



## ΠΡΑΞΗ

«Γαλάζια Ανάπτυξη με Καινοτομία και εφαρμογή στις

Ελληνικές Θάλασσες - ΓΛΑΥΚΗ»

κωδικός ΟΠΣ (MIS) 5002438

### Υποέργο 2

*«Ανάπτυξη της Βάσης Δεδομένων και Γεωχωρικών  
Πληροφοριών του ΥΣ Ρόδου/ΕΛΚΕΘΕ για το Θαλάσσιο  
Χωροτακτικό Σχεδιασμό και την Ολοκληρωμένη Διαχείριση  
της Παράκτιας Ζώνης στη ν. Ρόδο»*

Πακέτο εργασίας 2 : Θαλάσσια Ενέργεια

Υπεύθυνος Πακέτου Εργασίας: Δρ. Τ. Σουκισιάν

*Παραδοτέο:*

Ανάπτυξη-εφαρμογή μεθοδολογίας για την εκτίμηση υβριδικού  
θαλάσσιου δυναμικού και της μεταβλητότητάς του στη ν. Ρόδο

Υλοποίηση :

Φ. Καραθανάση, Δρ. Τ. Σουκισιάν

Μάρτιος 2021

## Περιεχόμενα

Περίληψη.....	6
1. Εισαγωγή .....	7
2. Ανάπτυξη Μεθοδολογίας.....	11
2.1 Αξιολόγηση γραμμικών μεταβλητών .....	12
2.2 Αξιολόγηση κατευθυντικών μεταβλητών .....	14
2.3 Στατιστικά μεγέθη γραμμικών και κατευθυντικών μεταβλητών για την περιγραφή του ανεμολογικού και κυματικού κλίματος .....	15
2.4 Εκτίμηση υπεράκτιου αιολικού δυναμικού και ροή κυματικής ενέργειας... 17	
2.5 Διδιάστατες κατανομές ανεμολογικών και κυματικών παραμέτρων .....	20
3. Δεδομένα.....	24
3.1 Ανεμολογικά δεδομένα.....	24
3.2 Κυματικά δεδομένα .....	26
4. Αριθμητικά αποτελέσματα.....	27
4.1 Έλεγχος συνταυτισμένων σημείων αριθμητικού μοντέλου και δορυφορικών δεδομένων για την ταχύτητα και διεύθυνση ανέμου.....	27
4.2 Αριθμητικά αποτελέσματα ανεμολογικών και κυματικών παραμέτρων.....	35
4.3 Αριθμητικά αποτελέσματα για το υπεράκτιο αιολικό δυναμικό και την ροή κυματικής ενέργειας.....	42
4.4 Αριθμητικά αποτελέσματα για τις κατανομές ανεμολογικών και κυματικών χαρακτηριστικών.....	46
5. Συμπεράσματα .....	54
Κατάλογος Βιβλιογραφίας .....	54
Παράρτημα.....	57
Α. Μηνιαία κλίμακα αναφοράς για το υπεράκτιο αιολικό δυναμικό.....	57
Β. Μηνιαία κλίμακα αναφοράς για τη ροή κυματικής ενέργειας .....	59

## Περιεχόμενα Εικόνων

Εικόνα 1. Συνταυτισμένα σημεία αριθμητικού μοντέλου ΣΚΙΡΟΝ-ΕΤΑ και δορυφορικών δεδομένων από τη βάση Blended Sea Winds.....	29
Εικόνα 2. Διάγραμμα διασποράς μαζί με τη γραμμή παλινδρόμησης $y = x$ των ταχυτήτων ανέμου για τα δεδομένα από τη βάση ΣΚΙΡΟΝ και BSW στο σημείο α) 1, β) 2, γ) 3, δ) 4, ε) 5, στ) 6, ζ) 7, η) 8 και θ) 9. ....	33
Εικόνα 3. Ροδογράμματα της διεύθυνσης του ανέμου για τα δεδομένα από τη βάση ΣΚΙΡΟΝ και BSW στο σημείο α) 1, β) 2, γ) 3, δ) 4, ε) 5, στ) 6, ζ) 7, η) 8 και θ) 9.. ..	36
Εικόνα 4. (α) Μέση ετήσια ταχύτητα και διεύθυνση ανέμου, (β) μέση ετήσια μεταβλητότητα και (γ) υπερετήσια μεταβλητότητα της ταχύτητας ανέμου. ....	37
Εικόνα 5. (α) Μέσο ετήσιο σημαντικό ύψος κύματος και διεύθυνση διάδοσης κυματισμού, (β) μέση ετήσια μεταβλητότητα και (γ) υπερετήσια μεταβλητότητα του σημαντικού ύψους κύματος. ....	38
Εικόνα 6. (α) Μέση ετήσια ενεργειακή περίοδος, (β) μέση ετήσια μεταβλητότητα και (γ) υπερετήσια μεταβλητότητα της ενεργειακής περιόδου. ....	39
Εικόνα 7. Μέση ταχύτητα και διεύθυνση ανέμου για (α) το χειμώνα, (β) την άνοιξη, (γ) το καλοκαίρι και (δ) το φθινόπωρο. ....	40
Εικόνα 8. (α) Μέσο σημαντικό ύψος κύματος και διεύθυνση διάδοσης κυματισμού για (α) το χειμώνα, (β) την άνοιξη, (γ) το καλοκαίρι και (δ) το φθινόπωρο. ....	41
Εικόνα 9. Μέση ενεργειακή περίοδος για (α) το χειμώνα, (β) την άνοιξη, (γ) το καλοκαίρι και (δ) το φθινόπωρο. ....	42
Εικόνα 10. (α) Μέσο ετήσιο υπεράκτιο αιολικό δυναμικό, (β) μέση ετήσια μεταβλητότητα και (γ) υπερετήσια μεταβλητότητα του υπεράκτιου αιολικού δυναμικού. ....	43
Εικόνα 11. Μέσο υπεράκτιο αιολικό δυναμικό για (α) το χειμώνα, (β) την άνοιξη, (γ) το καλοκαίρι και (δ) το φθινόπωρο. ....	44
Εικόνα 12. (α) Μέση ετήσια ροή κυματικής ενέργειας, (β) μέση ετήσια μεταβλητότητα και (γ) υπερετήσια μεταβλητότητα της ροής κυματικής ενέργειας .....	45
Εικόνα 13. Μέση ροή κυματικής ενέργειας για (α) το χειμώνα, (β) την άνοιξη, (γ) το καλοκαίρι και (δ) το φθινόπωρο. ....	46

Εικόνα 14. Ιστόγραμμα και θεωρητικές κατανομές για (α) την ταχύτητα ανέμου, (β) το αιολικό δυναμικό, (γ) το σημαντικό ύψος κύματος, (δ) την ενεργειακή περίοδο, και (ε) τη ροή κυματικής ενέργειας. ....	50
Εικόνα 15. Ιστόγραμμα και θεωρητική κατανομή για (α) την διεύθυνση ανέμου και (β) τη διεύθυνση διάδοσης κύματος. ....	51
Εικόνα 16. Διδιάστατες κατανομές πυκνότητας πιθανότητας για το σημαντικό ύψος κύματος και την ενεργειακή περίοδο. ....	52
Εικόνα 17. Διδιάστατες κατανομές πυκνότητας πιθανότητας για (α) ταχύτητα ανέμου-διεύθυνση ανέμου, (β) αιολικό δυναμικό-διεύθυνση ανέμου, (γ) σημαντικό ύψος κύματος-διεύθυνση κύματος, (δ) ενεργειακή περίοδο-διεύθυνση κύματος, και (ε) ροή κυματικής ενέργειας-διεύθυνση κύματος.....	53
Εικόνα Α.1. Μέσο υπεράκτιο αιολικό δυναμικό για (α) τον Ιανουάριο, (β) το Φεβρουάριο, (γ) το Μάρτιο, (δ) τον Απρίλιο, (ε) το Μάιο και (στ) τον Ιούλιο.....	57
Εικόνα Α.2. Μέσο υπεράκτιο αιολικό δυναμικό για (α) τον Ιούλιο, (β) τον Αύγουστο, (γ) το Σεπτέμβριο, (δ) τον Οκτώβριο (ε) το Νοέμβριο και (στ) τον Δεκέμβριο.....	58
Εικόνα Β.1. Μέση ροή κυματικής ενέργειας για (α) τον Ιανουάριο, (β) το Φεβρουάριο, (γ) το Μάρτιο, (δ) τον Απρίλιο, (ε) το Μάιο και (στ) τον Ιούλιο. ....	59
Εικόνα Β.2. Μέση ροή κυματικής ενέργειας για (α) τον Ιούλιο, (β) τον Αύγουστο, (γ) το Σεπτέμβριο, (δ) τον Οκτώβριο (ε) το Νοέμβριο και (στ) τον Δεκέμβριο. ....	60

## Περιεχόμενα Πινάκων

Πίνακας 1. Οι εκφράσεις του συντελεστή συσχέτισης Kendall τ για Αρχιμήδειες συζεύξεις. ....	23
Πίνακας 2. Γεωγραφικές συντεταγμένες και χρονική κάλυψη συνταυτισμένων σημείων.....	28
Πίνακας 2. Βασικά στατιστικά μεγέθη για την ταχύτητα του ανέμου στα συνταυτισμένα σημεία για τα δορυφορικά δεδομένα BSW και τα αποτελέσματα του αριθμητικού μοντέλου SKIPON... ..	30

Πίνακας 3. Βασικά στατιστικά μεγέθη για την διεύθυνση του ανέμου στα συνταυτισμένα σημεία για τα δορυφορικά δεδομένα BSW και τα αποτελέσματα του μοντέλου ΣΚΙΡΟΝ. ....	31
Πίνακας 4. Στατιστικά μέτρα για την αξιολόγηση της ταχύτητας του ανέμου από τα αποτελέσματα του μοντέλου ΣΚΙΡΟΝ με αναφορά τα δορυφορικά δεδομένα BSW. Οι αριθμοί με χαρακτήρα αφορούν τις καλύτερες τιμές για κάθε στατιστικό μέτρο. ....	32
Πίνακας 5. Στατιστικά μέτρα για την αξιολόγηση της διεύθυνσης του ανέμου από τα αποτελέσματα του μοντέλου ΣΚΙΡΟΝ με αναφορά τα δορυφορικά δεδομένα BSW. Οι αριθμοί με χαρακτήρα αφορούν τις καλύτερες τιμές για κάθε στατιστικό μέτρο. ....	34
Πίνακας 6. Συντελεστές συσχέτισης Pearson μεταξύ των μεταβλητών ενδιαφέροντος. ....	47
Πίνακας 7. Αριθμητικές τιμές από τα στατιστικά κριτήρια καλής προσαρμογής για την ταχύτητα του ανέμου. Με έντονη γραμματοσειρά επισημαίνονται οι καλύτερες τιμές για κάθε κριτήριο. ....	48
Πίνακας 8. Αριθμητικές τιμές από τα στατιστικά κριτήρια καλής προσαρμογής για το αιολικό δυναμικό. Με έντονη γραμματοσειρά επισημαίνονται οι καλύτερες τιμές για κάθε κριτήριο. ....	49
Πίνακας 9. Αριθμητικές τιμές από τα στατιστικά κριτήρια καλής προσαρμογής για το σημαντικό ύψος κύματος. Με έντονη γραμματοσειρά επισημαίνονται οι καλύτερες τιμές για κάθε κριτήριο. ....	49
Πίνακας 10. Αριθμητικές τιμές από τα στατιστικά κριτήρια καλής προσαρμογής για την ενεργειακή περίοδο. Με έντονη γραμματοσειρά επισημαίνονται οι καλύτερες τιμές για κάθε κριτήριο. ....	49
Πίνακας 11. Αριθμητικές τιμές από τα στατιστικά κριτήρια καλής προσαρμογής για τη ροή της κυματικής ενέργειας. ....	51

## Περίληψη

Στο παρόν παραδοτέο Π 2.1., γίνεται η αναλυτική περιγραφή των βασικών στατιστικών παραμέτρων για τα ανεμολογικά και κυματικά χαρακτηριστικά στη θαλάσσια περιοχή ανοικτά της Ρόδου με τη χρήση μακροπρόθεσμων δεδομένων αιολικών και κυματικών χαρακτηριστικών υψηλής ανάλυσης. Η στατιστική ανάλυση περιλαμβάνει την ταχύτητα και διεύθυνση του ανέμου (σε ύψος 10 m πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας) καθώς και το σημαντικό ύψος κύματος, την ενεργειακή περίοδο και τη μέση διεύθυνση διάδοσης κυματισμού σε ετήσια και εποχιακή κλίμακα. Επιπρόσθετα, παρατίθενται ορισμένα αποτελέσματα που είναι ιδιαίτερης σημασίας για την επιλογή θέσεων εγκατάστασης υπεράκτιων αιολικών και κυματικών πάρκων (και τα οποία σχετίζονται κυρίως με τη μέση ετήσια και τη διαχρονική μεταβλητότητα των βασικών ανεμολογικών και κυματικών μεγεθών) καθώς και αποτελέσματα για την διεύθυνση ανέμου και τη μέση διεύθυνση διάδοσης της κατάστασης θάλασσας (sea state). Το δυναμικό υπεράκτιας αιολικής ενέργειας και η μεταβλητότητά του εκτιμώνται επίσης σε ένα τυπικό ύψος λειτουργίας των υπεράκτιων ανεμογεννητριών (100 m πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας), ενώ παρουσιάζεται και η χωρική κατανομή της ροής της κυματικής ενέργειας στις δύο βασικές χρονικές κλίμακες αναφοράς, ετήσια και εποχιακή. Τα αποτελέσματα για την μηνιαία κλίμακα αναφοράς για τις δύο τελευταίες μεταβλητές παρατίθενται στο Παράρτημα. Τέλος, παρατίθενται αποτελέσματα για τις διδιάστατες κατανομές γραμμικών-γραμμικών μεταβλητών καθώς και γραμμικών-κατευθυντικών μεταβλητών τόσο ανεμολογικών όσο και κυματικών χαρακτηριστικών.

## 1. Εισαγωγή

Μέσα από τις Ευρωπαϊκές Οδηγίες για τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ) με χρονικό ορίζοντα τα έτη 2020 και 2030, η προώθηση της Γαλάζιας Ενέργειας (blue energy) έχει καταστεί επιτακτική ανάγκη τόσο για απεξάρτηση από τη χρήση ορυκτών καυσίμων και τη μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα όσο και για τη διασφάλιση θεμάτων ενεργειακής ασφάλειας. Οι θάλασσες και οι ωκεανοί, ως οι μεγαλύτεροι συλλέκτες ηλιακής ακτινοβολίας, αποτελούν μια καθαρή, ανεξάντλητη και ανανεώσιμη δεξαμενή ενέργειας. Ο όρος «Γαλάζια Ενέργεια» (Blue Energy) περιλαμβάνει όλες τις μορφές ενέργειας που μπορούν να απομαστευθούν από τους ωκεανούς, και ανάλογα με την προέλευσή τους, μπορούν να ταξινομηθούν στις εξής κατηγορίες: α) κυματική ενέργεια, β) ενέργεια από τα ρεύματα ή/και τις παλίρροιες, γ) ενέργεια από τις διαβαθμίσεις της θερμότητας και της αλατότητας, καθώς και δ) υπεράκτια (θαλάσσια) αιολική ενέργεια. Εκτός από τα συνήθη και προφανή πλεονεκτήματα αυτών των μορφών ενέργειας συμπεριλαμβάνονται, μεταξύ άλλων, οι μεγαλύτερες ενεργειακές αποδόσεις και, για ορισμένες μορφές, η αδιάκοπη παροχή, ενώ από την πλευρά της οικονομικής ανάπτυξης, τέτοιου είδους επενδύσεις μπορούν να ενισχύσουν την τοπική και περιφερειακή οικονομική δραστηριότητα με τη δημιουργία νέων θέσεων εργασίας και την ανάπτυξη νέων προϊόντων, υπηρεσιών και υποδομών.

Από τις ανωτέρω μορφές Γαλάζιας Ενέργειας, η πιο ευρέως διαδεδομένη και αναπτυγμένη είναι η υπεράκτια αιολική ενέργεια, που οφείλεται στην κινητική ενέργεια του ανέμου που πνέει πάνω από υδάτινες μάζες. Οι λόγοι που συντελούν για αυτό είναι κυρίως η ώριμη τεχνολογία των χερσαίων αιολικών ανεμογεννητριών, αλλά και ο περιορισμός των ευνοϊκών χερσαίων χώρων για τέτοιου είδους επενδύσεις, σε συνδυασμό με την αυξανόμενη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας και την επιτακτικότερη ανάγκη για παραγωγή καθαρής ενέργειας μέσω ΑΠΕ. Τα κυριότερα πλεονεκτήματα της υπεράκτιας αιολικής ενέργειας συνοψίζονται στα εξής: 1) στους ανέμους ισχυρής εντάσεως και χαμηλής μεταβλητότητας που πνέουν πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας, 2) τον διαθέσιμο και εκτεταμένο θαλάσσιο χώρο για την εγκατάσταση υπεράκτιων ανεμογεννητριών, 3) τη μειωμένη οπτική και ακουστική όχληση στις τοπικές παράκτιες κοινωνίες σε σύγκριση με τα χερσαία αιολικά πάρκα. Ο ρυθμός ανάπτυξης των Θαλάσσιων Αιολικών Πάρκων (ΘΑΠ) από το 1991, με τη λειτουργία

του πρώτου ΘΑΠ στη Δανία συνολικής ισχύος 4,95 MW, μέχρι σήμερα είναι αλματώδης. Ενδεικτικά, στο τέλος του 2019 η συνολική εγκατεστημένη ισχύς σε ευρωπαϊκό επίπεδο ξεπέρασε τα 22 GW, με το Ηνωμένο Βασίλειο, τη Γερμανία και τη Δανία να βρίσκονται στις τρεις πρώτες θέσεις με τις περισσότερες συνδεδεμένες ανεμογεννήτριες στο δίκτυο (WindEurope, 2020). Το Σεπτέμβριο του 2018, τέθηκε σε λειτουργία το μεγαλύτερο παγκοσμίως ΘΑΠ ανοικτά της βορειοδυτικής πλευράς της Αγγλίας με συνολική εγκατεστημένη ισχύ 659 MW (Walney Extension), ικανό να ηλεκτροδοτήσει περίπου 600.000 νοικοκυριά στο Ηνωμένο Βασίλειο, ενώ από τον Οκτώβριο του 2017 λειτουργεί και το πρώτο πλωτό αιολικό πάρκο (Hywind Scotland) στη Σκωτία, συνολικής ισχύος 30 MW. Παρόλα αυτά υπάρχουν αρκετά τεχνικά ζητήματα που βρίσκονται υπό διερεύνηση με πιο σημαντικά τη μείωση του κόστους κατασκευής και συντήρησης, καθώς και την περαιτέρω ανάπτυξη των πλωτών ανεμογεννητριών.

Όπως κάθε ανθρώπινη παρέμβαση στο φυσικό περιβάλλον, έτσι και η κατασκευή ή/και λειτουργία ενός ΘΑΠ μπορεί να έχει θετικές και αρνητικές επιπτώσεις στο θαλάσσιο περιβάλλον. Για παράδειγμα, μια θετική επίπτωση αφορά το υποθαλάσσιο τμήμα, και συγκεκριμένα τη θεμελίωση μιας τέτοιας κατασκευής, το οποίο μπορεί να μιμηθεί το ρόλο των τεχνητών υφάλων και να συμβάλει στον εμπλουτισμό της βιοποικιλότητας της περιοχής και την ανάπτυξη των ιχθυοπληθυσμών, ενώ η απαγόρευση ή ο περιορισμός της αλιείας εντός των ΘΑΠ βοηθάει στην εξέλιξη των οικολογικών συστημάτων. Επίσης, έχει παρατηρηθεί σε βόρειες χώρες, όπως η Γερμανία και η Δανία, ότι τα ΘΑΠ μπορούν να αποτελέσουν πόλους τουριστικής ανάπτυξης μέσω δραστηριοτήτων αναψυχής, όπως οι καταδύσεις, μετατρέποντάς τα σε τοπικά «αξιοθέατα». Ανάμεσα στις πιο συνήθεις αρνητικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις είναι: 1) η ύπαρξη θορύβου και ηλεκτρομαγνητικών πεδίων, που επηρεάζουν συνήθως τα θαλάσσια θηλαστικά και τα ψάρια, 2) οι πιθανοί τραυματισμοί ή η αλλαγή πορείας των μεταναστευτικών πουλιών, 3) η ενδεχόμενη αλλαγή των υδροδυναμικών και κυματικών χαρακτηριστικών στην ευρύτερη περιοχή του έργου. Για περισσότερες λεπτομέρειες, βλ. Bray et al. (2016). Ανάλογα με τη γεωγραφική θέση και το μέγεθος της εκάστοτε διάταξης ΘΑΠ, οι επιπτώσεις αυτές ποικίλουν σε μέγεθος και έκταση.



Από την άλλη πλευρά, η κυματική ενέργεια, που αφορά την εκμετάλλευση της κινητικής (λόγω της κυματικής διάδοσης) και δυναμικής (λόγω της ανύψωσης της επιφάνειας της θάλασσας) ενέργειας των κυματισμών που δημιουργούνται από τον άνεμο που πνέει πάνω από την θάλασσα, είναι μια μορφή γαλάζιας ενέργειας που έχει αξιοποιηθεί ελάχιστα μέχρι σήμερα. Παρόλο που η έρευνα και μελέτη τέτοιων συσκευών ξεκίνησε συστηματικά το 1973, δεν έχει επιτευχθεί ακόμα η ανάπτυξη μιας ολοκληρωμένης εμπορικά συσκευής με υψηλή απόδοση. Αυτό οφείλεται αφενός στη μεγάλη διασπορά των υπαρχουσών τεχνολογιών (με αποτέλεσμα τη μη σύγκλιση σε ένα εμπορικό πρότυπο) και αφετέρου στις απαιτήσεις σε εξειδικευμένο εξοπλισμό, ικανού να αντέχει τις καταπονήσεις που οφείλονται στα ακραία καιρικά και κυματικά φαινόμενα του θαλάσσιου περιβάλλοντος, και επομένως, του υψηλού κατασκευαστικού και λειτουργικού κόστους. Ανάλογα με την τοποθεσία εγκατάστασής τους, οι κυματικές συσκευές μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε επάκτιες (on-shore), παράκτιες (coastal) και υπεράκτιες (offshore).

Σε παγκόσμιο επίπεδο, το υψηλότερο κυματικό δυναμικό συναντάται στην εύκρατη ζώνη (με γεωγραφικό πλάτος 30°-60°, και στα δύο ημισφαίρια) ενώ οι βόρειες ευρωπαϊκές χώρες, όπως η Νορβηγία, η Ιρλανδία και το Ηνωμένο Βασίλειο, χαρακτηρίζονται από υψηλές τιμές κυματικού δυναμικού, που μπορεί να ξεπεράσει και τα 70 kW/m μετώπου του κυματισμού. Στη Μεσόγειο θάλασσα, η τιμή της κυματικής ισχύος δεν ξεπερνά τα 15 kW/m. Το 2008 λειτούργησε μόνο για δύο μήνες (λόγω οικονομικών προβλημάτων) το πρώτο πειραματικό κυματικό πάρκο στην Πορτογαλία αποτελούμενο από τρεις εξασθενητές κυματισμών (wave attenuators) με εγκατεστημένη ισχύ 2.25 MW, ικανή να καλύψει μέση ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας 1.500 νοικοκυριών. Αναφορικά με τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις, ακόμα δεν υπάρχει σαφής εικόνα λόγω της έλλειψης εφαρμογών σε μεγάλες χωρικές και χρονικές κλίμακες. Πιθανές επιπτώσεις στο θαλάσσιο περιβάλλον, τα ψάρια και τα θαλάσσια θηλαστικά, και τις ωκεανογραφικές/παράκτιες διεργασίες έχουν μελετηθεί από διάφορους, π.χ., Leeney et al. (2014), Witt et al. (2012).

