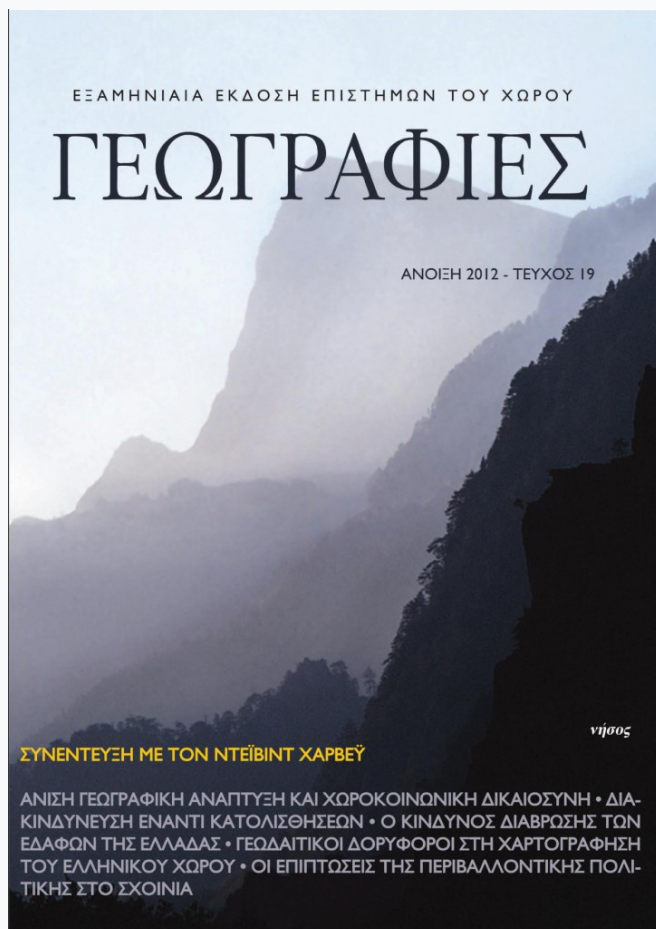


Γεωγραφίες

Αρ. 19 (2012)

Γεωγραφίες, Τεύχος 19, 2012



**Η ΣΥΝΕΙΣΦΟΡΑ ΤΩΝ ΑΛΤΙΜΕΤΡΙΚΩΝ
ΓΕΩΔΑΙΤΙΚΩΝ ΔΟΡΥΦΟΡΩΝ ΣΤΗ
ΧΑΡΤΟΓΡΑΦΗΣΗ ΤΟΥ ΕΛΛΗΝΙΚΟΥ ΧΩΡΟΥ. Η
ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΜΙΑΣ ΠΡΟΜΕΛΕΤΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ
ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΚΥΜΑΤΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ**

Δημήτρης Δεληκάρογλου, Στέφανος Δεληκάρογλου

Η ΣΥΝΕΙΣΦΟΡΑ ΤΩΝ ΑΛΤΙΜΕΤΡΙΚΩΝ ΓΕΩΔΑΙΤΙΚΩΝ ΔΟΡΥΦΟΡΩΝ ΣΤΗ ΧΑΡΤΟΓΡΑΦΗΣΗ ΤΟΥ ΕΛΛΗΝΙΚΟΥ ΘΑΛΑΣΣΙΟΥ ΧΩΡΟΥ

Η περίπτωση μιας προμελέτης για την αξιοποίηση της κυματικής ενέργειας

Δημήτρης Δεληκαράογλου,¹ Στέφανος Δεληκαράογλου²

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σε μία κατεξοχήν θαλάσσια χώρα όπως η Ελλάδα, οι τρέχουσες απαιτήσεις για την αξιοποίηση του θαλάσσιου χώρου επιβάλουν μια ριζική αλλαγή νοοτροπίας στις διαδικασίες μελέτης και χαρτογράφησης του θαλάσσιου περιβάλλοντος, ώστε να δοθεί μια νέα διάσταση αφενός στον τρόπο αντιμετώπισης, κατανόησης και μελέτης των φυσικών φαινομένων που το επηρεάζουν, αφετέρου στην εξυπηρέτηση καίριων εθνικών αναγκών όπως η ναυσιπλοΐα, η εθνική άμυνα, η προαγωγή των θαλάσσιων επιστημονικών ερευνών αλλά, ίσως και το κυριότερο, ο καθορισμός βασικών κατευθύνσεων για τη χωροθέτηση έργων *Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας* (ΑΠΕ) και στον θαλάσσιο χώρο, με στόχο τη γενικότερη ανάπτυξη της ελληνικής οικονομίας. Στο συγκεκριμένο άρθρο εξετάζεται η σημαντική συνεισφορά της τεχνολογίας των γεωδαιτικών δορυφόρων αλτιμετρίας που σήμερα παρέχουν εξαιρετικά ακριβείς και άμεσες μετρήσεις της δυναμικής κατάστασης των θαλασσών και αναδεικνύεται ότι η συστηματική συλλογή και επεξεργασία, μαζί με τη χρήση κατάλληλων τεχνικών αξιοποίησής τους, μπορούν να συνεισφέρουν στην επίτευξη των προαναφερόμενων στόχων για εργασίες μεγάλης και μικρής κλίμακας μελέτης των προοπτικών αξιοποίησης της κυματικής ενέργειας σε διάφορες περιοχές ενδιαφέροντος στον ελλαδικό χώρο.

The contribution of geodetic altimeter satellites in mapping the Greek area: a feasibility study for the exploitation of the wave energy.

Dimitris Delikaraoglou, Stephanos Delikaraoglou

ABSTRACT

In a predominantly maritime country like Greece, the current requirements for the use of the maritime regions, require a radical change in the way we perceive the process of studying and mapping the marine environment, so that to give a new dimension both in the way, we understand and study the natural phenomena affecting it, and to serve other critical needs such as for the safe navigation, the national defence and the promotion of marine scientific research, but perhaps most importantly, for carrying our renewable energy projects and in the sea areas, for the overall development and the improvement of the Greek economy. In this work we examine the possibilities offered by currently available advanced geodetic altimeter-carrying satellites which provide extremely accurate and direct measurements of instantaneous dynamic state of the seas. We show that the systematic collection and processing of such measurements, together with the use of appropriate techniques, can contribute to achieving these goals for large- and small-scale wave energy related studies in various marine areas of interest in Greece.

1. Εισαγωγή

Η Ελλάδα είναι μια κατεξοχήν νησιωτική χώρα που έχει ιστορική σχέση με τη θάλασσα, η οποία από την αρχαιότητα αποτελεί πόλο έλξης και χώρο υψηλής πολιτισμικής, τουριστικής και άλλης οικονομικής δραστηριότητας. Το μήκος των ελληνικών ακτογραμμών υπερβαίνει τα 15.000 χμ., αντιπροσωπεύοντας περίπου το 8% του συνολικού μήκους των ευρωπαϊκών ακτογραμμών, περιλαμβανομένων 6.000 περίπου νησιών και νησίδων που αποτελούν περίπου τη μισή έκταση της ακτογραμμής της χώρας.

1. Αναπλ. Καθηγητής, Σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Ηρώων Πολυτεχνείου 9, Ζωγράφος 15780, Τηλ. 210-7722617, ddeli@mail.ntua.gr.

2. Διπλ. Μηχαν. Μηχ. ΕΜΠ, Technical University of Denmark, National Laboratory for Sustainable Energy, Elektrovej 330 G-8, 2800 Kgs. Lyngby, Denmark, sdelikaraoglou@hotmail.com.

Δεδομένης της πολλαπλής σπουδαιότητας του ζωτικού αυτού θαλάσσιου χώρου, είναι ιδιαίτερα σημαντικό ότι η χώρα έχει παρουσιάσει τα τελευταία χρόνια μερικά σημαντικά επιτεύγματα στο χώρο της θαλάσσιας έρευνας και τεχνολογίας και ειδικότερα σε θέματα παρακολούθησης του θαλάσσιου υδάτινου περιβάλλοντος, για ποικίλες πρακτικές και επιστημονικές εφαρμογές (π.χ. η εγκατάσταση και λειτουργία του συστήματος «ΠΟΣΕΙΔΩΝ» για την πρόγνωση του καιρού και της κατάστασης των ελληνικών θαλασσών (HCMR 2010), τα προγράμματα υποθαλάσσιων αρχαιολογικών ερευνών, οι επιχειρησιακοί πλόες και υδρογραφικές εργασίες από την Υδρογραφική Υπηρεσία κ.ά.) που έχουν εκτελεστεί ή εκτελούνται στον ελληνικό ή στον ευρύτερο Μεσογειακό θαλάσσιο χώρο. Ωστόσο, πολλές άλλες σημαντικές ερευνητικές, επιστημονικές και επιχειρησιακές δραστηριότητες που θα μπορούσαν να συνεισφέρουν στη συλλογή, επεξεργασία και μελέτη των στοιχείων του θαλάσσιου περιβάλλοντος δεν τυγχάνουν της απαιτούμενης προσοχής κυρίως εξαιτίας της έλλειψης εθνικού σχεδιασμού. Ενδεικτικά, είναι ελάχιστες ή σχεδόν ανύπαρκτες οποιεσδήποτε συστηματικές δραστηριότητες που αφορούν, παραδείγματος χάριν:

- Την ολοκληρωμένη διαχείριση (κατά ξηρά και θάλασσα) των παράκτιων ζωνών, ώστε να είναι δυνατός ο θαλάσσιος χωροταξικός σχεδιασμός, η ασφαλής χρήση των θαλασσών και η αειφόρος διαχείριση των θαλάσσιων πόρων (Μουρμούρη 2010).

- Τη μελέτη των επιπτώσεων των ανθρωπογενών δραστηριοτήτων και κοινωνικοοικονομικών επιδράσεων στο θαλάσσιο οικοσύστημα και το περιβάλλον, κ.ά. (Μανούρης κ.ά. 2005).

Ιδιαίτερα σήμερα, η ολοκληρωμένη κατανόηση της παγκόσμιας κλιματικής αλλαγής και οι κίνδυνοι που διατρέχουν οι παράκτιες περιοχές από την άνοδο της στάθμης της θάλασσας, η εκτίμηση των υποθαλάσσιων ενεργειακών πόρων, καθώς και η καθημερινή πρόβλεψη της κατάστασης της θάλασσας και η έγκαιρη διάχυση της πληροφορίας (π.χ. σε πραγματικό ή σχεδόν πραγματικό χρόνο) προς τους ενδιαφερόμενους χρήστες αποτελούν νέες σημαντικές διεπιστημονικές δράσεις και προκλήσεις και για την Ελλάδα στους τομείς της θαλάσσιας έρευνας και καινοτομίας. Ιδιαίτερα στο πλαίσιο της εναρμόνισης της χώρας με τους στρατηγικούς στόχους της ενιαίας θαλάσσιας πολιτικής της Ευρωπαϊκής Ένωσης, είναι απαραίτητη μια νέα προσπάθεια αξιοποίησης του οικονομικού δυναμικού και μεγιστοποίησης της βιώσιμης εκμετάλλευσης των θαλάσσιων και παράκτιων περιοχών της χώρας, με ταυτόχρονη διασφάλιση της θαλάσσιας οικονομίας και των παράκτιων περιφερειών χωρίς υποβάθμιση του περιβάλλοντος.

