



Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών
Σχολή Θετικών Επιστημών
Τμήμα Φυσικής
Τομέας Φυσικής Περιβάλλοντος-Μετεωρολογίας

Διπλωματική Εργασία

Εκτίμηση της Κυματικής Ενέργειας με τη
χρήση Αριθμητικών Μοντέλων και
Δορυφορικών Παρατηρήσεων

Λιακατάς Αριστοτέλης
ΑΜ: 201025

Κάλλος Γεώργιος
Καθηγητής Ε.Κ.Π.Α.
Επιβλέπων

Γαλάνης Γεώργιος
Αναπληρωτής Καθηγητής Σ.Ν.Δ.

Σοφιανός Σαράντης
Λέκτορας Ε.Κ.Π.Α.

Αθήνα 2013

Περίληψη

Στόχος της εργασίας αυτής είναι η εκτίμηση της ενέργειας των θαλάσσιων κυμάτων με την βοήθεια αριθμητικών μοντέλων, αλλά και μέσω δεδομένων από δορυφορικές παρατηρήσεις για τις περιοχές του Βόρειου Ατλαντικού ωκεανού και της Μεσογείου και για τη χρονική περίοδο από τον Αύγουστο 2009 έως και το Δεκέμβριο 2010.

Ειδικότερα, λαμβάνονται υπόψη και συγκρίνονται δύο μέθοδοι για τον υπολογισμό της ενέργειας. Αφ' ενός γίνεται ο υπολογισμός του ολοκληρώματος του κυματικού φάσματος ως προς όλες τις διευθύνσεις και τις συχνότητες, με τις κατάλληλες παραμέτρους, αφ' ετέρου κάνοντας συγκεκριμένες παραδοχές και απλοποιήσεις, προκύπτει η προσεγγιστική σχέση υπολογισμού που χρησιμοποιείται

Παράλληλα, επιχειρείται μία ποιοτική αξιολόγηση του κυματικού μοντέλου WAM μέσω της μελέτης των αποτελεσμάτων που δίνει για τις στατιστικές παραμέτρους του κύματος, όπως είναι το σημαντικό ύψος κύματος, η μέση περίοδος καθώς και τα κυματικά φάσματα. Ως δεδομένα αναφοράς λαμβάνονται οι δορυφορικές παρατηρήσεις, ενώ γίνεται και διερεύνηση κατά πόσο προκύπτουν τα αναμενόμενα αποτελέσματα για περιοχές με συγκεκριμένα κυματικά χαρακτηριστικά.

Από τα αποτελέσματα της εργασίας προκύπτει ότι ο απλουστευμένος τύπος υπολογισμού υπερεκτιμά την ενέργεια σε ποσοστό 10% κατά μέσο όρο, ενώ ανάλογα με την περίπτωση ρηχών ή βαθέων υδάτων τα αποτελέσματα διαφοροποιούνται. Επιπλέον, οι στατιστικές παράμετροι του κύματος που υπολογίζονται από το μοντέλο προκύπτουν σύμφωνα με τα αναμενόμενα από την περιοχή αποτελέσματα. Ολοκληρώνοντας, το μοντέλο WAM εμφανίζει πολύ μικρά στατιστικά σφάλματα στον υπολογισμό των κυματικών χαρακτηριστικών, όπως επιβεβαιώνεται από τις δορυφορικές παρατηρήσεις.

Abstract

The aim of this work is to estimate the energy of sea waves utilizing numerical models and data provided by satellite observations for the regions of the North Atlantic Ocean and the Mediterranean and for the period from August 2009 to December 2010.

In particular, two methods for calculating wave energy were compared. On the one hand is the calculation of the integral of the wave spectrum in all directions and frequencies, with appropriate parameters, on the other hand, making certain assumptions and simplifications lead to the approximate formula for calculating energy.

In addition to the main subject, an attempt for a qualitative assessment of the wave model WAM was made through the study of the results that it gives for the statistical parameters of the wave, such as the significant wave height, mean period and the wave spectra. As reference data were taken those obtained by satellite observations, while model behaviour was also tested investigating specific areas which are cases where waves are expected to have certain characteristics.

In conclusion the results of this work show that the simplified calculation formula overestimates the energy rate of 10% on average, while in the case of shallow or deep water results vary accordingly. Moreover, the statistical parameters of the wave calculated by the model seem to meet the expected results at specific areas and the WAM model shows very small statistical errors in the calculation of wave characteristics, as confirmed by satellite observations.

Περιεχόμενα

1	Εισαγωγή	10
2	Κυματική Ενέργεια	14
2.1	Γενικά Στοιχεία	14
2.2	Τρόποι Υπολογισμού-Προσεγγίσεις της Κυματικής Ενέργειας	21
2.3	Εφαρμογές-Ανάγκη	23
3	Συλλογή και Μελέτη Δεδομένων	27
3.1	Φασματικό Μοντέλο WAM	27
3.2	Δορυφορικά Δεδομένα από τον ASAR-Envisat	33
4	Αξιολόγηση των αποτελεσμάτων του μοντέλου	36
4.1	Ανάλυση Ύψους Κύματος και Περιόδου	36
4.1.1	Αποτελέσματα για το σύνολο των δεδομένων	38
4.1.2	Αποτελέσματα ανά εποχή	41
4.2	Ανάλυση Ενεργειακού Φάσματος	48
5	Εκτίμηση της κυματικής ενέργειας	57
5.1	Τρόποι Υπολογισμού	57
5.2	Ανάλυση αποκλίσεων για τις δύο προσεγγίσεις	59
5.2.1	Ανάλυση αποκλίσεων για διαφορετικό κριτήριο βάθους	67

5.3	Ανάλυση ανά περιοχή	70
6	Τελικά συμπεράσματα-προτάσεις	79

Κατάλογος σχημάτων

2.1	Ορισμός κύματος (wave) και ανύψωσης (surface elevation)	15
2.2	Στατιστική κατανομή κυμάτων	16
2.3	Γενική μορφή κυματοπακέτου	17
2.4	Αναπαράσταση σύνθεσης κυμάτων σε δεξαμενή πειραμάτων	23
2.5	Η μηχανή Pelamis.	25
2.6	Η μηχανή Wavedragon.	26
3.1	Σχηματική αναπαράσταση του σχήματος οριζόντιας μεταφοράς ενέργειας	33
4.1	Σημεία διάβασης του δορυφόρου Envisat για τα έτη 2009 και 2010.	37
4.2	Διαγράμματα συσχέτισης δεδομένων περιόδου και ύψους κύματος για την περιοχή της Μ. Βρετανίας.	39
4.3	Διαγράμματα συσχέτισης δεδομένων περιόδου και ύψους κύματος για την περιοχή της Ισπανίας.	39
4.4	Διαγράμματα συσχέτισης δεδομένων περιόδου και ύψους κύματος για την περιοχή της Μεσογείου.	40
4.5	Διαγράμματα συσχέτισης δεδομένων ύψους κύματος για την περιοχή της Μ. Βρετανίας.	41
4.6	Διαγράμματα συσχέτισης δεδομένων ύψους κύματος για την περιοχή της Ισπανίας.	42
4.7	Διαγράμματα συσχέτισης δεδομένων ύψους κύματος για την περιοχή της Μεσογείου.	43

