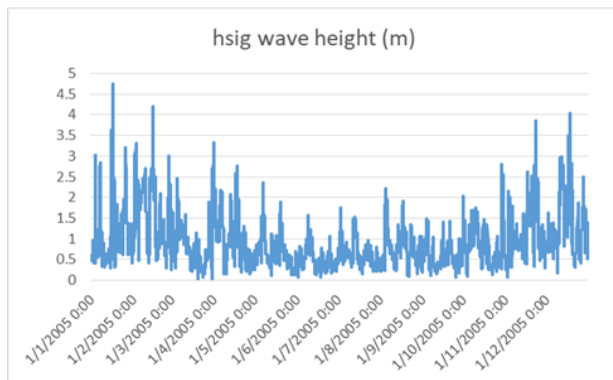
## Εκτίμηση ενεργειακού δυναμικού κυματικής ενέργειας & πρόβλεψη ηλεκτροπαραγωγής : Θαλάσσια περιοχή Αντικυθήρων



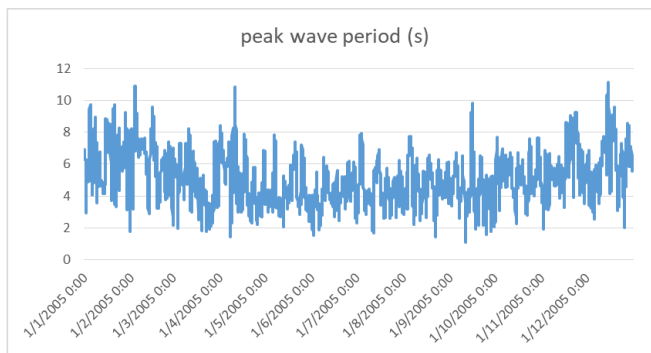
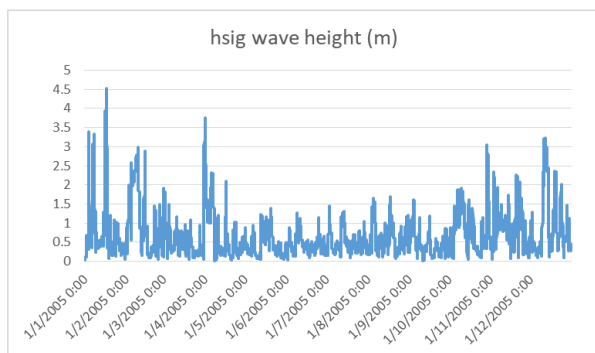
Γράφημα 7 Αριστερά: το Σημαντικό ύψος κύματος, Δεξιά: η περίοδος αιχμής κύματος, για το σημείο G για το έτος 2005



Γράφημα 8 Αριστερά: το Σημαντικό ύψος κύματος, Δεξιά: η περίοδος αιχμής κύματος, για το σημείο H για το έτος 2005



Γράφημα 9 Αριστερά: το Σημαντικό ύψος κύματος, Δεξιά: η περίοδος αιχμής κύματος, για το σημείο I για το έτος 2005

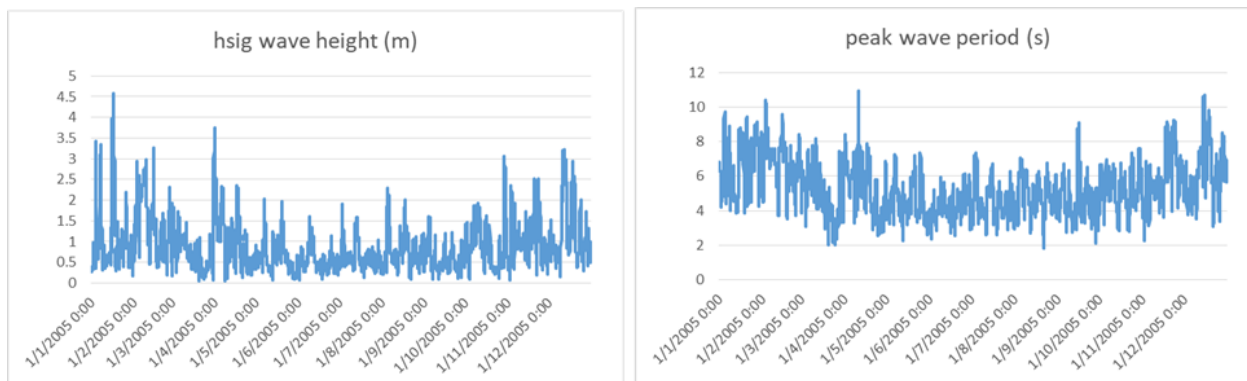


Γράφημα 10 Αριστερά: το Σημαντικό ύψος κύματος, Δεξιά: η περίοδος αιχμής κύματος, για το σημείο J για το έτος 2005