Με τη σημαντική έκταση του θαλάσσιου χώρου της, η Ελλάδα είναι μία από τις χώρες της Μεσογείου η οποία, έχοντας κατάλληλες φυσικές συνθήκες, μπορεί δυνητικά, παράλληλα με την επιτυχή ενσωμάτωση στο ενεργειακό ισοζύγιο της των ώριμων τεχνολογιών ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ), όπως τα αιολικά πάρκα και τα φωτοβολταϊκά συστήματα στην ξηρά, να δραστηριοποιηθεί εντατικά και για την προώθηση και τη διερεύνηση των δυνατοτήτων πρωτοποριακών και πολλά υποσχόμενων τεχνολογιών ΑΠΕ και στο θαλάσσιο χώρο, όπως της πιο συμπυκνωμένης ανανεώσιμης πηγής ενέργειας στη γη, της κυματικής ενέργειας. Στη χώρα μας, έχοντας ένα ήπιο κλίμα και σχετικά βαθιά χωρικά ύδατα κοντά στις ακτές, αυτή μπορεί να αποτελέσει μια ενεργειακή πηγή με μέτριες προς υψηλές αποδόσεις ενεργειακού δυναμικού, με ιδιαίτερα ελκυστικές

προοπτικές αξιοποίησής της σε νησιωτικές και μη περιοχές. Είναι ενδεικτικό ότι προηγούμενες ευρωπαϊκές μελέτες (CRES 2006) αναφέρουν προβλέψεις ότι το Αιγαίο Πέλαγος διαθέτει αξιοποιήσιμο θαλάσσιο ενεργειακό δυναμικό, το υψηλότερο της Μεσογείου, με την εκμετάλλευση του οποίου θα μπορούσε να καλυφθεί σημαντικό ποσοστό των ενεργειακών αναγκών μας. Στόχος της συγκεκριμένης εργασίας είναι να τεκμηριωθούν οι συγκεκριμένες προβλέψεις για το κυματικό ενεργειακό δυναμικό των ελληνικών θαλασσών μέσω της ανάλυσης μιας σχεδόν 5ετούς διάρκειας μετρήσεων δορυφορικής αλτιμετρίας.

2. Ενέργεια από τη θάλασσα

Η σημασία της χρήσης των ΑΠΕ εξαπλώνεται την τελευταία δεκαετία με γρήγορους ρυθμούς από χώρα σε χώρα. Κατά γενική παραδοχή, οι ΑΠΕ μπορούν να προσφέρουν δυνατότητες μείωσης των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου και των ρύπων από τα ορυκτά καύσιμα, αξιοποίησης τοπικών και αποκεντρωμένων ενεργειακών πηγών και την επίτευξη βασικών στόχων ως προς την αειφορία και την ανταγωνιστικότητα. Προς το παρόν, η μόνη εναλλακτική λύση μακριά από τις συμβατικές, ρυπογόνες μορφές ενέργειας είναι η στροφή προς τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, όπως είναι τα βιοκαύσιμα, η αιολική και η ηλιακή ενέργεια, οι υδατοπτώσεις κ.ά., οι οποίες σήμερα προσελκύουν και το μεγαλύτερο οικονομικό-τεχνικό ενδιαφέρον εξ αιτίας των διαθέσιμων ώριμων και οικονομικά αποδοτικών τεχνολογιών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που δίνουν τη δυνατότητα εκμετάλλευσης των ενεργειακών αυτών πόρων. Πράγματι, την τελευταία δεκαετία έχουν γίνει σημαντικά βήματα προς την κατεύθυνση αυτή, τόσο σε παγκόσμια κλίμακα όσο και στη χώρα μας. Ωστόσο, στη γενικότερη προσπάθεια επιλογής των κατάλληλων ΑΠΕ που είναι απαραίτητες για την αναδιαμόρφωση και επίτευξη των εκάστοτε ενεργειακών επιδιώξεων μιας χώρας, η πολυπλοκότητα, η νεωτερικότητα και ο αποκεντρωμένος χαρακτήρας των περισσότερων εφαρμογών ανανεώσιμης ενέργειας αποτελούν σημαντικούς λόγους για τους οποίους πολλές τεχνολογίες ΑΠΕ παραμένουν ακόμα στο ενεργειακό επενδυτικό περιθώριο, αν και οι προοπτικές και οι δυνατότητες αξιοποίησης τους παραμένουν τεράστιες. Μία τέτοια ανανεώσιμη πηγή ενέργειας, η οποία μέχρι σήμερα ελάχιστα έχει αξιοποιηθεί, είναι η ενέργεια της θάλασσας. Οι θαλάσσιες μάζες καλύπτουν το 75% της γήινης επιφάνειας και μπορούν να θεωρηθούν ως ένα κολοσσιαίο, παγκόσμιο ενεργειακό ρεζερβουάρ, δεδομένου ότι οι φυσικές θαλάσσιες διεργασίες, όπως τα παλιρροϊκά ρεύματα, τα κύματα και η θερμικές μεταβολές του θαλάσσιου νερού, μπορούν δυνητικά να παρέχουν μian άπειρη ποσότητα ενέργειας και να καλύψουν ένα μεγάλο ποσοστό των ενεργειακών αναγκών του μέλλοντος. Κοινή ιδιότητα των μορφών θαλάσσιας ενέργειας είναι η υψηλή ενεργειακή πυκνότητά τους, η οποία είναι η υψηλότερη μεταξύ των ανανεώσιμων. Σήμερα, η αξιοποίηση του ανανεώσιμου αυτού πόρου θεωρείται ότι μόλις τα τελευταία χρόνια ξεπέρασε την πειραματική φάση της ανάπτυξης και επίδειξης των κατάλληλων οικονομικότεχνικά εφικτών τεχνολογιών. Στο εγγύς μέλλον, προβλέπεται η αξιοποίηση των εν λόγω τεχνολογιών να βαδίζει πλέον προς το στάδιο της πλήρους εμπορικής εκμε-

τάλλευσης καθώς το κόστος παραγωγής αναμένεται να μειωθεί μόλις η χρήση της κυματικής ενέργειας καταστεί δημοφιλής.

2.1. Μορφές Κυματικής Ενέργειας

Υπάρχουν ουσιαστικά τρεις βασικοί τρόποι για την παραγωγή ενέργειας από τη θάλασσα (Pontes and Falcão 2001): μέσω των παλιρροιών και των υποθαλάσσιων ρευμάτων, των κυμάτων και των διακυμάνσεων της θερμοκρασίας του θαλάσσιου νερού, γνωστή και ως «ωκεανό θερμική μετατροπή της ενέργειας» (Ocean Thermal Energy Conversion, OTEC). Άλλες πηγές ενέργειας στο θαλάσσιο περιβάλλον περιλαμβάνουν την οσμωτική ενέργεια που βασίζεται στις μεταβολές της πυκνότητας σε θαλάσσια στρώματα διαφορετικής αλατότητας (salinity gradients), την ενέργεια από θαλάσσια βιομάζα που βασίζεται στη χρήση φυκιών για την παραγωγή βιοκαυσίμων και την υπεράκτια αιολική ενέργεια, η οποία αν και τυπικά ανήκει στη κατηγορία των αιολικών ανανεώσιμων πηγών στην πραγματικότητα είναι επίσης ένας πόρος θαλάσσιας ενέργειας.

Η παλιρροϊκή ενέργεια είναι μια μορφή ενέργειας που προκύπτει από τις βαρυτικές αλληλεπιδράσεις της γης με τον ήλιο και τη σελήνη. Η ενέργεια αυτή είναι εκμεταλλεύσιμη εξαιτίας της διαφοράς του ύψους της επιφάνειας της στάθμης των νερών κατά τη διάρκεια της υψηλής και χαμηλής παλίρροιας (πλημμυρίδας και άμπωτης). Σε παγκόσμιο επίπεδο, υπολογίζεται ότι το ενεργειακό δυναμικό των παλιρροιών ανέρχεται σε περίπου 3 TW, ενώ στις περιοχές της υφαλοκρηπίδας είναι της τάξης του 1.0 TW (CRES 2006). Ακόμα και εάν μόνο το 1% αυτής της ενέργειας θα μπορούσε να αξιοποιηθεί για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, η παλιρροϊκή ενέργεια θα μπορούσε να αποδώσει 200-400 TWh/y.

Η ενεργειακή αξιοποίηση της κίνησης των κυμάτων χρησιμοποιεί την κινητική συνιστώσα της διαθέσιμης ενέργειας των κυμάτων και το ενεργειακό δυναμικό του αυξημένου ύψους των μορίων νερού κατά τον κυματισμό του. Η ενέργεια αυτή χαρακτηρίζεται από περιοδικότητα και σχετικά μικρή πυκνότητα. Το φαινόμενο των ανέμων έχει ως συνέπεια το σχηματισμό κυμάτων μεταβλητού ύψους και συχνότητας τα οποία είναι εκμεταλλεύσιμα σε θαλάσσιες περιοχές με υψηλό δείκτη ανέμων και σε παράκτιες ζώνες. Σε παγκόσμιο επίπεδο, υπολογίζεται ότι το ενεργειακό δυναμικό των κυμάτων είναι της τάξης των 1-10 TW (10^{12} - 10^{15} J) που, σύμφωνα με τον Παγκόσμιο Οργανισμό Ενέργειας, θα μπορούσε να καλύψει τουλάχιστον το 10% των αναγκών της παγκόσμιας κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας (WEC 1993).

Η ενεργειακή αξιοποίηση της ωκεανο-θερμικής ενεργειακής μετατροπής και της οσμωτικής ενέργειας, αν και σήμερα θεωρείται εφικτή, απαιτεί διαδικασίες που είναι τεχνικά πιο πολύπλοκες, ενεργοβόρες και με τεράστιο αρχικό κόστος επένδυσης. Απεναντίας, πολλοί ειδικοί προτείνουν ότι η κυματική ενέργεια των ωκεανών είναι αποδοτικότερη από την αιολική ενέργεια, δεδομένου ότι η φυσική πυκνότητα του νερού ($\rho=1025 \text{ kg/m}^3$) είναι πολύ πιο έντονη από εκείνη του αέρα ($\rho=1.2 \text{ kg/m}^3$), γεγονός που αποδίδει στην κυματική ενέργεια την υψηλότερη ενεργειακή πυκνότητα από όλες τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.

2.2. Κυματική ενέργεια. Βασικοί ορισμοί και ιδιαίτερα χαρακτηριστικά

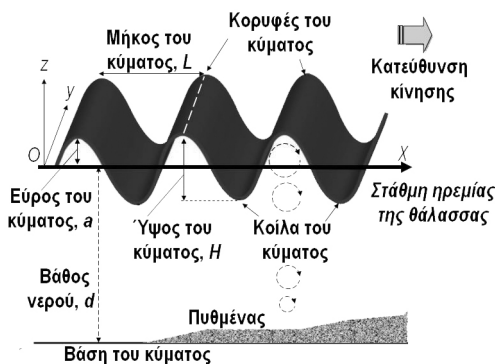
Ως κυματισμός ορίζεται κάθε περιοδική ή μη περιοδική διαταραχή της επιφάνειας της θάλασσας, η οποία συνήθως προκαλείται από την επίδραση των ανέμων που, σε πολλά μέρη του κόσμου, όπως και στην Ελλάδα, π.χ. στο Αιγαίο, πνέουν με αρκετή συνέπεια και δύναμη για να παρέχουν συνεχή κύματα που περιέχουν τεράστια ενέργεια. Η ενέργεια των θαλάσσιων κυμάτων είναι μια συμπυκνωμένη μορφή της ηλιακής ενέργειας που μεταφέρεται από την ατμόσφαιρα στο νερό και προέρχεται από τις δύο εναλλασσόμενες κινήσεις του νερού της θαλάσσιας επιφάνειας, την κατακόρυφη και την οριζόντια. Η κατακόρυφη ή ανοδική κίνηση προσδιορίζει το ύψος του κύματος, ενώ η οριζόντια ή καθοδηγητική κίνηση προσδιορίζει την ταχύτητα με την οποία κινείται το κύμα.

Τα περισσότερα θαλάσσια κύματα παράγονται από τον άνεμο που διακινείται πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας και το μέγεθος τους εξαρτάται από την ταχύτητα και τη διάρκεια πνοής του ανέμου, από την περιοχή και την απόσταση στην οποία ο άνεμος ταξιδεύει (fetch), καθώς και από το βάθος και τη μορφολογία του πυθμένα, η οποία μπορεί να προκαλέσει τη συγκέντρωση ή τον διασκορπισμό της ενέργειας των κυμάτων. Τα κύματα έχουν φασματικά, χρονικά και κατευθυντικά χαρακτηριστικά, τα οποία επηρεάζουν σημαντικά την απόκριση, την απόδοση άρα και τη σχεδίαση των μετατροπών κυματικής ενέργειας σε ηλεκτρική και των οποίων η γνώση είναι αναγκαία προκειμένου να γίνουν οι αναγκαίοι υπολογισμοί του διαθέσιμου δυναμικού της κυματικής ενέργειας σε μια περιοχή ενδιαφέροντος.