4.8	Διαγράμματα συσχέτισης δεδομένων μέσης περιόδου για την περιοχή της Μ. Βρετανίας.	44
4.9	Διαγράμματα συσχέτισης δεδομένων μέσης περιόδου για την περιοχή της Ισπανίας.	45
4.10	Διαγράμματα συσχέτισης δεδομένων μέσης περιόδου για την περιοχή της Μεσογείου.	46
4.11	Φάσμα από δορυφορική παρατήρηση (a), καθώς και διαγράμματα ενέργειας ανά διεύθυνση (b) και συχνότητα (c)	49
4.12	Αποτελέσματα αριθμητικού μοντέλου WAM για το φάσμα (a), την ενέργεια ανά διεύθυνση (b) και ανά συχνότητα (c)	51
4.13	Συμμετρικά φάσματα από δορυφόρο	52
4.14	Σύγκριση παρατηρήσεων δορυφόρου και αποτελεσμάτων μοντέλου για το φάσμα (a1-a2), την ενέργεια ανά διεύθυνση (b1-b2) και ανά συχνότητα (c1-c2)	53
4.15	Σύγκριση παρατηρήσεων δορυφόρου και αποτελεσμάτων μοντέλου για το φάσμα (a1-a2), την ενέργεια ανά διεύθυνση (b1-b2) και ανά συχνότητα (c1-c2)	55
5.1	Συγκεντρωτικά αποτελέσματα για τη διαφορά (%) που παρουσιάζει ο υπολογισμός της ενέργειας από το φάσμα και τον απλό τύπο.	59
5.2	Διάγραμμα συσχέτισης bias με τη βαθυμετρία.	60
5.3	Διάγραμμα συσχέτισης bias με το βάθος για ρηχά νερά.	61
5.4	Διάγραμμα συσχέτισης bias με το βάθος για βαθιά νερά.	62
5.5	Διάγραμμα συσχέτισης φασματικής ενέργειας με το σημαντικό ύψος κύματος.	63
5.6	Διάγραμμα συσχέτισης φασματικής ενέργειας με τη μέση περίοδο κύματος.	64
5.7	Διάγραμμα κλάσεων φασματικής ενέργειας και προσαρμογή της καμπύλης Weibull.	65
5.8	Διάγραμμα κλάσεων δεδομένων ενέργειας από προσεγγιστικό τύπο και προσαρμογή της καμπύλης Weibull.	66
5.9	Διαγράμματα σύγκρισης αποτελεσμάτων bias (%) για διαφορετικές επιλογές τιμής κριτηρίου βάθους.	69

5.10 Διαγράμματα bias-βάθους, όπου εστιάζονται στο όριο αλλαγής χαρακτηρισμού των υδάτων.	70
5.11 Χάρτες περιοχών μελέτης κυματικών χαρακτηριστικών.	72
5.12 Διαγράμματα κατανομής του bias ανά περιοχή μελέτης.	73
5.13 Διαγράμματα κατανομής φασματικής ενέργειας ανά περιοχή μελέτης.	75
5.14 Διαγράμματα κατανομής σημαντικού ύψους κύματος ανά περιοχή μελέτης.	76
5.15 Διαγράμματα κατανομής μέσης περιόδου κύματος ανά περιοχή μελέτης.	78

Κατάλογος πινάκων

4.1	Πίνακας στατιστικών στοιχείων για το σύνολο των δεδομένων. . . .	40
4.2	Πίνακας στατιστικών στοιχείων των δεδομένων ανά εποχή.	47
5.1	Πίνακας στατιστικών στοιχείων για την ποιότητα προσαρμογής των κατανομών.	67

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

Η σημερινή εποχή βρίσκει το περιβάλλον εξαντλημένο από τη χρήση συμβατικών μορφών ενέργειας, όπως το πετρέλαιο με τα παράγωγά του και την εκμετάλλευση γαιανθράκων, ώστε να καλυφθούν οι ολοένα αυξανόμενες ενεργειακές ανάγκες του πληθυσμού. Η επιβάρυνση αυτή, σε συνδυασμό με τις οικονομικές εξελίξεις, καθιστούν επιτακτική την αναζήτηση εναλλακτικών πηγών ενέργειας. Τέτοιες πηγές είναι, μεταξύ άλλων, τα δύο ρευστά που υπάρχουν άφθονα στη φύση, δηλαδή ο αέρας και η θάλασσα. Καθώς τα αποθέματα ενέργειας που παρέχονται είναι αστείρευτα, ονομάζονται Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ).

Ο αέρας, με την ενέργεια που μεταφέρεται μέσω του ανέμου και η θάλασσα με την ενέργεια που μεταφέρουν τα κύματά της αποτελούν τις πλέον «καθαρές» μορφές ενέργειας. Ιδιαίτερα, η κυματική ενέργεια χαρακτηρίζεται από βασικά πλεονεκτήματα, ένα από τα οποία είναι ο μικρός βαθμός αβεβαιότητας και η περιορισμένη μεταβλητότητα που παρουσιάζουν τα κύματα ως προς την ενέργειά τους. Αυτή η ιδιότητα είναι σημαντική, καθώς βοηθά στην ομαλή εισαγωγή στις μονάδες παραγωγής και, εν τέλει στην εύρυθμη λειτουργία του δικτύου παροχής ενέργειας.

Αν και οι τεχνολογίες ανάλυσης και εκμετάλλευσης της κυματικής ενέργειας βρίσκονται σε αρχικό στάδιο, οι σχετικές έρευνες υποδεικνύουν ότι το ενεργειακό δυναμικό των ωκεανών είναι κατά πολύ μεγαλύτερο από το αντίστοιχο του ανέμου. Το θαλασσινό νερό όντας περίπου τρεις τάξεις μεγέθους πυκνότερο από τον αέρα, παρέχει τη δυνατότητα σε μικρής ταχύτητας ρεύματα να χαρακτηρίζονται από υψηλή συγκέντρωση κινητικής ενέργειας. Ο άνεμος για να αποδώσει τέτοια ποσά, θα πρέπει να αποκτήσει τόσο υψηλές ταχύτητες, που όχι μόνο καθίστανται επικίνδυνες για τον ίδιο τον εξοπλισμό συλλογής της, αλλά είναι και σπάνιες στη φύση. Επιπλέον, ένα θετικό σημείο για την κυματική ενέργεια, με πρακτική χρησιμότητα, αποτελεί το γεγονός ότι είναι κατάλληλη για την κάλυψη των αναγκών μίας ευρύτερης κλίμακας κατανάλωσης.