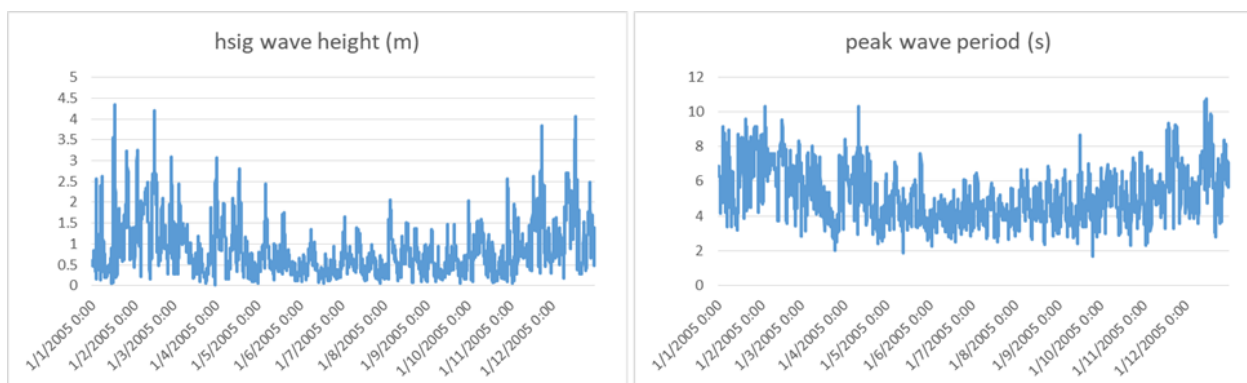




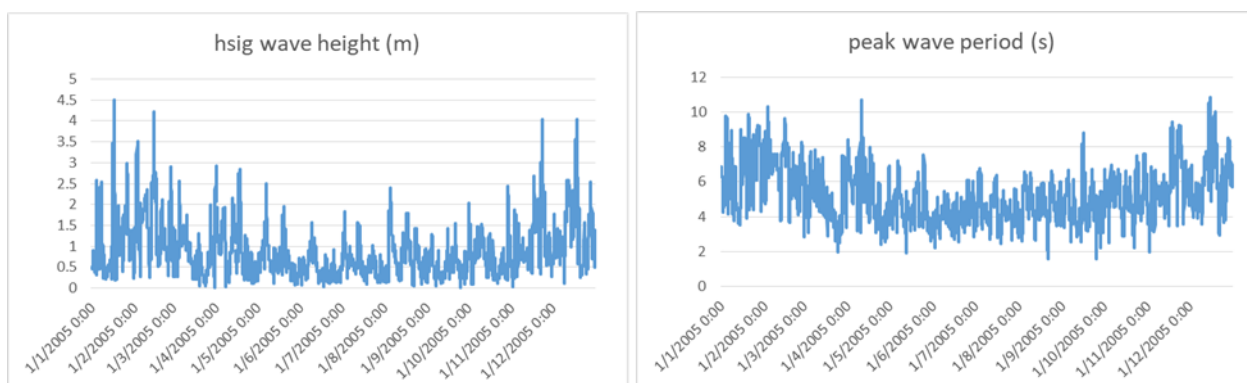
## Εκτίμηση ενεργειακού δυναμικού κυματικής ενέργειας & πρόβλεψη ηλεκτροπαραγωγής : Θαλάσσια περιοχή Αντικυθήρων