Στην ιδανική περίπτωση, τα βαθιά κύματα του νερού έχουν ένα ημιτονοειδές μοτίβο, όπως φαίνεται στην Εικόνα 1, όπου αναφέρονται τα γεωμετρικά και κινηματικά στοιχεία των κυματισμών. Η απόσταση H από την κορυφή (crest), δηλαδή το υψηλότερο σημείο του κύματος, προς το κοίλο (trough), δηλαδή το χαμηλό σημείο στην επιφάνεια του νερού μεταξύ διαδοχικών κορυφών, είναι το λεγόμενο ύψος του κύματος (wave height), και η απόσταση L από τη μία κορυφή στην άλλη ονομάζεται μήκος του κύματος (wavelength). Το μήκος του κύματος είναι η απόσταση που διανύει το κύμα σε χρόνο μιας περιόδου T (σε sec), δηλαδή το χρονικό διάστημα μεταξύ της δημιουργίας δύο διαδοχικών διαταραχών, ή της διέλευσης δύο διαδοχικών χαρακτηριστικών μιας διαταραχής, για παράδειγμα δύο κορυφών του κύματος από ένα συγκεκριμένο σημείο του χώρου. Η χρονική κλίμακα μεταβολής της στάθμης της επιφάνειας, η οποία εκφράζεται από την περίοδο T για τους περιοδικούς κυματισμούς, ποικίλει ανάλογα με την προέλευση γένεσης του κυματισμού, από μερικά sec μέχρι μερικές ώρες. Παραδείγματος χάριν, τα ανεμογενή κύματα έχουν περιόδους $T=3-25$ sec, παλιρροιακά κύματα $T=43000$ sec, κ.λπ. Το μέτωπο του κύματος (wave front) στην επιφάνεια της θάλασσας (κατά τη διεύθυνση Oy) είναι πρακτικά ανεξάρτητο του μήκους κύματος, και εξαρτάται μόνο από την προϊστορία των ανέμων στην εκάστοτε περιοχή.

Η περιεχόμενη μηχανική ενέργεια στους κυματισμούς υπολογίζεται από την ολοκλήρωση της δυναμικής και κινητικής ενέργειας ανά μονάδα μήκους κύματος (και ανά μονάδα πλάτους του μετώπου του κύματος) κατά τη διεύθυνση διάδοσης του κύματος και δίνεται από την απλή σχέση (USCOE 2002)

$$E = E_k + E_d = \frac{1}{8} \rho g H^2 L = \frac{1}{2} \rho g \alpha^2 L, \quad H = 2\alpha \quad (1)$$



Εικόνα 1: Βασικά γεωμετρικά και κινηματικά μεγέθη περιγραφής των κυματισμών

όπου $\rho = 1025 \text{ kg/m}^3$ είναι η πυκνότητα του θαλάσσιου νερού, $g \approx 9.81 \text{ m/s}^2$ είναι η επιτάχυνση της βαρύτητας, H και a είναι αντίστοιχα το ύψος και το εύρος του κύματος (σε m) και L (επίσης σε m) είναι το μήκος των κυμάτων. Στη συγκεκριμένη εξίσωση, η οποία ισχύει για ένα ιδανικό ημιτονοειδές κύμα, η δυναμική και κινητική ενέργεια των κυμάτων είναι ισοδύναμες και εξαρτώνται ουσιαστικά από το ύψος του κύματος, ενώ η συνολική ενέργεια είναι ανεξάρτητη του βάθους και εξαρτάται από το $(E_k = E_d = \frac{1}{16} \rho g H^2)$ μήκος του κύματος και είναι ανάλογη του τετραγώνου του ύψους του κύματος.

Η επακόλουθη κίνηση του νερού σε έναν κυματισμό μεταφέρει την κινητική ενέργεια η οποία μπορεί να καταστεί εκμεταλλεύσιμη από τις συσκευές κυματικής ενέργειας. Σημαντικός δείκτης για την αξιολόγηση του ενεργειακού δυναμικού της κυματικής ενέργειας αποτελεί η λεγόμενη *πυκνότητα ενέργειας* (energy density) ενός κύματος (σε J/m^2 ή σε Wh/m^2 , όπου $1 \text{ J (Joule)} = 1 \text{ N} \cdot \text{m} = [\text{kg} \cdot \text{m/s}^2] \cdot \text{m} = 1 \text{ W} \cdot \text{s}$), η οποία από τη σχέση (1) ορίζεται ως ο λόγος E/L

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

και αντιπροσωπεύει ουσιαστικά τη *μέση ροή ενέργειας* (mean energy flux) ανά μονάδα επιφάνειας διαμέσου ενός κατακόρυφου επιπέδου τοποθετημένου παράλληλα προς τη διεύθυνση της κορυφής του κύματος (ή, με άλλα λόγια, κάθετα στη διεύθυνση κίνησης του κύματος).

Σε βαθιά ύδατα, εκεί όπου $d > L/2$, δηλαδή το βάθος είναι μεγαλύτερο από το ήμισυ του μήκους του κύματος, η *κυματική ισχύς* (wave power) ή *ροή ενέργειας* (wave energy flux) που μεταδίδεται ανά μήκος μετώπου του κύματος διαμέσου ενός κατακόρυφου επιπέδου κάθετου στη διεύθυνση της κίνησης του κύματος δίνεται από τη σχέση

$$P = E c_g = E \frac{c_p}{2} = \frac{\rho g^2 H^2 T}{32\pi}, \quad (3)$$

όπου c_g είναι η ομαδική ταχύτητα που κινούνται τα κύματα στα βαθιά νερά και $c_p = gT/2\pi$ είναι η ταχύτητα φάσης του κύματος ή ταχύτητα διάδοσης απλού κυματισμού, η οποία σε βαθιά νερά είναι ανεξάρτητη του βάθους.

Στην πραγματικότητα, οι κυματισμοί τους οποίους δημιουργεί η επίδραση του ανέμου στην επιφάνεια της θάλασσας, δεν είναι «μονοχρωματικοί», δηλαδή δεν έχουν μια απλή ημιτονοειδή μορφή. Η διαταραγμένη επιφάνεια της θάλασσας μπορεί να προσεγγιστεί με σύνθεση περισσότερων κανονικών κυματισμών που αποτελούνται από τη σύζευξη ημιτονικών κυμάτων με διαφορετικά μήκη κύματος, φάση, και διεύθυνση, ή να αναλυθεί σαν στοχαστικό μέγεθος. Από τη στατιστική ανάλυση ενός δείγματος N τιμών H_i , $i=1, 2, \dots, N$ του ύψους της θαλάσσιας επιφάνειας προκύπτουν διάφορες εκφράσεις περιγραφής του ύψους των κυμάτων, όπως (WMO 1998):

- $H_{rms} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_1^N H_i^2}$ – η μέση τετραγωνική τιμή των καταγραμμένων υψών κύματος (root-mean-square wave height).

• $H_{1/3} = H_s = \sqrt{2} H_{rms} \approx 4\sqrt{m_0}$ – το λεγόμενο *Σημαντικό Ύψος Κύματος* (Significant Wave Height) που αντιπροσωπεύει τη μέση τιμή του ενός τρίτου των υψηλότερων παρατηρούμενων κυμάτων. Η εν λόγω τιμή χρησιμοποιείται συχνά γιατί συμπίπτει με την τιμή του ύψους κύματος που δίνει ένας έμπειρος ναυτικός από την οπτική παρατήρηση της θάλασσας. Δεδομένης της μεταβλητότητας του ύψους των κυμάτων, τα μεγαλύτερα επιμέρους κύματα είναι πιθανό να έχουν μέχρι και διπλάσιο από το σημαντικό ύψος κύματος για μια συγκεκριμένη χρονική περίοδο κυματώσεων ή ένα σύστημα υψηλής θαλασσοταραχής.

• $H_{m0} \approx 4\sqrt{m_0} = \sqrt{2} H_{rms} \approx 1.05 H_s$ – Η φασματική τιμή του ύψους του κύματος (spectral wave height), όπου m_0 εκφράζει το εμβαδόν που περικλείεται κάτω από την καμπύλη του ενεργειακού φάσματος που περιγράφει πώς είναι κατανεμημένη η περιεχόμενη μηχανική ενέργεια στις διάφορες συχνότητες που περιέχονται σε ένα σύνθετο κυματισμό.

• $H_{1/10} = 5.1\sqrt{m_0} = 1.8 H_{rms} \approx 1.3 H_s$ – Η μέση τιμή του ενός δέκατου των υψηλότερων παρατηρούμενων κυμάτων.

• $H_{1/100} = 6.7\sqrt{m_0} = 2.4 H_{rms} \approx 1.7 H_s$ – Η μέση τιμή του ενός εκατοστού των υψηλότερων παρατηρούμενων κυμάτων.

• $H_{max} = H_{rms} \sqrt{\ln(N)} \approx 1.8 H_{m0}$ – Το μέγιστο ύψος κύματος με πιθανότητα υπέρβασης $1/N$.

Εάν θεωρηθεί ότι η πραγματική κυματική κατάσταση της θάλασσας μπορεί να αντικατασταθεί από ένα ιδανικό ημιτονοειδές κύμα που περιέχει την ίδια κυματική ενέργεια σύμφωνα με την εξίσωση (2), το ισοδύναμο ύψος του εν λόγω κύματος θα δίνεται από την τιμή $\frac{L}{25} < d < \frac{L}{2}$ και η πυκνότητα ενέργειας που υπολογίζεται από την αντίστοιχη σχέση

$$E_{dens} = \bar{E} = \frac{1}{8} \rho g H_{rms}^2 = \frac{1}{16} \rho g H_{m0}^2 \cong \frac{1}{16} \rho \quad (4)$$

αντιπροσωπεύει την ενεργειακή πυκνότητα των πραγματικών κυματισμών. Αντίστοιχα, η κυματική ισχύς ή ροή κυματικής ενέργειας ανά μήκος μετώπου του κύματος διαμέσου ενός κατακόρυφου επιπέδου κάθετου στη διεύθυνση της κίνησης ενός κύματος σημαντικού ύψους H_s δίνεται από τη σχέση

$$P = \frac{\rho g^2 H_s^2 T}{64\pi} \approx \left(0.5 \frac{kW}{m^3 s} \right) H_s^2 T \quad (5)$$

όπου όταν το σημαντικό ύψος του κύματος δίνεται σε μέτρα και η περίοδος του κύματος σε δευτερόλεπτα, η κυματική ισχύς εκφράζεται σε *kilowatts (kW)* ανά μέτρο μήκους του μετώπου του κύματος. Π.χ., ένα κύμα, λίγα χιλιόμετρα από την ακτογραμμή, με σημαντικό ύψος 2 m και περίοδο 8 sec περιέχει 16 kW κυματικής ισχύος ανά μέτρο της παραλιακής ζώνης. Στην πράξη, μια εγκατάσταση μετατροπής της κυματικής ενέργειας σε ηλεκτρική που κινείται μόνο κατακόρυφα ή μόνο οριζόντια θα καλύπτει αποκλειστικά και μόνο το μισό της παραπάνω ενέργειας/ισχύος των κυμάτων. Αντίστοιχα, σε ενδιάμεσα βάθη νερού, δηλαδή εκεί όπου ισχύει, η κυματική ισχύς εκφράζεται από τη σχέση

$$P = \frac{\rho g^2 H_s^2 T}{64\pi} \left(1 + \frac{4\pi d/L}{\sinh(4\pi d/L)} \right) \tanh(2\pi d/L). \quad (6)$$

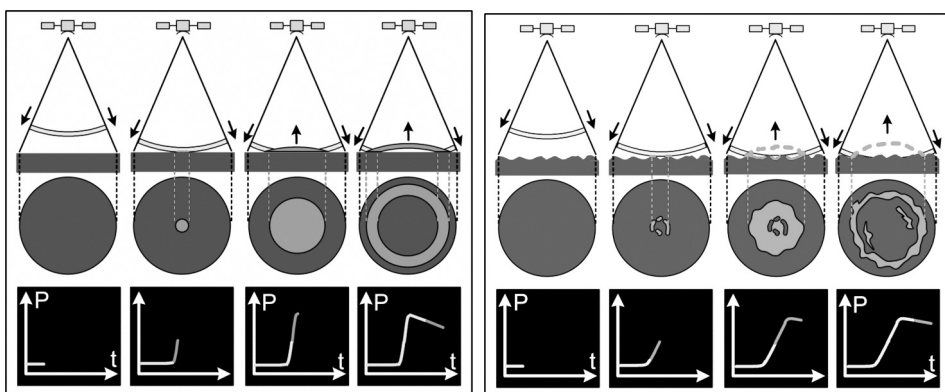
Πλησιέστερα στην ακτή, η κυματική ενέργεια μειώνεται λόγω της τριβής με το βυθό, οπότε τα κύματα σε βαθύτερα, καλά εκτεθειμένα ύδατα μακριά από τις ακτές θα έχουν την μέγιστη ενέργεια.