Η Ελλάδα συγκαταλέγεται στις Μεσογειακές χώρες με αξιοποιήσιμους πόρους κυρίως υπεράκτιας αιολικής ενέργειας, εξαιτίας του διαθέσιμου αιολικού δυναμικού και του βαθμού ωριμότητας των αντίστοιχων τεχνολογιών, και λιγότερο της κυματικής

ενέργειας. Η σχετικά στενή υφαλοκρηπίδα των Ελληνικών θαλασσών περιορίζει την εγκατάσταση ενεργειακών συσκευών σε μικρά βάθη, τα οποία συναντώνται κατά κύριο λόγο κοντά στην ακτή. Έτσι, ενισχύεται το ενδεχόμενο εγκατάστασής τους σε μεγάλα βάθη, μακριά από την ακτή, καθιστώντας λιγότερο οικονομική την κατασκευή και συντήρηση των αντίστοιχων πάρκων (π.χ., λόγω μεγαλύτερου υποθαλάσσιου ενεργειακού δικτύου, μικρότερης ευελιξίας στη μεταφορά τμημάτων του πάρκου, κ.λπ.). Από την άλλη πλευρά, η μεγάλη απόσταση εγκατάστασης από την ακτή δημιουργεί λιγότερα προβλήματα οπτικής και ακουστικής όχλησης στον τοπικό παράκτιο πληθυσμό, όπου συναντώνται και άλλες παράκτιες/θαλάσσιες χρήσεις (π.χ., ναυτιλία, αλιεία, υδατοκαλλιέργειες) και υπάρχει συνήθως έντονος τουριστικός χαρακτήρας. Επομένως, η εύρεση της χρυσής τομής για την ορθολογική χωροθέτηση θαλάσσιων ενεργειακών πάρκων είναι απαραίτητη προϋπόθεση για τη βιώσιμη ανάπτυξη της Γαλάζιας Ενέργειας στην Ελλάδα, βλ. Soukissian et al. (2017a). Σχετικές ενέργειες για την προώθηση και ανάπτυξη της Γαλάζιας Ενέργειας στον Ελληνικό θαλάσσιο χώρο αποτελούν: 1) το προκαταρκτικό σχέδιο χωροθέτησης των περιοχών ενδιαφέροντος των ΘΑΠ, το οποίο βρίσκεται υπό αναθεώρηση, 2) κάποιες άδειες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ΘΑΠ που έχουν κατατεθεί στη Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας, και 3) το μικρό σύστημα παραγωγής κυματικής ενέργειας που τοποθετήθηκε το 2015 πιλοτικά στο λιμάνι του Ηρακλείου στην Κρήτη, το οποίο πρόκειται να επεκταθεί με σκοπό, αν λειτουργήσει επιτυχώς, να τροφοδοτήσει μελλοντικά τις ανάγκες ηλεκτροδότησης όλου του λιμανιού σε χαμηλό κόστος.

Οι προαπαιτούμενες μελέτες για τέτοιου είδους έργα περιλαμβάνουν σε πρώτη φάση την εκτίμηση του διαθέσιμου αιολικού και κυματικού δυναμικού με χρήση μακροχρόνιων πηγών δεδομένων υψηλής χωρικής και χρονικής ανάλυσης. Πρόσφατες μελέτες (π.χ., Soukissian et al., 2017c) έχουν αναδείξει ότι ανάμεσα στις περιοχές με υψηλό κυματικό και υπεράκτιο αιολικό δυναμικό στην Ελλάδα είναι τα στενά Ρόδου και Καρπάθου, γεγονός που οφείλεται κυρίως στις ετησίες (μελτέμια) που πνέουν με βόρεια-βορειοδυτική κατεύθυνση κατά τους καλοκαιρινούς μήνες και ενισχύονται κατά το πέρασμά τους από τα προαναφερθέντα στενά. Ένας από τους στόχους της παρούσας μελέτης είναι η αξιολόγηση του υπεράκτιου αιολικού και κυματικού δυναμικού ανοικτά της Ρόδου σε δύο χρονικές κλίμακες, ετήσια και εποχική, προκειμένου να εντοπιστούν περιοχές 1) με υψηλό διαθέσιμο υπεράκτιο δυναμικό, 2) με υψηλή διαθέσιμη ροή

κυματικής ενέργειας, και 3) που συνδυάζουν τόσο υψηλές τιμές υπεράκτιου δυναμικού όσο και κύματος για την συνεκμετάλλευση και των δύο μορφών ΑΠΕ μέσω μιας υβριδικής κατασκευής, μια ευρωπαϊκή τάση στον χώρο των θαλάσσιων ΑΠΕ για μεγαλύτερη αυτονομία και απόδοση. Επιπρόσθετα, η κατασκευή μονοδιάστατων και διδιάστατων κατανομών των ανεμολογικών και κυματικών χαρακτηριστικών προσδίδουν μια πιο αναλυτική περιγραφή των περιβαλλοντικών συνθηκών και συμβάλλουν στην ορθότερη εκτίμηση της συχνότητας εμφάνισης των μεταβλητών προς εξέταση, λαμβάνοντας υπόψη τόσο τα γραμμικά (π.χ., ύψος κύματος, ταχύτητα ανέμου) όσο και τα κατευθυντικά χαρακτηριστικά (κατεύθυνση κύματος και ανέμου) .

## 2. Ανάπτυξη Μεθοδολογίας

Η ανάλυση του ανεμολογικού και κυματικού κλίματος καθώς και η αξιολόγηση του υπεράκτιου αιολικού και κυματικού δυναμικού βασίζονται σε υψηλής χωρικής και χρονικής ανάλυσης ανεμολογικά και κυματικά δεδομένα, αντίστοιχα, τα οποία αποτελούν αποτελέσματα μοντέλων αριθμητικής προσομοίωσης και είναι διαθέσιμα σε μορφή πλέγματος. Βλ. Κεφάλαιο 3 για περισσότερες λεπτομέρειες αναφορικά με τα δεδομένα.

Εκτός από τη χωρική και χρονική διακριτότητα, και τη γεωγραφική κάλυψη, η αξιοπιστία των δεδομένων αποτελεί μια σημαντική παράμετρο σε τέτοιου είδους αναλύσεις. Το ζήτημα της αξιοπιστίας αφορά όλα τα δεδομένα είτε αυτά προέρχονται από άμεση παρατήρηση/μέτρηση είτε αποτελούν προϊόντα μαθηματικής επεξεργασίας (π.χ., δορυφορικά δεδομένα) ή προσομοίωσης, καθώς κάθε πηγή δεδομένων παρουσιάζει συγκεκριμένες αδυναμίες, περιορισμούς και κυρίως στοχαστικές αβεβαιότητες. Στην περίπτωση των δεδομένων που προέρχονται από μοντέλα αριθμητικής προσομοίωσης, το βασικότερο μειονέκτημά τους είναι οι αβεβαιότητες που υπεισέρχονται σε αυτά λόγω σφάλματων του μοντέλου. Αυτές οι αβεβαιότητες μπορεί να οφείλονται:

- στις οριακές και αρχικές συνθήκες, η ακρίβεια των οποίων είναι χαμηλή λόγω σφαλμάτων μέτρησης και αφομοίωσης,

- σε σφάλματα παραμετροποίησης και τον αποκλεισμό συγκεκριμένων αλληλεπιδράσεων ή των λιγότερο σημαντικών μεταβλητών για λόγους απλούστευσης, και
- τη χαοτική συμπεριφορά της ατμόσφαιρας, της θάλασσας και της μεταξύ τους αλληλεπίδρασης που καθιστά τη μοντελοποίηση αυτών των φυσικών συστημάτων μια πολύ απαιτητική διαδικασία.

Από την άλλη πλευρά, στα πλεονεκτήματα συγκαταλέγονται η μεγάλη χρονική διάρκεια η κάλυψη μεγάλων εκτάσεων και η άμεση, και συνήθως ανοικτή, διάθεσή τους στον τελικό χρήστη.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι στην αντίστοιχη βιβλιογραφία, οι επιτόπιες μετρήσεις θεωρούνται ως δεδομένα αναφοράς λόγω της μεγαλύτερης ακρίβειας των μετρήσεων που παρέχουν, ενώ αναφορικά με τα δεδομένα σε μορφή πλέγματος (δορυφορικά δεδομένα, μοντέλα αριθμητικής προσομοίωσης), θα πρέπει να ελέγχεται στατιστικά η αξιοπιστία τους και να διορθώνονται, εάν αυτό είναι δυνατόν, βάσει των δεδομένων αναφοράς (Soukissian & Papadopoulos, 2015b). Σε περίπτωση απουσίας των επιτόπιων μετρήσεων, οι δορυφορικές μετρήσεις θεωρούνται η αμέσως επόμενη πιο αξιόπιστη πηγή. Από τα ανωτέρω συνάγεται ότι για τη βέλτιστη αξιοποίηση των ανεμολογικών και κυματικών δεδομένων είναι απαραίτητος ο έλεγχος και η αξιολόγηση των παραμέτρων που συμμετέχουν στην εκτίμηση της υπεράκτιας αιολικής και κυματικής ενέργειας για δεδομένα που προέρχονται από αποτελέσματα αριθμητικών μοντέλων.

### 2.1 Αξιολόγηση γραμμικών μεταβλητών

Αναφορικά με τις γραμμικές μεταβλητές (ταχύτητα ανέμου, σημαντικό ύψος κύματος, ενεργειακή περίοδος), τα στατιστικά μέτρα που χρησιμοποιήθηκαν και συνοψίζουν τη συμπεριφορά των αντίστοιχων δεδομένων είναι:

i) Ο συντελεστής συσχέτισης (correlation coefficient -  $r_{XY}$ )

$$r_{XY} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (1)$$

ii) Το συστηματικό σφάλμα (bias - BIAS)

$$\text{BIAS} = \bar{y} - \bar{x} \quad (2)$$

iii) Το μέσο απόλυτο σφάλμα (mean absolute error - MAE)

$$\text{MAE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - x_i| \quad (3)$$

iv) Η τετραγωνική ρίζα του μέσου τετραγωνικού σφάλματος (root mean square error - RMSE)

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2} \quad (0.4)$$

v) Ο δείκτης διασποράς (scatter index - SI)

$$\text{SI} = \frac{\text{RMSE}}{\bar{x}} \quad (5)$$

vi) Το συμμετρικό μέσο απόλυτο ποσοστό σφάλματος (symmetrical mean absolute percentage error - SMAPE)

$$\text{SMAPE} = \frac{200}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|y_i - x_i|}{|y_i + x_i|} \quad (6)$$

όπου  $X, Y$  είναι δύο τυχαίες γραμμικές μεταβλητές με  $x_i, i = 1, \dots, n$ , τα δεδομένα από την πιο αξιόπιστη διαθέσιμη πηγή δεδομένων,  $y_i, i = 1, \dots, n$  τα δεδομένα από τη λιγότερο αξιόπιστη πηγή δεδομένων,  $\bar{x}, \bar{y}$  τη μέση τιμή των δεδομένων της πιο αξιόπιστης πηγής και της λιγότερο αξιόπιστης, αντίστοιχα, και  $n$  το μέγεθος του δείγματος. Οι τιμές για τον συντελεστή συσχέτισης είναι φραγμένες στο διάστημα  $[-1,1]$  ενώ για το συμμετρικό μέσο απόλυτο ποσοστό σφάλματος στο  $[0,200]$ . Η

συμπεριφορά του μοντέλου χαρακτηρίζεται ικανοποιητική εάν οι τιμές των ανωτέρω στατιστικών μέτρων είναι κοντά στο μηδέν, εκτός από εκείνη του συντελεστή συσχέτισης που πρέπει να είναι κοντά στη μονάδα (στην περίπτωση της θετικής γραμμικής συσχέτισης).

## 2.2 Αξιολόγηση κατευθυντικών μεταβλητών

Αναφορικά με τις κατευθυντικές μεταβλητές (διεύθυνση ανέμου, διεύθυνση διάδοσης κυματισμού), τα στατιστικά μέτρα που χρησιμοποιήθηκαν και συνοψίζουν τη συμπεριφορά των αντίστοιχων δεδομένων είναι:

i) Ο κυκλικός συντελεστής συσχέτισης (circular correlation coefficient -  $r_{\theta\phi}$ ),

$$r_{\theta\phi} = \frac{\sum_{i=1}^n \sin(\theta_i - \bar{\theta}) \sin(\phi_i - \bar{\phi})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (\sin(\theta_i - \bar{\theta}))^2 \sum_{i=1}^n (\sin(\phi_i - \bar{\phi}))^2}} \quad (7)$$

ii) Το συστηματικό σφάλμα (bias - BIAS)

$$\text{BIAS} = \bar{\theta} - \bar{\phi} \quad (8)$$

iii) Το μέσο κυκλικό απόλυτο σφάλμα (mean circular absolute error - MCAE) (Jing-Jing et al., 2014)

$$\text{MCAE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |d(\theta_i, \phi_i)| \quad (9)$$

όπου  $d(\theta, \phi) = \min(\theta - \phi, 360 - (\theta - \phi))$ ,

iv) Η τετραγωνική ρίζα του μέσου σφάλματος (root mean error - RME) (Karathanasi et al., 2016)

$$\text{RME} = \sqrt{-2 \ln \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \cos \frac{\theta_i - \phi_i}{2} \right| \right)} \quad (10)$$

ν) Το μέσο σχετικό συστηματικό σφάλμα (mean relative bias - MRB) (SenGupta et al. 2013)

$$\text{MRB} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sin \left( \frac{\theta_i - \phi_i}{2} \right), \quad (11)$$

όπου  $\theta, \Phi$  είναι δύο τυχαίες κατευθυντικές μεταβλητές με  $\theta_i, i = 1, \dots, n$ , τα δεδομένα από την πιο αξιόπιστη διαθέσιμη πηγή δεδομένων,  $\phi_i, i = 1, \dots, n$  τα δεδομένα από τη λιγότερο αξιόπιστη πηγή δεδομένων,  $\bar{\theta}, \bar{\phi}$  τη μέση τιμή των δεδομένων της πιο αξιόπιστης πηγής και της λιγότερο αξιόπιστης, αντίστοιχα, και  $n$  το μέγεθος του δείγματος. Οι τιμές για τον κυκλικό συντελεστή συσχέτισης είναι φραγμένες στο διάστημα  $[0,1]$ . Η συμπεριφορά του μοντέλου χαρακτηρίζεται ικανοποιητική εάν οι τιμές των ανωτέρω κυκλικών στατιστικών μέτρων είναι κοντά στο μηδέν εκτός από εκείνη του κυκλικού συντελεστή συσχέτισης που πρέπει να είναι κοντά στη μονάδα.

### 2.3 Στατιστικά μεγέθη γραμμικών και κατευθυντικών μεταβλητών για την περιγραφή του ανεμολογικού και κυματικού κλίματος

Μετά την αξιολόγηση των δεδομένων, ακολουθεί η παρουσίαση του ανεμολογικού και κυματικού κλίματος μέσω διαφόρων στατιστικών μεγεθών. Η στατιστική επεξεργασία των εμπλεκόμενων περιβαλλοντικών παραμέτρων, δηλαδή της ταχύτητας και διεύθυνσης του ανέμου, του σημαντικού ύψους κύματος, της ενεργειακής περιόδου και της μέσης διεύθυνσης διάδοσης κυματισμού, γίνεται σε δύο διαφορετικές χρονικές κλίμακες: 1) ετήσια, και 2) εποχική κλίμακα. Αναφορικά με τις γραμμικές μεταβλητές, εκτός από τις μέσες τιμές υπολογίζονται η μέση ετήσια μεταβλητότητα (mean annual variability – MAV) και η υπερετήσια μεταβλητότητα (inter-annual variability – IAV) για το μέτρο της ταχύτητας του ανέμου, εκφρασμένες σε ποσοστό (%), βλ. Soukissian et al. (2017b).

Πιο συγκεκριμένα, η μέση ετήσια μεταβλητότητα ισούται με το λόγο της τυπικής απόκλισης ανά έτος προς τη μέση τιμή ανά έτος της εξεταζόμενης μεταβλητής, και υπολογίζεται από τη σχέση:

$$MAV = \frac{1}{J} \sum_{j=1}^J CV(j) = \frac{1}{J} \sum_{j=1}^J \frac{s(j)}{m(j)}, \quad (12)$$

όπου  $CV(j), j = 1, \dots, J$ , είναι ο συντελεστής μεταβλητότητας για κάθε έτος και  $J$  είναι το συνολικό μήκος της χρονοσειράς (σε έτη). Είναι φανερό ότι το ανωτέρω μέγεθος μεταβλητότητας προκύπτει από μια χρονοσειρά ετησίων τιμών της εξεταζόμενης μεταβλητής.

Επίσης, η υπερετήσια (διαχρονική) μεταβλητότητα ισούται με το λόγο της τυπικής απόκλισης της μέσης τιμής (ανά έτος) κάθε μεταβλητής προς τη συνολική της μέση τιμή  $\tilde{m}$  και υπολογίζεται από τη σχέση:

$$IAV = \frac{s_m(j)}{\tilde{m}(j)}, j = 1, \dots, J. \quad (13)$$

Για παράδειγμα, αν μια περιοχή χαρακτηρίζεται από υπερετήσια μεταβλητότητα για την ταχύτητα του ανέμου της τάξης του 6%, αυτό υποδηλώνει ότι η μέση ετήσια ταχύτητα ανέμου κάθε έτους θα είναι μέσα στο 6% της συνολικής μέσης τιμής. Αξίζει να σημειωθεί ότι αυτές οι δύο στατιστικές ποσότητες αποτελούν σημαντικούς δείκτες της μεταβλητότητας του μεγέθους που εξετάζεται, και ειδικότερα στο θέμα των ενεργειακών πάρκων (αιολικών και κυματικών) αποτελούν βασικές παραμέτρους σχεδιασμού.

Σχετικά με τις κατευθυντικές μεταβλητές, είναι σκόπιμο να γίνει μια σύντομη εισαγωγή στις βασικές έννοιες της κατευθυντικής στατιστικής, στην οποία βασίζονται τα σχετικά αποτελέσματα για τις διευθύνσεις ανέμου και κύματος. Για περισσότερες λεπτομέρειες βλ. π.χ., Soukissian (2014).



Έστω  $\theta_i$ ,  $i = 1, \dots, n$ , οι πραγματοποιήσεις μια κατευθυντικής τυχαίας μεταβλητής και  $C = \sum_{i=1}^n \cos\theta_i$  και  $S = \sum_{i=1}^n \sin\theta_i$ . Η μέση διεύθυνση  $\bar{\theta}$  υπολογίζεται ως ακολούθως:

$$\bar{\theta} = \text{atan2}(S/C) = \begin{cases} \text{atan}(S/C), & C > 0, S \geq 0 \\ \text{atan}(S/C) + 2\pi, & C \geq 0, S < 0 \\ \text{atan}(S/C) + \pi, & C < 0 \\ \pi/2, & C = 0, S > 0 \\ -\pi/2, & C = 0, S < 0 \\ \text{undefined}, & C = 0, S = 0, \end{cases} \quad (14)$$

Για μεγάλα δειγματικά μεγέθη, το τυπικό σφάλμα της  $\hat{s}$  δίνεται από τη σχέση:

$$\hat{s} = \sqrt{\frac{\left(1 - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \cos 2(\theta_i - \bar{\theta})\right)}{2n\bar{R}^2}} \quad (15)$$

όπου  $\bar{R} = R/n$ . Η ποσότητα  $R$  ονομάζεται συνιστάμενο διάνυσμα (resultant length) και ισούται με  $R^2 = C^2 + S^2, R \geq 0$ , και υποδηλώνει τη μέση τιμή που είναι συσχετισμένη με τη μέση διεύθυνση  $\bar{\theta}$ .

Η δειγματική κυκλική διασπορά και η αντίστοιχη τυπική απόκλιση δίνονται από τις εξής σχέσεις:

$$V(\theta) = 1 - \bar{R}, SD(\theta) = \sqrt{-2 \ln \bar{R}} \quad (16)$$

Όπου  $V(\theta) \in [0,1]$  και  $SD(\theta) \in [0, \infty)$ . Βασικές πηγές αναφοράς για την κατευθυντική στατιστική αποτελούν οι Fisher (1993) και Mardia & Jupp (2000).

#### 2.4 Εκτίμηση υπεράκτιου αιολικού δυναμικού και ροή κυματικής ενέργειας

Το υπεράκτιο αιολικό δυναμικό  $\bar{P}_{wi}$  ( $\text{W/m}^2$ ) εκτιμάται στα 100 m από την επιφάνεια της θάλασσας, ένα αντιπροσωπευτικό ύψος λειτουργίας υπεράκτιων ανεμογεννητριών. Για την εκτίμηση αυτή χρησιμοποιείται η διαθέσιμη μακροχρόνια χρονοσειρά της ταχύτητας του ανέμου στα σημεία του πλέγματος του μοντέλου. Για ένα συγκεκριμένο σημείο του πλέγματος, το  $\bar{P}_{wi}$  υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$\bar{P}_{wi} = \frac{1}{2N} \sum_{i=1}^N \rho_a U_i^3. \quad (17)$$

όπου  $N$  το συνολικό μέγεθος της χρονοσειράς,  $\rho_a$  η πυκνότητα του αέρα ίση με  $1.2258 \text{ kg/m}^3$  σε όλη την περιοχή ενδιαφέροντος και  $U_i$  η τιμή της ταχύτητας του ανέμου από την χρονοσειρά τη χρονική στιγμή  $i$ . Για τον υπολογισμό αυτό, έγινε πρώτα αναγωγή της ταχύτητας του ανέμου από τα 10 m (που είναι διαθέσιμη) στα 100 m που ήταν το επιθυμητό ύψος αναφοράς από την επιφάνεια της θάλασσας, χρησιμοποιώντας τον λογαριθμικό κανόνα:

$$U_{100} = U_{10} \frac{\ln(100/z_0)}{\ln(10/z_0)}, \quad (18)$$

όπου  $U_{100}$  η ταχύτητα του ανέμου (m/s) σε ύψος 100 m από την επιφάνεια της θάλασσας,  $U_{10}$  η ταχύτητα του ανέμου (m/s) σε ύψος 10 m από την επιφάνεια της θάλασσας και  $z_0$  το ύψος αναφοράς για τον υπολογισμό, το οποίο είναι ίσο με 0.001 m για την ανοικτή θάλασσα (Hansen, 1993).

Χωρίς αμφιβολία, η ακριβής περιγραφή του υπεράκτιου αιολικού δυναμικού σε μια περιοχή είναι ένα αρκετά δύσκολο ζήτημα, καθώς σχετικά μικρές αποκλίσεις της ταχύτητας του ανέμου σε σχέση με την πραγματική τιμή της (αν υπήρχαν διαθέσιμες επιτόπιες μετρήσεις) οδηγούν σε πολύ μεγαλύτερες μεταβολές στο δυναμικό λόγω της εξάρτησης του τελευταίου από την τρίτη δύναμη της ταχύτητας, βλ. Εξ. (17).