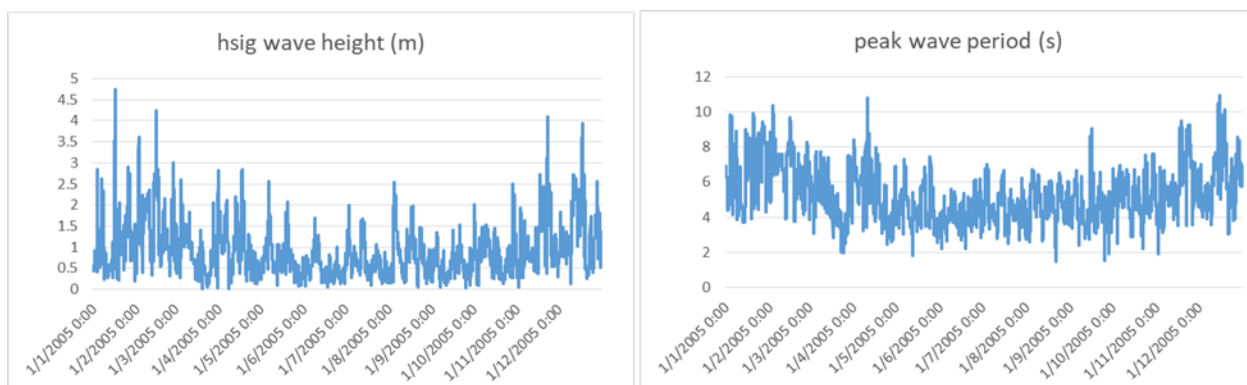
Γράφημα 11 Αριστερά: το Σημαντικό ύψος κύματος, Δεξιά: η περίοδος αιχμής κύματος, για το σημείο K για το έτος 2005



Γράφημα 12 Αριστερά: το Σημαντικό ύψος κύματος, Δεξιά: η περίοδος αιχμής κύματος, για το σημείο L για το έτος 2005



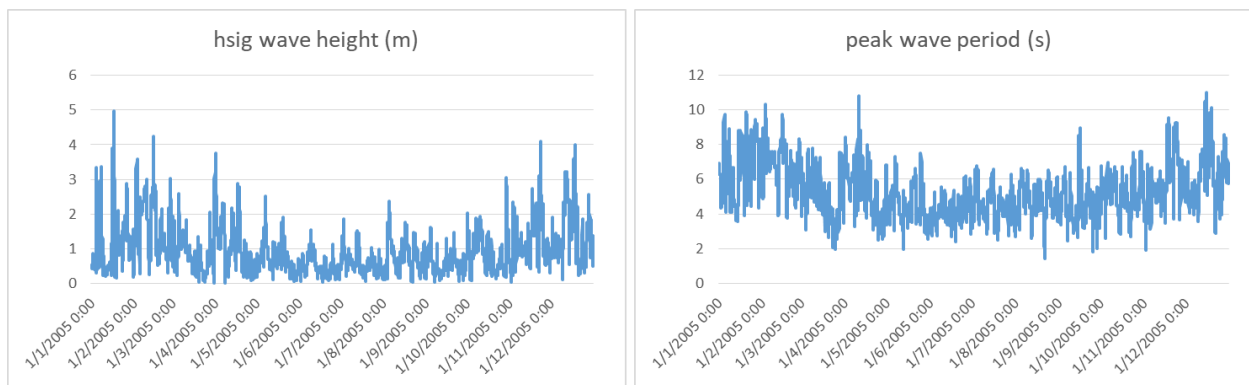
Γράφημα 13 Αριστερά: το Σημαντικό ύψος κύματος, Δεξιά: η περίοδος αιχμής κύματος, για το σημείο M για το έτος 2005