3. Κυματικό ενεργειακό δυναμικό στις ελληνικές θάλασσες – εκτιμήσεις από δορυφορικά αλτιμετρικά δεδομένα

3.1. Ο ρόλος της δορυφορικής αλτιμετρίας

Σημαντικό ρόλο στην προσπάθεια αξιολόγησης του ενεργειακού δυναμικού των θαλάσσιων περιοχών παίζουν σήμερα οι ποικίλες δορυφορικές τεχνολογίες παρακολούθησης της γης, οι οποίες συμβάλλουν στη δημιουργία βάσεων γνώσεων και εξαντλητικών δεδομένων, που στόχο έχουν να βελτιστοποιήσουν τη χρήση του θαλάσσιου χώρου και των ωκεανών. Μια τέτοια τεχνολογία είναι εκείνη της δορυφορικής αλτιμετρίας, η οποία χρησιμοποιεί υψηλής ακρίβειας δορυφορικά ραντάρ, τα οποία πρωτίστως μετρούν και απεικονίζουν την τοπογραφία της επιφάνειας της θάλασσας (sea surface topography), η οποία επηρεάζεται από τους ανέμους, τα ρεύματα και τη βαρύτητα.

Σήμερα, το κύριο γεωδαιτικό ενδιαφέρον για τη δορυφορική αλτιμετρία επικεντρώνεται σε σημαντικά προβλήματα όπως είναι η ανάγκη ακριβούς προσδιορισμού του θαλάσσιου γεωειδούς, καθώς και η βραχυπρόθεσμη και μακροπρόθεσμη παρακολούθηση των μεταβολών της Μέσης Στάθμης της Θάλασσας (ΜΣΘ) π.χ. εξαιτίας των παλιρροιών, των επιδράσεων της ατμοσφαιρικής πίεσης, των κλιματικών αλλαγών κ.ά. Ωστόσο, μέρος της επεξεργασίας των αλτιμετρικών δεδομένων παρέχει ένα άλλο σημαντικό προϊόν, τον ακριβή προσδιορισμό του σημαντικού ύψους των κυμάτων στο τμήμα της θαλάσσιας επιφάνειας από την οποία ανακλώνται οι παλμοί ραντάρ που εκπέμπει ένας αλτιμετρικός δορυφόρος καθώς διέρχεται πάνω από μια θαλάσσια περιοχή.



Εικόνα 2: Τυπική κυματομορφή ανακλώμενου παλμού ραντάρ δορυφορικού αλτιμέτρου

Συγκεκριμένα, το μέγεθος και το σχήμα του ανακλώμενου παλμού ραντάρ, η λεγόμενη *κυματομορφή του παλμού* (pulse waveform), περιέχει επίσης πληροφορίες σχετικά με τα χαρακτηριστικά της επιφάνειας η οποία προκάλεσε την ανάκλαση του παλμού (pulse echo) που εκπέμπεται από το δορυφορικό αλτίμετρο. Η οπισθοσκέδαση (backscatter) του παλμού επηρεάζεται από την τραχύτητα της επιφάνειας της θάλασσας εξαιτίας των επιφανειακών κυματισμών, δεδομένου ότι το αλτίμετρο μετρά πρώτα την κυματική κορυφή και στη συνέχεια την κυματική κοιλάδα των κυμάτων. Συγκεκριμένα, η κυματομορφή του εκάστοτε ανακλώμενου παλμού έχει ένα χαρακτηριστικό σχήμα που μπορεί να περιγραφεί αναλυτικά ενώ η ένταση του παλμού ποικίλλει με την πάροδο του χρόνου επιστροφής του παλμού. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 2, όταν η επιφάνεια της θάλασσας είναι επίπεδη κατά τη διάρκεια περιόδων ηρεμίας (αριστερά), ο παλμός ανακλάται έντονα από τη στιγμή που η αιχμή του εκπεμπόμενου παλμού ραντάρ χτυπά την επιφάνεια. Αντίθετα, όταν επικρατεί θαλασσοταραχή (δεξιά), ο παλμός ανακλάται αρχικά από την κορυφή του υψηλότερου κύματος που βρίσκεται απευθείας κάτω από το δορυφόρο και μετέπειτα από τη σειρά άλλων κυματοκορυφών διαδοχικών κυμάτων, με τρόπο ώστε το πλάτος του ανακλώμενου παλμού του ραντάρ αυξάνεται σταδιακά. Με τον τρόπο αυτό μπορεί να εκτιμηθεί το σημαντικό ύψος των κυμάτων από την κλίση της καμπύλης που αντιπροσωπεύει το πλάτος του ανακλώμενου παλμού με την πάροδο του χρόνου κατά μήκος του ίχνους του ραντάρ στην επιφάνεια της θάλασσας. Επιπλέον, στο πλαίσιο της εν λόγω μετρητικής διαδικασίας μπορεί να παραχθεί και η ταχύτητα του ανέμου από την δύναμη του σήματος που οπισθοσκεδάζεται.

Το κύριο πλεονέκτημα των κυματικών αλτιμετρικών δεδομένων είναι ότι καλύπτουν συστηματικά πολύ μεγάλες εκτάσεις και παρέχουν πληροφόρηση ακόμα και σε περιοχές με ιδιαίτερα δυσμενείς καιρικές συνθήκες, με κύριο ωστόσο μειονέκτημα τη χαμηλή χρονική συχνότητα επισκεψιμότητας του εκάστοτε δορυφόρου πάνω από τα ίδια σημεία της θαλάσσιας επιφάνειας, από 5 μέχρι 35 μέρες, ανάλογα με τα χαρακτηριστικά της τροχιάς του (π.χ. την κλίση της τροχιάς). Η δυσκολία αυτή παρακάμπτεται με τη συνδυασμένη χρήση αλτιμετρικών δεδομένων από διαφορετικούς δορυφόρους, όπως γίνεται σήμερα με την ταυτόχρονη λειτουργία των δορυφόρων *Jason-1*, *-2* και *ENVISAT*, των οποίων τα επίγεια ίχνη στη θαλάσσια επιφάνεια δημιουργούν πυκνότερα πλέγματα κάλυψης των θαλάσσιων περιοχών. Στην περίπτωση αυτή, ακόμα και εάν η κανονικότητα και η χωρική κατανομή των επιμέρους μετρήσεων στην επιφάνεια του ωκεανού χαρακτηρίζεται από αποστάσεις μερικών δεκάδων χιλιομέτρων μεταξύ γειτονικών επίγειων ίχνων κατά μήκος των οποίων λαμβάνονται τα αλτιμετρικά δεδομένα δεν αποτελούν κρίσιμους παράγοντες για τις μελέτες του κυματικού κλίματος στις ανοικτές θάλασσες, αλλά στις παράκτιες περιοχές ενδέχεται να υπάρχουν σημαντικές χωρικές μεταβλητότητες και υποβαθμισμένη ποιότητα των ενδείξεων των κυματισμών σε αποστάσεις μέχρι και 10 km από τις ακτές. Για τους λόγους αυτούς, γενικά τα αλτιμετρικά δορυφορικά δεδομένα είναι ιδιαίτερα χρήσιμα για τη γενική εκτίμηση του ανεμολογικού και κυματικού κλίματος εκτεταμένων θαλάσσιων περιοχών (Lefevre κ.ά. 2006), παρέχοντας μια ακριβή εικόνα της μακροπρόθεσμης κατανομής του σημαντικού ύψους των κυμάτων στις περιοχές ενδιαφέροντος.

Η πρώτη χρήση αλτιμετρικών δεδομένων από τους δορυφόρους *GEOSAT* και *TOPEX/Poseidon* για την εκτίμηση του κυματικού ενεργειακού δυναμικού σε παγκόσμια κλίμακα αναφέρθηκε από τους Barstow κ.ά. (1998). Σε συνδυασμό με

δεδομένα από ένα εκτεταμένο δίκτυο σημαντήρων, από τη συγκεκριμένη μελέτη αναδείχθηκε ότι οι καλύτεροι κυματικοί πόροι, ως προς το ενεργειακό δυναμικό τους, εμφανίζονται σε περιοχές όπου ισχυροί άνεμοι έχουν ταξιδέψει σε μεγάλες αποστάσεις. Για τον λόγο αυτό, οι καλύτεροι κυματικοί πόροι σε παγκόσμιο επίπεδο, μεγέθους από 20 έως 70 kW/m, εντοπίζονται στις εύκρατες ζώνες (μεταξύ του 30ου και του 70ου παραλλήλου και στα δύο ημισφαίρια), όπου παρατηρούνται και οι ισχυρότεροι θυελλώδεις άνεμοι, π.χ. στις δυτικές ακτές της Ν. Αμερικής, Αυστραλίας και Ν. Ζηλανδίας. Αντίστοιχα, στην Ευρώπη εντοπίζονται κατά μήκος των δυτικών ακτών, οι οποίες βρίσκονται στο τέλος ενός μακριού πεδίου δράσης, τον Ατλαντικό Ωκεανό. Συγκεκριμένα, η ενέργεια που περιέχουν τα κύματα υπολογίζεται ότι φτάνει ως τα 75 kW/m στις ακτές της Ιρλανδίας και της Σκωτίας, ενώ για τις Ευρωπαϊκές ακτές της Μεσογείου η ενέργεια υπολογίζεται από 4 έως 11 kW/m (CRES 2006).

3.2. Αξιοποίηση αλιμετρικών δεδομένων για την εκτίμηση του κυματικού ενεργειακού δυναμικού στις ελληνικές θάλασσες

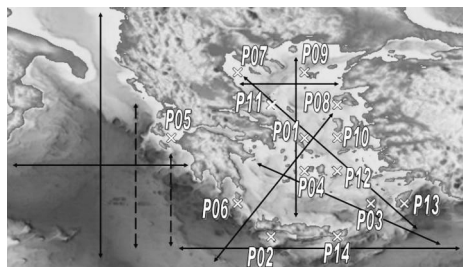
Μεταξύ των Μεσογειακών ακτών, οι εκτιμήσεις του κυματικού ενεργειακού δυναμικού με τις υψηλότερες τιμές (8-11 kW/m) αναφέρονται στη βιβλιογραφία για τις περιοχές του νοτιοδυτικού Αιγαίου (Pontes 1998). Οι συγκεκριμένες γενικές εκτιμήσεις βασίζονται κυρίως σε περιορισμένα ανεμολογικά και κυματικά δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για τη σύνταξη του πρώτου Ευρωπαϊκού Άτλαντα Κυματικής Ενέργειας (Wave Energy Resource Atlas, WERATLAS) με βάση και τα αποτελέσματα του προγνωστικού κυματικού μοντέλου WAM (Wave Analysis Model) (WAMDI Group 1988) για την περίοδο 07/1992-12/1995. Το μοντέλο WAM είναι ένα φασματικό κυματικό μοντέλο 3ης γενιάς, το οποίο υπολογίζει με αναλυτικές μεθόδους την χωροχρονική εξέλιξη του δισδιάστατου φάσματος της κυματικής ενέργειας. Ωστόσο, όπως έχει προκύψει τόσο από τον συστηματικό ποιοτικό έλεγχο του WERATLAS όσο και από μελέτες της προγνωστικής ικανότητας του μοντέλου WAM (π.χ. από τους Σουκισιάν και Προσπαθόπουλο [2003]), σε σύγκριση με αλιμετρικά δεδομένα από το δορυφόρο TOPEX/Poseidon και κυματικά δεδομένα από σημαντήρες, για τη Μεσόγειο θάλασσα η ποιότητα των αποτελεσμάτων του μοντέλου είναι γενικά κατώτερη από εκείνη π.χ. για τις περιοχές του Βόρειου Ατλαντικού. Συγκεκριμένα το μοντέλο WAM τείνει να υποεκτιμάει τις τιμές H_s σε όλη τη περιοχή της Μεσογείου, ενώ οι τιμές της κυματικής ισχύος που υπολογίζει μπορεί να είναι χαμηλότερες μέχρι και 50% σε σχέση με τις πραγματικές τιμές.