Σε μια ρεαλιστική κατάσταση θάλασσας (δηλαδή για κυματικές συνθήκες που διαρκούν μερικές ώρες σε ένα δεδομένο σημείο της θάλασσας), ένα σύστημα θαλάσσιων ανεμογενών κυματισμών μπορεί να αναλυθεί μέσω υπέρθεσης αρμονικών συνιστωσών για την περιγραφή και μοντελοποίησή του. Έτσι, η περιγραφή ενός τέτοιου συστήματος (κατάστασης θάλασσας) γίνεται μέσω της φασματικής πυκνότητας, η οποία καθορίζει την κατανομή της ενέργειας για διάφορες διευθύνσεις και συχνότητες. Η ροή της κυματικής ενέργειας ανά μέτωπο κύματος (kW/m) για δεδομένη κατάσταση θάλασσας και σε βαθιά νερά μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση:

$$P_{wa} = \frac{\rho_s g^2}{64\pi} H_{m0}^2 T_e \approx 0.5 H_{m0}^2 T_e, \quad (19)$$

όπου  $\rho_s$  η πυκνότητα του νερού ίση με  $1025 \text{ kg/m}^3$ ,  $g$  η επιτάχυνση της βαρύτητας ίση με  $9.8067 \text{ m/s}$ ,  $H_{m0}$  το σημαντικό ύψος κύματος (m) και  $T_e$  η μέση ενεργειακή περίοδος. Το σημαντικό ύψος κύματος και η μέση ενεργειακή περίοδος υπολογίζονται συναρτήσει των φασματικών ροπών. Πιο συγκεκριμένα, οι φασματικές ροπές  $n$ -στής τάξης ορίζονται ως ακολούθως:

$$m_k = \int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} f^k E(f, \vartheta) df d\vartheta, \quad k = \dots, -2, -1, 0, 1, 2, \dots, \quad (20)$$

όπου  $E(f, \vartheta)$  είναι η κατανομή της ενεργειακής συχνότητας (directional spectrum),  $f$  η φασματική συχνότητα και  $\vartheta$  η διεύθυνση διάδοσης κυματισμού. Έτσι, το σημαντικό ύψος  $H_{m0}$  ορίζεται ως εξής:

$$H_{m0} = 4\sqrt{m_0}, \quad (21)$$

όπου  $m_0$  η φασματική ροπή μηδενικής τάξης, ενώ η ενεργειακή περίοδος  $T_e$  δίνεται από τη σχέση:

$$T_e = \frac{m_{-1}}{m_0}. \quad (22)$$

Τέλος, για την εκτίμηση της μέσης ροής της κυματικής ενέργειας από τη διαθέσιμη χρονοσειρά, χρησιμοποιείται η ακόλουθη σχέση:

$$\bar{P}_{wa} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N P_{wa}(i). \quad (23)$$

### 2.5 Διδιάστατες κατανομές ανεμολογικών και κυματικών παραμέτρων

Για την μοντελοποίηση της από κοινού κατανομής ανεμολογικών και κυματικών παραμέτρων και την περιγραφή της δομής εξάρτησης ένας από τους πιο δημοφιλείς τρόπους είναι μέσω των συναρτήσεων σύζευξης (copulas). Το βασικό χαρακτηριστικό της συνάρτησης σύζευξης είναι η σύνδεση μεταξύ της από κοινού συνάρτησης κατανομής και των περιθώριων κατανομών της, με το Θεώρημα του Sklar (1959) να παίζει καθοριστικό ρόλο στην ανάπτυξή τους. Έστω δύο τυχαίες μεταβλητές  $X, Y$  με περιθώριες συναρτήσεις κατανομών  $F_X(x), F_Y(y)$ , αντίστοιχα. Οι μετασχηματισμοί  $U = F_X(x)$  και  $V = F_Y(y)$  προσδιορίζουν ένα εξαρτημένο και ομοιόμορφα κατανεμημένο διάνυσμα τυχαίων μεταβλητών  $(U, V)$  στο  $[0,1]^2$ . Τότε,  $U \sim U(0,1)$  και  $x = F^{-1}(u)$ , και  $V \sim U(0,1)$  και  $y = F^{-1}(v)$ .

Η από κοινού αθροιστική συνάρτηση κατανομής των τυχαίων μεταβλητών  $X, Y$  εκφράζεται με την παρακάτω σχέση:

$$F_{XY}(x, y) = C_{XY}(F_X(x), F_Y(y)) = C(u, v), \quad (24)$$

όπου  $C(u, v)$  είναι η συνάρτηση κατανομής σύζευξης, με  $C: [0,1] \times [0,1] \rightarrow [0,1]$ .

Μια συνάρτηση σύζευξης  $C$  ικανοποιεί τις ακόλουθες σχέσεις:

- i. Για κάθε  $u, v \in [0,1]$  ισχύει ότι  $C(u, 0) = C(0, v) = 0$  και  $C(u, 1) = u$ ,  $C(1, v) = v$ .
- ii. Για κάθε σημείο  $(u_1, v_1), (u_2, v_2) \in [0,1] \times [0,1]$  με  $u_1 \leq u_2$  και  $v_1 \leq v_2$  έχουμε ότι  $C(u_2, v_2) - C(u_2, v_1) - C(u_1, v_2) + C(u_1, v_1) \geq 0$ .

Για κάθε συνάρτηση σύζευξης  $C$  ισχύει ότι:

- i. Είναι συνεχής
- ii. Είναι αύξουσα για κάθε τυχαία μεταβλητή
- iii. Ικανοποιεί:  $\max[u + v - 1] \leq C(u, v) \leq \min[u, v]$ .

Η συνάρτηση σύζευξης  $C(u, v)$  μπορεί να εκφραστεί ως εξής:

$$C(u, v) = F(F^{-1}(u), F^{-1}(v)), \quad (25)$$

ενώ η αντίστοιχη συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας δίνεται από τη σχέση:

$$c(u, v) = \frac{\partial^2 C(u, v)}{\partial u \partial v}, \quad (26)$$

εφόσον η  $C(u, v)$  είναι αύξουσα και συνεχής. Επίσης, για την πυκνότητα σύζευξης  $c$  ισχύει ότι

$$f_{XY}(x, y) = c(u, v)f_X(x)f_Y(y), \quad (27)$$

όπου  $f_X(x), f_Y(y)$  οι περιθώριες συναρτήσεις των τυχαίων μεταβλητών  $X, Y$ .

Στη βιβλιογραφία έχουν προταθεί διάφορες μορφές συναρτήσεων σύζευξης, με την κάθε μία να εξετάζει μια συγκεκριμένη δομή εξάρτησης των τυχαίων μεταβλητών που εμπλέκονται (π.χ., Nelsen, 2006). Μια από τις πιο σημαντικές οικογένειες συναρτήσεων σύζευξης με ευρεία χρήση σε περιβαλλοντικές παραμέτρους είναι η οικογένεια Αρχιμήδειων συζεύξεων, η οποία περιλαμβάνει συναρτήσεις της μορφής

$$C(x, y) = \varphi^{-1}(\varphi(x) + \varphi(y)), \quad (28)$$

όπου  $\varphi^{-1}(\cdot)$  μια ψευδο-αντίστροφη συνάρτηση της  $\varphi: [0,1] \rightarrow [0, \infty)$ , η οποία είναι συνεχής και αυστηρά φθίνουσα, με  $\varphi(1) = 0$ . Η συνάρτηση  $\varphi$  καλείται γεννήτρια της σύζευξης. Οι πιο διαδεδομένες Αρχιμήδειες συζεύξεις είναι των Frank, Gumbel, Clayton και Joe.

### Σύζευξη Frank

Η συνάρτηση της σύζευξης Frank (1979) δίνεται από τη σχέση:

$$C(u, v) = -\vartheta^{-1} \ln[1 + g_u g_v / g_1], \quad (29)$$

όπου  $g_z = \exp(-\vartheta z) - 1$ ,  $\vartheta \in \mathbb{R} \setminus \{0\}$ . Η σύζευξη αυτή είναι ιδανική για την μοντελοποίηση μεταβλητών με ισχυρή θετική ή αρνητική εξάρτηση.

### Σύζευξη Gumbel

Η γεννήτρια της συνάρτησης Gumbel (1960) είναι  $\varphi(t) = (-\ln t)^\vartheta$ , όπου  $\vartheta \geq 1$ . Η παράγωγος της  $\varphi$  ισούται με  $\varphi'(t) = \frac{-\vartheta(-\ln t)^{\vartheta-1}}{t}$ , η οποία είναι γνησίως φθίνουσα στο  $[0, \infty)$ , και  $\varphi''(t) \geq 0$  στο διάστημα  $[0,1]$ . Η σύζευξη Gumbel δίνεται από τη σχέση:

$$C(u, v) = \exp\left\{-\left[(-\ln u)^\vartheta + (-\ln v)^\vartheta\right]^{1/\vartheta}\right\}, \vartheta \geq 1. \quad (30)$$

Η σύζευξη αυτή δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί όταν υπάρχει αρνητική εξάρτηση μεταξύ των μεταβλητών, δηλαδή για  $\vartheta \leq 0$ .

### Σύζευξη Clayton

Η γεννήτρια της συνάρτησης Clayton (1978) είναι  $\varphi(t) = (t^{-\vartheta} - 1)/\vartheta$ ,  $\vartheta \in [-1, \infty) \setminus \{0\}$ . Η συνάρτηση της σύζευξης Clayton δίνεται από τη σχέση:

$$C(u, v) = \max\left([u^{-\vartheta} + v^{-\vartheta} - 1]^{-1/\vartheta}, 0\right). \quad (31)$$

Για  $\vartheta > 0$ , η Εξ. (31) απλοποιείται στην παρακάτω έκφραση:

$$C(u, v) = (u^{-\vartheta} + v^{-\vartheta} - 1)^{-1/\vartheta}. \quad (32)$$

### Σύζευξη Joe

Η γεννήτρια της συνάρτησης Joe (1993) είναι  $\varphi(t) = (-\ln t)^\vartheta$ ,  $\vartheta \in [-1, \infty)$  και η αντίστοιχη σύζευξη δίνεται από τη σχέση:

$$C(u, v) = 1 - \left[(1-u)^\vartheta + (1-v)^\vartheta - (1-u)^\vartheta(1-v)^\vartheta\right]^{1/\vartheta}. \quad (33)$$

Ένα ακόμη βασικό ερώτημα τίθεται για τη συσχέτιση της παραμέτρου εξάρτησης που εμπεριέχεται στη συναρτησιακή έκφραση των συζεύξεων με την κλασική έννοια του

μέτρου συσχέτισης, που είναι πιο οικεία στο μελετητή. Τα μέτρα συσχέτισης (εξάρτησης) που συνήθως χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση του  $\vartheta$  είναι ο γραμμικός συντελεστής συσχέτισης Pearson, ο συντελεστής συσχέτισης Kendall  $\tau$  και ο συντελεστής συσχέτισης Spearman  $\rho$ . Στον πίνακα που ακολουθεί (Πίνακας 12) παρουσιάζεται ο συντελεστής συσχέτισης Kendall  $\tau$  για κάθε μια από τις ανωτέρω συζεύξεις.

Πίνακας 12. Οι εκφράσεις του συντελεστή συσχέτισης Kendall  $\tau$  για Αρχιμήδειες συζεύξεις.

Όνομασία σύζευξης	Συντελεστής Kendall $\tau$
Σύζευξη Frank	$1 - 4/\vartheta + 4 D_1(\vartheta)/\vartheta, D_1(\vartheta) = \int_0^{\vartheta} \frac{x/\vartheta}{\exp x - 1} dx$
Σύζευξη Gumbel	$(\vartheta - 1)/\vartheta$
Σύζευξη Clayton	$\vartheta/(\vartheta + 2)$
Σύζευξη Joe	$1 + 4/\vartheta^2 \int_0^1 x \ln x (1 - x)^{2(1-\vartheta)/\vartheta} dx$

Στην περίπτωση που στις μεταβλητές προς ανάλυση εμπεριέχονται κατευθυντικές παράμετροι, η συνάρτηση σύζευξης διαφοροποιείται προκειμένου να ληφθεί υπόψη η κατευθυντικότητα. Έστω μία κατευθυντική τυχαία μεταβλητή  $\theta$  και μία γραμμική  $X$  με συναρτήσεις πυκνότητας πιθανότητας  $f_{\theta}(\theta), f_X(x)$ , αντίστοιχα. Η από κοινού συνάρτηση κατανομής  $f_{\theta X}(\theta, x)$  μπορεί να εκφραστεί με τη χρήση μιας κατευθυντικής-γραμμικής σύζευξης  $C_{\theta X}(z, u)$  από τη σχέση:

$$f_{\theta X}(\theta, x) = c_{\theta X}(F_{\theta}(\theta), F_X(x)) f_{\theta}(\theta) f_X(x), \quad (34)$$

όπου  $c_{\theta X}(u, v)$  είναι η συνάρτηση πυκνότητας της σύζευξης,  $c_{\theta X}(0, u) = c_{\theta X}(1, u)$ ,  $\forall u \in [0, 1]$ ,  $Z = F_{\theta}(\theta)$  και  $U = F_X(x)$ , και  $F_{\theta}(\theta), F_X(x)$  οι περιθώριες κατανομές της κατευθυντικής και γραμμικής μεταβλητής, αντίστοιχα.

Από το πιο διαδεδομένα μοντέλα για τέτοιου είδους μεταβλητές είναι το μοντέλο που έχει προταθεί από τους Johnson & Wehrly (1978) με την  $f_{\theta X}(\theta, x)$  να παίρνει τη μορφή:

$$f_{\theta X}(\theta, x) = 2\pi g[2\pi(F_{\theta}(\theta) - F_X(x))] f_{\theta}(\theta) f_X(x), \quad (35)$$

$$\theta \in [0, 2\pi), x \in \mathbb{R},$$

όπου  $g(\cdot)$  είναι μια κατευθυντική συνάρτηση πυκνότητα πιθανότητας, η οποία εκφράζει την εξάρτηση μεταξύ των δύο μεταβλητών. Στην ανάλυση αυτή η  $g(\cdot)$  θεωρείται ότι κατανέμεται ικανοποιητικά ως μείξη δύο συνιστωσών της von Mises κατανομής. Είναι φανερό ότι το Johnson-Wehrly (JW) μοντέλο αποτελεί μια ειδική περίπτωση της Εξ. (27), όπου  $c(z, u) = 2\pi g[2\pi(z - u)]$ .

Ο συντελεστής συσχέτισης μεταξύ μιας κατευθυντικής και μιας γραμμικής μεταβλητής δίνεται από τη σχέση:

$$\rho_{\theta x} = \sqrt{\frac{r_{cx}^2 + r_{sx}^2 - 2r_{cx}r_{sx}r_{cs}}{1 - r_{cs}^2}}, \quad (36)$$

όπου  $r_{cx} = \rho(\cos \theta, x)$ ,  $r_{sx} = \rho(\sin \theta, x)$ ,  $r_{cs} = \rho(\cos \theta, \sin \theta)$  και  $\rho(\cdot, \cdot)$  είναι ο Pearson συντελεστής συσχέτισης.

### 3. Δεδομένα

#### 3.1 Ανεμολογικά δεδομένα

Τα ανεμολογικά δεδομένα (ταχύτητα και διεύθυνση ανέμου στα 10 m από την επιφάνεια της θάλασσας) που περιγράφονται στο παρόν εδάφιο και χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία, έχουν προκύψει από το αριθμητικό μοντέλο SKIPON-ETA (Papadopoulos et al., 2008). Η χωρική ανάλυση του μοντέλου είναι  $0.1^\circ \times 0.1^\circ$  (~11 km x 11 km) και η χρονική ανάλυση 3 ώρες (00:00, 03:00, 06:00, 09:00, ... UTC). Οι αντίστοιχες χρονοσειρές καλύπτουν μια περίοδο 15 ετών από 01/01/1995 έως 31/12/2009 που είναι κρίνεται ως ικανοποιητική για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας.

Τα μετεωρολογικά δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για τον καθορισμό των αρχικών και πλευρικών οριακών συνθηκών του μοντέλου προέρχονται από τα πεδία ανάλυσης



που διατίθενται από το Ευρωπαϊκό Κέντρο Μεσοπρόθεσμων Καιρικών Προγνώσεων (European Center for Medium-Range Weather Forecasts – ECMWF). Τα δεδομένα είναι διαθέσιμα με ανάλυση  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$  σε 16 ισοβαρικά επίπεδα (1000, 925, 850, 700, 500, 400, 300, 250, 200, 150, 100, 70, 50, 30, 20, 10 hPa) και παρέχονται ανά 6 ώρες (00:00, 06:00, 12:00, 18:00 UTC). Επίσης, από το ECMWF αντλήθηκαν τα δεδομένα για τον καθορισμό της εδαφικής θερμοκρασίας και εδαφικής υγρασίας σε τέσσερα εδαφικά στρώματα (που ορίζονται στα βάθη 7 cm, 28 cm, 100 cm και 255 cm), καθώς και της θερμοκρασίας της επιφάνειας της θάλασσας. Τα δεδομένα αυτά παρέχονται επίσης σε ανάλυση  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ . Για μια πιο αναλυτική παρουσίαση του ατμοσφαιρικού μοντέλου, βλ. Σουκισιάν κ.α. (2007).

Επίσης, τα ανεμολογικά δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για την αξιολόγηση των δεδομένων από το αριθμητικό μοντέλο SKIPON-ETA, προέρχονται από τη βάση δορυφορικών δεδομένων Blended Sea Winds (BSW), η οποία αναπτύχθηκε από το Εθνικό Κέντρο Κλιματικών Δεδομένων (National Climatic Data Center - NCDC) του οργανισμού National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). Τα δεδομένα αυτά αποτελούνται από διανύσματα επιφανειακών ανέμων πάνω από τη θάλασσα και τάσεων ανέμου από μια πληθώρα δορυφόρων με μακρόχρονη λειτουργία (έως και έξι δορυφόρους από τον Ιούνιο του 2002). Με αυτόν τον τρόπο, είναι εφικτή η μεγαλύτερη χωρική και χρονική κάλυψη των μετρήσεων σε σύγκριση με τα μεμονωμένα σύνολα δορυφορικών δεδομένων. Πιο συγκριμένα, ο οργανισμός NOAA έχει αναπτύξει δορυφορικά δεδομένα σε παγκόσμια βάση με τη μείξη πολλαπλών δορυφόρων, με χρονική ανάλυση 6 h και χωρική  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$  (~28 km x 28 km). Το 1987, υπήρχε μόνο ένας δορυφόρος, ενώ το 2000 υπήρχαν περισσότεροι από πέντε (SSMIF13, SSMI F14, SSMI F15, TMI, QuikSCAT, AMSR-E). Το κοινό χαρακτηριστικό αυτού του προϊόντος είναι ότι βασίζεται στους ίδιους αλγορίθμους ανάκτησης για όλα τα εμπλεκόμενα όργανα. Όσον αφορά τα χρονικά διαστήματα δειγματοληψίας, γενικά μειώνονται όσο αυξάνονται τα εξεταζόμενα γεωγραφικά πλάτη. Από το 2000, τα χρονικά διαστήματα δειγματοληψίας έχουν μειωθεί σε λιγότερο από 5 h στις τροπικές περιοχές και σε υψηλότερα γεωγραφικά πλάτη. Η χρονοσειρά που χρησιμοποιήθηκε για τους σκοπούς αυτής της μελέτης εκτείνεται από την 1η Ιανουαρίου 1995 έως τις 31 Δεκεμβρίου 2014 και αναφέρεται σε ύψος 10 m πάνω από τη στάθμη της θάλασσας.

Μια λεπτομερής περιγραφή των δεδομένων BSW βρίσκεται στην εργασία των Zhang et al. (2006).

Προφανώς, η διαδικασία μείξης των επιφανειακών ανέμων από πολλαπλούς δορυφόρους σε ένα μόνο προϊόν οδηγεί σε ανομοιογενή κάλυψη δεδομένων στο χώρο. Βλ. Σχήμα 1 του Soukissian et al. (2017b), όπου απεικονίζεται η χωρική κατανομή του ποσοστού χρονικής κάλυψης των δεδομένων BSW στη Μεσόγειο θάλασσα για την περίοδο 1995–2014. Για την πλειονότητα των τετραγώνων διαστάσεων  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ , η δειγματοληψία υπερβαίνει το 75% της εξεταζόμενης περιόδου σε κάθε χρονικό παράθυρο των 6 h. Συγκεκριμένα, το χρονικό ποσοστό είναι ικανοποιητικό στην ανοικτή θάλασσα και τις υπεράκτιες περιοχές όλων των κύριων υπολεκάνων (δηλαδή της δυτικής Μεσογείου, του Ιονίου Πελάγους και της θάλασσας της Λεβαντίνης), όπου ο αριθμός των μετρήσεων είναι περισσότερο από επαρκής. Στην Αδριατική θάλασσα και σε μεγάλο μέρος του Αιγαίου Πελάγους, ο αριθμός αυτός μειώνεται, αλλά όχι δραστικά, επιτρέποντας ακόμα στατιστικά ανθεκτικές εκτιμήσεις. Οι περιοχές όπου το ποσοστό χρονικής κάλυψης μέσω δορυφόρων είναι πολύ χαμηλό (10% του μέγιστου αναμενόμενου αριθμού παρατηρήσεων) και επομένως δεν είναι αποδεκτές για περαιτέρω στατιστική ανάλυση εντοπίζονται στο βόρειο και το κεντρικό Αιγαίο Πέλαγος και τα αντίστοιχα αποτελέσματα δεν πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά την ανάλυση. Στην ευρύτερη θαλάσσια περιοχή της περιοχής μελέτης, η δειγματοληψία στο νοτιο-ανατολικό και δυτικό τμήμα υπερβαίνει το 75%, που καθιστά τα αντίστοιχα σημεία του πλέγματος κατάλληλα για τις ανάγκες της αξιολόγησης. Αντίθετα, στο βόρειο τμήμα η δειγματοληψία είναι κοντά στο 50%, γεγονός που απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή από την πλευρά του μελετητή.

### 3.2 Κυματικά δεδομένα

Τα κυματικά δεδομένα αποτελούν ένα προϊόν hindcast του συστήματος πρόγνωσης Mediterranean Sea Waves, το οποίο βασίζεται στο κυματικό μοντέλο τρίτης γενιάς WAM Cycle 4.5.4 (Günther & Behrens, 2012), και καλύπτουν την περίοδο 2006–2018 (<http://marine.copernicus.eu/services-portfolio/access-to-products/>). Οι κυματικές παράμετροι παρέχονται κάθε μία ώρα σε πλέγμα χωρικής οριζόντιας ανάλυσης  $1/24^\circ \times 1/24^\circ$  για την περιοχή της Μεσογείου Θάλασσας, ανάλυση αρκετά κατάλληλη για την

περιγραφή του κυματικού δυναμικού στο Αιγαίο Αρχιπέλαγος, μια ημίκλειστη λεκάνη με γεωγραφικές και τοπογραφικές ιδιαιτερότητες.

Το μοντέλο WAM επιλύει πλήρως την εξίσωση κυματικής ενέργειας χωρίς κάποια υπόθεση για το σχήμα του κυματικού φάσματος και περιλαμβάνει τα εξής βασικά χαρακτηριστικά: διάθλαση και θραύση λόγω της βαθυμετρίας και της παρουσίας θαλάσσιων ρευμάτων, θραύση κυματισμών, επίδραση του ανέμου στη δημιουργία κυματισμών, επίδραση τριβής του πυθμένα, μη γραμμικές κυματικές αλληλεπιδράσεις τετράδας και διάδοση κυματισμών στο χώρο και το χρόνο ([http://poseidon.hcmr.gr/listview\\_gr.php?id=114#sea\\_state\\_wam](http://poseidon.hcmr.gr/listview_gr.php?id=114#sea_state_wam)). Σε κάθε σημείο του πλέγματος γίνεται επίλυση του κυματικού φάσματος σε 24 διευθύνσεις (κλάσεις των 15°) και 32 διακριτές συχνότητες.

#### **4. Αριθμητικά αποτελέσματα**

Στο παρόν εδάφιο παρατίθενται αποτελέσματα και σχετικά σχόλια για τη χωρική κατανομή στατιστικών μεγεθών των ανεμολογικών και κυματικών παραμέτρων είτε σε ετήσια και εποχική κλίμακα είτε μεγέθη μεταβλητότητας των εξεταζόμενων παραμέτρων. Οι χάρτες ισοσταθμικών καμπυλών για τη μέση τιμή της ταχύτητας ανέμου και του σημαντικού ύψους κύματος σε ετήσια και εποχική κλίμακα συνδυάζονται με τα αντίστοιχα μέσα διανύσματα που δηλώνουν τη μέση διεύθυνση (κατεύθυνση από) ανέμου και διάδοσης κυματισμού, αντίστοιχα. Οι χάρτες που αφορούν τη χωρική κατανομή της μέσης ετήσιας και υπερετήσιας μεταβλητότητας για το μέτρο της ταχύτητας του ανέμου εκφράζονται σε ποσοστά (%). Ας σημειωθεί ότι η χρωματική κλίμακα που χρησιμοποιήθηκε για την παρουσίαση των αποτελεσμάτων των ανεμολογικών και κυματικών παραμέτρων είναι ίδια για τις δύο χρονικές κλίμακες που εξετάζονται.