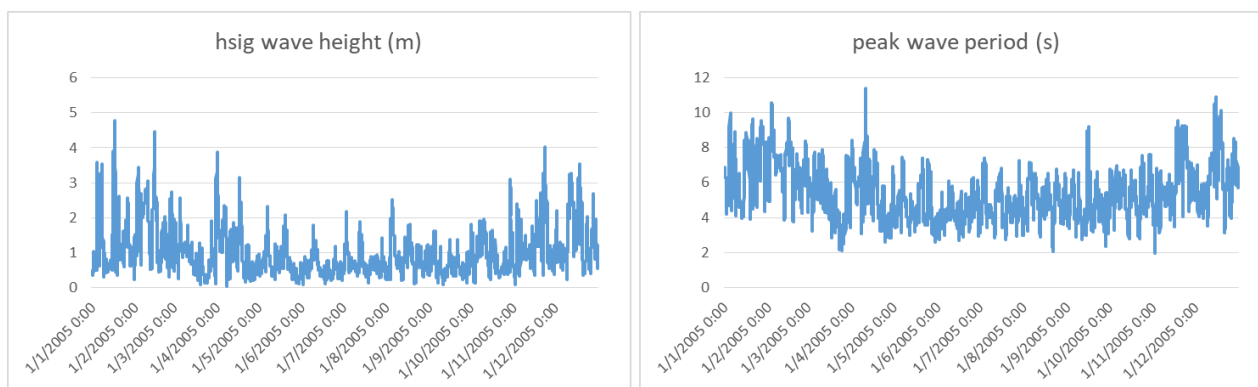
Γράφημα 14 Αριστερά: το Σημαντικό ύψος κύματος, Δεξιά: η περίοδος αιχμής κύματος, για το σημείο N για το έτος 2005



## Εκτίμηση ενεργειακού δυναμικού κυματικής ενέργειας & πρόβλεψη ηλεκτροπαραγωγής : Θαλάσσια περιοχή Αντικυθήρων



Γράφημα 15 Αριστερά: το Σημαντικό ύψος κύματος, Δεξιά: η περίοδος αιχμής κύματος, για το σημείο O για το έτος 2005



Γράφημα 16 Αριστερά: το Σημαντικό ύψος κύματος, Δεξιά: η περίοδος αιχμής κύματος, για το σημείο P για το έτος 2005

### 2.2 Οι ωριαίες τιμές που παίρνουν το σημαντικό ύψος κύματος και η περίοδος αιχμής, για το σημείο αναφοράς ανά έτος για την περίοδο 2005-2015

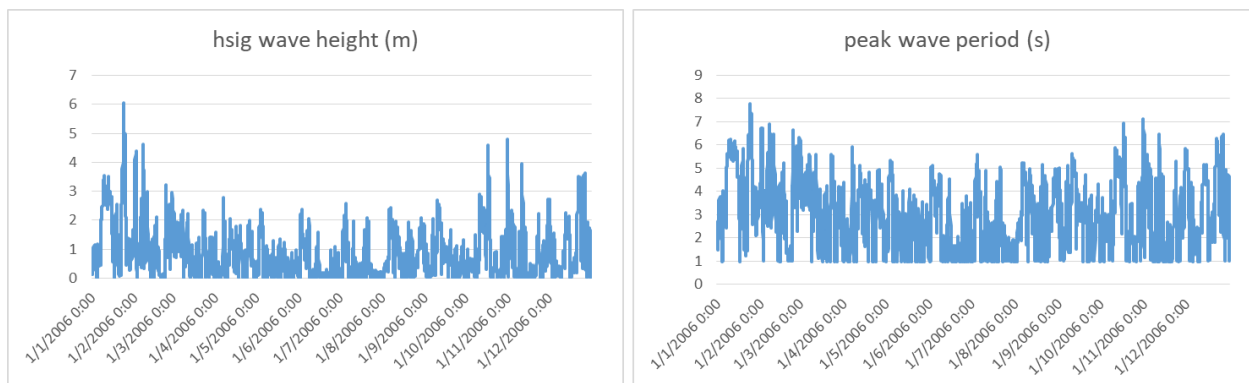
Σε αυτό το παράρτημα παρουσιάζονται τα κυματικά χαρακτηριστικά (σημαντικό ύψος κύματος και περίοδος αιχμής) για το σημείο αναφοράς, την χρονική περίοδο 2005-2015, όπως προέκυψαν από το μοντέλο MEDSEA WAM (ανάλυση 1/24ο x 1/24ο) του ECMWF, το οποίο είναι διαθέσιμο στην υπηρεσία Copernicus Marine Service (product medsea\_multiyear\_wav\_006\_012).