Ως εκ τούτου, η παρούσα μελέτη επιδιώκει να παρουσιάσει μια ενδελεχή ανάλυση του κυματικού κλίματος στις ελληνικές θάλασσες, δίνοντας μια πληρέστερη εικόνα του κυματικού ενεργειακού δυναμικού σε χαρακτηριστικές περιοχές του ελληνικού θαλάσσιου χώρου. Προκειμένου να αξιολογηθεί το κυματικό ενεργειακό δυναμικό της Ελλάδας κάτω από τις πραγματικές συνθήκες που αντιστοιχούν στις ελληνικές θάλασσες και να συγκριθούν με τα αντίστοιχα επίπεδα της διαθέσιμης κυματικής ενέργειας άλλων μεσογειακών και ευρωπαϊκών χωρών χρησιμοποιήθηκαν πολυετή δεδομένα του σημαντικού ύψους των κυμάτων από τις μετρήσεις αλιμετρίας ραντάρ των δορυφόρων *Jason-1*, *Jason-2* και *ENVISAT*. Συγκεκριμένα έγινε χρήση ημερήσιων τιμών *SWH* για το χρονικό διάστημα από 11/12/2005 έως 27/05/2010 στη θαλάσσια περιοχή που περιλαμβάνει τις ελληνικές θάλασσες και πε-

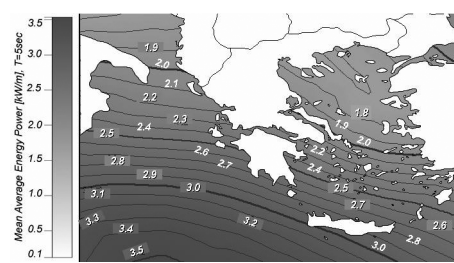
ρικλείεται από τις συντεταγμένες φ: 34° - 42° N και λ: 16° - 32° E. Τα συγκεκριμένα δεδομένα αποτελούν προϊόν συνδυασμένης ανάλυσης των αλτιμετρικών δεδομένων από τους εν λόγω δορυφόρους, τα οποία είναι διαθέσιμα από το γαλλικό οργανισμό AVISO ως χρονοσειρές στα σημεία πλέγματος διαστάσεων 1° x 1°.

Στην περιοχή ενδιαφέροντος, όπως φαίνεται στο Χάρτη 1, επιλέχθηκαν επιπλέον μια σειρά συγκεκριμένες τοποθεσίες (P01, P02, ..., P14), για τις οποίες αναλύθηκαν οι αντίστοιχες χρονοσειρές των αλτιμετρικών δεδομένων προκειμένου να υπολογιστούν λεπτομερή στατιστικά στοιχεία των κυματικών κλιματολογικών συνθηκών και του κυματικού ενεργειακού δυναμικού στις περιοχές που αντιπροσωπεύουν τα εν λόγω σημεία. Η επιλογή των εν λόγω τοποθεσιών δεν είναι τυχαία. Τα συγκεκριμένα σημεία βρίσκονται κοντά στους άξονες που αντιπροσωπεύουν τα εικονιζόμενα ελεύθερα μήκη της πνοής των ανέμων στις ελληνικές θάλασσες, κατά μήκος των οποίων αναπτύσσονται και τα κύρια μέτωπα κυματισμών. Ανάμεσα στις επιλεγμένες τοποθεσίες συμπεριλαμβάνονται συγκεκριμένες παράκτιες περιοχές π.χ. στις θέσεις P02 (Γαύδος), P06 (Κύθηρα/Αντικύθηρα), P13 (Ρόδος) και άλλων νησιών, οι οποίες κατά καιρούς έχουν προταθεί και από διάφορες άλλες μελέτες ως κατάλληλες για την αξιοποίηση των αιολικών μορφών ενέργειας, και ενδεχομένως στο μέλλον να προσφέρονται ως ιδανικές τοποθεσίες εγκατάστασης υβριδικών συστημάτων ΑΠΕ, με κοινή συνεισφορά στα αυτόνομα ενεργειακά δίκτυα των νησιών. Άλλες από τις επιλεγμένες τοποθεσίες, π.χ. στο βορειοανατολικό Αιγαίο οι θέσεις P08 (Λέσβος) και P09 (Λήμνος), θεωρήθηκε κρίσιμο να εξεταστούν δεδομένου ότι αντιπροσωπεύουν περιοχές με σχετικά μεγάλη παραγωγικότητα του θαλάσσιου οικοσυστήματος (αλιεία, ιχθυοκαλλιέργειες), όπου ενδεχομένως, ανεξάρτητα του μεγέθους της διαθέσιμης κυματικής ενέργειας, θα πρέπει να διερευνηθούν περαιτέρω οι τυχόν επιπτώσεις στο περιβάλλον και στις παράκτιες οικονομίες των συγκεκριμένων περιοχών κατάλληλων εγκαταστάσεων αξιοποίησής της.

Στον Πίνακα 1 δίνονται τα στατιστικά κυματολογικά στοιχεία στις προαναφερόμενες τοποθεσίες, όπως προέκυψαν από τις χρονοσειρές των τιμών H_s του σημαντικού ύψους των κυμάτων για τη διάρκεια της πενταετούς περιόδου των διαθέσιμων αλτιμετρικών δεδομένων (βλ. αντίστοιχα τις μέσες κυματικές συνθήκες που απεικονίζονται στο Χάρτη 2). Οι τιμές Q1 και Q3 υποδηλώνουν αντίστοιχα ότι το 25% των χαμηλότερων τιμών H_s έχουν μέγεθος μικρότερο από Q1 (σε m) και το 25% των υψηλότερων τιμών H_s έχουν μέγεθος μεγαλύτερο από Q3 (σε m). Π.χ. για τη θέση P02 (Γαύδος) το 50% των παρατηρούμενων τιμών H_s κυμαίνονται μεταξύ 0.75 και 1.35 m ή 25% των παρατηρήσεων έχουν μέγεθος $H_s > 1.35$ m, και 50% των παρατηρήσεων έχουν μέγεθος $H_s > 1.0$ m. Είναι εμφανές ότι στις ακτές



Χάρτης 1: Περιοχή μελέτης, με επιμέρους ενδιαφέρουσες τοποθεσίες (gridpoints) ενδιαφέροντος



Χάρτης 2: Μέσες κυματικές συνθήκες κατά την περίοδο 12/2005-05/2010.

των θέσεων, κατά σειρά, P02 (Γαύδος), P14 (Κουφονήσι), P06 (Αντικύθηρα) και P03 (Κάρπαθος) εμφανίζονται οι εντονότερες κυματικές συνθήκες με τις τιμές του σημαντικού ύψους κυμάτων H_s πάνω από το 1 m να εμφανίζονται με συχνότητα από 40% μέχρι 50% κατά τη διάρκεια της υπό εξέταση περιόδου των αλτιμετρικών μετρήσεων. Είναι γνωστό και από οπτικές παρατηρήσεις ότι οι περιοχές αυτές είναι

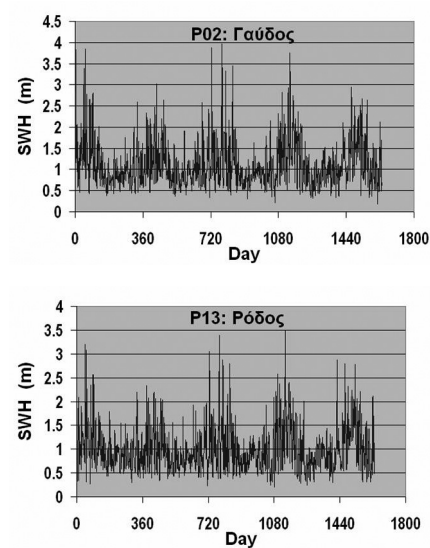
	P01 Ανδρός	P02 Γαύδος	P03 Κάρπαθος	P04 Αντίπαρος	P05 Ζάκυνθος Ηλεία	P06 Κύθηρα/ Αντικύθηρα	P07 Θερμαϊκός
# Days	1571	1610	1598	1594	1593	1585	1484
Mean	0.89	1.12	1.01	0.97	1.00	1.08	0.86
St Dev	0.44	0.53	0.46	0.45	0.53	0.53	0.46
Min	0.11	0.18	0.22	0.22	0.16	0.19	0.03
Q ₁	0.58	0.75	0.68	0.64	0.60	0.71	0.53
Median	0.78	0.98	0.90	0.85	0.88	0.93	0.75
Q ₃	1.09	1.36	1.24	1.18	1.22	1.35	1.06
Max	4.05	3.94	3.56	3.83	4.12	3.73	4.06
%($H_s > 1m$)	32	50	40	37	39	42	26
	P08 Λέσβος	P09 Λήμνος	P10 Χίος	P11 Σκόπελος	P12 Αμοργός	P13 Ρόδος	P14 Κουφονήσι
#Days	1414	1414	1555	1514	1588	1593	1595
Mean	0.83	0.83	0.87	0.88	0.95	1.00	1.08
St Dev	0.46	0.46	0.43	0.47	0.44	0.46	0.50
Min	-0.10	-0.15	0.13	0.01	0.20	0.20	0.20
Q ₁	0.53	0.52	0.57	0.54	0.64	0.67	0.73
Median	0.71	0.71	0.77	0.76	0.84	0.89	0.97
Q ₃	1.01	1.01	1.06	1.08	1.15	1.22	1.30
Max	4.29	4.17	4.04	4.35	3.80	3.44	3.85
%($H_s > 1m$)	26	25	29	32	35	39	46

Πίνακας 1. Στατιστικά στοιχεία κυματικών κλιματολογικών συνθηκών.

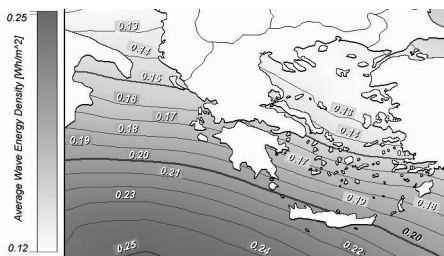
περιοχές με υψηλό ανεμολογικό δυναμικό, ενώ ταυτόχρονα τα κύματα διατηρούν αυτό το ύψος τους περισσότερο από 6 μήνες το χρόνο.

Οι κυματικές συνθήκες στις διαφορετικές θέσεις που εξετάστηκαν είναι, όπως αναμενόταν, πιο έντονες κατά τις περιόδους που εκτείνονται περίπου από το Νοέμβριο μέχρι το Φεβρουάριο, ενώ λεπτομερέστερη ανάλυση των χρονοσειρών των αλτιμετρικών δεδομένων αναδεικνύει και την επίδραση των «ετησίων»-εποχιακών ανέμων που εμφανίζονται κατά τη διάρκεια της καλοκαιρινής περιόδου. Οι εν λόγω διαπιστώσεις είναι εμφανείς στην Εικόνα 3, όπου απεικονίζονται ενδεικτικά οι χρονοσειρές του σημαντικού ύψους κύματος στις θέσεις P02 και P13. Παρόμοια συμπεριφορά παρατηρήθηκε και στις χρονοσειρές των υπόλοιπων σημείων, με τις ίδιες έντονες περιόδους κυματικών συνθηκών σε γειτονικές θέσεις να παρατηρούνται με χρονική διαφορά λίγων ημερών. Ανάλογα σύμφωνα αποτελέσματα αναφέρεται στη βιβλιογραφία (π.χ. από τους Σουκισιάν και Προσπαθόπουλο [2003]) ότι έχουν προκύψει και από τα κυματικά μοντέλα WAM.

Το επόμενο σημαντικό στάδιο στην αξιολόγηση του κυματικού ενεργειακού δυναμικού αφορά τη χωρική κατανομή του ενεργειακού περιεχομένου των κυμάτων ανάλογα με τη κυματική ενεργειακή πυκνότητα τους. Στο Χάρτη 3 απεικονίζεται η μέση ενεργειακή πυκνότητα (σε Wh/m²) της περιοχής της μελέτης όπως υπολογίζεται από τη σχέση (4) βάσει των διαθέσιμων χρονοσειρών αλτιμε-



Εικόνα 3: Χρονοσειρές των ημερήσιων τιμών του σημαντικού ύψους κύματος στις θέσεις P02 (Γαύδος) και P13 (Ρόδος).