##### *4.1 Έλεγχος συνταυτισμένων σημείων αριθμητικού μοντέλου και δορυφορικών δεδομένων για την ταχύτητα και διεύθυνση ανέμου*

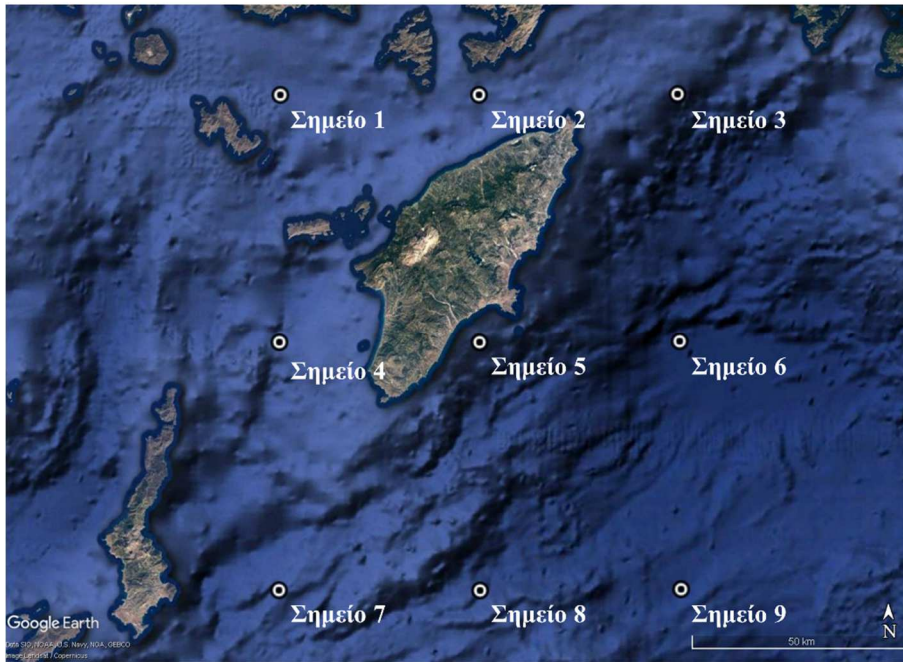
Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, για τον έλεγχο και την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων του αριθμητικού μοντέλου αναφορικά με τις παραμέτρους του ανέμου,

χρησιμοποιήθηκαν δορυφορικά δεδομένα από τη βάση BSW. Για τις κυματικές παραμέτρους, δεν υπήρχαν διαθέσιμα δεδομένα από εναλλακτικές και πιο αξιόπιστες πηγές δεδομένων.

Στον Πίνακα 13, παρουσιάζονται οι γεωγραφικές συντεταγμένες των συνταυτισμένων (χωρικά και χρονικά) σημείων του αριθμητικού μοντέλου ΣΚΙΡΟΝ-ΕΤΑ και των δορυφορικών δεδομένων BSW, καθώς και το ποσοστό της αντίστοιχης χρονικής κάλυψης της βάσης BSW για το συνταυτισμένο χρονικό διάστημα των δεδομένων της ταχύτητας και διεύθυνσης ανέμου. Συμπεραίνεται ότι για τα σημεία 1–3, που βρίσκονται στο βόρειο τμήμα της περιοχής μελέτης (βλ. Εικόνα 18), τα αποτελέσματα της αξιολόγησης μπορεί να θεωρηθούν επισφαλής λόγω του χαμηλού ποσοστού κάλυψης (50–60%).

*Πίνακας 13. Γεωγραφικές συντεταγμένες και χρονική κάλυψη συνταυτισμένων σημείων.*

<b>Όνομασία σημείου</b>	<b>Γεωγραφικό μήκος (°)</b>	<b>Γεωγραφικό πλάτος (°)</b>	<b>Χρονική διάρκεια</b>	<b>Ποσοστό χρονικής κάλυψης δεδομένων BSW (%)</b>
Σημείο 1	36.5	27.5	1995–2009	49.7
Σημείο 2	36.5	28		53.7
Σημείο 3	36.5	28.5		58.6
Σημείο 4	36	27.5		75.2
Σημείο 5	36	28		96.1
Σημείο 6	36	28.5		97.7
Σημείο 7	35.5	27.5		97.7
Σημείο 8	35.5	28		97.9
Σημείο 9	35.5	28.5		98.0



Εικόνα 18. Συνταυτισμένα σημεία αριθμητικού μοντέλου SKIPON-ETA και δορυφορικών δεδομένων από τη βάση Blended Sea Winds.

Στον Βασικά στατιστικά μεγέθη για την ταχύτητα του ανέμου στα συνταυτισμένα σημεία για τα δορυφορικά δεδομένα BSW και τα αποτελέσματα του αριθμητικού μοντέλου SKIPON. Πίνακας 14, παρουσιάζονται οι τιμές βασικών στατιστικών μεγεθών για την ταχύτητα του ανέμου στα συνταυτισμένα σημεία και για τις δύο πηγές δεδομένων. Τα στατιστικά μεγέθη αφορούν τη μέση τιμή  $m$ , την τυπική απόκλιση  $s$ , την διάμεσο  $med$ , τη μέγιστη τιμή  $max$ , το συντελεστή μεταβλητότητας  $CV$ , τη λοξότητα  $sk$  και την κύρτωση  $ku$ . Σε όλα τα συνταυτισμένα σημεία, οι τιμές της μέσης ταχύτητας ανέμου, της διαμέσου, της τυπικής απόκλισης και της μέγιστης τιμής είναι μεγαλύτερες για τα δορυφορικά δεδομένα σε σύγκριση με τα αντίστοιχα του μοντέλου. Επίσης, τη μικρότερη σχετική διασπορά φαίνεται να παρουσιάζουν σχεδόν συστηματικά τα δορυφορικά δεδομένα λόγω της χαμηλότερης τιμής του συντελεστή μεταβλητότητας (εκτός από το Σημείο 2). Τα δύο σετ δεδομένων χαρακτηρίζονται από θετική συμμετρία (δηλ. με μεγάλη ουρά προς τα δεξιά) και λεπτόκυρτη κατανομή (εκτός από τα Σημεία 2 και 8 για την περίπτωση του μοντέλου που θεωρείται πλατύκυρτη) σε όλα τα σημεία. Στα Σημεία 8 και 9, που χαρακτηρίζονται από το μεγαλύτερο ποσοστό χρονικής κάλυψης, τα στατιστικά μεγέθη που εξετάστηκαν για την ταχύτητα του ανέμου έχουν παραπλήσιες τιμές, ενώ στα Σημεία 1, 3 και 5 η διαφορά των μέσων τιμών της ταχύτητας είναι 3–4 m/s.

Πίνακας 14. Βασικά στατιστικά μεγέθη για την ταχύτητα του ανέμου στα συνταυτισμένα σημεία για τα δορυφορικά δεδομένα BSW και τα αποτελέσματα του αριθμητικού μοντέλου ΣΚΙΡΟΝ.

Σημείο	Πηγή	$N$	$m$ (m/s)	$s$ (m/s)	$med$ (m/s)	$max$ (m/s)	$CV$ (%)	$sk$ (-)	$ku$ (-)
Σ1	BSW	10884	7.6	3.4	7.4	36.2	0.45	1.0	5.7
	ΣΚΙΡΟΝ		3.7	2.0	3.5	14.0	0.54	0.9	4.5
Σ2	BSW	11770	6.5	3.4	6.0	25.8	0.53	0.9	4.4
	ΣΚΙΡΟΝ		4.8	2.4	4.9	16.0	0.50	0.1	2.4
Σ3	BSW	12832	6.4	3.4	6.0	25.5	0.53	1.0	4.5
	ΣΚΙΡΟΝ		3.7	2.6	3.0	18.7	0.69	1.3	4.8
Σ4	BSW	16476	7.5	3.3	7.4	30.8	0.44	0.6	4.3
	ΣΚΙΡΟΝ		6.4	3.2	6.4	20.4	0.50	0.3	2.9
Σ5	BSW	21044	6.9	3.2	6.8	26.2	0.46	0.6	3.7
	ΣΚΙΡΟΝ		4.1	2.2	3.9	19.0	0.54	1.2	5.7
Σ6	BSW	21391	6.4	3.2	6.0	31	0.51	0.8	4.1
	ΣΚΙΡΟΝ		4.6	2.8	4.0	20.4	0.61	1.2	5.0
Σ7	BSW	21409	7.3	3.3	7.2	32.8	0.45	0.5	3.8
	ΣΚΙΡΟΝ		5.2	2.8	4.9	19.9	0.54	0.8	3.6
Σ8	BSW	21434	6.9	3.2	6.8	25.0	0.46	0.5	3.4
	ΣΚΙΡΟΝ		6.6	3.1	6.5	19.9	0.47	0.3	2.8
Σ9	BSW	21462	6.4	3.2	6.1	27.3	0.49	0.7	3.7
	ΣΚΙΡΟΝ		6.1	3.0	6.0	19.7	0.49	0.4	3.1

Στον Βασικά στατιστικά μεγέθη για την ταχύτητα του ανέμου στα συνταυτισμένα σημεία για τα δορυφορικά δεδομένα BSW και τα αποτελέσματα του αριθμητικού μοντέλου ΣΚΙΡΟΝ. Πίνακας 15, παρουσιάζονται οι τιμές βασικών στατιστικών μεγεθών για την διεύθυνση του ανέμου στα συνταυτισμένα σημεία και για τις δύο πηγές δεδομένων. Τα στατιστικά μεγέθη αφορούν την κυκλική μέση τιμή  $m_{\theta}$ , την διάμεσο  $med_{\theta}$ , το συνιστάμενο διάνυσμα  $\bar{R}$ , την κυκλική διακύμανση  $var_{\theta}$ , την κυκλική τυπική απόκλιση  $s_{\theta}$ , την κυκλική λοξότητα  $sk_{\theta}$  και την κυκλική κύρτωση  $ku_{\theta}$ . Σε όλα τα συνταυτισμένα σημεία, η μέση τιμή της διεύθυνσης ανέμου για τα δορυφορικά δεδομένα είναι βορειο-δυτικής προέλευσης ενώ για το μοντέλο είναι δυτικής.

Πίνακας 15. Βασικά στατιστικά μεγέθη για την διεύθυνση του ανέμου στα συντακτισμένα σημεία για τα δορυφορικά δεδομένα BSW και τα αποτελέσματα του μοντέλου ΣΚΙΡΟΝ.

Σημείο	Πηγή	$m_{\theta}$ ( $^{\circ}$ )	$med_{\theta}$ ( $^{\circ}$ )	$\bar{R}$ (-)	$var_{\theta}$ (-)	$s_{\theta}$ (-)	$sk_{\theta}$ (-)	$ku_{\theta}$ (-)
Σ1	BSW	328.2	333.2	0.37	0.62	1.12	0.2	0.1
	ΣΚΙΡΟΝ	251.8	337.2	0.45	0.55	1.05	0	0.3
Σ2	BSW	329.0	238.5	0.37	0.63	1.12	0.1	0.1
	ΣΚΙΡΟΝ	250.9	247.1	0.52	0.48	0.98	0.1	0.7
Σ3	BSW	330.2	329.6	0.35	0.7	1.1	0.1	0.1
	ΣΚΙΡΟΝ	268.0	276.6	0.35	0.7	1.1	0.4	0.2
Σ4	BSW	320.1	326.2	0.42	0.58	1.08	0.1	0.2
	ΣΚΙΡΟΝ	295.3	299.0	0.54	0.46	0.96	0.3	0.7
Σ5	BSW	317.7	322.4	0.41	0.59	1.09	0.1	0.1
	ΣΚΙΡΟΝ	266.2	268.9	0.54	0.46	0.96	0.1	0.5
Σ6	BSW	316.4	318.5	0.39	0.61	1.10	0.1	0.1
	ΣΚΙΡΟΝ	265.1	265.5	0.46	0.54	1.04	0.2	0.2
Σ7	BSW	313.0	320.7	0.46	0.54	1.04	0.1	0.2
	ΣΚΙΡΟΝ	291.9	212.8	0.55	0.45	0.95	0.3	0.4
Σ8	BSW	311.5	310.1	0.45	0.55	1.05	0.1	0.2
	ΣΚΙΡΟΝ	280.2	289.2	0.59	0.41	0.91	0.2	0.5
Σ9	BSW	309.8	312.3	0.44	0.56	1.06	0.1	0.2
	ΣΚΙΡΟΝ	275.0	277.0	0.57	0.43	0.93	0.2	0.5

Το συνιστάμενο διάνυσμα είναι συστηματικά μεγαλύτερο για τα αποτελέσματα του μοντέλου σε όλα τα σημεία, υποδηλώνοντας μια σχετικά μικρότερη διασπορά σε σχέση με τα δορυφορικά δεδομένα, ενώ η κυκλική διακύμανση (και η κυκλική απόκλιση) είναι μεγαλύτερη για τα δορυφορικά δεδομένα. Οι τιμές της κυκλικής λοξότητας και κύρτωσης είναι μεγαλύτερες για τα αποτελέσματα του μοντέλου σε σύγκριση με τα δορυφορικά δεδομένα (εκτός από το Σημείο 1 για το  $sk_{\theta}$ ). Οι τιμές της κυκλικής λοξότητας κοντά στο μηδέν υποδηλώνουν σχετικά συμμετρικές κατανομές γύρω από τη μέση τιμή της διεύθυνσης ενώ οι χαμηλές τιμές της κυκλικής κύρτωσης αντιπροσωπεύουν σχετικά ομαλές κατανομές. Στα Σημεία 1–3 εντοπίζονται οι μεγαλύτερες διαφορές στις μέσες τιμές των διευθύνσεων ανέμου ( $62^{\circ}$ – $78^{\circ}$ ), ενώ στα Σημεία 4, 7 και 8 οι μικρότερες ( $21^{\circ}$ – $31^{\circ}$ ).

Στον Πίνακα 16 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για τα στατιστικά μέτρα που περιγράφηκαν στο Εδάφιο 2.1 και αφορούν την ταχύτητα του ανέμου. Από τις τιμές του συντελεστή συσχέτισης συμπεραίνεται ότι για όλα τα σημεία, εκτός από το Σημείο 2, η γραμμική συσχέτιση των ταχυτήτων ανέμου για τις δύο πηγές δεδομένων είναι ισχυρή με τη μεγαλύτερη τιμή (0.84) να εμφανίζεται στο Σημείο 8. Από τις τιμές του στατιστικού δείκτη BIAS είναι φανερό ότι τα αποτελέσματα του μοντέλου συστηματικά υποεκτιμούν σε όλα τα εξεταζόμενα σημεία την ταχύτητα ανέμου σε σχέση με τα δορυφορικά δεδομένα με τη μικρότερη τιμή να εμφανίζεται στα Σημεία 8 και 9 (-0.4 m/s) και τη μεγαλύτερη (-3.9 m/s) στο Σημείο 1.

Ανάλογη είναι η συμπεριφορά και για τους στατιστικούς δείκτες RMSE και SI. Για τους στατιστικούς δείκτες MAE και SMAPE, μόνο το Σημείο 8 παρουσιάζει τις καλύτερες τιμές (1.3 m/s και 24.8%, αντίστοιχα). Να σημειωθεί ότι το Σημείο 1, που παρουσιάζει τις λιγότερο καλές τιμές για τους στατιστικούς δείκτες, έχει και το μικρότερο ποσοστό χρονικής κάλυψης παρατηρήσεων για το δορυφορικό σετ δεδομένων.

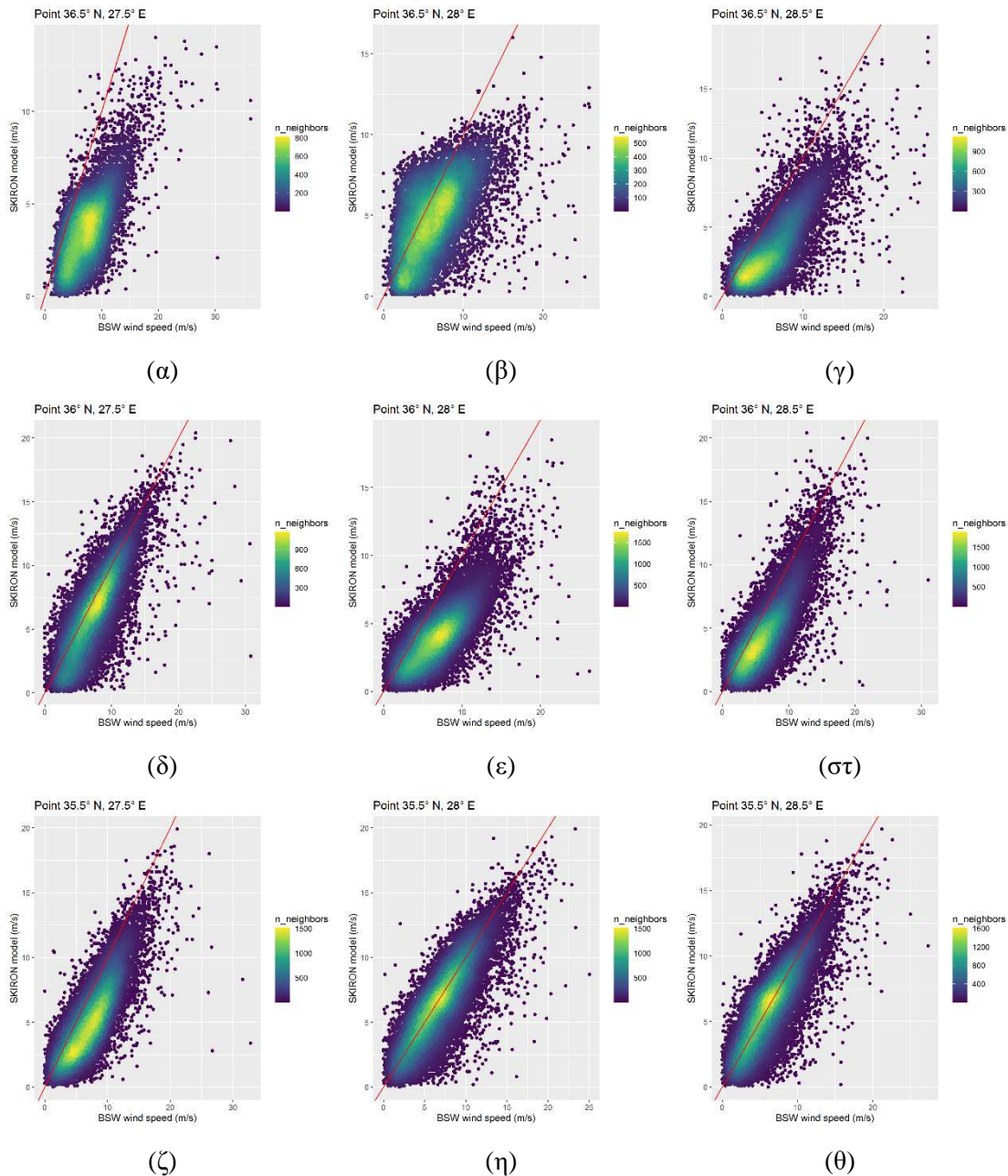
Στην Εικόνα 19 παρουσιάζονται τα διαγράμματα διασποράς για την ταχύτητα του ανέμου από τις δύο πηγές δεδομένων με προσαρμοσμένη τη γραμμή παλινδρόμησης  $y = x$ . Στα σημεία με συντελεστή συσχέτισης  $r_{xy} \geq 0.8$  (δηλ. τα σημεία 4, 6–9), όπως ήταν αναμενόμενο, τα ζεύγη των δεδομένων είναι περισσότερο και πιο ομοιόμορφα συγκεντρωμένα γύρω από την ευθεία παλινδρόμησης σε σύγκριση με τα υπόλοιπα γεγονός που επιβεβαιώνει την ισχυρή γραμμική τους συσχέτιση.

*Πίνακας 16. Στατιστικά μέτρα για την αξιολόγηση της ταχύτητας του ανέμου από τα αποτελέσματα του μοντέλου ΣΚΙΡΟΝ με αναφορά τα δορυφορικά δεδομένα BSW. Οι αριθμοί με χαρακτήρα αφορούν τις καλύτερες τιμές για κάθε στατιστικό μέτρο.*

Σημείο	$r_{xy}$ (-)	BIAS (m/s)	RMSE (m/s)	MAE (m/s)	SI (-)	SMAPE (%)
Σ1	0.69	-3.9	4.6	4.0	0.6	73.0
Σ2	0.57	-1.7	3.3	2.5	0.5	49.2
Σ3	0.75	-2.7	3.5	2.9	0.5	62.9
Σ4	0.80	-1.0	2.3	1.7	0.3	31.7
Σ5	0.75	-2.8	3.5	2.9	0.5	56.5



Σ6	0.80	-1.8	2.7	2.1	0.4	44.3
Σ7	0.82	-2.1	2.8	2.3	0.4	41.9
Σ8	<b>0.84</b>	<b>-0.4</b>	<b>1.9</b>	<b>1.3</b>	<b>0.3</b>	<b>24.8</b>
Σ9	0.82	<b>-0.4</b>	<b>1.9</b>	1.4	<b>0.3</b>	27.2



Εικόνα 19. Διάγραμμα διασποράς μαζί με τη γραμμή παλινδρόμησης  $y = x$  των ταχυτήτων ανέμου για τα δεδομένα από τη βάση SKIPON και BSW στο σημείο α) 1, β) 2, γ) 3, δ) 4, ε) 5, στ) 6, ζ) 7, η) 8 και θ) 9.

Στον Πίνακα 17 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για τα στατιστικά μέτρα που περιγράφηκαν στο Εδάφιο 2.2 και αφορούν τη διεύθυνση του ανέμου. Από τις τιμές του

κυκλικού συντελεστή συσχέτισης συμπεραίνεται ότι υπάρχει ισχυρή κυκλική συσχέτιση για τα Σημεία 4, 7–9 με  $r_{\theta\phi} \geq 0.7$  ενώ στα υπόλοιπα σημεία είναι σχετικά ασθενέστερη με  $0.50 \leq r_{\theta\phi} < 0.7$ . Αναφορικά με τις τιμές των στατιστικών δεικτών BIAS και MCAE, το Σημείο 7 χαρακτηρίζεται από τις καλύτερες τιμές ( $-21.1^\circ$  και  $33.0^\circ$ , αντίστοιχα) ενώ το Σημείο 2 από τις λιγότερες καλές ( $-78.1^\circ$  και  $74.8^\circ$ , αντίστοιχα). Χαμηλές τιμές του στατιστικού δείκτη RME εντοπίζονται στα Σημεία 4, 7–9 (0.4) ενώ το Σημείο 4 έχει επίσης τη χαμηλότερη τιμή και για το στατιστικό δείκτη MRB. Για τους δύο τελευταίους δείκτες, η λιγότερη καλή συμπεριφορά εντοπίζεται στα Σημεία 2 (0.8) και 1 (-9.7), αντίστοιχα, όπου και τα δύο παρουσιάζουν το μικρότερο ποσοστό χρονικής κάλυψης παρατηρήσεων για το δορυφορικό σετ δεδομένων.

Στην Εικόνα 20, παρουσιάζονται τα ροδογράμματα της διεύθυνσης του ανέμου και για τις δύο πηγές δεδομένων σε όλα τα εξεταζόμενα σημεία. Γενικά, φαίνεται ότι η κατανομή των διευθύνσεων ανέμου που προέρχονται από τα δορυφορικά δεδομένα είναι πιο ομοιόμορφη σε αντίθεση με αυτή του μοντέλου όπου ξεχωρίζουν συγκεκριμένες διευθύνσεις με μεγάλη συχνότητα εμφάνισης. Τα Σημεία 4 και 7–9, με κυκλικό συντελεστή συσχέτισης  $r_{\theta\phi} \geq 0.7$ , εμφανίζουν την πιο ικανοποιητική συμπεριφορά στο πλαίσιο της αξιολόγησης των ανεμολογικών δεδομένων.