Η αποδοτικότερη, τόσο από πλευράς οικονομικού κόστους, όσο και από καθαρά ενεργειακή σκοπιά, εκμετάλλευση του κύματος ως πηγή, καθιστά απαραίτητη την προσεκτική μελέτη και πρόγνωση του. Αυτές οι διαδικασίες είναι σύνθετες, καθώς βασίζονται σε εξειδικευμένα εργαλεία και γνώσεις, και είναι πολύ πιθανό να περιέχουν σημαντικά σφάλματα τα οποία είναι σημαντικό να λαμβάνονται υπόψη και, αν είναι δυνατόν, να απαλείφονται.

Χάρη στην ανάπτυξη της τεχνολογίας, μία πλειάδα μεθόδων συλλογής δεδομένων είναι διαθέσιμες. Η κάθε μορφή παρατήρησης έχει πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα, οπότε είναι σκόπιμο να μη βασιζόμαστε αποκλειστικά σε μία από αυτές, αλλά περισσότερο σε συνδυασμούς τους. Πιο συγκεκριμένα, δύο μεγάλες κατηγορίες παρατηρήσεων που χρησιμοποιούνται είναι:

- οι in situ παρατηρήσεις με όργανα
- οι τεχνικές τηλεπισκόπησης

Τα βασικότερα εργαλεία για in situ παρατηρήσεις είναι τα buoys, καθώς και όλες οι κατασκευές, στις οποίες υπάρχει η δυνατότητα να προσαρτηθούν όργανα, όπως μετρητές πίεσης και ρευμάτων ή μετρητές κυματισμού. Η εξ αποστάσεως μέτρηση των ευρύτερων χαρακτηριστικών κυματισμού κάνει χρήση διαφόρων τεχνικών, όπως τα συστήματα radar, τη στερεοφωτογράφιση από κινητές ή ακίνητες πλατφόρμες οργάνων, ενώ σημαντικά στοιχεία προσφέρουν τα δορυφορικά συστήματα.

Μία ακόμα προσέγγιση, πιο συγκεκριμένα τεχνική προσομοίωσης, η οποία δεν θα πρέπει να παραληφθεί είναι τα κυματικά αριθμητικά μοντέλα. Παρέχουν μία σημαντική εναλλακτική πηγή δεδομένων για τα κυματικά χαρακτηριστικά σε μία ευρεία περιοχή ενδιαφέροντος, με πιο προσιτό κόστος και αποτελέσματα σε πυκνότερο πλέγμα σε αντίθεση με τις προηγούμενες μεθόδους. Μειονέκτημα των μοντέλων θα μπορούσε να χαρακτηριστεί το γεγονός ότι για να ξεκινήσουν οι υπολογισμοί χρειάζονται αρχικές και οριακές συνθήκες, οπότε υπάρχει στενή εξάρτηση της ποιότητας των αποτελεσμάτων τους από την ποιότητα των δεδομένων εισόδου τους. Επιπλέον, ένα ακόμα εγγενές πρόβλημα είναι ο τρόπος υπολογισμού της κυματικής ενέργειας, η οποία προκύπτει ως αποτέλεσμα θεωρητικών παραδοχών.

Η πρώτη ιδέα της εκμετάλλευσης των θαλάσσιων κυμάτων ως πηγή ενέργειας χρονολογείται στα τέλη του 18ου προς τις αρχές του 19ου αιώνα, ενώ στην Καλιφόρνια των ΗΠΑ, ήδη από το 1909 χρησιμοποιούσαν τα κύματα για την ηλεκτροδότηση των αποβαθρών. Παρόλα αυτά, η εμπειριστατωμένη ενασχόληση με το κυματικό ενεργειακό δυναμικό γίνεται συστηματικότερη μετά τη δεκαετία του 1970, οπότε κάνουν την εμφάνισή τους διάφορες μεθοδολογίες μελέτης από τις επιστημονικές ομάδες.

Οι περισσότερες προσπάθειες βασίζονται στη συλλογή δεδομένων από buoys (41; 9; 14) και την περαιτέρω στατιστική επεξεργασία τους, με στόχο τη χαρτογράφηση του δυναμικού ανά περιοχές, αλλά και ευρύτερα. Άλλες μέθοδοι, βασίζονται σε τεχνικές τηλεπισκόπησης, όπως τα radar (34; 18) και οι δορυφόροι (29; 38). Σήμερα, όμως, με την υπολογιστική δύναμη των ηλεκτρονικών υπολογιστών να σημειώνει ραγδαία αύξηση, τα κυματικά μοντέλα αποτελούν μία σημαντική πηγή πληροφορίας (5; 3; 36; 30; 20; 16). Ο συνδυασμός δε των παραπάνω μεθόδων δείχνει τη χρησιμότητά του σε πολλαπλά παραδείγματα περιοχών κλειστής θάλασσας (13; 4; 18; 25; 8), αλλά και για τους ωκεανούς συνολικά.

Με σκοπό το μοντέλο να αποτελεί ένα χρήσιμο εργαλείο, ώστε να παρέχει είτε μία πρόβλεψη, είτε μία εικόνα της περιοχής ενδιαφέροντος είναι απαραίτητος ο συνδυασμός της θεωρίας με δεδομένα παρατηρήσεων για άνεμο και κύμα. Κατά κύριο λόγο, η μεθοδολογία των μοντέλων βασίζεται στα χαρακτηριστικά του ανέμου, τις μη γραμμικές αλληλεπιδράσεις των κυμάτων και την εξασθένηση λόγω τριβής (10; 45). Συνεπώς η ύπαρξη μίας βάσης δεδομένων με αξιόπιστα και ακριβή στοιχεία είναι ιδιαίτερης σημασίας για τα αποτελέσματα που θα εξαχθούν. Ένα ακόμα χαρακτηριστικό των αριθμητικών μοντέλων, είναι οι παραδοχές στη φυσική των εξισώσεων, με στόχο να απλοποιηθούν και να μειωθεί ο υπολογιστικός χρόνος. Βέβαια, οι απλοποιήσεις οδηγούν αναπόφευκτα και στην εισαγωγή αποκλίσεων στην προσομοίωση που παρέχουν τα μοντέλα, όμως η προσεκτική ανάλυση των εξισώσεων και η τελική επιλογή τους γίνεται με γνώμονα τα χαρακτηριστικά φαινόμενα που θέλουμε να παρατηρήσουμε, αγνοώντας τα υπόλοιπα.