Χάρτης 3: Μέση κυματική ενεργειακή πυκνότητα (σε Wh/m²).

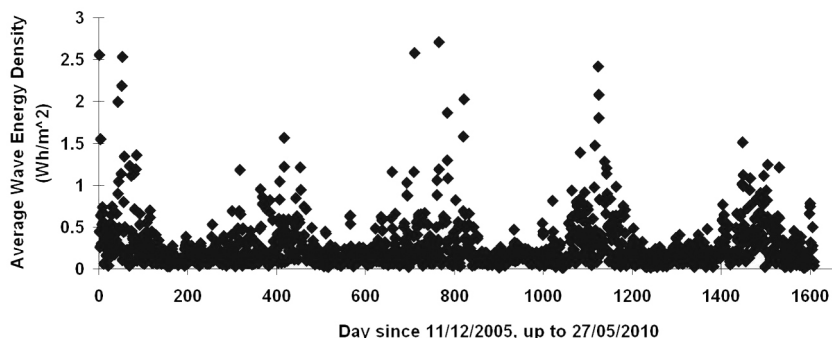
τρικών δεδομένων του σημαντικού ύψους κύματος H_s για την περίοδο 12/2005-05/2010. Η ενεργειακή πυκνότητα είναι συνάρτηση της στιγμιαίας ενέργειας του κύματος ανά μονάδα επιφάνειας, και στη συγκεκριμένη περιοχή κυμαίνεται κατά μέσο όρο από 0.12 έως 0.25 Wh/m², δηλαδή επίπεδα που η κυματική ενέργεια χαρακτηρίζεται όπως και όλες οι μορφές ΑΠΕ από σχετικά μικρή πυκνότητα. Ωστόσο, ακόμα και αυτά τα θεωρούμενα ίσως χαμηλά επίπεδα κυματικής ενεργειακής πυκνότητας δεν είναι ευκαταφρόνητα, αφού είναι συγκρίσιμα με τις αντίστοιχες τιμές από 0.05 έως 0.3 που αναφέρονται, π.χ., για τη Βαλτική Θάλασσα (βλ. Henfridsson κ.ά. 2006), η οποία θεωρείται ως τυπικό παράδειγμα «προφυλαγμένης» θάλασσας κατάλληλης για την αξιοποίηση και εκμετάλλευση του κυματικού ενεργειακού δυναμικού της για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Στον Πίνακα 2, δίνονται τα στατιστικά στοιχεία της κυματικής ενεργειακής πυκνότητας για τις επιλεγμένες θέσεις του ελλαδικού θαλάσσιου χώρου. Στην Εικόνα 4, δίνονται ενδεικτικά οι εποχικές μεταβολές της κυματικής ενεργειακής πυκνότητας (σε Wh/m²) στη θέση P02 (Γαύδος), όπου παρατηρείται και η μέγιστη μέση τιμή. Παρόμοια συμπεριφορά παρατηρείται τις θέσεις P06 (Αντικύθηρα), P14 (Κουφονήσι), P03 (Κάρπαθος) και P05 (Ζάκυνθος/Ηλεία), οι οποίες εμφανίζουν κατά μέσο όρο τις αμέσως μεγαλύτερες τιμές κυματικής ενεργειακής πυκνότητας. Από το γράφημα της Εικόνας 4 είναι εμφανές το χαρακτηριστικό γνώρισμα της περιοδικότητας της κυματικής ενεργειακής πυκνότητας ανάλογα με την εποχή του έτους, με τον ίδιο τρόπο όπως ήδη αναφέρθηκε προηγουμένως και για τις κυματικές συνθήκες στις διαφορετικές θέσεις που εξετάστηκαν.

	P01 Άνδρος	P02 Γαύδος	P03 Κάρπαθος	P04 Αντίπαρος	P05 Ζάκυνθος/ Ηλεία	P06 Κύθηρα/ Αντικύθηρα	P07 Θερμαϊκός
# Days	1571	1610	1598	1594	1593	1585	1484
Mean	0.17	0.27	0.22	0.20	0.22	0.25	0.17
St Dev	0.20	0.29	0.23	0.22	0.26	0.28	0.21
Min	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.00
Q ₁	0.06	0.10	0.08	0.07	0.06	0.09	0.05
Median	0.11	0.17	0.14	0.13	0.13	0.15	0.10
Q ₃	0.21	0.32	0.27	0.24	0.26	0.32	0.20
Max	2.86	2.71	2.21	2.56	2.97	2.43	2.88
	P08 Λέσβος	P09 Λήμνος	P10 Χίος	P11 Σκόπελος	P12 Αμοργός	P13 Ρόδος	P14 Κουφονήσι
#Days	1414	1414	1555	1514	1588	1593	1595
Mean	0.16	0.16	0.17	0.17	0.19	0.21	0.25
St Dev	0.21	0.22	0.19	0.22	0.21	0.22	0.26
Min	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01
Q ₁	0.05	0.05	0.06	0.05	0.07	0.08	0.09
Median	0.09	0.09	0.10	0.10	0.12	0.14	0.16
Q ₃	0.18	0.18	0.20	0.20	0.23	0.26	0.29
Max	3.21	3.03	2.84	3.30	2.52	2.07	2.59

Πίνακας 2. Στατιστικά στοιχεία της κυματικής ενεργειακής πυκνότητας (σε Wh/m²).

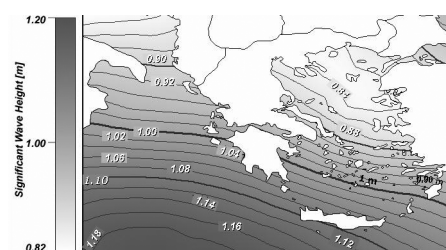
Στο Χάρτη 4, απεικονίζεται η μέση κυματική ισχύς ή ο μέσος ρυθμός ροής ενέργειας στην περίοδο των κυμάτων, σε kW ανά μέτρο μετώπου του κύματος. Στον Πίνακα 3, δίνονται για τις επιλεγμένες θέσεις του ελλαδικού θαλάσσιου



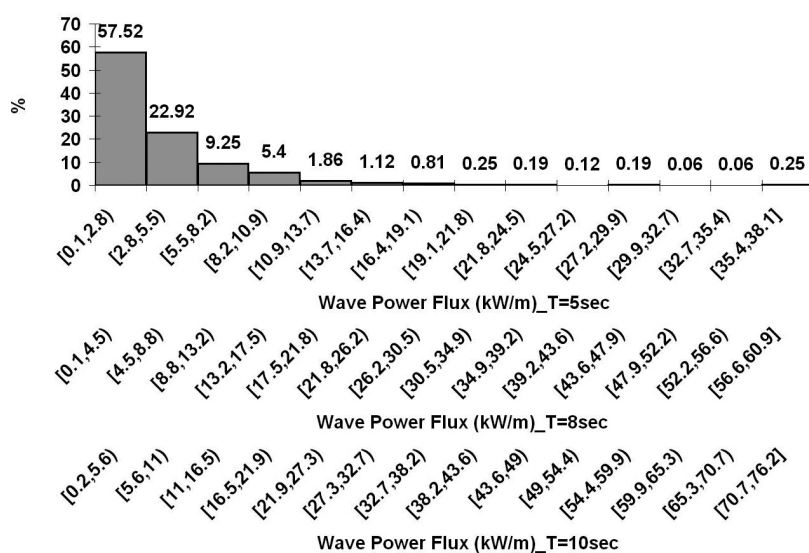
Εικόνα 4: Εποχικές μεταβολές κυματικής ενεργειακής πυκνότητας στη θέση P02 (Γαύδος).

χώρου τα στατιστικά στοιχεία της κυματικής ισχύος, θεωρώντας δύο τυπικές περιόδους κίνησης των κυμάτων, $T=5 \text{ sec}$ και $T=8 \text{ sec}$, οι οποίες αντιπροσωπεύουν συνήθεις τιμές για τις κυματολογικές συνθήκες στις ελληνικές θάλασσες. Όπως ήταν αναμενόμενο από τα προηγούμενα αποτελέσματα των κυματολογικών συνθηκών και της κυματικής ενεργειακής πυκνότητας, μεταξύ των θέσεων ενδιαφέροντος, κατά σειρά οι θέσεις P02 (Γαύδος), P06 (Αντικύθηρα), P14 (Κουφονήσι), P05 (Ζάκυνθος/Ηλεία) και P03 (Κάρπαθος) παρουσιάζουν κατά μέσο όρο και τις υψηλότερες τιμές κυματικής ισχύος ανεξάρτητα από την περίοδο των κυμάτων.

Είναι αυτονόητο ότι η κυματική ισχύς σε κάθε θέση μεταβάλλεται από μέρα σε μέρα ανάλογα με τις επικρατούσες κυματικές συνθήκες οι οποίες επηρεάζουν και την εκάστοτε περίοδο των κυματισμών. Για το λόγο αυτό, σε κάθε θέση ενδιαφέροντος έχουν επίσης υπολογιστεί αναλυτικότερα τα ποσοστά κατανομής κυματικής ισχύος για διαφορετικές περιόδους κυματισμών (από 5 sec μέχρι 14 sec), τα οποία ελλείψει χώρου δεν παρουσιάζονται στην παρούσα εργασία, αλλά τα αποτελέσματα των υπολογισμών είναι διαθέσιμα σε κάθε ενδιαφερόμενο. Στην Εικόνα 5, παρουσιάζονται ενδεικτικά τα ποσοστά κατανομής κυματικής ισχύος για τη θέση P02 (Γαύδος) θεωρώντας περιόδους κυματισμών $T=5, 8$ και 10 sec .



Χάρτης 4: Μέση κυματική ισχύς (σε kW/m) για θεωρούμενη περίοδο κυματισμών $T=5 \text{ sec}$.



Εικόνα 5: Ποσοστά κατανομής της κυματικής ισχύος (σε Wh/m) στη θέση P02 (Γαύδος), ανάλογα με την περίοδο των κυμάτων ($T = 5, 8$ και 10 sec).

Στον Πίνακα 3, ο δείκτης WEDI (Wave Energy Development Index), ο οποίος υπολογίζεται από το λόγο της μέσης κυματικής ισχύος (Mean Wave Energy Flux) ως

προς τη μέγιστη τιμή της παρατηρούμενης κυματικής ισχύος (Storm Wave Energy Flux) και εκφράζεται ως $100'(P_{Mean}/P_{Max})$, είναι ένας καθαρός αριθμός που πρακτικά βοηθάει στην κατάλληλη επιλογή θέσεων για την εγκατάσταση συστημάτων μετατροπής της ενέργειας των κυμάτων. Διότι μεταξύ δύο τοποθεσιών που έχουν κατά μέσο όρο ίδια επίπεδα κυματικής ισχύος, π.χ. μεταξύ των θέσεων P08 (Λέσβος) και P09 (Λήμνος), υποδηλώνεται ότι η τοποθεσία με το χαμηλότερο δείκτη WEDI (στη συγκεκριμένη περίπτωση, στη θέση P08) θα απαιτούσε εγκαταστάσεις μετατροπής κατάλληλα σχεδιασμένες για περισσότερο ανθεκτικές κατασκευές σε παραχώδεις κυματικές συνθήκες, με ανάλογες επιπτώσεις στο κόστος κατασκευής και λειτουργίας τους. Πρακτικά, εάν σε μια τοποθεσία ο δείκτης WEDI πλησιάζει τη μονάδα, σημαίνει ότι, κατά τη διάρκεια μιας ακραίας θαλασσοταραχής, οι εγκαταστάσεις και οι αγκυρώσεις ή οι πλωτήρες των μονάδων μετατροπής κυματικής ενέργειας