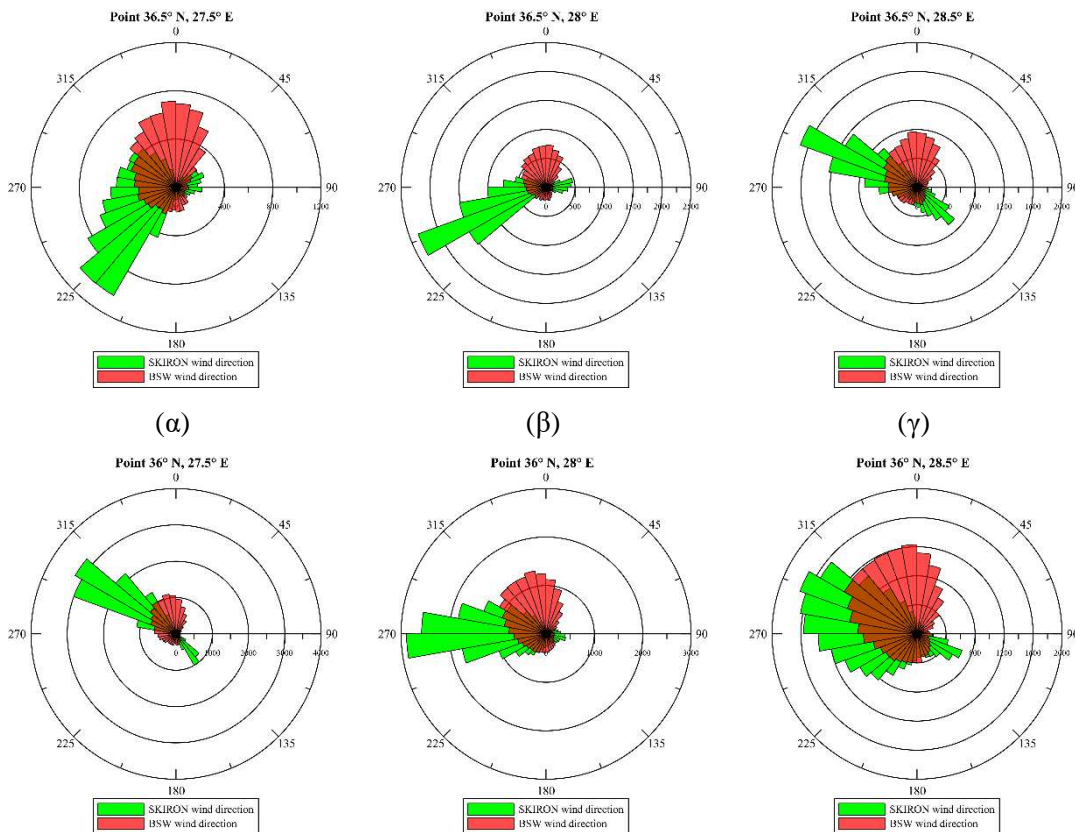
*Πίνακας 17. Στατιστικά μέτρα για την αξιολόγηση της διεύθυνσης του ανέμου από τα αποτελέσματα του μοντέλου ΣΚΙΡΟΝ με αναφορά τα δορυφορικά δεδομένα BSW. Οι αριθμοί με χαρακτήρα αφορούν τις καλύτερες τιμές για κάθε στατιστικό μέτρο.*

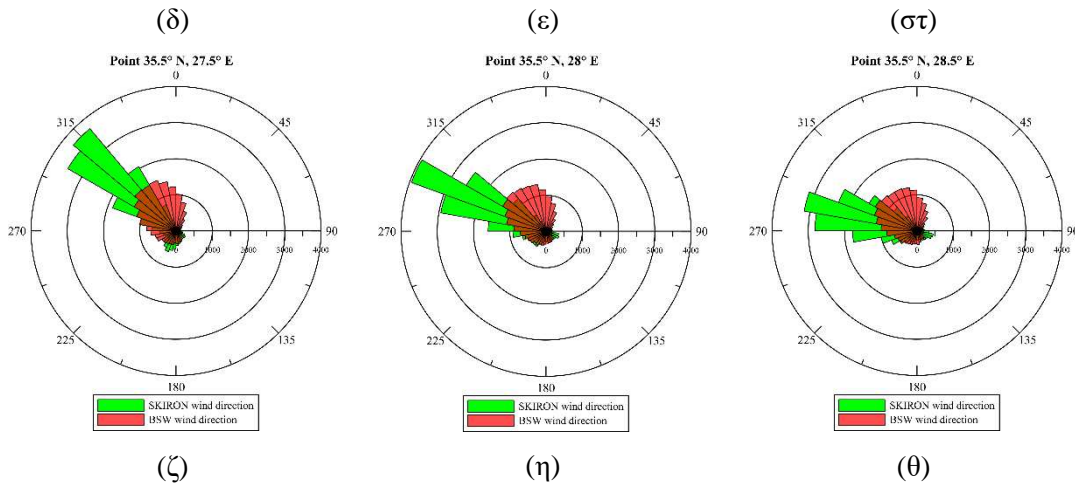
Σημείο	$r_{\theta\phi}$ (-)	BIAS ( $^\circ$ )	MCAE ( $^\circ$ )	RME (-)	MRB (-)
Σ1	0.57	-76.3	71.3	0.7	-9.7
Σ2	0.50	-78.1	74.8	0.8	-7.8
Σ3	0.50	-62.2	63.7	0.7	-5.2
Σ4	0.70	-24.7	39.9	<b>0.4</b>	<b>-0.7</b>
Σ5	0.67	-51.5	50.9	0.5	-8.0
Σ6	0.62	-51.3	50.6	0.5	-7.7
Σ7	<b>0.76</b>	<b>-21.1</b>	<b>33.0</b>	<b>0.4</b>	-3.0
Σ8	0.75	-31.3	37.4	<b>0.4</b>	-4.7
Σ9	0.72	-34.8	39.6	<b>0.4</b>	-5.6

Συγκρίνοντας τις τιμές των στατιστικών δεικτών για την ταχύτητα και διεύθυνση του ανέμου με άλλες εργασίες που αξιολογούνται ανεμολογικά δεδομένα (π.χ. Soukissian et al., 2017c; Kotroni et al., 2018) που προέρχονται από διαφορετικές πηγές, διαπιστώνεται ότι η συμπεριφορά του ανεμολογικού πεδίου από τα αποτελέσματα του μοντέλου είναι αρκετά αξιόπιστη, με εξαίρεση τα Σημεία 1–3, για τις ανάγκες της παρούσας μελέτης. Επομένως, τα αποτελέσματα που ακολουθούν και αναφέρονται στο βόρειο τμήμα της περιοχής μελέτης θα πρέπει να εξετάζονται με προσοχή.

#### 4.2 Αριθμητικά αποτελέσματα ανεμολογικών και κυματικών παραμέτρων

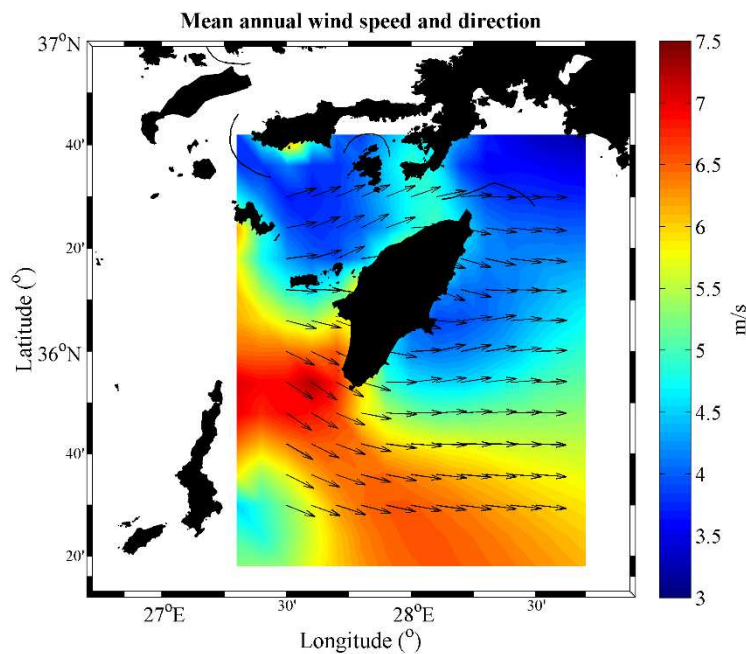
Στην Εικόνα 21(α), παρουσιάζεται η μέση ετήσια ταχύτητα και η διεύθυνση του ανέμου για την περιοχή ενδιαφέροντος. Παρατηρείται ότι η επικρατούσα διεύθυνση του ανέμου στην ανατολική πλευρά του νησιού είναι η δυτική, ενώ στη δυτική πλευρά είναι η βορειοδυτική. Αναφορικά με τις τιμές της ταχύτητας ανέμου στα 10 m, η μέγιστη μέση ετήσια τιμή παρατηρείται νοτιοδυτικά της Ρόδου (35.9° N, 27.6° E) με τιμή ~7.2 m/s ενώ οι χαμηλότερες τιμές είναι της τάξης των 4 m/s και εντοπίζονται σε εκτεταμένες περιοχές βόρεια και ανατολικά του νησιού.



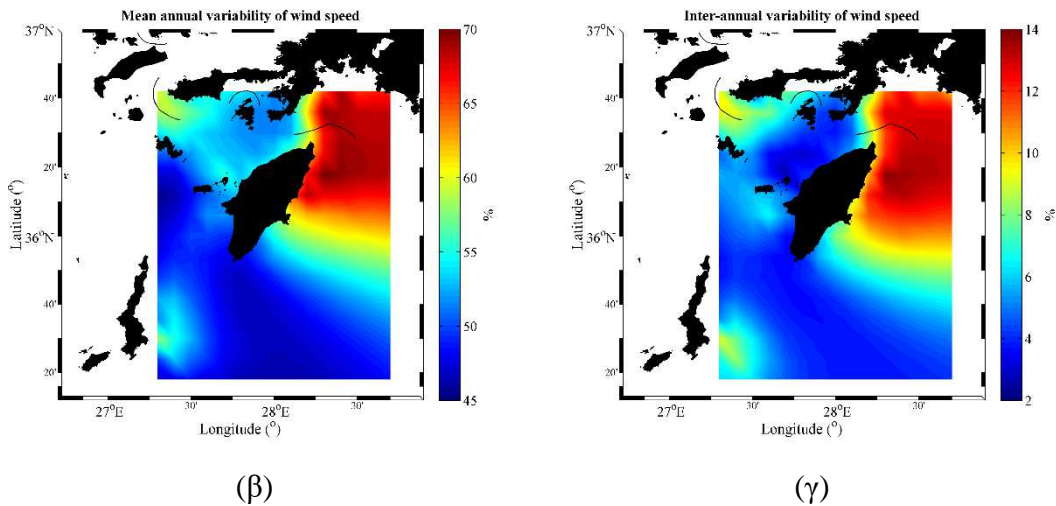


Εικόνα 20. Ροδογράμματα της διεύθυνσης του ανέμου για τα δεδομένα από τη βάση ΣΚΙΡΟΝ και BSW στο σημείο α) 1, β) 2, γ) 3, δ) 4, ε) 5, στ) 6, ζ) 7, η) 8 και θ) 9.

Ανάλογη συμπεριφορά παρουσιάζει και η υπερετήσια μεταβλητότητα (IAV) της ταχύτητας ανέμου με τη μέγιστη τιμή να εμφανίζεται και πάλι στην ίδια περιοχή (~6%) και το βορειοδυτικό τμήμα να παρουσιάζει τις χαμηλότερες τιμές (~3%) (βλ. Εικόνα 21(γ)). Η περιοχή με την υψηλότερη τιμή για τη μέση ετήσια ταχύτητα ανέμου παρουσιάζει μέση ετήσια και υπερετήσια μεταβλητότητα κοντά στο 49% και 4%, αντίστοιχα, ποσοστά αρκετά χαμηλά για την περιοχή μελέτης.

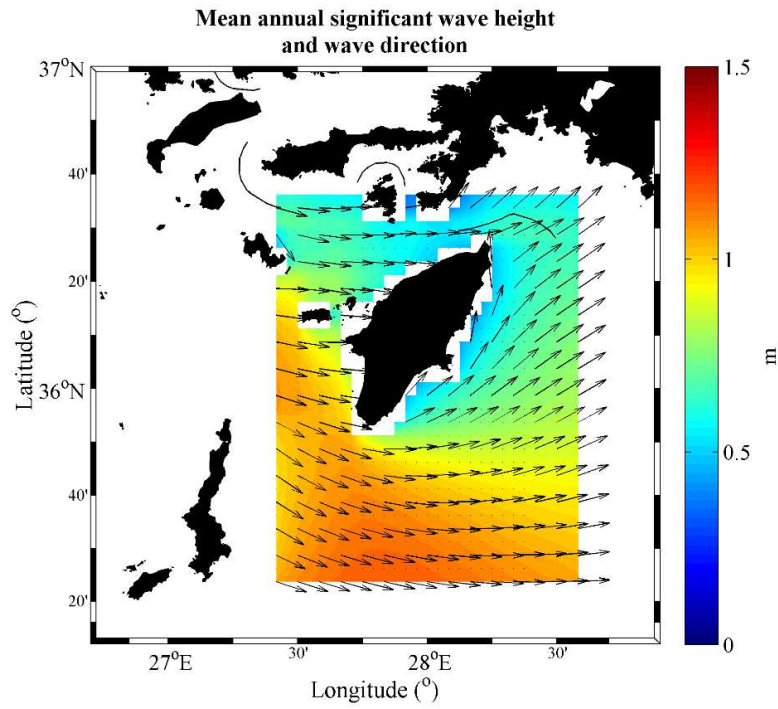


(α)

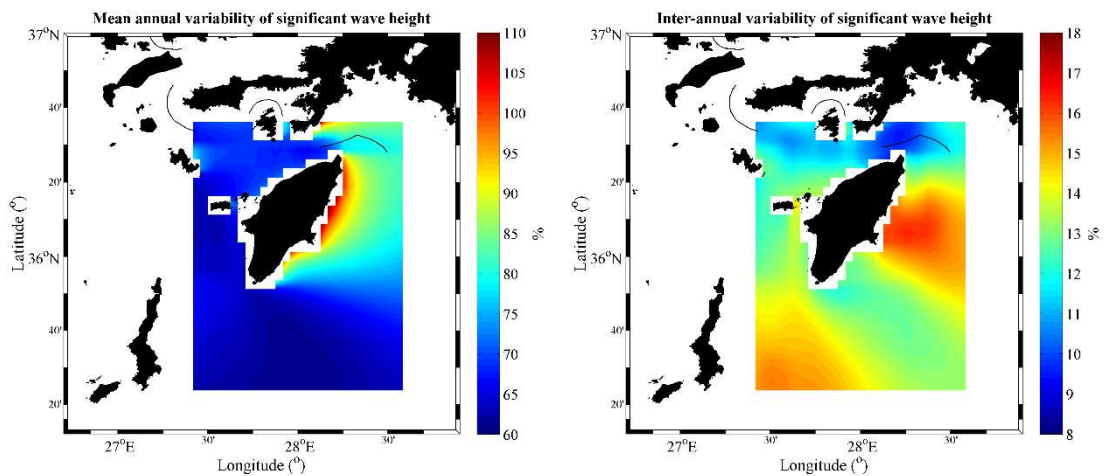


Εικόνα 21. (α) Μέση ετήσια ταχύτητα και διεύθυνση ανέμου, (β) μέση ετήσια μεταβλητότητα και (γ) υπερετήσια μεταβλητότητα της ταχύτητας ανέμου.

Στη συνέχεια, παρατίθενται οι αντίστοιχοι χάρτες για τις κυματικές παραμέτρους. Στην Εικόνα 22(α), εμφανίζεται η χωρική κατανομή του μέσου σημαντικού ύψους κύματος μαζί με τη μέση διεύθυνση διάδοσης κυματισμού σε ετήσια βάση. Βόρεια και νότια της Ρόδου επικρατούν δυτικές κατευθύνσεις διάδοσης κυματισμού με τιμές ύψους κύματος κάτω από 1 m, ανατολικά οι επικρατούσες κατευθύνσεις είναι νοτιοανατολικές ενώ δυτικά είναι βορειοδυτικές με μέγιστη τιμή τα 1.2 m (35.4° N, 27.8° E). Η μέση ετήσια μεταβλητότητα (Εικόνα 22(β)) παρουσιάζει μέγιστη τιμή (114%) στο σημείο με συντεταγμένες (36.1° N, 28.3° E) και σε πολύ κοντινή απόσταση βρίσκεται και το σημείο με τη μεγαλύτερη τιμή υπερετήσιας μεταβλητότητας (16%) για τα σημαντικό ύψος κύματος (Εικόνα 22 (γ)).



(α)

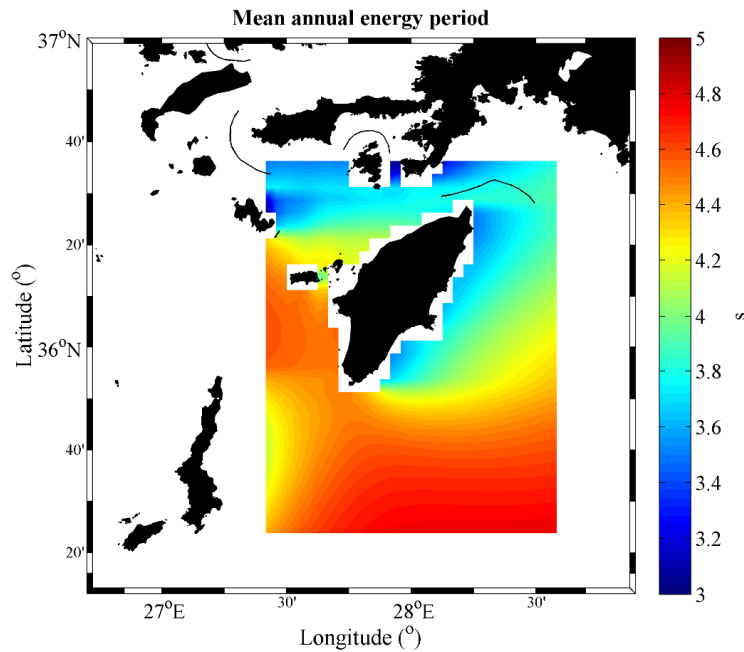


(β)

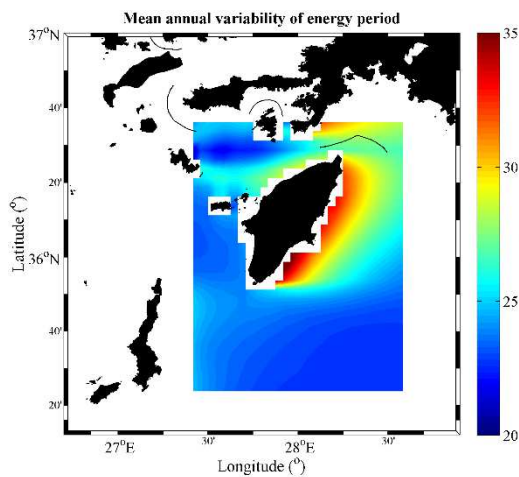
(γ)

Εικόνα 22. (α) Μέσο ετήσιο σημαντικό ύψος κύματος και διεύθυνση διάδοσης κυματισμού, (β) μέση ετήσια μεταβλητότητα και (γ) υπερετήσια μεταβλητότητα του σημαντικού ύψους κύματος.

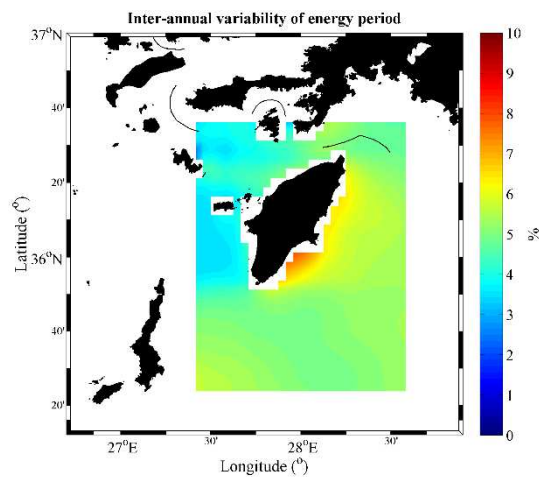
Οι μεγαλύτερες τιμές για την ενεργειακή περίοδο (βλ. Εικόνα 24(α)) παρουσιάζονται στο νότιο και δυτικό τμήμα της περιοχής μελέτης με τη μεγαλύτερη τιμή (4.8 s) να εμφανίζεται στο σημείο (35.4° N, 28.6° E). Η μέση ετήσια μεταβλητότητα (Εικόνα 6(β)) παρουσιάζει μέγιστη τιμή (36%) στο σημείο με συντεταγμένες (35.9° N, 28.0° E) και σε πολύ κοντινή απόσταση βρίσκεται και το σημείο με τη μεγαλύτερη τιμή υπερετήσιας μεταβλητότητας (8%) για την ενεργειακή περίοδο (Εικόνα 6(γ)).



(α)



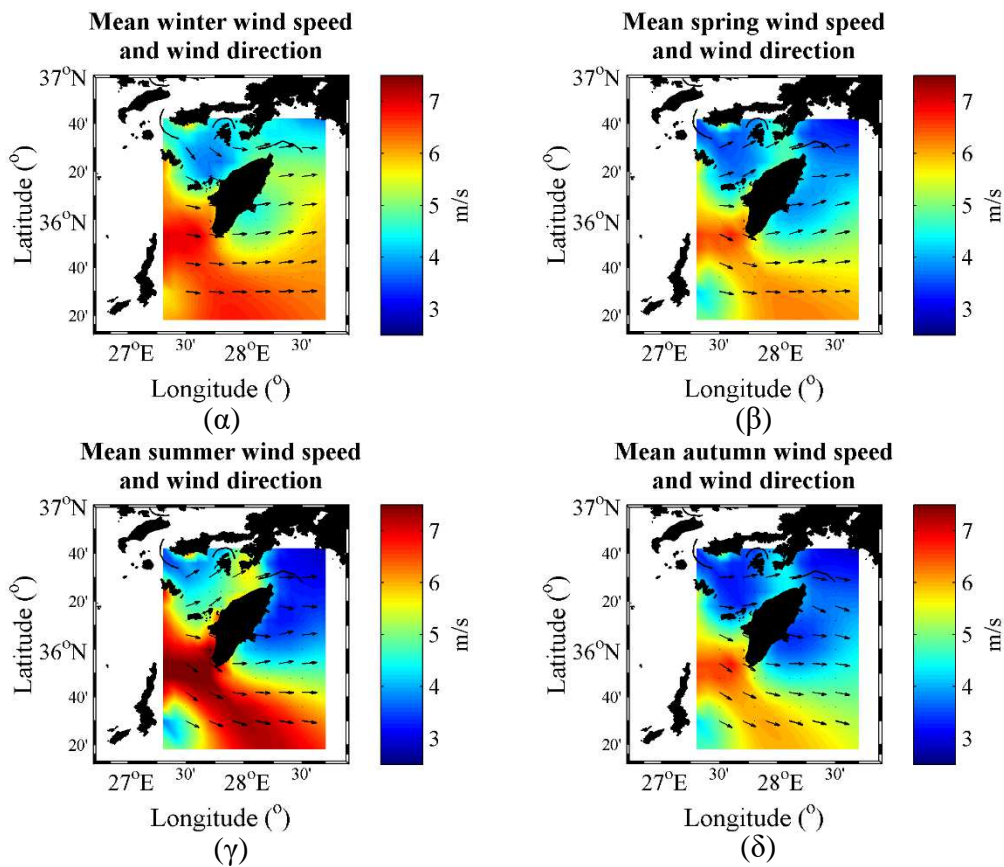
(β)



(γ)

Εικόνα 23. (α) Μέση ετήσια ενεργειακή περίοδος, (β) μέση ετήσια μεταβλητότητα και (γ) υπερετήσια μεταβλητότητα της ενεργειακής περιόδου.