Με σκοπό την επιτυχή πρόγνωση της κατάστασης μίας θαλάσσιας περιοχής, με τη βοήθεια των αριθμητικών μοντέλων, η επιστημονική κοινότητα καλείται να αντιμετωπίσει τα προαναφερθέντα προβλήματα. Τα τελευταία χρόνια, οι βασικοί τρόποι επίλυσής τους, είναι δύο, με κοινή, όμως κατεύθυνση, τη μείωση του μεταδιδόμενου σφάλματος. Ο πρώτος αφορά την εκμετάλλευση μεγαλύτερου όγκου διαθέσιμων παρατηρήσεων, ώστε να βελτιώνεται η ποιότητα των δεδομένων εισόδου και ο δεύτερος κάνει χρήση στατιστικών τεχνικών (19) και νευρωνικών δικτύων (52; 31; 17), για την επεξεργασία των αποτελεσμάτων.

Στόχος αυτής της εργασίας, είναι η διερεύνηση της ποιοτικής διαφοράς που μπορεί να προκύψει στον υπολογισμό της κυματικής ενέργειας και άλλων κυματικών χαρακτηριστικών με τη βοήθεια του πλήρους φάσματος του θαλάσσιου κυματισμού, χωρίς τις παραδοχές και προσεγγίσεις των θεωρητικών τύπων, όπου, κατά κύριο λόγο γίνεται χρήση στατιστικών παραμέτρων, όπως το σημαντικό ύψος ή η περίοδος του κύματος. Με γνώμονα αυτό, έγινε επεξεργασία των αποτελεσμάτων του φασματικού μοντέλου WAM και την αντιπαραβολή τους με δεδομένα από το δορυφόρο ASAR-ENVISAT. Ειδικότερα, η προσομοίωση έγινε για την περιοχή της Μεσογείου καθώς και τα Ευρωπαϊκά παράλια του Ατλαντικού ωκεανού, δηλαδή τις ακτές της Ισπανίας και της Μ. Βρετανίας. Η χρονική περίοδος ξεκινά

από τον Αύγουστο του έτους 2009 έως και το Δεκέμβριο του 2010.

Το πρώτο μέρος της εργασίας εστιάζει στην αξιολόγηση των στοιχείων σημαντικού ύψους κύματος H_s και περιόδου κύματος T_e μέσω στατιστικής ανάλυσης των δεδομένων και των αντίστοιχων κατανομών τους, ενώ μελετήθηκαν και τα ενεργειακά φάσματα για συγκεκριμένες περιοχές.

Το δεύτερο μέρος, επικεντρώνεται στον τρόπο υπολογισμού της κυματικής ενέργειας αφ' ενός από τα χαρακτηριστικά του κύματος και αφ' ετέρου από το φάσμα. Επιπλέον, αναλύθηκε η σχέση που ενδεχομένως υπάρχει μεταξύ τύπου υπολογισμού και φυσικών ή γεωγραφικών χαρακτηριστικών της περιοχής όπου εφαρμόζεται το μοντέλο.

Κεφάλαιο 2

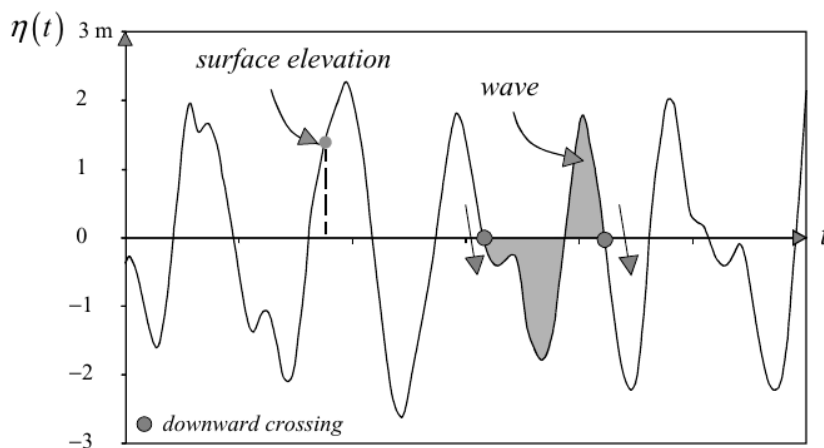
Κυματική Ενέργεια

2.1 Γενικά Στοιχεία

Η ενέργεια η οποία μεταφέρεται από τα θαλάσσια κύματα, ή αλλιώς κυματική ενέργεια, καθορίζεται από διάφορους παράγοντες μεταξύ των οποίων είναι η ροή του ανέμου πάνω από τη θαλάσσια επιφάνεια, οι παλίρροιες, τα έντονα καιρικά φαινόμενα, ακόμα και η ίδια η αλληλεπίδραση μεταξύ δύο ή περισσότερων κυμάτων. Όλες οι προηγούμενες αιτίες δημιουργίας κυματισμού, ουσιαστικά μεταφέρουν μεγάλα ποσά ενέργειας προς τη θάλασσα, τα οποία είναι δυνατόν να συλλεχθούν και να προκύψουν πολύ σημαντικά οφέλη. Ιδιαίτερα για κλειστές θάλασσες, αλλά και γενικότερα, ο άνεμος είναι η σημαντικότερη αιτία δημιουργίας κυματισμού.

Προτού ξεκινήσει η περαιτέρω ανάλυση, είναι σκόπιμο να αναφερθούν κάποιοι σχετικοί ορισμοί.

- *Ανύψωση Επιφάνειας*
Ως ανύψωση $\eta(t)$, θεωρείται η απόσταση ενός σημείου της θαλάσσιας επιφάνειας από ένα οριζόντιο επίπεδο αναφοράς, μηδενικής ανύψωσης, κάποια χρονική στιγμή.
- *Κύμα*
Ως κύμα θεωρείται το προφίλ της ανύψωσης που ορίζεται μεταξύ δύο διαδοχικών σημείων του μηδενικού επιπέδου, τα οποία έχουν ίδια κατεύθυνση, όπως ορίζεται και στο σκιασμένο τμήμα στο γράφημα 2.1. Πρόκειται για το αποτέλεσμα της μεταφοράς ενέργειας που συμβαίνει, η οποία μεταβάλλει την κατανομή της μάζας στο ρευστό κατά την κατακόρυφη διεύθυνση. Προκειμένου για τα θαλάσσια κύματα, μπορούν να διαχωριστούν σε ανεμογενή



Σχήμα 2.1: Ορισμός κύματος (wave) και ανύψωσης (surface elevation)

και μεταφερόμενα κύματα. Ως **ανεμογενές κύμα (wind wave)** ονομάζεται αυτό το οποίο έχει δημιουργηθεί εξαιτίας της δράσης του ανέμου πάνω στη θαλάσσια επιφάνεια. Το μέγεθός τους σε ύψος ποικίλει από μερικά *mm* έως 30 *m* περίπου, ενώ έχουν την ικανότητα να ταξιδεύουν αρκετά μέχρι να συναντήσουν ξηρά.