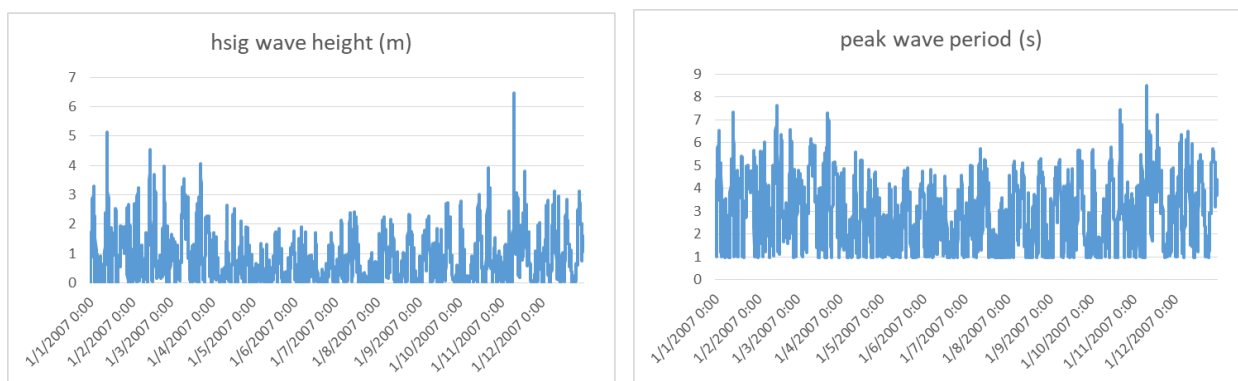
Γράφημα 17 Αριστερά: το Σημαντικό ύψος κύματος, Δεξιά: η περίοδος αιχμής κύματος, για το σημείο αναφοράς για το έτος 2005



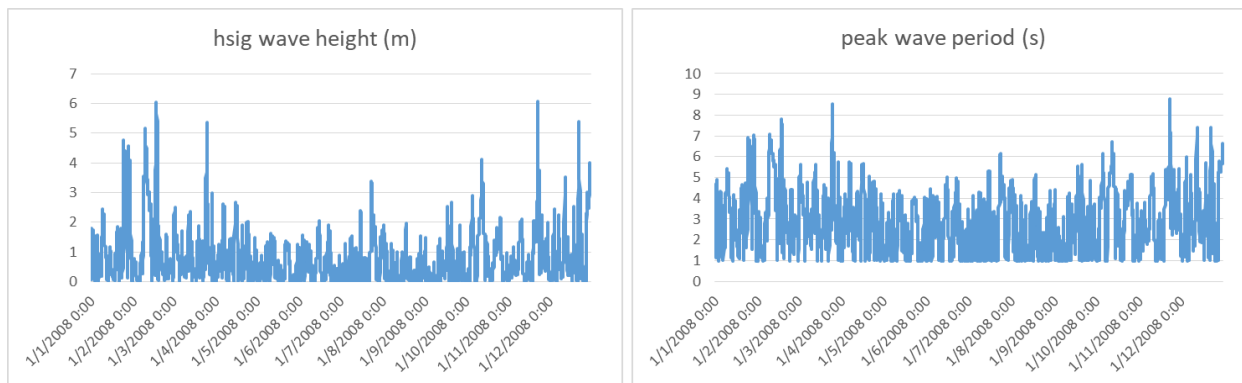
## Εκτίμηση ενεργειακού δυναμικού κυματικής ενέργειας & πρόβλεψη ηλεκτροπαραγωγής : Θαλάσσια περιοχή Αντικυθήρων



Γράφημα 18 Αριστερά: το Σημαντικό ύψος κύματος, Δεξιά: η περίοδος αιχμής κύματος, για το σημείο αναφοράς για το έτος 2006



Γράφημα 19 Αριστερά: το Σημαντικό ύψος κύματος, Δεξιά: η περίοδος αιχμής κύματος, για το σημείο αναφοράς για το έτος 2007



Γράφημα 20 Αριστερά: το Σημαντικό ύψος κύματος, Δεξιά: η περίοδος αιχμής κύματος, για το σημείο αναφοράς για το έτος 2008