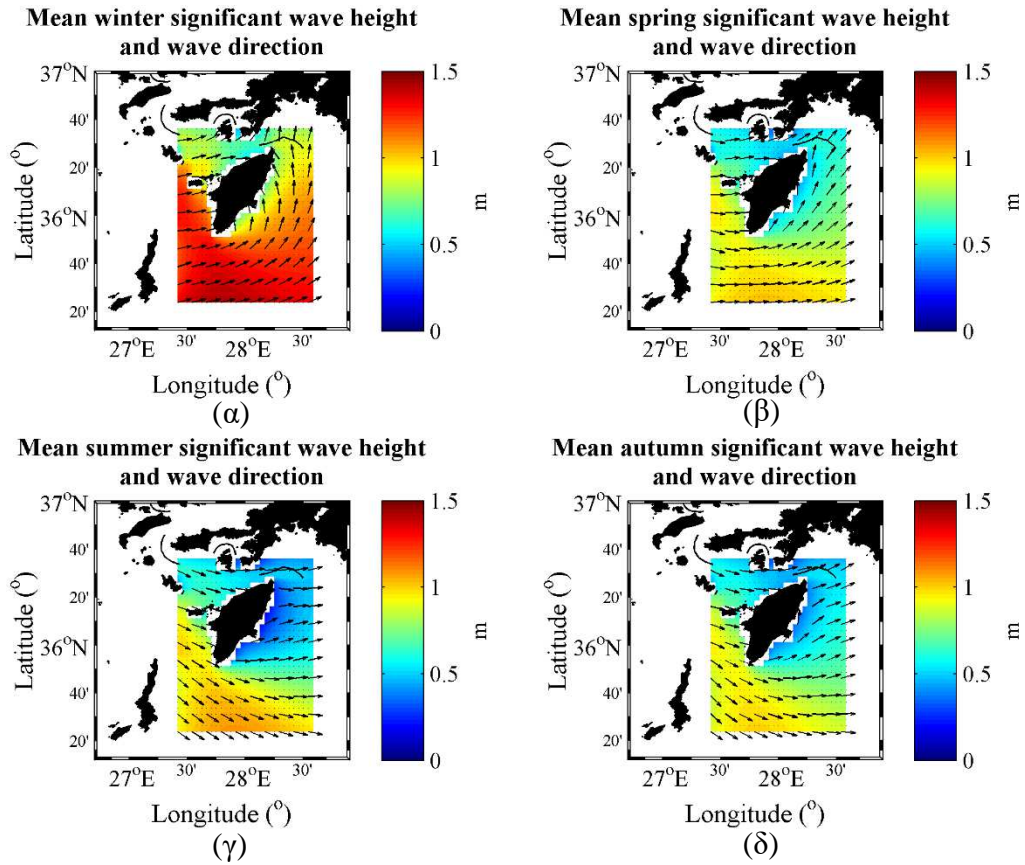
Μελετώντας την εποχική συμπεριφορά των τιμών της ταχύτητας ανέμου (Εικόνα 24), η υψηλότερη τιμή εμφανίζεται το καλοκαίρι με μέγιστη τιμή στο δυτικό τμήμα της Ρόδου ( $35.9^{\circ}$  N,  $27.6^{\circ}$  E) ίση με  $8.3$  m/s. Ακολουθούν (για την ίδια περιοχή) ο χειμώνας με  $7.1$  m/s, το φθινόπωρο ( $6.8$  m/s) και η άνοιξη ( $6.7$  m/s). Από τα ανωτέρω αποτελέσματα, επιβεβαιώνεται η σημαντικότερη συμβολή των ετησίων (μελτεμιών) στη διαμόρφωση του ανεμολογικού κλίματος της περιοχής μελέτης.



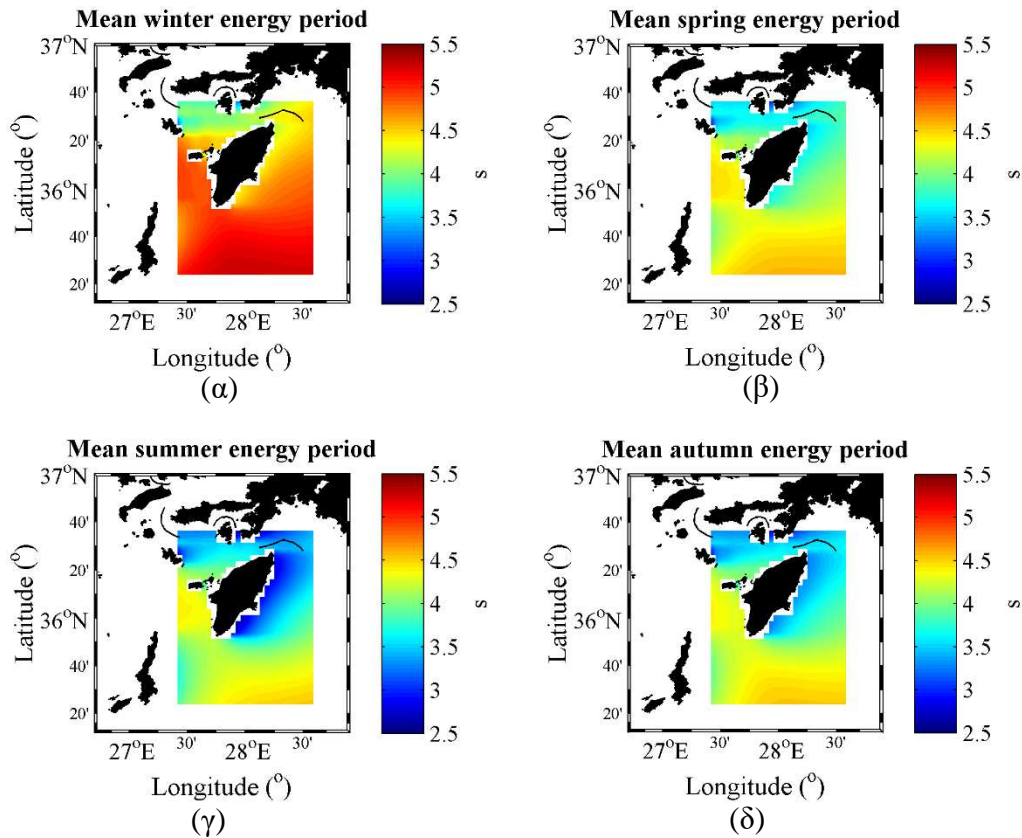
Εικόνα 24. Μέση ταχύτητα και διεύθυνση ανέμου για (α) το χειμώνα, (β) την άνοιξη, (γ) το καλοκαίρι και (δ) το φθινόπωρο.

Ακολουθώντας, μελετώντας την εποχική συμπεριφορά των τιμών του σημαντικού ύψους κύματος και της ενεργειακής περιόδου (βλ. Εικόνα 25 και Εικόνα 26, αντίστοιχα), οι υψηλότερες τιμές και για τις δύο παραμέτρους εμφανίζονται κατά την χειμερινή περίοδο σε όλο το νότιο τμήμα της Ρόδου και ξεπερνούν τα 1.3 m και 5 s, αντίστοιχα. Η αμέσως επόμενη εποχή με την υψηλότερη κυματική ισχύ είναι το καλοκαίρι, μετά η άνοιξη και τέλος το φθινόπωρο. Η χωρική κατανομή των μέσων τιμών και για τις δύο παραμέτρους παρουσιάζει παρόμοια συμπεριφορά (το νότιο και δυτικό τμήμα εμφανίζει υψηλότερες τιμές σε σχέση με το βόρειο και ανατολικό) κατά τη διάρκεια των τριών προαναφερθέντων εποχών.





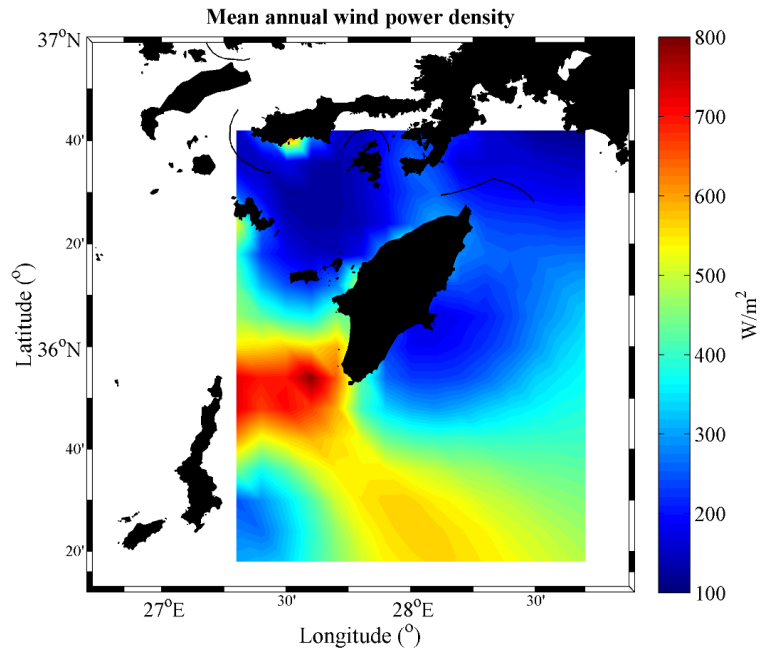
Εικόνα 25. (α) Μέσο σημαντικό ύψος κύματος και διεύθυνση διάδοσης κυματισμού για (α) το χειμώνα, (β) την άνοιξη, (γ) το καλοκαίρι και (δ) το φθινόπωρο.



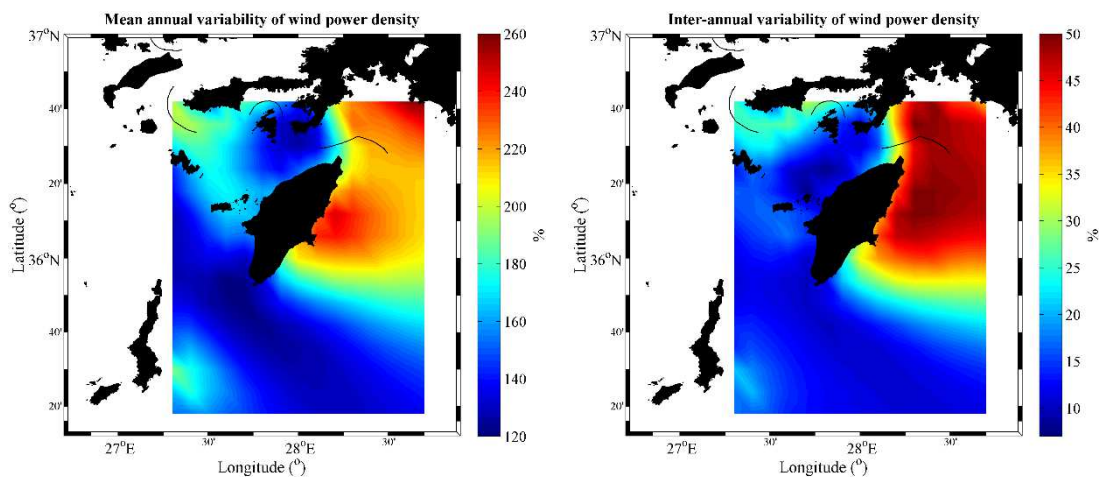
Εικόνα 26. Μέση ενεργειακή περίοδος για (α) το χειμώνα, (β) την άνοιξη, (γ) το καλοκαίρι και (δ) το φθινόπωρο.

#### 4.3 Αριθμητικά αποτελέσματα για το υπεράκτιο αιολικό δυναμικό και την ροή κυματικής ενέργειας

Στην Εικόνα 27(α) απεικονίζεται η ισχύς του ανέμου ανά μονάδα επιφάνειας ( $W/m^2$ ) στο ύψος των 100 m σε ετήσια κλίμακα. Η μέγιστη μέση ετήσια τιμή της ισχύος εμφανίζεται στη νοτιοδυτική περιοχή του νησιού ( $35.9^\circ N, 27.6^\circ E$ ) με τιμή ίση  $\sim 788 W/m^2$ , ενώ η ελάχιστη μέση ετήσια τιμή ( $\sim 105 W/m^2$ ) εμφανίζεται στα βορειοδυτικά ( $36.5^\circ N, 27.5^\circ E$ ). Η μέση ετήσια μεταβλητότητα (Εικόνα 27(β)) παρουσιάζει μέγιστη τιμή (259%) στο σημείο με συντεταγμένες ( $36.7^\circ N, 28.7^\circ E$ ) και στις γεωγραφικές συντεταγμένες ( $36.2^\circ N, 28.3^\circ E$ ) βρίσκεται και το σημείο με τη μεγαλύτερη τιμή υπερετήσιας μεταβλητότητας (50%) για την ίδια μεταβλητή (Εικόνα 27(γ)).



(α)



(β)

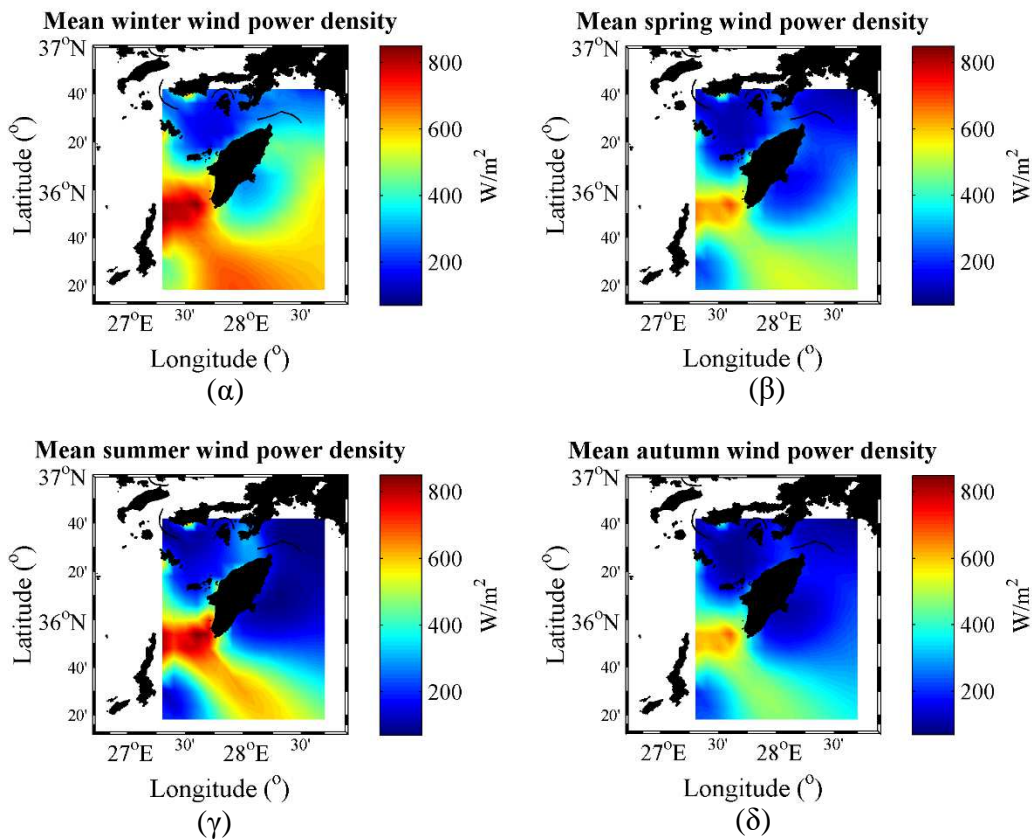
(γ)

Εικόνα 27. (α) Μέσο ετήσιο υπεράκτιο αιολικό δυναμικό, (β) μέση ετήσια μεταβλητότητα και (γ) υπερετήσια μεταβλητότητα του υπεράκτιου αιολικού δυναμικού.

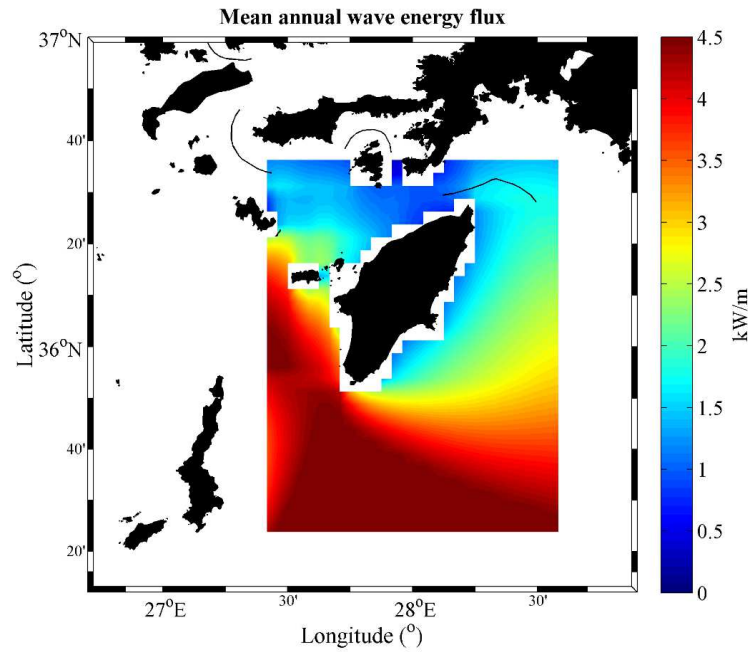
Ακολούθως, μελετώντας την εποχική συμπεριφορά των τιμών του υπεράκτιου αιολικού δυναμικού (βλ. Εικόνα 28), οι υψηλότερες τιμές εμφανίζονται κατά την καλοκαιρινή περίοδο που καλύπτουν το νοτιοδυτικό τμήμα της ν. Ρόδου και ξεπερνούν τα  $900 \text{ W/m}^2$ . Όπως και στην εποχιακή συμπεριφορά της ταχύτητας ανέμου, η αμέσως επόμενη εποχή με το υψηλότερο αιολικό δυναμικό είναι ο χειμώνας (με μέγιστη τιμή  $848 \text{ W/m}^2$ ), μετά η άνοιξη (με μέγιστη τιμή  $718 \text{ W/m}^2$ ) και τέλος, το φθινόπωρο (με μέγιστη τιμή  $684 \text{ W/m}^2$ ). Η χωρική κατανομή των μέσων τιμών για την παράμετρο αυτή παρουσιάζει

παρόμοια συμπεριφορά (το νότιο και δυτικό τμήμα εμφανίζει υψηλότερες τιμές σε σχέση με το βόρειο και ανατολικό) κατά τη διάρκεια των τεσσάρων εποχών.

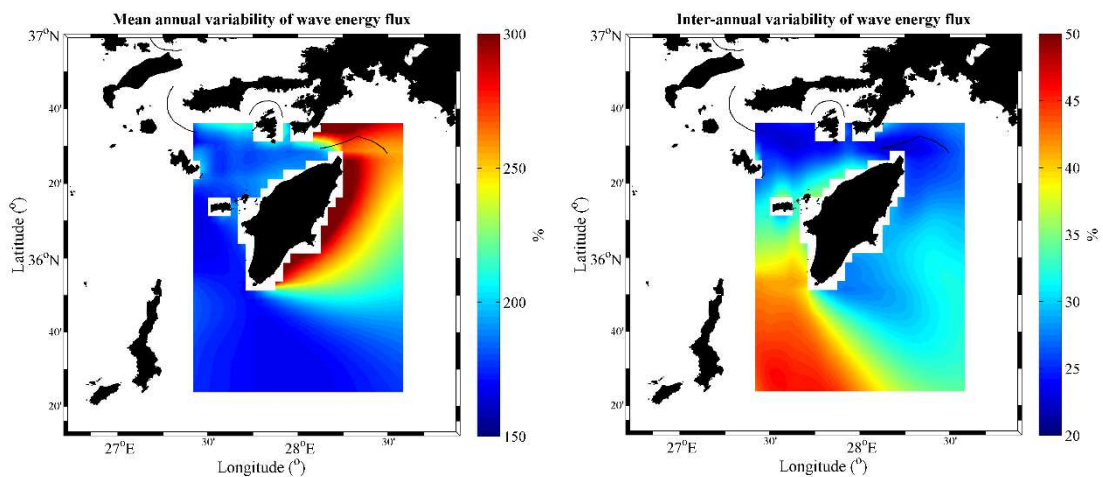
Η χωρική κατανομή των τιμών της μέσης ετήσιας κυματικής ροής ενέργειας (κυματική ισχύς) απεικονίζεται σε kW/m στην Εικόνα 29(α). Στην ανοιχτή θαλάσσια περιοχή δυτικά της Ρόδου (36.4° N, 27.8° E) εμφανίζεται η μέγιστη κυματική ενέργεια με τιμή στα 5.5 kW/m. Οι χαμηλότερες τιμές κυματικής ισχύος (~1 kW/m) εντοπίζονται στα βόρεια του νησιού. Η μέση ετήσια μεταβλητότητα (Εικόνα 29(β)) παρουσιάζει μέγιστη τιμή (401%), βορειοανατολικά της ν. Ρόδου, στο σημείο με συντεταγμένες (36.6° N, 28.1° E) και στις γεωγραφικές συντεταγμένες (35.5° N, 27.5° E), στο νοτιοδυτικό τμήμα, βρίσκεται και το σημείο με τη μεγαλύτερη τιμή υπερετήσιας μεταβλητότητας (46%) για την ίδια μεταβλητή (Εικόνα 29(γ)).



Εικόνα 28. Μέσο υπεράκτιο αιολικό δυναμικό για (α) το χειμώνα, (β) την άνοιξη, (γ) το καλοκαίρι και (δ) το φθινόπωρο.



(α)



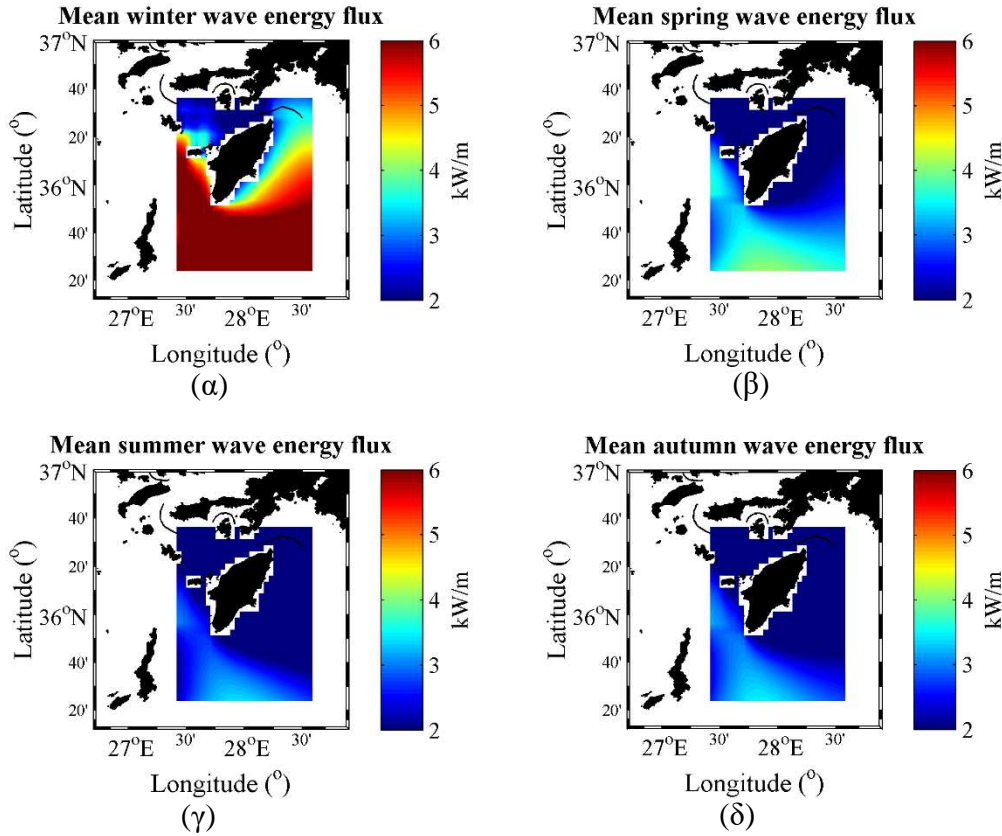
(β)

(γ)

Εικόνα 29. (α) Μέση ετήσια ροή κυματικής ενέργειας, (β) μέση ετήσια μεταβλητότητα και (γ) υπερετήσια μεταβλητότητα της ροής κυματικής ενέργειας.

Ακολούθως, μελετώντας την εποχική συμπεριφορά των τιμών της ροής της κυματικής ενέργειας (βλ. Εικόνα 30), οι υψηλότερες τιμές εμφανίζονται κατά την χειμερινή περίοδο που καλύπτουν όλο το νότιο τμήμα της ν. Ρόδου και ξεπερνούν τα 6 kW/m (η μέγιστη τιμή είναι 8.9 kW/m στο σημείο (35.4° N, 27.8° E)). Η αμέσως επόμενη εποχή με την υψηλότερη κυματική ενέργεια είναι η άνοιξη, με μέγιστη τιμή 4.1 kW/m. Το καλοκαίρι και το φθινόπωρο παρουσιάζουν σχεδόν ίδια συμπεριφορά αναφορικά με τη

χωρική κατανομή των μέσων τιμών της κυματικής ενέργειας με μέγιστες τιμές 3.4 kW/m και 3.5 kW/m, αντίστοιχα.



Εικόνα 30. Μέση ροή κυματικής ενέργειας για (α) το χειμώνα, (β) την άνοιξη, (γ) το καλοκαίρι και (δ) το φθινόπωρο.

Συνοπτικά, με βάση τα διαθέσιμα δεδομένα η θαλάσσια περιοχή που συνδυάζει υψηλό αιολικό και αρκετά υψηλό κυματικό δυναμικό, αντιστοιχεί στο ορθογώνιο που ορίζεται από τις συντεταγμένες (35.8° N–27.5° E) και (35.9° N–27.6° E), όπου οι τιμές του αιολικού δυναμικού κυμαίνονται μεταξύ 700 W/m<sup>2</sup> και 780 W/m<sup>2</sup>, και της κυματικής ενέργειας μεταξύ 4.1 kW/m και 4.5 kW/m.