Αντίθετα, το **μεταφερόμενο κύμα (swell)** είναι κύμα που δημιουργείται από καιρικά φαινόμενα στην ανοιχτή θάλασσα και έχει περιορισμένο εύρος συχνοτήτων και διευθύνσεων στο χώρο. Το μήκος κύματος εδώ είναι μεγαλύτερο από αυτό των ανεμογενών κυμάτων και μπορεί να φτάσει μέχρι και τα 700 *m*, λόγω ισχυρών καταιγίδων.

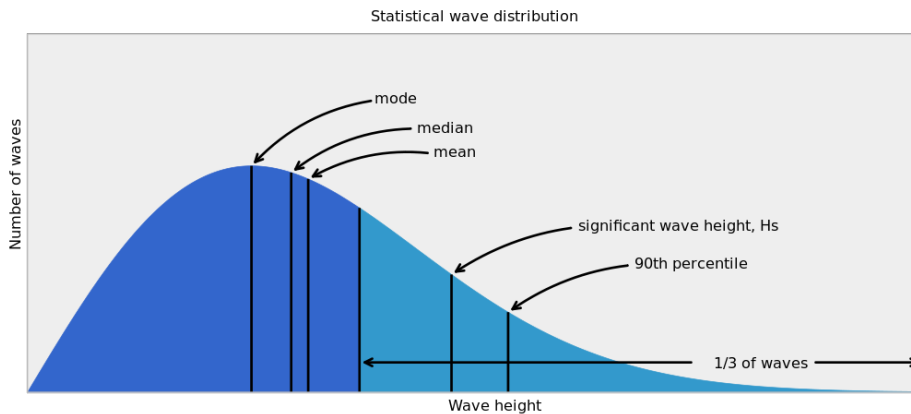
- **Σημαντικό Ύψος κύματος (Significant Wave Height)**

Σύμφωνα και με τα προηγούμενα, το ύψος ενός κύματος δεν είναι μόνο η ανύψωση, αλλά η κατακόρυφη απόσταση μεταξύ ενός όρους του κύματος και της αντίστοιχης κοιλίας του. Πέρα από το συνήθη ορισμό, μία περισσότερο χρήσιμη έννοια είναι το significant wave height $H_{1/3}$ ή H_s . Αναφέρεται στο μέσο ύψος του 1/3 των ψηλότερων κυμάτων μίας σειράς κυμάτων. Δηλαδή, ισχύει:

$$H_{1/3} = \frac{1}{n/3} \sum_{i=1}^{n/3} H_i \quad (2.1)$$

Στο σχήμα 2.2 παρουσιάζεται μία τυπική στατιστική κατανομή κυμάτων ως προς το ύψος τους για μία χρονοσειρά, όπου σημειώνεται και το ποσοστιαίο πλήθος τους.

- **Περίοδος Κύματος**



Σχήμα 2.2: Στατιστική κατανομή κυμάτων

Αποτελεί τη χαρακτηριστική χρονική διάσταση ενός κύματος και καθορίζεται από το χρόνο που μεσολαβεί, ώστε να παρέλθει η αρχή και το τέλος του κύματος από ένα δεδομένο σημείο του χώρου.

- **Φασική ταχύτητα και ταχύτητα Ομάδας**

Το κύμα χαρακτηρίζεται από τις δύο αυτές ταχύτητες, οι οποίες, γενικά, δεν είναι ίσες μεταξύ τους. Θεωρώντας την περίπτωση κυματοπακέτου αποτελούμενου από πολλές διαταραχές, διαφορετικών χαρακτηριστικών, η **φασική ταχύτητα** είναι εκείνη η οποία παρέχει πληροφορία για το ρυθμό διάδοσης μίας φάσης στο χώρο. Ορίζεται δε από τη σχέση:

$$v_p = \frac{\lambda}{T} \quad (2.2)$$

όπου λ το μήκος κύματος της διαταραχής και T η περίοδος. Αν χρησιμοποιηθούν οι σχέσεις $\lambda = \frac{2\pi}{k}$ και $T = \frac{2\pi}{\omega}$, όπου k ο κυματαριθμός και ω η συχνότητα, η εξίσωση 2.2 προκύπτει στην πιο χρήσιμη μορφή της:

$$v_p = \frac{\omega}{k} \quad (2.3)$$

Αντίστοιχα, η **ταχύτητα ομάδας** χαρακτηρίζει το σύνολο των διαφορετικών διαταραχών ενός κυματοπακέτου και δίνει την ταχύτητα με την οποία κινείται αυτό ως σύνολο. Η σχέση που την περιγράφει είναι:

$$v_g = \frac{\partial \omega}{\partial k} \quad (2.4)$$

Όπως γίνεται φανερό, η ταχύτητα ομάδας είναι άμεσα συνδεδεμένη με την ύπαρξη σχέσης διασποράς για το κυματοπακέτο, δηλαδή να υπάρχει η συνάρτηση $\omega(k)$. Στην εικόνα 2.3 που ακολουθεί, η περιβάλλουσα (κόκκινη γραμμή)

του κυματοπακέτου (μπλε γραμμή), είναι αυτή η οποία ταξιδεύει με την ταχύτητα ομάδας. Αναφορικά με τη σχέση διασποράς, προκύπτει πως είναι:

$$\omega^2 = gk \tanh(kd) \quad (2.5)$$

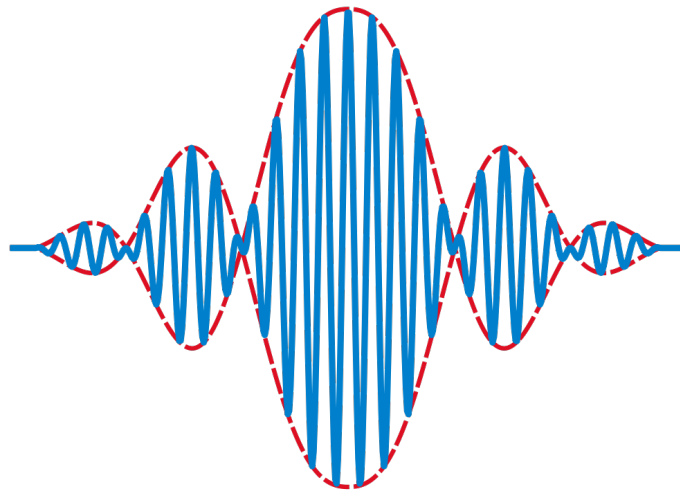
όπου d το βάθος των υδάτων. Ο τύπος αυτός απλοποιείται για τις περιπτώσεις ρηχών ή βαθέων υδάτων:

$$\omega = \sqrt{gk} \quad \text{βαθέων υδάτων} \quad (2.6)$$

$$\omega = k\sqrt{gd} \quad \text{ρηχών υδάτων} \quad (2.7)$$

- *Fetch*

Με τον όρο αυτό αναφέρεται το μήκος της υδάτινης επιφάνειας, πάνω από την οποία έχει φυσήσει ο άνεμος και μπορεί να αναπτυχθεί το κύμα.