## Εκτίμηση ενεργειακού δυναμικού κυματικής ενέργειας & πρόβλεψη ηλεκτροπαραγωγής : Θαλάσσια περιοχή Αντικυθήρων

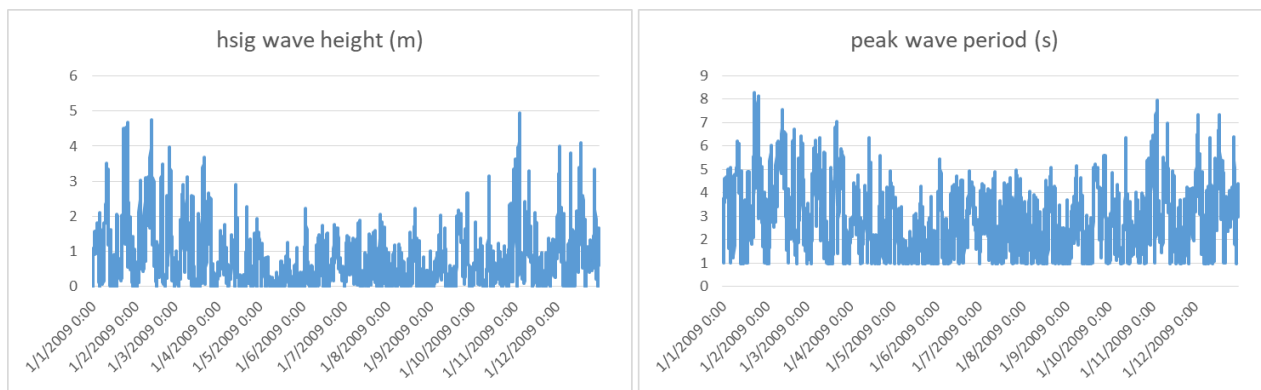


Figure 21 Αριστερά: το Σημαντικό ύψος κύματος, Δεξιά: η περίοδος αιχμής κύματος, για το σημείο αναφοράς για το έτος 2009

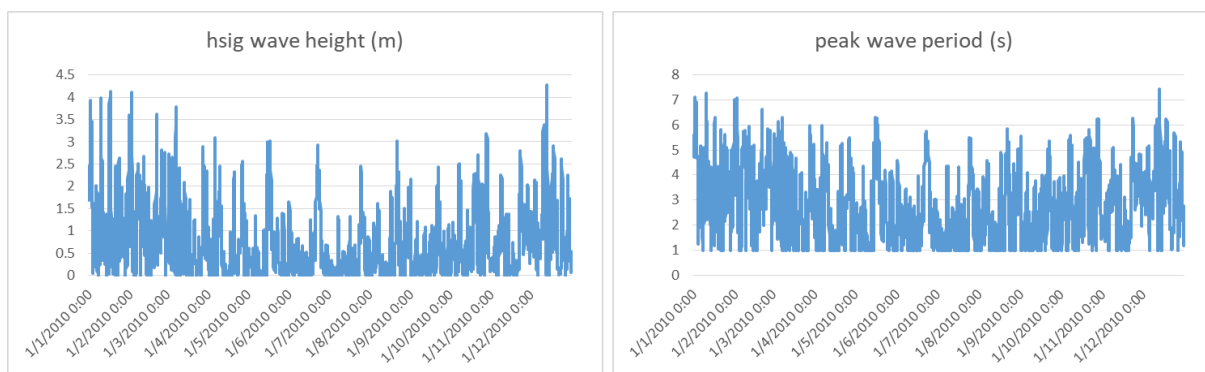


Figure 22 Αριστερά: το Σημαντικό ύψος κύματος, Δεξιά: η περίοδος αιχμής κύματος, για το σημείο αναφοράς για το έτος 2010