#### 4.4 Αριθμητικά αποτελέσματα για τις κατανομές ανεμολογικών και κυματικών χαρακτηριστικών

Στο εδάφιο αυτό παρατίθενται τα αποτελέσματα που αφορούν τις μονοδιάστατες κατανομές γραμμικών και κατευθυντικών μεταβλητών καθώς και τις διδιάστατες κατανομές γραμμικών μεταβλητών και γραμμικών-κατευθυντικών μεταβλητών. Για

την ανάλυση αυτή, επιλέχθηκε ένα σημείο το οποίο συνδυάζει σχετικά υψηλές τιμές τόσο του αιολικού δυναμικού όσο και της ροής της κυματικής ενέργειας. Οι συντεταγμένες του σημείου που αφορούν τις δύο βάσεις δεδομένων (των ανεμολογικών και κυματικών χαρακτηριστικών) είναι (35.9° N–27.6° E). Στη μονοδιάστατη ανάλυση και αναφορικά με τις γραμμικές μεταβλητές, εξετάστηκαν για τον άνεμο: i) η ταχύτητα ανέμου  $U_{wi}$ , και ii) το αιολικό δυναμικό  $P_{wi}$ , ενώ για το κύμα: i) το σημαντικό ύψος κύματος  $H_{m_0}$ , ii) η ενεργειακή περίοδος  $T_e$ , και iii) η ροή της κυματικής ενέργειας  $P_{wa}$ . Για τις κατευθυντικές μεταβλητές, αναλύθηκαν η διεύθυνση ανέμου  $\theta_{wi}$  και η διεύθυνση διάδοσης του κύματος  $\theta_{wa}$ , αντίστοιχα.

Στη διδιάστατη ανάλυση, προκειμένου να διαπιστωθεί αν οι ανά δύο συνδυασμοί των επιμέρους παραμέτρων συσχετίζονται, εκτιμήθηκαν οι συντελεστές συσχέτισης μεταξύ δύο γραμμικών μεταβλητών (βλ. Εξ. 1) και γραμμικών-κατευθυντικών μεταβλητών (βλ. Εξ. 34). Τα αριθμητικά αποτελέσματα συνοψίζονται στον Πίνακα 18. Η τιμή του συντελεστή συσχέτισης για το ζεύγος  $H_{m_0} - T_e$  υποδηλώνει μια αρκετά μεγάλη συσχέτιση μεταξύ των δύο αυτών κυματικών παραμέτρων. Από τις τιμές του συντελεστή συσχέτισης  $r_{\chi\theta}$ , φαίνεται ότι οι ανεμολογικές παράμετροι είναι πιο πολύ συσχετισμένες με την αντίστοιχη διεύθυνση σε σύγκριση με τις κυματικές παραμέτρους και την διεύθυνση διάδοσης κυματισμού.

Πίνακας 18. Συντελεστές συσχέτισης Pearson μεταξύ των μεταβλητών ενδιαφέροντος.

Ζεύγη τυχαίων μεταβλητών	$r_{\chi\chi}$	$r_{\chi\theta}$
$H_{m_0} - T_e$	0.794	–
$H_{m_0} - \theta_{wa}$	–	0.166
$T_e - \theta_{wa}$	–	0.134
$P_{wa} - \theta_{wa}$	–	0.085
$U_{wi} - \theta_{wi}$	–	0.275
$P_{wi} - \theta_{wi}$	–	0.215

### Μονοδιάστατες κατανομές

Οι κατανομές που εξετάστηκαν για τη μοντελοποίηση των γραμμικών μεταβλητών είναι οι εξής: Gamma, Generalized extreme value (GEV), Gumbel, Logistic, Lognormal, Rayleigh και Weibull (2P). Πρόκειται για κατανομές που

χρησιμοποιούνται ευρέως στη βιβλιογραφία για τη πιθανοθεωρητική περιγραφή ανεμολογικών και κυματικών χαρακτηριστικών (π.χ. Soukissian and Karathanasi, 2017). Για την αξιολόγησή τους χρησιμοποιήθηκαν στατιστικοί δείκτες καλής προσαρμογής και πιο συγκεκριμένα, τα εξής: Kolmogorov-Smirnov (K-S), Cramer-von Mises, Anderson-Darling (A-D), Akaike information criterion (AIC) και Bayesian information criterion (BIC). Η κατανομή με τις περισσότερες μικρότερες τιμές των ανωτέρω στατιστικών δεικτών θεωρείται η πλέον κατάλληλη για την πιθανοθεωρητική περιγραφή της εκάστοτε γραμμικής μεταβλητής.

Για τη μοντελοποίηση των κατευθυντικών μεταβλητών, χρησιμοποιήθηκαν μείξεις της κατανομής von Mises. Ο βέλτιστος αριθμός των συνιστωσών προσδιορίστηκε από την ελαχιστοποίηση του στατιστικού κριτηρίου Bayesian information criterion.

Τα αριθμητικά αποτελέσματα από την αξιολόγηση των μονοδιάστατων κατανομών για τις γραμμικές μεταβλητές παρουσιάζονται στους Πίνακες 8–12. Για την ταχύτητα ανέμου και το αιολικό δυναμικό (Πίνακες 8–9), «καλύτερη» κατανομή βάσει των στατιστικών κριτηρίων καλής προσαρμογής είναι η κατανομή GEV, για το σημαντικό ύψος κύματος (Πίνακας 21) η Gamma, και για την ενεργειακή περίοδο και τη ροή κυματικής ενέργειας (Πίνακες 11–12) η Lognormal. Στην Εικόνα 31, παρουσιάζονται οι προσαρμογές των διαφόρων κατανομών για τις εκάστοτε παραμέτρους μαζί με το αντίστοιχο ιστόγραμμα. Ενδιαφέρον παρουσιάζει η έντονη ασυμμετρία στην περίπτωση του ενεργειακού δυναμικού ανέμου και κύματος.

*Πίνακας 19. Αριθμητικές τιμές από τα στατιστικά κριτήρια καλής προσαρμογής για την ταχύτητα του ανέμου. Με έντονη γραμματοσειρά επισημαίνονται οι καλύτερες τιμές για κάθε κριτήριο.*

Στατιστικά καλής προσαρμογής	<b>GEV</b>	<b>Gumbel</b>	<b>Logistic</b>
K-S	<b>0.035</b>	0.075	0.039
Cramer-von Mises	<b>14.874</b>	73.604	17.775
A-D	<b>100.855</b>	455.834	143.246
AIC	<b>234754</b>	238393	237081
BIC	<b>234780</b>	238410	237098



Πίνακας 20. Αριθμητικές τιμές από τα στατιστικά κριτήρια καλής προσαρμογής για το αιολικό δυναμικό. Με έντονη γραμματοσειρά επισημαίνονται οι καλύτερες τιμές για κάθε κριτήριο.

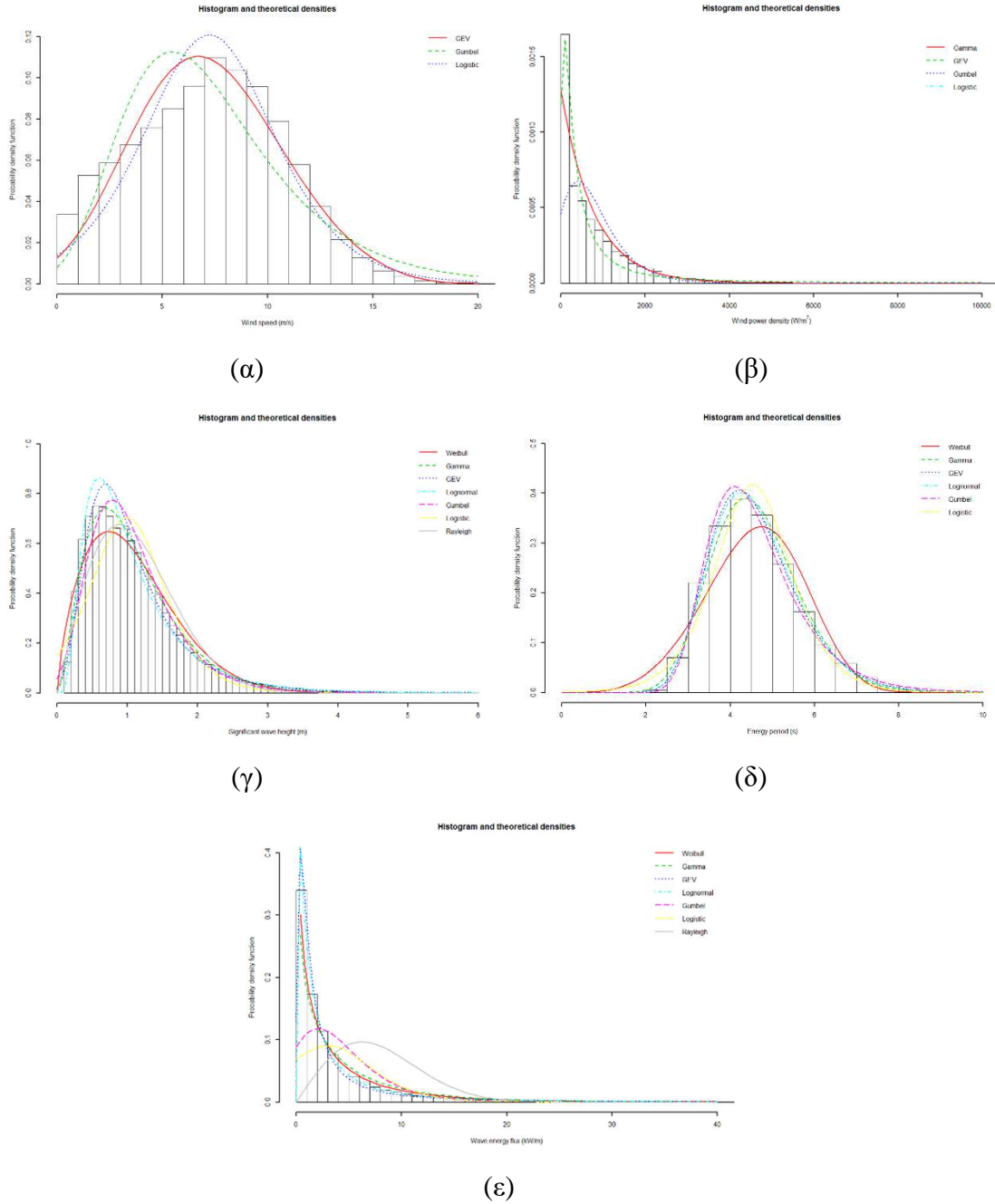
Στατιστικά καλής προσαρμογής	Gamma	GEV	Gumbel
K-S	0.1203371	<b>0.088</b>	0.117
Cramer-von Mises	178.0661889	<b>111.931</b>	189.193
A-D	Inf	<b>738.789</b>	1292.364
AIC	<b>671345</b>	680840	698743
BIC	<b>671362</b>	680866	698760

Πίνακας 21. Αριθμητικές τιμές από τα στατιστικά κριτήρια καλής προσαρμογής για το σημαντικό ύψος κύματος. Με έντονη γραμματοσειρά επισημαίνονται οι καλύτερες τιμές για κάθε κριτήριο.

Στατιστικά καλής προσαρμογής	Gamma	GEV	Gumbel	Logistic	Lognormal	Rayleigh	Weibull
K-S	<b>0.017</b>	0.023	0.035	0.083	0.032	0.079	0.035
Cramer-von Mises	<b>10.522</b>	24.571	42.787	143.172	36.197	319.868	58.413
A-D	<b>86.883</b>	155.900	336.802	1485.850	205.828	1676.600	474.257
AIC	<b>190982</b>	192394	195838	220437	191194	202027	197212
BIC	<b>191002</b>	192423	195857	220456	191213	202036	197231

Πίνακας 22. Αριθμητικές τιμές από τα στατιστικά κριτήρια καλής προσαρμογής για την ενεργειακή περίοδο. Με έντονη γραμματοσειρά επισημαίνονται οι καλύτερες τιμές για κάθε κριτήριο.

Στατιστικά καλής προσαρμογής	Gamma	GEV	Gumbel	Logistic	Lognormal	Weibull
K-S	0.017	<b>0.009</b>	0.024	0.037	<b>0.009</b>	0.062
Cramer-von Mises	13.507	2.426	17.741	40.562	<b>1.744</b>	190.281
A-D	100.332	17.938	108.877	453.999	<b>17.304</b>	1328.526
AIC	326992	<b>325515</b>	326727	335035	325625	343910
BIC	327011	<b>325544</b>	326747	335054	325644	343930

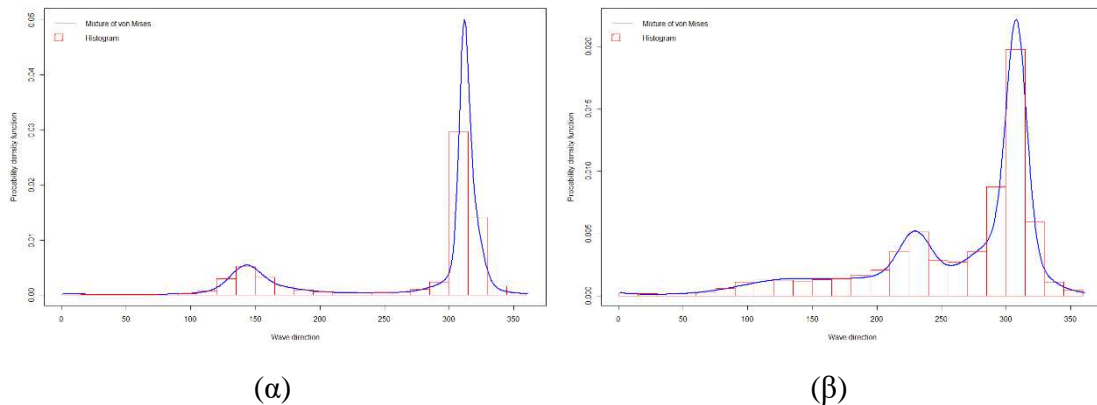


Εικόνα 31. Ιστόγραμμα και θεωρητικές κατανομές για (α) την ταχύτητα ανέμου, (β) το αιολικό δυναμικό, (γ) το σημαντικό ύψος κύματος, (δ) την ενεργειακή περίοδο, και (ε) τη ροή κυματικής ενέργειας.

Πίνακας 23. Αριθμητικές τιμές από τα στατιστικά κριτήρια καλής προσαρμογής για τη ροή της κυματικής ενέργειας.

Στατιστικά καλής προσαρμογής	Gamma	GEV	Gumbel	Logistic	Lognormal	Rayleigh	Weibull
K-S	0.075	0.047	0.160	0.254	<b>0.024</b>	0.524	0.041
Cramer-von Mises	260.626	84.365	1157.548	1255.676	<b>20.710</b>	1385.171	83.957
A-D	1469.227	538.336	Inf	Inf	<b>118.307</b>	Inf	647.390
AIC	547944	540953	653733	708998	<b>531434</b>	931332	540611
BIC	547964	540982	653753	709017	<b>531454</b>	931341	640630

Στην Εικόνα 32, παρουσιάζονται οι προσαρμογές των μείξεων της von Mises για τις δύο κατευθυντικές παραμέτρους. Ο αριθμός των συνιστωσών για τη διεύθυνση ανέμου είναι 6 και ο αντίστοιχος για το κύμα είναι 5. Διαπιστώνεται ότι το σχήμα των θεωρητικών κατανομών για τις δύο διευθύνσεις είναι παραπλήσιο με τη μεγαλύτερη πιθανότητα εμφάνισης κοντά στις 300° (ΒΔ διεύθυνση).

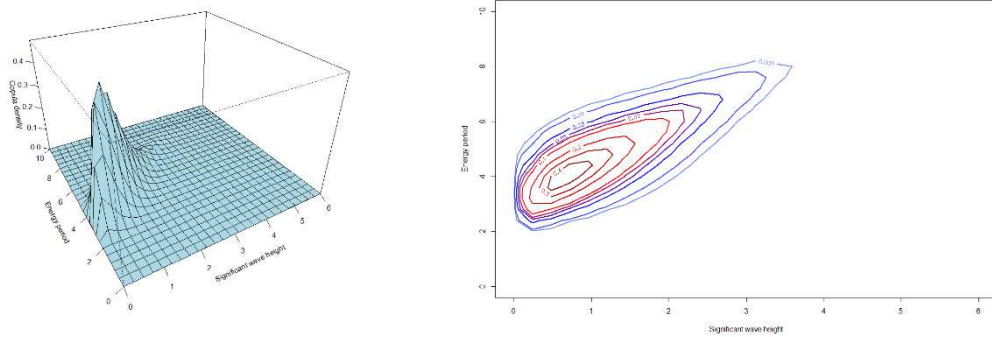


Εικόνα 32. Ιστόγραμμα και θεωρητική κατανομή για (α) την διεύθυνση ανέμου και (β) τη διεύθυνση διάδοσης κύματος.

### Διδιάστατες κατανομές

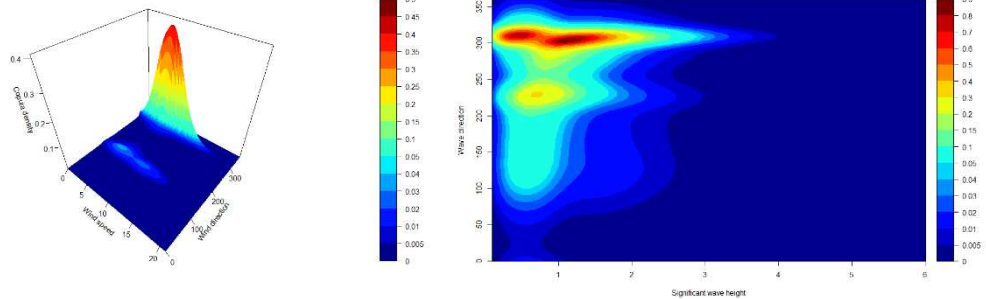
Με βάση τις καλύτερες κατανομές που προέκυψαν στη μονοδιάστατη περίπτωση, για την από κοινού περιγραφή των γραμμικών τυχαίων μεταβλητών  $H_{m_0}, T_e$  εξετάστηκαν οι εξής συζεύξεις: Clayton, Gumbel, Frank και Joe copula. Βάσει των κριτηρίων log-likelihood, AIC και BIC, καλύτερη συμπεριφορά επιτυγχάνεται με τη χρήση της σύζευξης Gumbel. Στην Εικόνα 33, παρουσιάζεται η διδιάστατη κατανομή πυκνότητας

πιθανότητας των παραμέτρων  $H_{m_0}$  και  $T_e$ . Την μεγαλύτερη πιθανότητα εμφάνισης εμφανίζει ο συνδυασμός  $H_{m_0} = 0.8$  m και  $T_e = 4$  s.

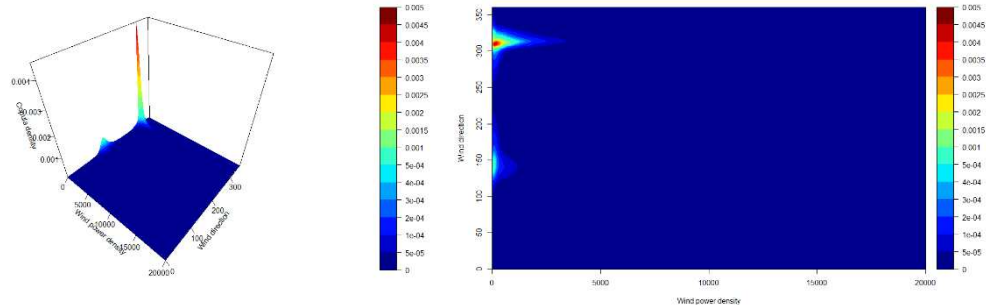


Εικόνα 33. Διδιάστατες κατανομές πυκνότητας πιθανότητας για το σημαντικό ύψος κύματος και την ενεργειακή περίοδο.

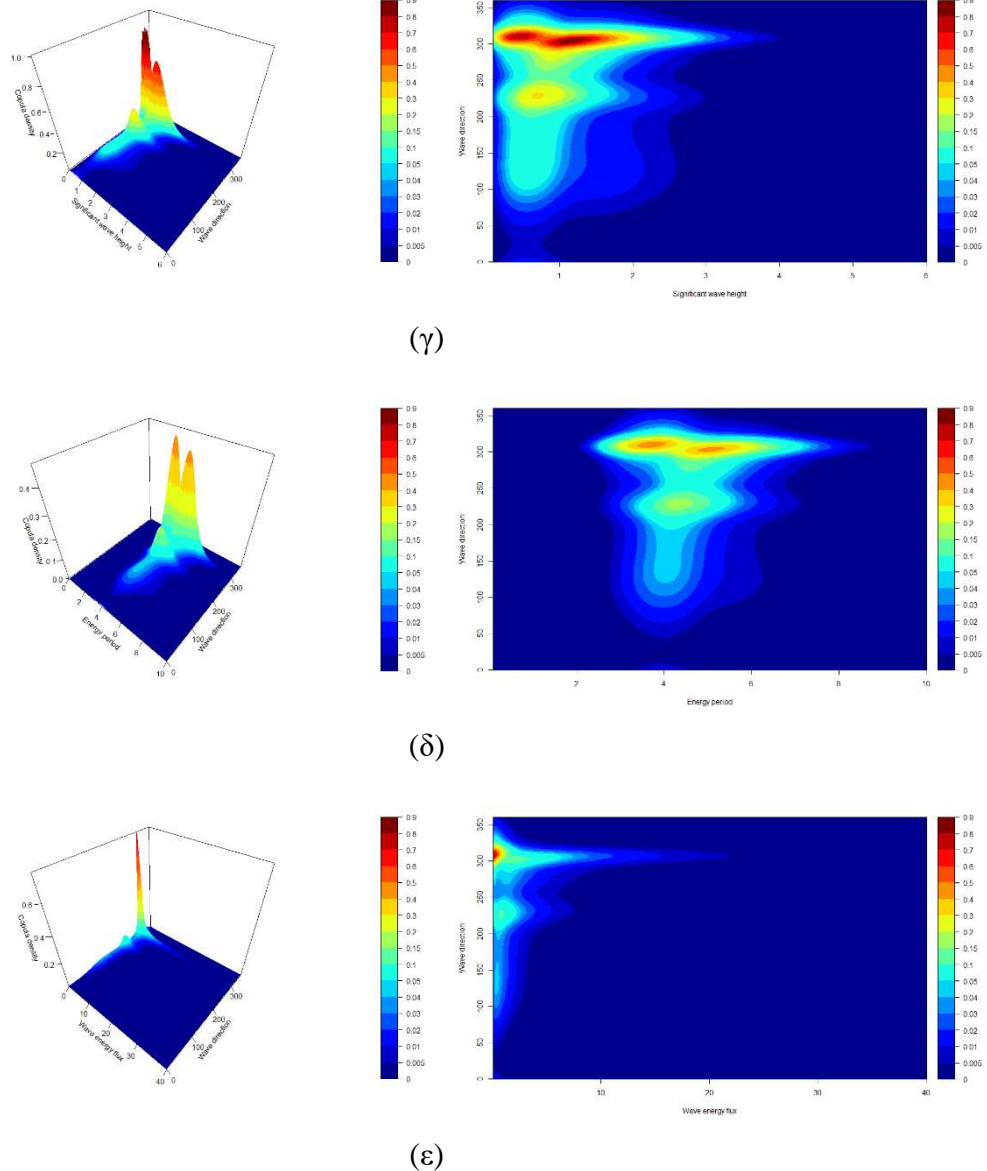
Στην Εικόνα 34, παρατίθενται οι διδιάστατες κατανομές για τα ζεύγη που περιλαμβάνουν μια γραμμική και μια κατευθυντική τυχαία μεταβλητή. Στην περίπτωση αυτής της μοντελοποίησης χρησιμοποιήθηκε η σύζευξη JW (βλ. Κεφάλαιο 2.5).



(α)



(β)



Εικόνα 34. Διδιάστατες κατανομές πυκνότητας πιθανότητας για (α) ταχύτητα ανέμου- διεύθυνση ανέμου, (β) αιολικό δυναμικό-διεύθυνση ανέμου, (γ) σημαντικό ύψος κύματος- διεύθυνση κύματος, (δ) ενεργειακή περίοδο-διεύθυνση κύματος, και (ε) ροή κυματικής ενέργειας-διεύθυνση κύματος.