Σχήμα 2.3: Γενική μορφή κυματοπακέτου

Ολοκληρώνοντας τις εισαγωγικές έννοιες είναι χρήσιμο να αναφερθούν κάποιες εμπειρικές σχέσεις που συσχετίζουν κυματικά χαρακτηριστικά με την ταχύτητα του ανέμου σε ύψος 10 m . Σύμφωνα με τον (39) υπολογίστηκε ότι για το significant wave height ισχύει:

$$H_{1/3} \approx 4\sqrt{\eta^2} \quad (2.8)$$

όπου η η ανύψωση της επιφάνειας. Επιπλέον, η διαστατική ανάλυση των διάφορων μεταβλητών για τυπικά φάσματα ανεπτυγμένων κυμάτων από τον (37) οδήγησε στο συμπέρασμα ότι για τη συνάρτηση $\phi(\omega)$ του φάσματος ισχύει:

$$\frac{\phi(\omega)g^3}{U_{10}^5} = f\left(\frac{\omega U_{10}}{g}\right) \quad (2.9)$$

όπου U_{10} η ταχύτητα του ανέμου σε ύψος 10 m από την επιφάνεια της θάλασσας και g η επιτάχυνση της βαρύτητας. Από τη σχέση 2.9 προκύπτει η ακόλουθη ισότητα:

$$\frac{\omega_D U_{10}}{g} = 0.88 \quad (2.10)$$

από την οποία, αν θεωρηθούν βραχέα κύματα, όπως πρακτικά συμβαίνει στον ωκεανό, προκύπτουν τα εξής:

$$\omega_D = g \frac{0.88}{U_{10}} \quad (2.11)$$

$$H_{1/3} = 0.2 \frac{U_{10}^2}{g} \quad (2.12)$$

Έτσι, έχοντας ολοκληρώσει την αναφορά στις βασικές έννοιες που χαρακτηρίζουν τα κύματα, ακολουθεί η ανάλυση του φάσματος και της ενέργειας των θαλάσσιων κυμάτων.

Η αναπαράσταση ενός κύματος χρησιμοποιώντας το φάσμα του, αποσκοπεί στη στατιστική μελέτη των κυματικών ιδιοτήτων που μπορούν να προκύψουν από μία παρατήρηση. Κατά αυτό τον τρόπο, ο κυματισμός της θάλασσας αντιμετωπίζεται ως στοχαστική διαδικασία. Γίνεται εύκολα αντιληπτό λοιπόν, ότι η φασματική ανάλυση παρέχει πληροφόρηση που θα ήταν δυνατή μόνο μέσα από πολλαπλές παρατηρήσεις και αποτελεί αυτή τη στιγμή την κυρίαρχη μέθοδο ανάλυσης κυμάτων.

Για να παραχθεί το κυματικό φάσμα από τις κλασσικές παρατηρήσεις σε μορφή χρονοσειράς για το ύψος κύματος $\eta(t)$ από ένα βυογ, για παράδειγμα, αναπτύσσουμε τη χρονοσειρά, χρονικής διάρκειας T_d , στις αρμονικές της, μέσω ανάλυσης Fourier:

$$\eta(t) = \sum_{i=1}^N a_i \cos(2\pi f_i t + \phi_i) \quad (2.13)$$

όπου a_i είναι το πλάτος και ϕ_i η φάση της ταλάντωσης που αντιστοιχεί σε συχνότητα $f_i = \frac{i}{T_d}$. Το διάγραμμα που προκύπτει από την απεικόνιση των διαφόρων πλατών ως προς τις αντίστοιχες συχνότητες, ονομάζεται φάσμα πλάτους και είναι δυνατόν να υπολογιστεί. Ομοίως, ορίζεται το φάσμα για τη φάση, το οποίο, παρόλα αυτά, δεν εμφανίζει κάποια ιδιαίτερη συμπεριφορά και είναι ομοιόμορφο. Καθώς η χρονοσειρά εμφανίζει διαφορές, ακόμα και αν επαναληφθεί η διαδικασία σε στατιστικά ίδιες συνθήκες, είναι σκόπιμο να θεωρείται η μέση τιμή του πλάτους a_i για κάθε συχνότητα ϕ_i .

Η ανάλυση που περιγράφηκε έως τώρα, αφορά σε κύματα τα οποία μελετώνται σε μία χωρική τοποθεσία με μόνη μεταβλητή το χρόνο. Για να μελετηθεί η ρεαλιστική

περίπτωση κινούμενων κυμάτων στο χώρο, θεωρείται αρμονικό κύμα το οποίο κινείται σε οριζόντιο επίπεδο, υπό γωνία θ ως προς τον άξονα x' και το πλάτος του δίνεται από τη σχέση:

$$\eta(x, y, t) = a \cos(\omega t - kx \cos\theta - ky \sin\theta + \phi) \quad (2.14)$$

Υπό αυτή την έννοια, ένα τυχαίο κύμα στη θαλάσσια επιφάνεια θα περιγράφεται από το άθροισμα της σχέσης 2.14 σε όλες τις πιθανές αρμονικές που μπορούν να εμφανιστούν.

$$\tilde{\eta}(x, y, t) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M a_{i,j} \cos(\omega_i t - k_i x \cos\theta_j - k_i y \sin\theta_j + \phi_{i,j}) \quad (2.15)$$

Επιχειρώντας την άθροιση σε όλες τις πιθανές διευθύνσεις θ και κυματαριθμούς k , πρέπει κανείς να λάβει υπόψη το γεγονός ότι ο κυματαριθμός k με τη συχνότητα ω συνδέονται μέσω της σχέσης διασποράς 2.5 για το κύμα. Συνεπώς, η παραγόμενη σχέση εμπλέκει δύο διαστάσεις, τη διεύθυνση θ και τη συχνότητα ω ή τον κυματαριθμό k . Τα τυχαία πλάτη $a_{i,j}$ ακολουθούν μία κατανομή Rayleigh, σε αντίθεση με τη φάση $\phi_{i,j}$, οι τιμές της οποίας είναι ομοιόμορφα κατανομημένες. Επίσης, τα όρια για τις τιμές των συχνοτήτων ω τίθενται από τις συχνότητες που εμφανίζουν τα ανεμογενή κύματα.

Συνοψίζοντας, η διαδικασία αυτή μπορεί να περιγράψει τα πραγματικά συνήθη κύματα του ωκεανού, δηλαδή μία στοχαστική διαδικασία, ως χρονικά στάσιμη και ομογενή ως προς το οριζόντιο επίπεδο. Αυτό γίνεται εφικτό, όπως φαίνεται και από τη σχέση 2.15, όπου θεωρούμε διαδιδόμενα κύματα διαφορετικών πλατών και συχνοτήτων σε όλες τις διευθύνσεις. Συνέπεια της προηγούμενης ανάλυσης είναι η απλοποίηση της μελέτης του φάσματος.