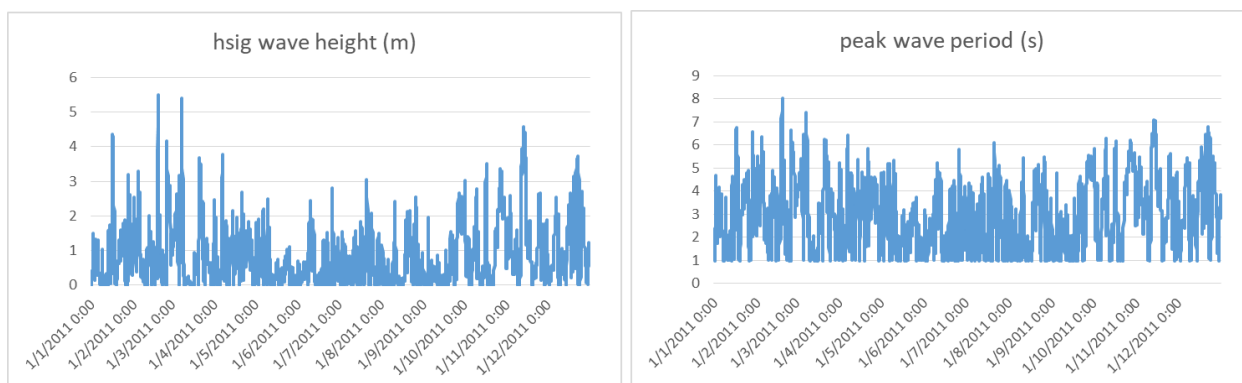


Figure 23 Αριστερά: το Σημαντικό ύψος κύματος, Δεξιά: η περίοδος αιχμής κύματος, για το σημείο αναφοράς για το έτος 2011

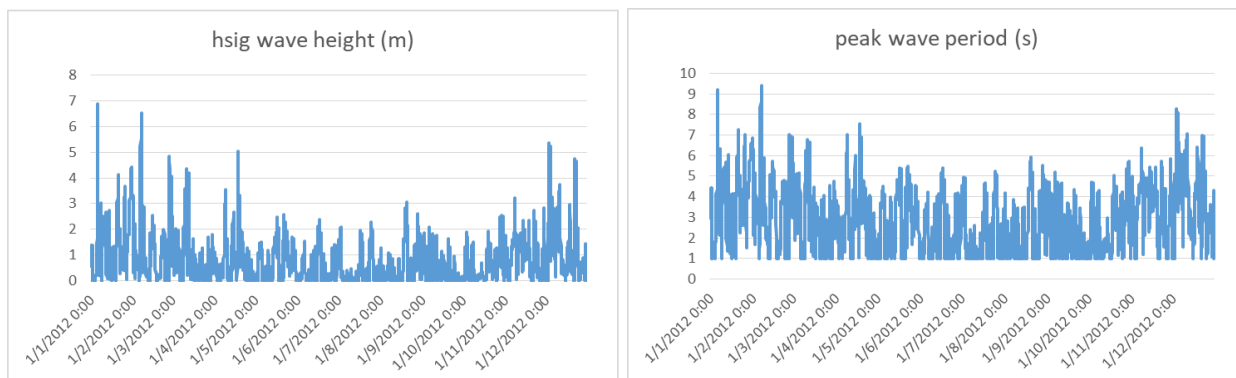


Figure 24 Αριστερά: το Σημαντικό ύψος κύματος, Δεξιά: η περίοδος αιχμής κύματος, για το σημείο αναφοράς για το έτος 2012