Η θέση των κορυφών στις διδιάστατες κατανομές είναι πολύ κοντά με τις αντίστοιχες θέσεις στα ιστογράμματα της μονοδιάστατης περίπτωσης τόσο των γραμμικών μεταβλητών όσο και των κατευθυντικών. Επίσης, η ταχύτητα ανέμου και το σημαντικό ύψος κύματος εμφανίζουν τη μεγαλύτερη πιθανότητα εμφάνισης σε ένα αρκετά μεγάλο διάστημα συγκριτικά με το συνολικό εύρος τιμών τους (4–10 m/s και 1–2 m, αντίστοιχα).

## 5. Συμπεράσματα

Η εκτίμηση του υπεράκτιου αιολικού και κυματικού δυναμικού αποτελεί ένα από τα βασικά στάδια για τον εντοπισμό θαλάσσιων περιοχών ιδανικών για ανάπτυξη ενεργειακών πάρκων. Στο Ελληνικό θαλάσσιο χώρο, η Ρόδος θεωρείται μια περιοχή με ικανοποιητικό διαθέσιμο αιολικό δυναμικό, κυρίως λόγω των μελτεμιών και της τοπογραφίας της ευρύτερης θαλάσσιας περιοχής, αλλά και ικανοποιητική κυματική ισχύ για τα δεδομένα της Μεσογείου. Πιο συγκεκριμένα, η νοτιοδυτική περιοχή παρουσιάζει τις μέγιστες τιμές του μέσου ετήσιου αιολικού δυναμικού πάνω από  $750 \text{ W/m}^2$ . Οι μέγιστες τιμές για την κυματική ισχύ καλύπτουν μια μεγαλύτερη περιοχή που εκτείνεται από το βορειοδυτικό τμήμα και φθάνει στο νοτιοανατολικό (αριστερόστροφα), ξεπερνώντας κατά τόπους τα  $6 \text{ kW/m}$ . Επίσης, η χωρική κατανομή των παραμέτρων του ανέμου και του κύματος που αναλύθηκαν στατιστικά παρουσιάζει παρόμοια συμπεριφορά σε ετήσια και εποχική βάση, γεγονός που αιτιολογεί την χαμηλή μεταβλητότητα κυρίως στα στενά Ρόδου-Καρπάθου. Ενδιαφέρον παρουσιάζουν και τα αποτελέσματα των διδιάστατων κατανομών και κυρίως μεταξύ γραμμικών και κατευθυντικών παραμέτρων των ανεμολογικών και κυματικών χαρακτηριστικών, όπου είναι ξεκάθαρη η μεταξύ τους εξάρτηση.

Με κριτήριο το διαθέσιμο δυναμικό, η πιο πολλά υποσχόμενη περιοχή για την συνεκμετάλλευση του υπεράκτιου ανέμου και του κύματος εντοπίζεται στη νοτιοδυτική πλευρά της Ρόδου, στην ανοικτή θάλασσα δυτικά από το Πρασονήσι. Σε μεταγενέστερη ανάλυση ένα επιπλέον τεχνικό κριτήριο, όπως το βάθος του πυθμένα, μπορεί να δώσει μια πιο εστιασμένη περιοχή με βάθη μικρότερα των  $50 \text{ m}$ , καθώς υπάρχουν περιορισμοί λόγω της υπάρχουσας τεχνολογίας.

## Κατάλογος Βιβλιογραφίας

### Ελληνόγλωσσες

Σουκισιάν Γ., Χατζηνάκη Μ., Κορρές Γ., Παπαδόπουλος Α., Κάλλος Γ., Αναδρανιστάκης Ε., (2007). *Άτλαντας Ανέμου και Κύματος των Ελληνικών Θαλασσών*. Εκδ. Ελληνικό Κέντρο Θαλασσίων Ερευνών, 300 σελ.

### Ξενόγλωσσες

Bray L., Reizopoulou S., Voukouvalas E., Soukissian T., Carme Alomar C., Vázquez-Luis M., et al., (2016). *Expected Effects of Offshore Wind Farms on Mediterranean Marine Life*, J. Mar. Sci. Eng. 2016, 4(1), 18.

Fisher N.I., *Statistical Analysis of Circular Data*, Revised edition. Cambridge University Press, 1993.

Günther, H., Behrens, A. (2012). The WAM model. Validation document Version 4.5.4. Institute of Coastal Research Helmholtz-Zentrum Geesthach (HZG) January 2012, pp. 92.

Hansen, F.V. (1993). Surface roughness lengths. U.S. Army Research Laboratory, U.S. Army Technical Report No. ARL-TR-61. White Sands Missile Range, New Mexico.

Jing-Jing, X., Fei, H., Zi-Niu, X. & Xue-Ling, C. (2014). Bias correction in wind direction forecasting using the circular-circular regression method. *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, 7(2), 87–91.

Karathanasi, F. E., Soukissian, T. H. & Axaopoulos, P. G. (2016). Calibration of Wind Directions in the Mediterranean Sea. The 26th International Ocean and Polar Engineering Conference. Rhodes, Greece: International Society of Offshore and Polar Engineers.

Kotroni, V., Lagouvardos, K., Lykoudis, S. (2014). *High-resolution model-based wind atlas for Greece*. *Renewable & Sustainable Energy Reviews* 30: 479–489.

Leeney R. H., Greaves D., Conley D., O'Hagan A. M., (2014). *Environmental Impact Assessments for wave energy developments – Learning from existing activities and informing future research priorities*, *Ocean & Coastal Management* 99: 14–22.

Mardia K.V., Jupp P., (2000). *Directional Statistics*, 2<sup>nd</sup> edition, John Wiley and Sons Ltd., Chichester.

Nelsen R.B. (2006). *An Introduction to Copulas*. 2<sup>nd</sup> edition. New York: Springer.

Papadopoulos A., Katsafados P., Mavromatidis E., Kallos G., (2008). *Assessing the skill of the POSEIDON-II weather forecasting system*. Abstracts books of the EuroGOOS 2008 conference.

SenGupta, A., Kim, S. & Arnold, B. C. 2013. Inverse circular-circular regression. *Journal of Multivariate Analysis*, 119, 200–208.

Sklar A. (1959). Fonctions de repartition a n dimensions et leurs marges. *Inst. Stat. Univ. Paris Publ.*, 8, 229–231.

Soukissian T.H., (2014). *Probabilistic modeling of directional and linear characteristics of wind and sea states*, *Ocean Engineering* 91: 91–110.

Soukissian T., Denaxa D., Karathanasi F., Prospathopoulos A., Sarantakos K., Iona A., et al. (2017a). *Marine Renewable Energy in the Mediterranean Sea: Status and Perspectives*, *Energies* 10: 1512.

Soukissian T. H., & Karathanasi F. E. (2017). On the selection of bivariate parametric models for wind data. *Applied Energy*, 188, 280–304.

Soukissian T., Karathanasi F., Axaopoulos P., (2017b). *Satellite-Based Offshore Wind Resource Assessment in the Mediterranean Sea*, *IEEE Journal of Oceanic Engineering* 42(1): 73–86.

Soukissian, T. H. & Papadopoulos, A. 2015b. Effects of different wind data sources in offshore wind power assessment. *Renewable Energy*, 77, 101–114.

Soukissian T., Papadopoulos A., Skrimizeas P., Karathanasi F., Axaopoulos P., Avgoustoglou E., et al. (2017c). Assessment of offshore wind power potential in the Aegean and Ionian Seas

based on high-resolution hindcast model results, *AIMS Energy* 5(2): 268–289, 10.3934/energy.2017.2.268

WindEurope (2020), Offshore Wind in Europe, Key trends and statistics 2019. Report, p. 40.

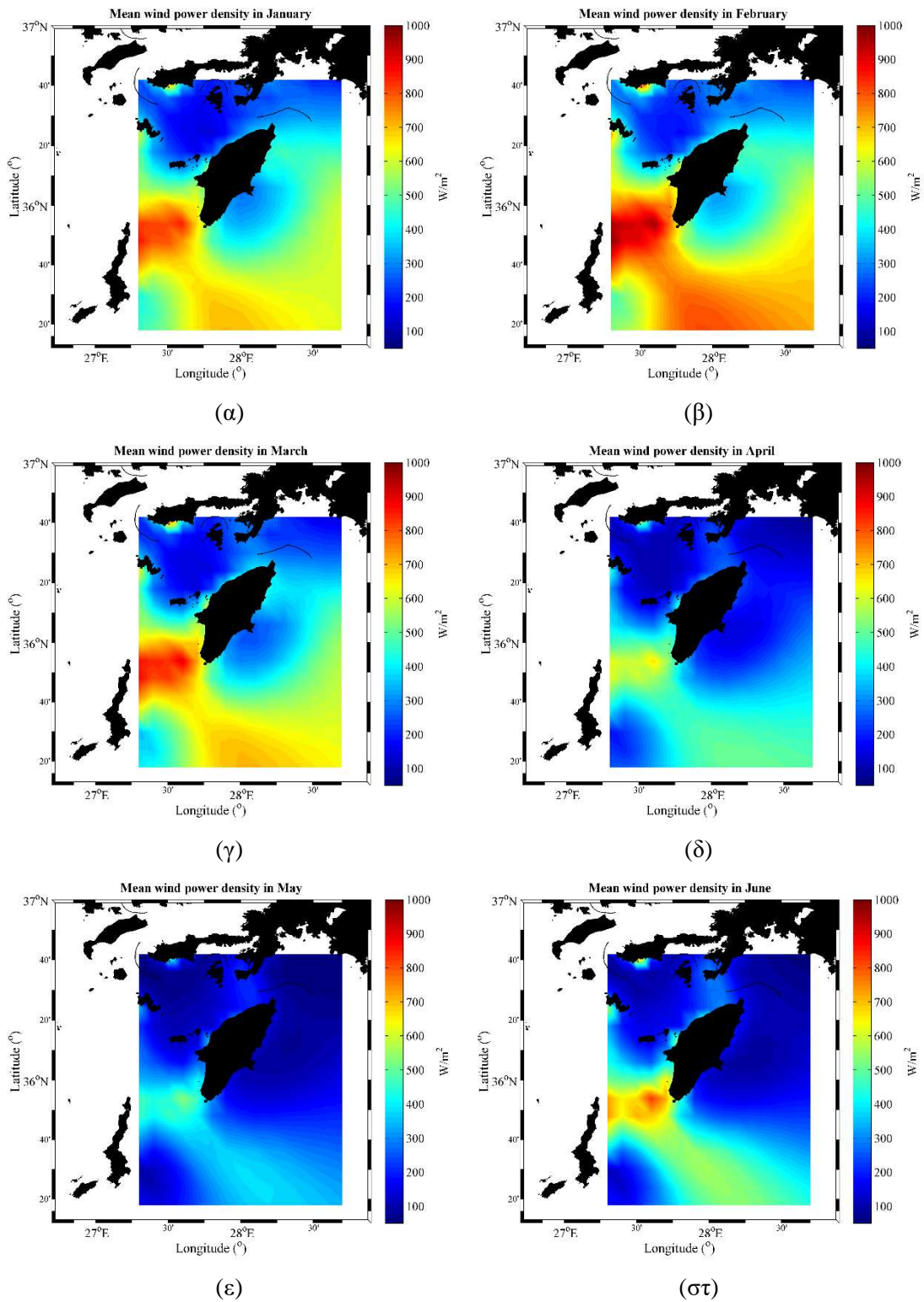
Witt, M.J., Sheehan, E.V., Bearhop, S., Broderick, A.C., Conley, D.C., Cotterell, S.P., et al., (2012). *Assessing wave energy effects on biodiversity: the Wave Hub experience*, *Phil. Trans. R. Soc. A* 370: 502–529.

Zhang, H. M., Bates, J. J. & Reynolds, R. W. 2006. Assessment of composite global sampling: Sea surface wind speed. *Geophysical Research Letters*, 33(17).

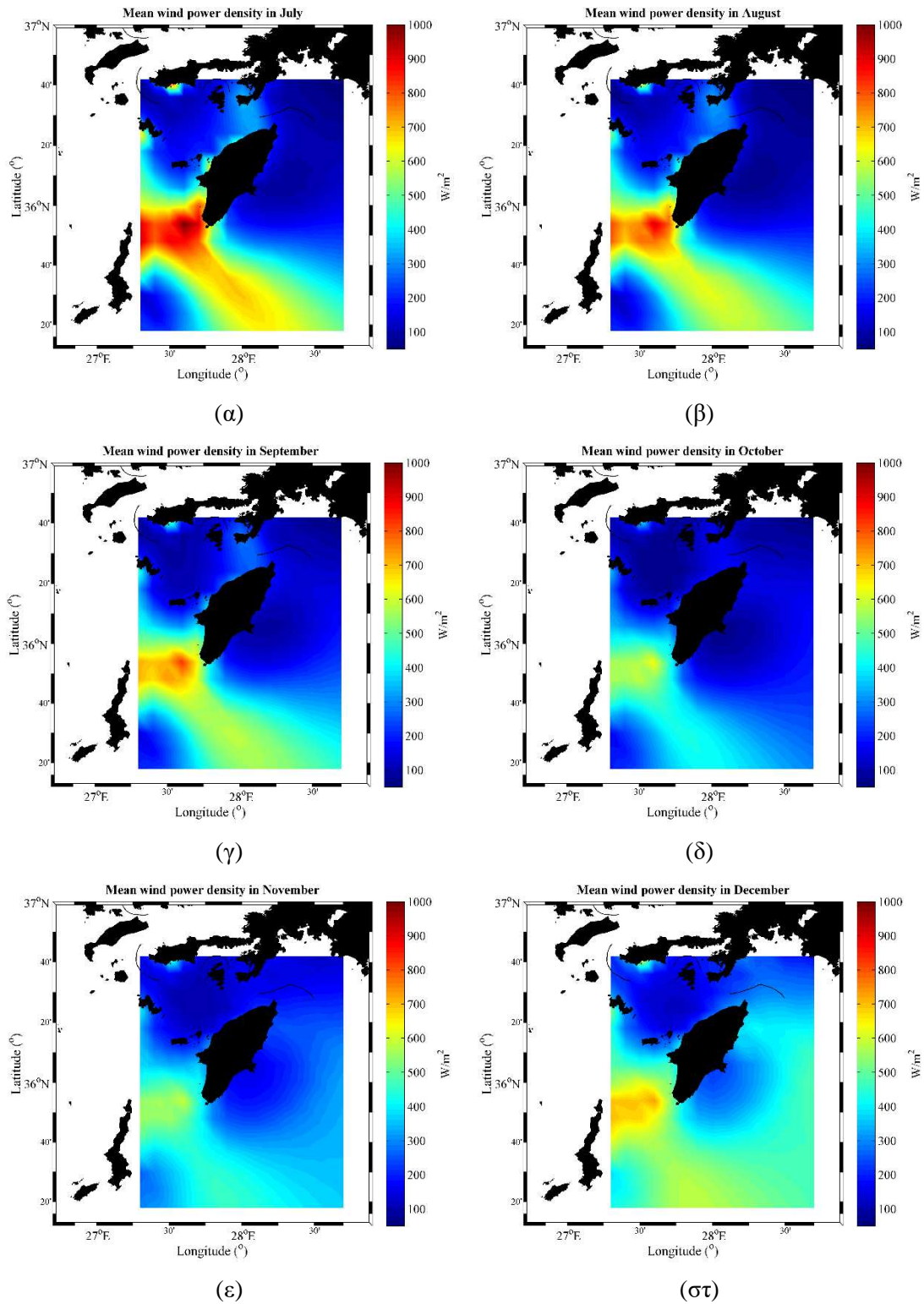


**Παράρτημα**

*A. Μηνιαία κλίμακα αναφοράς για το υπεράκτιο αιολικό δυναμικό*

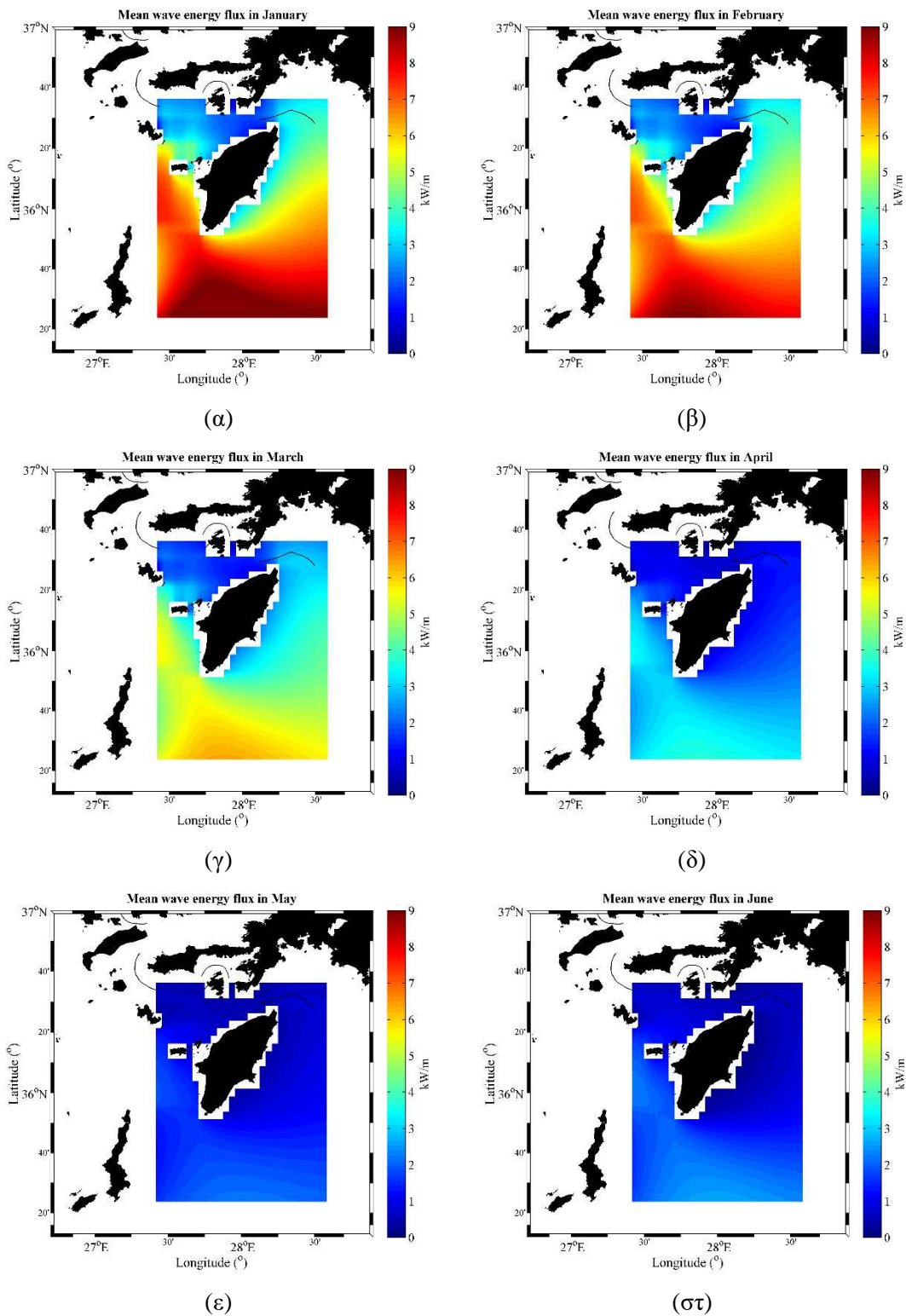


*Εικόνα A.1. Μέσο υπεράκτιο αιολικό δυναμικό για (α) τον Ιανουάριο, (β) το Φεβρουάριο, (γ) το Μάρτιο, (δ) τον Απρίλιο, (ε) το Μάιο και (στ) τον Ιούλιο.*

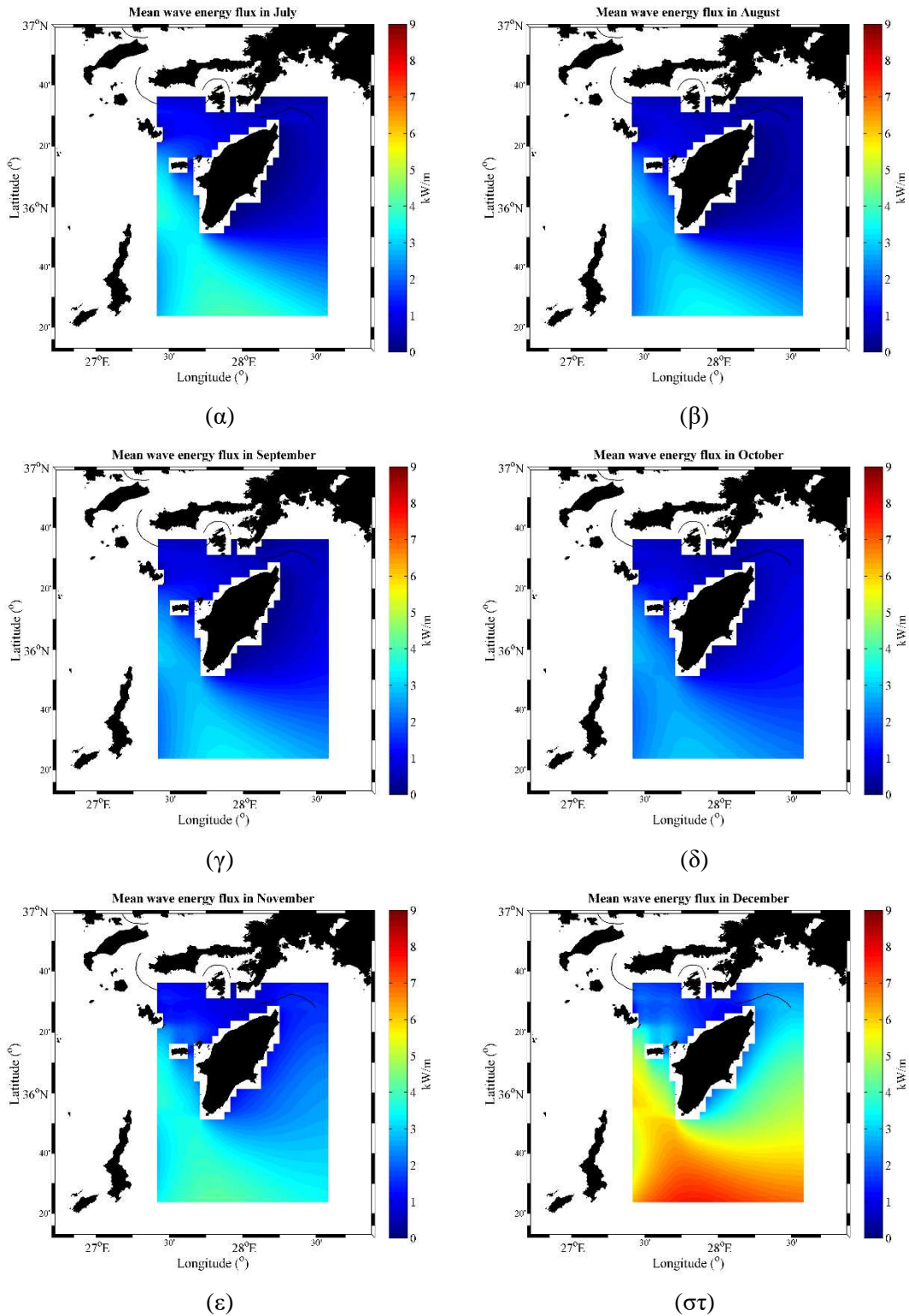


Εικόνα Α.2. Μέσο υπεράκτιο αιολικό δυναμικό για (α) τον Ιούλιο, (β) τον Αύγουστο, (γ) το Σεπτέμβριο, (δ) τον Οκτώβριο (ε) το Νοέμβριο και (στ) τον Δεκέμβριο.

B. Μηνιαία κλίμακα αναφοράς για τη ροή κυματικής ενέργειας



Εικόνα B.1. Μέση ροή κυματικής ενέργειας για (α) τον Ιανουάριο, (β) το Φεβρουάριο, (γ) το Μάρτιο, (δ) τον Απρίλιο, (ε) το Μάιο και (στ) τον Ιούλιο.



Εικόνα Β.2. Μέση ροή κυματικής ενέργειας για (α) τον Ιούλιο, (β) τον Αύγουστο, (γ) το Σεπτέμβριο, (δ) τον Οκτώβριο (ε) το Νοέμβριο και (στ) τον Δεκέμβριο.