Το φάσμα ως μετρούμενη ποσότητα, χρησιμοποιείται στον υπολογισμό της κυματικής ενέργειας, η οποία με τη σειρά της έχει πολλαπλές τεχνολογικές εφαρμογές. Η συνολική ενέργεια που χαρακτηρίζει ένα κύμα αποτελείται από δύο μέρη, την κινητική και τη δυναμική ενέργεια. Ενδιαφέρον στοιχείο αποτελεί η ισοκατανομή της ανάμεσα στα δύο αυτά είδη, ενώ η ταχύτητα διάδοσής της ταυτίζεται με την ταχύτητα ομάδας ενός κυματοπακέτου, παρά με τη φασική ταχύτητα του κύματος (σχέσεις 2.2, 2.3, 2.4).

Το ποσό δυναμικής ενέργειας ανά μονάδα επιφάνειας που παρουσιάζει ένα κύμα με ανύψωση η δίνεται από τον ακόλουθο τύπο, θεωρώντας τη χρονική μέση τιμή για μία περίοδο:

$$E_{pot} = \overline{\int_0^{\eta} \rho g z dz} \quad (2.16)$$

Αντίστοιχα, για την μέση κινητική ενέργεια ανά μονάδα επιφάνειας μιας στήλης

νερού, του κύματος, από την ελεύθερη επιφάνειά του μέχρι βάθος d είναι:

$$E_{kin} = \int_{-d}^{\eta} \frac{1}{2} \rho u^2 dz \quad (2.17)$$

Υπολογίζοντας τα δύο προηγούμενα ολοκληρώματα, για αρμονικό κύμα, πλάτους α και λαμβάνοντας υπόψη την ταχύτητα u που προκύπτει από τη γραμμική θεωρία κυμάτων, το αποτέλεσμα είναι ίδιο και ίσο με:

$$E_i = \frac{1}{4} \rho g \alpha^2 \quad (2.18)$$

Συνεπώς, η ολική ενέργεια ενός κύματος είναι:

$$E_i = \frac{1}{2} \rho g \alpha^2 \quad (2.19)$$

Από την τελευταία εξίσωση 2.19, γίνεται φανερό ότι υπάρχει εξάρτηση της ολικής ενέργειας από το πλάτος α του κύματος. Βέβαια, η ποσότητα που έχει φυσική σημασία, δεν είναι το ίδιο το πλάτος, όσο η διακύμανση $\frac{1}{2} \alpha^2$. Όπως προαναφέρθηκε, ο (39), υπολόγισε ότι: $H = 4\sqrt{\alpha^2/4}$, αν θεωρηθεί ότι ισχύει $\alpha = 2\eta$ στη σχέση 2.8. Τότε, το ποσό ενέργειας που μεταφέρει ένα μονοδιάστατο κύμα συγκεκριμένης συχνότητας είναι:

$$E = \rho_w g H_{1/3}^2 / 8 \quad (2.20)$$

όπου ρ_w η πυκνότητα του νερού, g η επιτάχυνση της βαρύτητας και $H_{1/3}$ το σημαντικό ύψος κύματος.

Παρουσιάζεται όμως πρόβλημα ασυνέχειας στο προκύπτον φάσμα του μονοδιάστατου κύματος, το οποίο λύνεται θεωρώντας το φάσμα πυκνότητας της διακύμανσης ως εξής:

$$E(f) = \lim_{\Delta f \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta f} \frac{1}{2} \alpha^2 \quad (2.21)$$

Το ενεργειακό φάσμα των κυμάτων ως συνάρτηση της συχνότητας μπορεί να υπολογιστεί ως εξής:

$$E_{ener}(f) = \rho g E_{var}(f) \quad (2.22)$$

πολλαπλασιάζοντας δηλαδή το φάσμα διακύμανσης του πλάτους με την ποσότητα ρg . Αυτό το αποτέλεσμα στηρίζεται στη γραμμική συμπεριφορά των κυμάτων, δηλαδή στο γεγονός ότι η κάθε συνιστώσα δεν επηρεάζει τις υπόλοιπες. Η υπόθεση αυτή ανταποκρίνεται στην πραγματικότητα, ειδικά για τα ανεμογενή κύματα των ωκεανών.

Στην προαναφερθείσα αντιμετώπιση, είναι δυνατόν να λαμβάνεται υπόψη στους υπολογισμούς, η κυκλική συχνότητα $\omega = 2\pi/T$ αντί της συχνότητας $f = 1/T$. Με

αυτή την αλλαγή, η παραμετροποίηση του φάσματος αλλάζει κατά τέτοιο τρόπο, ώστε να διατηρείται αναλλοίωτη η ποσότητα της διακύμανσης $\overline{\eta^2}$.

$$\overline{\eta^2} = \int_0^\infty E(\omega) d\omega = \int_0^\infty E(f) df \quad (2.23)$$

Όπως γίνεται φανερό και στην τελευταία σχέση, ο μετασχηματισμός είναι ιδιαίτερα απλός:

$$E(\omega) = E(f) \frac{df}{d\omega} \quad (2.24)$$

Ο λόγος $J = \frac{df}{d\omega}$ ονομάζεται Jacobian του μετασχηματισμού και για τα παρόντα δεδομένα είναι $J = 1/2\pi$.

Η παραπάνω ανάλυση αφορά στη λεπτομερή περιγραφή και γνώση των κυματικών χαρακτηριστικών μίας θαλάσσιας περιοχής. Στις περισσότερες, όμως, τεχνολογικές εφαρμογές που σχετίζονται με την εκμετάλλευση της ενέργειας, αποκτά μεγαλύτερο ενδιαφέρον η ανάλυση και επεξεργασία του κυματικού φάσματος, κάνοντας αυτή την προσέγγιση την κυρίαρχη μέθοδο ανάλυσης των κυμάτων.