## Εκτίμηση ενεργειακού δυναμικού κυματικής ενέργειας & πρόβλεψη ηλεκτροπαραγωγής : Θαλάσσια περιοχή Αντικυθήρων

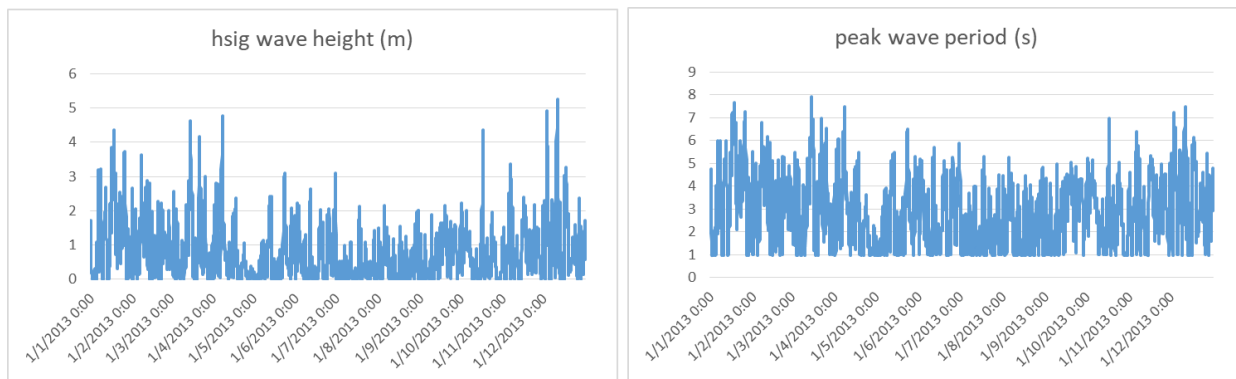


Figure 25 Αριστερά: το Σημαντικό ύψος κύματος, Δεξιά: η περίοδος αιχμής κύματος, για το σημείο αναφοράς για το έτος 2013

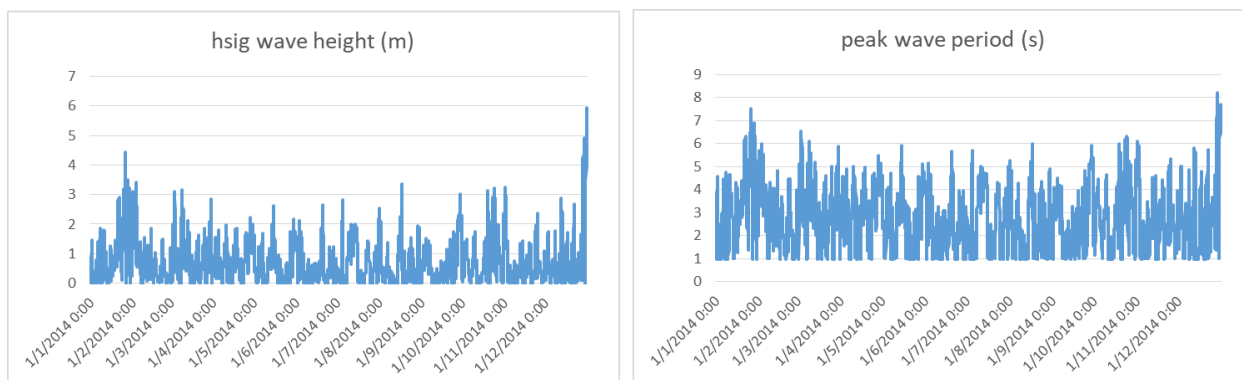


Figure 26 Αριστερά: το Σημαντικό ύψος κύματος, Δεξιά: η περίοδος αιχμής κύματος, για το σημείο αναφοράς για το έτος 2014

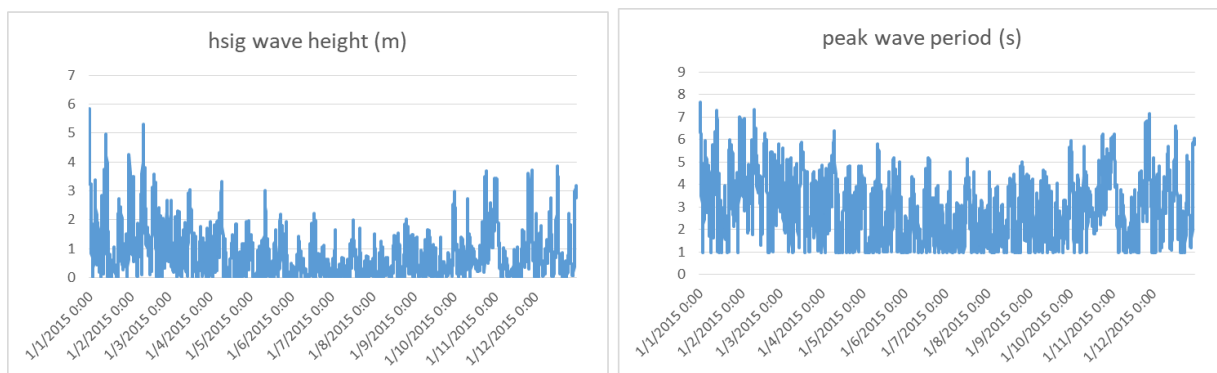


Figure 27 Αριστερά: το Σημαντικό ύψος κύματος, Δεξιά: η περίοδος αιχμής κύματος, για το σημείο αναφοράς για το έτος 2015