	P01 Άνδρος	P02 Γαύδος	P03 Κάρπαθος	P04 Αντίπαρος	P05 Ζάκυνθος/ Ηλεία	P06 Κύθηρα/ Αντικύθηρα	P07 Θερμαϊκός
# Days	1571	1610	1598	1594	1593	1585	1484
Mean	2.43/3.89	3.74/5.99	3.03/4.85	2.80/4.47	3.13/5.01	3.54/5.66	2.35/3.75
St Dev	2.86/4.57	4.09/6.55	3.18/5.09	3.06/4.89	3.71/5.94	3.95/6.31	2.99/4.78
Min	0.03/0.05	0.08/0.13	0.12/0.20	0.11/0.18	0.06/0.10	0.09/0.14	0.00/0.00
Q ₁	0.82/1.31	1.39/2.23	1.14/1.82	1.01/1.62	0.88/1.41	1.23/1.97	0.68/1.09
Median	1.51/2.41	2.37/3.80	1.99/3.19	1.77/2.83	1.89/3.02	2.14/3.42	1.39/2.22
Q ₃	2.91/4.66	4.54/7.27	3.76/6.02	3.43/5.49	3.66/5.86	4.46/7.13	2.76/4.42
Max	40.2/64.3	38.1/60.9	31.1/49.8	36.0/57.6	41.7/66.8	34.1/54.6	40.4/64.6
WEDI	6.0	9.8	9.7	7.8	7.5	10.4	5.8
	P08 Λέσβος	P09 Λήμνος	P10 Χίος	P11 Σκόπελος	P12 Αμοργός	P13 Ρόδος	P14 Κουφονήσι
#Days	1414	1414	1555	1514	1588	1593	1595
Mean	2.22/3.54	2.22/3.55	2.32/3.72	2.41/3.86	2.68/4.28	2.95/4.72	3.48/5.57
St Dev	2.97/4.75	3.05/4.88	2.70/4.32	3.09/4.94	2.90/4.63	3.09/4.94	3.69/5.91
Min	0.02/0.04	0.03/0.05	0.04/0.07	0.00/0.00	0.10/0.16	0.10/0.16	0.10/0.16
Q ₁	0.68/1.09	0.65/1.04	0.81/1.29	0.72/1.15	0.99/1.59	1.10/1.76	1.31/2.09
Median	1.23/1.98	1.22/1.95	1.46/2.33	1.42/2.27	1.72/2.75	1.95/3.12	2.30/3.69
Q ₃	2.53/4.04	2.50/4.00	2.75/4.40	2.84/4.55	3.22/5.15	3.65/5.84	4.13/6.61
Max	45.1/72.2	42.6/68.2	40.0/63.9	46.4/74.2	35.5/56.8	29.0/46.5	36.3/58.1
WEDI	4.9	5.2	5.8	5.2	7.5	10.2	9.6

Πίνακας 3: Στατιστικά στοιχεία για την ισχύ της κυματικής ενέργειας P (σε Wh/m) στα επιλεγμένα σημεία ενδιαφέροντος. Οι πρώτες τιμές αναφέρονται σε περίοδο $T=5 sec$ και οι δεύτερες σε περίοδο $T=8 sec$.

για να πρέπει να είναι σε θέση να απορροφήσουν 100 φορές περισσότερη κυματική ενέργεια από τα επίπεδα κυματικής ενέργειας για τα οποία θα είναι σχεδιασμένες να λειτουργούν υπό κανονικές μέσες κυματολογικές συνθήκες. Συγκριτικά, για τις επιλεγμένες τοποθεσίες της συγκεκριμένης μελέτης, η διακύμανση του δείκτη WEDI από 10.4 έως 4.9 σημαίνει ότι οποιεσδήποτε τυχόν εγκαταστάσεις στις τοποθεσίες αυτές θα πρέπει να μπορούν να ανταπεξέλθουν αντίστοιχα κατά 9 έως 20 φορές τα αντίστοιχα αναφερόμενα μέσα επίπεδα κυματικής ισχύος.

Μια προσεκτική ανάλυση των αποτελεσμάτων που περιέχονται στον Πίνακα 3 οδηγεί σε μια σειρά από χρήσιμες διαπιστώσεις. Από τις τιμές $Q1$ και $Q3$ συνάγεται, π.χ., ότι κατά το 50% της χρονικής περιόδου που εξετάστηκε, η κυματική ισχύς στη θέση P02 (Γαύδος) κυμαίνεται από 1.39 έως 4.54 kW/m (για κυματική περίοδο

$T=5 \text{ sec}$), ή από 2.23 έως 7.27 kW/m (για $T=8 \text{ sec}$), ενώ κατά το 25% του χρόνου η κυματική ισχύς υπερβαίνει την τιμή 4.54 kW/m με τιμές αιχμής μέχρι και 38.1 kW/m για $T=5 \text{ sec}$ ή, 7.27 kW/m, με τιμές αιχμής μέχρι και 60.9 kW/m για $T=8 \text{ sec}$.

Με βάση τις αναφερόμενες στον Πίνακα 3 μέσες τιμές της παρατηρούμενης κυματικής ισχύος (για $T=5$ και 8 sec), ένα πάρκο κυματικής ενέργειας στην περιοχή Β (Χάρτης 4), περιμέτρου περίπου 248 km γύρω από τη θέση $P02$ (Γαύδος) θα μπορούσε να εκμεταλλευτεί κατά μέσο όρο διαθέσιμη κυματική ενέργεια 0.93 GW (3.74 kW/m x 248 km), για κυματική περίοδο $T=5 \text{ sec}$, ή 1.5 GW (5.99 kW/m x 248 km), για $T=8 \text{ sec}$. Με βάση τα αντίστοιχα στοιχεία για τις θέσεις $P06$ (Αντικύθηρα) και $P03$ (Κάρπαθος) ή $P13$ (Ρόδος), τα επίπεδα διαθέσιμης κυματικής ενέργειας είναι 0.85 GW (3.54 kW/m x 240 km) ή 1.36 GW (5.66 kW/m x 240 km) στην περιοχή Α και 0.50 GW (2.99 kW/m x 170 km) ή 0.73 GW (4.28 kW/m x 170 km) στην περιοχή C.

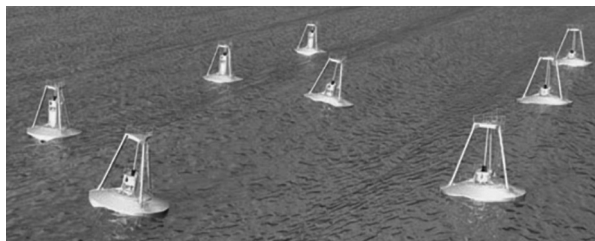
Στην πράξη, η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από έναν μετατροπέα κυματικής ενέργειας εξαρτάται από την απόδοση της μηχανικής διαδικασίας μετατροπής που χρησιμοποιείται και από τους περιορισμούς που επιβάλλονται από τη λειτουργία της εκάστοτε μονάδας εκμετάλλευσης της κυματικής ενέργειας. Για παράδειγμα, η πραγματικά διαθέσιμη κυματική ισχύς προέρχεται από διαφορετικές διευθύνσεις κυματισμών, ενώ οι περισσότερες συσκευές εκμετάλλευσης της κυματικής ενέργειας αξιοποιούν αποκλειστικά και μόνο κύματα των οποίων το επερχόμενο μέτωπο είναι κατάλληλα προσανατολισμένο στη κυρίαρχη κατεύθυνση που απαιτείται από τον εκάστοτε μετατροπέα. Με άλλα λόγια, η κυματική ισχύς που αξιοποιείται τελικά είναι μικρότερη από τη διαθέσιμη. Στα απλούστερα μοντέλα υπολογισμού της τεχνικά εφικτής παραγόμενης ενέργειας, θεωρείται ότι η αρχικά διαθέσιμη ισχύς των κυμάτων μειώνεται κατά ένα *συντελεστή κατευθυντικότητας* DF (Directional Factor), ενώ μειώνεται περαιτέρω κατά ένα επιπλέον *συντελεστή απόδοσης* CF (Capacity Factor) που κυμαίνεται από 30 έως 60% και εξαρτάται από τον τύπο και το σχεδιασμό της εκάστοτε μονάδας εκμετάλλευσης της κυματικής ενέργειας. Στον Πίνακα 4, αναφέρονται ενδεικτικά οι εκτιμήσεις της αξιοποιήσιμης κυματικής ενέργειας στα επιλεγμένα σημεία της συγκεκριμένης μελέτης, θεωρώντας την εγκατάσταση ενός σημειακού απορροφητήρα κυματικής ενέργειας (Point Absorber) διαμέτρου $D=10 \text{ m}$, με $DF=0.9$ και $CF=0.57$. Με P_I (σε kW) συμβολίζεται η μέση διαθέσιμη κυματική ενέργεια του επερχόμενου κύματος (Average Power Incident), η οποία είναι συνάρτηση της μέσης κυματικής ισχύος (όπως αυτή υπολογίστηκε από τα αλτιμετρικά δεδομένα, βλ. και Πίνακα 3), του συντελεστή DF και της διαμέτρου του σημαντήρα του σημειακού απορροφητήρα. Η *αξιοποιήσιμη κυματική ενέργεια* (Captured Power) που αποδίδεται από τον σημαντήρα υπολογίζεται ως $P_C = P_I (D_\lambda / D)$ και εξαρτάται από το μήκος D_λ του μετώπου του επερχόμενου κύματος που, με τη σειρά του, εξαρτάται από την περίοδο κυματισμού και υπολογίζεται ως (δηλ. $D_\lambda = 6.2 \text{ m}$ και $D_\lambda = 15 \text{ m}$ για τις αντίστοιχα θεωρούμενες περιόδους κυματισμών $T=5 \text{ sec}$ και $T=8 \text{ sec}$). Η μέση τεχνικά εφικτή παραγόμενη ενέργεια υπολογίζεται τελικά ως $P_{Out} = P_C * CF$ (σε kW). Η ετήσια παραγόμενη ενέργεια (σε MWh) υπολογίζεται θεωρώντας συνεχή λειτουργία της μονάδας μετατροπής, δηλ. για 8.760 ώρες καθ' όλη τη διάρκεια του έτους.

Ενδεικτικά, οι περιοχές Α, Β και C που αναφέρθηκαν ως παραδείγματα στο Χάρτη 5 θα μπορούσαν να αξιοποιηθούν με την εγκατάσταση μικρών «πάρκων κυματικής ενέργειας» αποτελούμενα, π.χ., από κατάλληλες συστοιχίες πολλα-

P01	P02 Άνδρος	P03 Γαύδος	P04 Κάρπαθος	P05 Αντίπαρος	P06 Ζάκυνθος/ Ηλεία	P07 Κύθηρα/ Αντικύθηρα	Θερμαϊκός
# Days	1571	1610	1598	1594	1593	1585	1484
Mean	2.43/3.89	3.74/5.99	3.03/4.85	2.80/4.47	3.13/5.01	3.54/5.66	2.35/3.75
P_I , kW	21.87/35.01	33.66/53.91	27.27/43.65	25.2/40.23	28.17/45.09	31.86/50.94	21.15/33.75
P_C , kW	13.56/52.52	20.87/80.87	16.91/65.48	15.62/60.35	17.47/67.64	19.75/76.41	13.11/50.63
P_{Out} , kW	7.73/29.93	11.9/46.09	9.64/37.32	8.91/34.40	9.96/38.55	11.26/43.55	7.47/28.86
Ετήσια ΠΕ, MWh	67.7/262.2	104.2/403.8	84.42/326.9	78.01/301.3	87.21/337.7	98.63/381.5	65.48/252.8
	P08 Λέσβος	P09 Λήμνος	P10 Χίος	P11 Σκόπελος	P12 Αμοργός	P13 Ρόδος	P14 Κουφονήσι
#Days	1414	1414	1555	1514	1588	1593	1595
Mean	2.22/3.54	2.22/3.55	2.32/3.72	2.41/3.86	2.68/4.28	2.95/4.72	3.48/5.57
P_I , kW	19.98/31.86	19.98/31.95	20.88/33.48	21.69/34.74	24.12/38.52	26.55/42.48	31.32/50.13
P_C , kW	12.39/47.79	12.39/47.93	12.95/50.22	13.45/52.11	14.95/57.78	16.46/63.72	19.42/75.20
P_{Out} , kW	7.06/27.24	7.06/27.32	7.38/28.63	7.67/29.70	8.52/32.93	9.38/36.32	11.07/42.86
Ετήσια ΠΕ, MWh	61.85/238.6	61.85/239.3	64.64/250.8	67.15/260.2	74.67/288.5	82.19/318.2	96.96/375.5

Πίνακας 4: Εκτιμήσεις της τεχνικά αξιοποιήσιμης κυματικής ενέργειας από ένα τυπικό απορροφητήρα κυματικής ενέργειας στα επιλεγμένα σημεία ενδιαφέροντος. Οι πρώτες τιμές αναφέρονται σε περίοδο $T=5 \text{ sec}$ και οι δεύτερες σε περίοδο $T=8 \text{ sec}$.

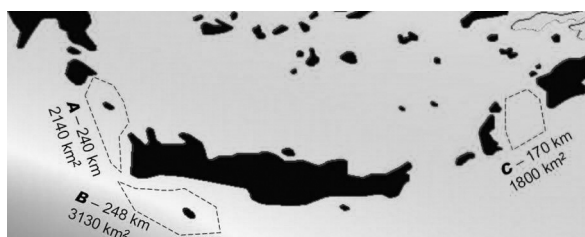
πλών σημειακών απορροφητήρων κυματικής ενέργειας (arrays of point absorbers), όπως φαίνεται στην Εικόνα 6. Στη συγκεκριμένη ενδεικτική συστοιχία, μια μέση απόσταση περίπου 20 m μεταξύ γειτονικών σημαντήρων (έκαστος διαμέτρου 10 m) δημιουργεί μια εξαγωνική διάταξη διαμέτρου περίπου 300 m.



Εικόνα 6: Τυπική διάταξη συστοιχίας σημειακών απορροφητήρων κυματικής ενέργειας, εν είδη πάρκου κυματικής ενέργειας.

Το πλεονέκτημα τέτοιων διατάξεων σημαντήρων είναι ότι συνολικά μπορούν να απορροφήσουν ένα μεγάλο ποσοστό της εισερχόμενης κυματικής ενέργειας και συνεπώς να παράγουν σημαντικές ποσότητες ηλεκτρικής ενέργειας, ακόμη και από τις θαλάσσιες ζώνες με πιο ήπιο κυματολογικό κλίμα, όπως στην περίπτωση των ελληνικών θαλασσών. Συγκεκριμένα, η πρώτη σειρά των σημαντήρων που είναι κατάλληλα προσανατολισμένοι ως προς τη κυρίαρχη διεύθυνση του πεδίου των κυματισμών θα λαμβάνουν μεγαλύτερη ενέργεια από εκείνους που είναι στο πίσω μέρος μιας τέτοιας συστοιχίας (shadowing effect). Ωστόσο, με κατάλληλα επιλεγμένη απόσταση μεταξύ των σημαντήρων το ποσοστό απώλειας της διαθέσιμης εισερχόμενης κυματικής ισχύος από μια σειρά σημαντήρων στην επόμενη σειρά μπορεί τυπικά να διατηρηθεί σε επίπεδα του 2% ή μικρότερα. Δη-

Χάρτης 5: Ενδεικτικές υποψήφιες περιοχές εγκατάστασης μονάδων μετατροπής κυματικής ενέργειας.



λαδή για τη σειρά n ($n=2,3,\dots$) των σημαντήρων, η εισερχόμενη κυματική ισχύς θα μετριαστεί στο επίπεδο $0.98^{(n-1)}$ της αρχικά διαθέσιμης κυματικής ισχύος. Με τον τρόπο αυτό, μια συστοιχία 85 σημειακών απορροφητήρων, όπως φαίνεται στην Εικόνα 6, τοποθετημένη παραδείγματος χάριν στην περιοχή B θέση P02 (Γαύδος), θα μπορούσε να παράγει σε ετήσια βάση 8.02 GWh ενέργειας για κυματική περίοδο $T=5 \text{ sec}$ (συγκριτικά με τα 104.2 MWh ετήσιας παραγωγής ενός και μόνο σημειακού απορροφητήρα, βλ. Πίνακα 4) ή 31.07 GWh για κυματική περίοδο $T=8 \text{ sec}$. Τα ετήσια επίπεδα παραγωγής ενέργειας από την εγκατάσταση μιας παρόμοιας συστοιχίας στην περιοχή A γύρω από τη θέση P06 (Αντικύθηρα) θα ανέρχονται στα επίπεδα 7.59 GWh και 29.36 GWh (αντίστοιχα για $T=5 \text{ sec}$ και $T=8 \text{ sec}$), ενώ για την περιοχή C μεταξύ των θέσεων P03 (Κάρπαθος) και P13 (Ρόδος) στα επίπεδα 6.41 GWh και 24.82 GWh αντίστοιχα.

4. Ανακεφαλαίωση και συμπεράσματα

Προκειμένου να εκτιμηθεί η σημασία των συγκεκριμένων επιπέδων κυματικής ισχύος στις ελληνικές θάλασσες, αξίζει να σημειωθεί ότι, αν και οι παρατηρούμενες τιμές της διαθέσιμης κυματικής ισχύος στις θέσεις που εξετάστηκαν στο πλαίσιο της συγκεκριμένης μελέτης μπορεί να θεωρηθούν ως χαμηλού ενεργειακού δυναμικού, ωστόσο είναι συγκρίσιμες με εκείνες των τοποθεσιών στην υφαλοκρηπίδα του Βελγίου και για ορισμένα σημεία στις ακτές της Ολλανδίας, όπως προκύπτει από ανάλογες μελέτες για διάφορες τοποθεσίες στη Βόρεια Θάλασσα (Beels κ.ά. 2007). Επιπλέον, είναι σημαντικά υψηλότερες από τα αντίστοιχα επίπεδα αξιοποιήσιμης κυματικής ενέργειας σε αντίστοιχες υποψήφιες παράκτιες περιοχές προς το Αιγαίο, όπου η γειτονική Τουρκία επικεντρώνει το ενδιαφέρον της για την εγκατάσταση μονάδων μετατροπής κυματικής ενέργειας, όπως δείχνει η πρόσφατη μελέτη των Sağlam κ.ά. (2010).

Από τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την ανάλυση πλέον των 4 ετών διαθέσιμων δορυφορικών αλτιμετρικών δεδομένων μέτρησης του σημαντικού ύψους κύματος, συνάγεται ότι οι ελληνικές θάλασσες διαθέτουν σημαντικό αξιοποιήσιμο θαλάσσιο δυναμικό κυματικής ενέργειας, με τις περιοχές του νοτιοδυτικού Αιγαίου να εμφανίζουν από τα υψηλότερα επίπεδα της Μεσογείου. Η εκμετάλλευση αυτού του κυματικού ενεργειακού δυναμικού θα μπορούσε να καλύψει σημαντικό ποσοστό των ενεργειακών αναγκών των νησιών μας. Από τα στοιχεία που παρουσιάστηκαν προκύπτει ότι συγκεκριμένες περιοχές (π.χ. Γαύδος, Κουφονήσι, Ρόδος κ.ά.) παρουσιάζουν αξιοσημείωτα επίπεδα διαθέσιμης κυματικής ισχύος, τα οποία δημιουργούν την προσδοκία και τις προϋποθέσεις για μεγαλύτερη εντατικοποίηση της ευρύτερης ενεργειακής και οικονομικής αποτίμησης του κυματικού ενεργειακού δυναμικού των συγκεκριμένων περιοχών, με στόχο τον κα-

λύτερο σχεδιασμό για τη μεγαλύτερη διεύθυνση ΑΠ κυματικής ενέργειας στην κατανεμημένη παραγωγή ενέργειας των νησιών. Ως άμεσο επόμενο βήμα προς αυτή την κατεύθυνση θεωρείται απαραίτητο να γίνει μια διεξοδικότερη μελέτη για τις περιοχές που εξετάστηκαν στην παρούσα εργασία. Σε αυτήν προτείνεται να εξεταστούν πιθανές επιπτώσεις στο θαλάσσιο περιβάλλον και οικοσύστημα από την κατασκευή και λειτουργία υπεράκτιων πάρκων κυματικής ενέργειας, ανάλογων εκείνων των υπεράκτιων αιολικών πάρκων (Καλογεροπούλου 2010), προκειμένου να διαπιστωθεί περαιτέρω η καταλληλότητα των εν λόγω περιοχών ως προς άλλα σημαντικά κριτήρια επιλογής όπως: οπτική όχληση από την ακτή, τυχόν αλλαγές στο φυσικό θαλάσσιο περιβάλλον και υποβάθμιση των ενδιατημάτων των θαλάσσιων οργανισμών, επιπτώσεις στις θαλάσσιες μεταφορές και τη διακίνηση σκαφών, εάν η περιοχή είναι προστατευόμενη, κ.λπ. Με τον τρόπο αυτό θα αναδειχθούν τα ειδικά πλεονεκτήματα (και μειονεκτήματα) κάθε περιοχής, ώστε μελλοντικές δράσεις αξιοποίησης της κυματικής ενέργειας στον ελλαδικό νησιωτικό χώρο να έχουν το αναμενόμενο αναπτυξιακό και περιβαλλοντικό αποτέλεσμα.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Barstow, S.F., Haug, O. και Krogstad, H.E. (1998), *Satellite Altimeter Data in Wave Energy Studies*, Proc. *WAVES'97*, ASCE, Vol. 2: 339-354.
- Beels, C., Henriques, J.C.C., De Rouck, J., Pontes, M.T., De Backer, G. και Verhaeghe, H. (2007), *Wave energy resource in the North Sea*, Proc. of the 7th European Wave and Tidal Energy Conference, Porto, Portugal.
- Centre for Renewable Energy Sources, CRES (2006), «Ocean Energy Conversion in Europe. Recent advancements and prospects, published in the framework of the “Coordinated Action on Ocean Energy”», EU project under FP6 Priority: 6.1.3.2.3, Renewable Energy Technologies.
- Hellenic Centre for Marine Research (2010), «Poseidon System», στο <http://www.poseidon.hcmr.gr/index.php> (τελευταία επίσκεψη 15.07.2010).
- Henfridsson, U., Neimane, V., Strand, K., Kapper, R., Bernhoff, H., Danielsson, O., Leijon, M., Sundberg J., Thorburn, K., Ericsson, E. και Bergman, K. (2006), «Wave energy potential in the Baltic Sea and the Danish part of the North Sea, with reflections on the Skagerrak», *Renewable Energy* 32(2), Οκτώβριος: 2069-2084.
- Καλογεροπούλου, Τ.Χ. (2010), *Υπεράκτια Αιολικά Πάρκα*, Διπλωματική Εργασία, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- Lefèvre, J.M., Aouf, L., Skandrani, C. και Queffeuilou, P., 2006, *Contribution of Satellite Altimetry to Wave Analysis and Forecasting*, 15 years of progress in radar altimetry Symposium, Venice, Italy.
- Μανούρης, Γ.Κ., Γιούτσου, Α. και Κασσιός, Κ. (2005), *Εκτίμηση περιβαλλοντικών επιπτώσεων και παράκτιες ζώνες*, Heleco '05, ΤΕΕ, Αθήνα, 3-6 Φεβρουαρίου.
- Μουρμούρη, Α. (2010), «Ολοκληρωμένη διαχείριση παράκτιων περιοχών. Επτά ζητήματα-κλειδιά για την εφαρμογή της», *Τεχνικά Χρονικά*, Μάρτιος-Απρίλιος 2010: 83-95.
- Pontes, T.M. (1998), «Assessing the European Wave Energy Resource», *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering* 120: 226-231.
- Pontes, T.M. και Falcão A. (2001), *Ocean Energies. Resources and Utilization*, World Energy Council 18th Congress, Buenos Aires, October.
- Sağlam, M., Sulukan, E. και Uyar, T.S. (2010), «Wave Energy and Technical Potential of Turkey», *Journal of Naval Science and Engineering* 6(2): 34-50.
- Σουκισιάν, Τ.Χ. και Προσπαθόπουλος, Α.Μ. (2003), «Εφαρμογή του Κυματικού Μοντέλου 3ης Γενιάς WAM-Cycle 4 στο Αιγαίο Πέλαγος», *Τεχν. Χρον. Επιστ. Έκδ. ΤΕΕ* 1-2: 7-19.
- U.S. Army Corps of Engineers (USCOE) (2002), *Engineering and Design-Coastal Engineering Manual – Part II*, EM 1110-2-1100, CECW-EW Washington, DC 20314-1000.
- WAMDI-Group (1988), «The WAM model. A third-generation ocean wave prediction model», *Journal Phys. Oceanography* 18(12): 1775-1810.
- World Energy Council, WEC (1993), *Renewable Energy Sources: 2000-2020. Opportunities and Constraints*, Λονδίνο: World Energy Council.
- World Meteorological Organization, WMO (1998), *Guide to Wave Analysis and Forecasting*, WMO No 702, δεύτερη έκδοση.