2.2 Τρόποι Υπολογισμού-Προσεγγίσεις της Κυματικής Ενέργειας

Οι μέθοδοι υπολογισμού της κυματικής ενέργειας είναι δύο. Αφ' ενός μπορεί να υπολογιστεί αν υπάρχει το φάσμα του κύματος $E(f, \theta)$ ως προς τις χωρικές διευθύνσεις και τις συχνότητες. Αυτή η λεπτομερέστερη μέθοδος διαχωρίζεται αν το φάσμα αναφέρεται σε περιοχές κοντά στην ακτή και γενικότερα μικρά βάθη, ή εάν πρόκειται για ανοιχτή θάλασσα με μεγαλύτερα βάθη. Συγκεκριμένα ισχύει ο εξής τύπος:

$$P = \rho_w g \int_0^{2\pi} \int_0^\infty c_g(f, h) E(f, \theta) df d\theta \quad (2.25)$$

όπου $c_g(f, h)$ αναφέρεται η ομαδική ταχύτητα του κύματος, δηλαδή η ταχύτητα διάδοσης της ενέργειας, η οποία εξαρτάται, εν γένει, από τη συχνότητα και το βάθος των υδάτων. Συγκεκριμένα, ισχύει το ακόλουθο:

$$c_g(f, h) = \frac{g}{4\pi} f^{-1} \quad \text{για βαθιά νερά} \quad (2.26)$$

$$c_g(f, h) = \sqrt{gh} \quad \text{για ρηχά νερά} \quad (2.27)$$

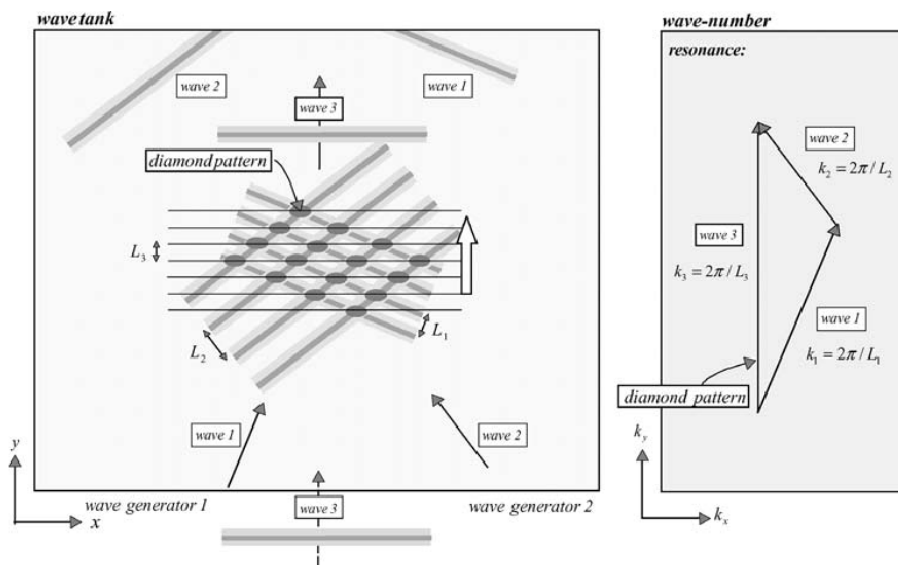
Αφ' ετέρου υπάρχει η απλοποιημένη σχέση:

$$P = \frac{\rho_w g^2}{64\pi} T H_{1/3}^2 \quad (2.28)$$

όπου $\rho_w \approx 1027 \text{ kg/m}^3$ η πυκνότητα του θαλασσινού νερού, g η επιτάχυνση της βαρύτητας, T η περίοδος του κύματος και $H_{1/3}$ το σημαντικό ύψος κύματος. Η σχέση 2.28 μπορεί να παραχθεί θεωρώντας ότι η ισχύς P υπολογίζεται ως το γινόμενο $P = c_g E$, όπου c_g είναι η ταχύτητα ομάδας του κύματος για βαθιά νερά 2.26 και E η συνολική ενέργεια του κυματισμού, όπως έχει υπολογιστεί στον τύπο 2.20.

Από αυτούς τους τύπους, γίνεται φανερό ότι τα βασικά χαρακτηριστικά του κύματος, όπως η περίοδος, το σημαντικό ύψος κύματος, αλλά και η διεύθυνση είναι απαραίτητα για τον υπολογισμό της ενέργειας, είτε αυτά συλλέγονται από όργανα παρατήρησης, είτε προκύπτουν από μοντέλα πρόγνωσης κυματισμού.

Όπως έχει αναφερθεί και προηγούμενα, ο υπολογισμός της ενέργειας που μεταφέρει ένα κύμα της θάλασσας βασίζεται κυρίως στη γραμμική θεωρία των κυμάτων, δηλαδή στο γεγονός ότι οι διάφορες συνιστώσες των κυμάτων δεν αλληλεπιδρούν μεταξύ τους. Για την περίπτωση βαθέων υδάτων όμως, μία σημαντική παράμετρος δημιουργίας και ενίσχυσης κυμάτων είναι ο συντονισμός μεταξύ κυμάτων με μη γραμμικό τρόπο. Παράδειγμα μίας τέτοιας σύνθεσης κυμάτων παρουσιάζεται στο ακόλουθο σχήμα 2.4, όπου δύο γεννήτριες δημιουργούν κυματισμό με διαφορετικά χαρακτηριστικά και διευθύνσεις. Το προκύπτον κύμα εμφανίζει ένα συγκεκριμένο μοτίβο, το οποίο μοιάζει με διαμάντι (σχήμα 2.4) και έχει δικά του χαρακτηριστικά που σχετίζονται με αυτά των δύο αρχικών, αλλά δεν είναι ίδια. Αυτό με τη σειρά του μπορεί να αλληλεπιδράσει με ένα τρίτο, προϋπάρχον, κύμα και, υπό κατάλληλες προϋποθέσεις να υπάρξει ανταλλαγή ενέργειας.



Σχήμα 2.4: Αναπαράσταση σύνθεσης κυμάτων σε δεξαμενή πειραμάτων

Το παραπάνω σενάριο με την τριάδα κυμάτων δεν είναι ρεαλιστικό. Στην ανοιχτή θάλασσα, αυτό που μπορεί να συμβεί και τελικά συμβαίνει, είναι η αλληλεπίδραση δύο ζευγών κυμάτων, των οποίων το μοτίβο σύνθεσης παρουσιάζει όμοια χαρακτηριστικά. Η συνθήκη συντονισμού αφορά στις συχνότητες και τους κυματαριθμούς και είναι:

$$\begin{aligned} f_1 + f_2 &= f_3 + f_4 \\ \vec{k}_1 + \vec{k}_2 &= \vec{k}_3 + \vec{k}_4 \end{aligned}$$

Αν ισχύει η παραπάνω συνθήκη, τα κύματα τότε ανταλλάσσουν ενέργεια, όπως έδειξε ο (27).

2.3 Εφαρμογές-Ανάγκη

Η εκμετάλλευση της κυματικής ενέργειας γνωρίζει ιδιαίτερη άνθηση τις τελευταίες δεκαετίες. Ειδικότερα, ο Yoshio Masuda το 1960 (41), θεωρήθηκε πρωτόπóρος με τη συσκευή που εφηύρε για να ηλεκτροδοτήσει πλεούμενες συσκευές, εκμεταλλευόμενος τα κύματα. Έκτοτε, συνεχίζουν να πραγματοποιούνται τόσο θεωρητικές όσο και πειραματικές μελέτες πάνω σε αυτό το επιστημονικό αντικείμενο.

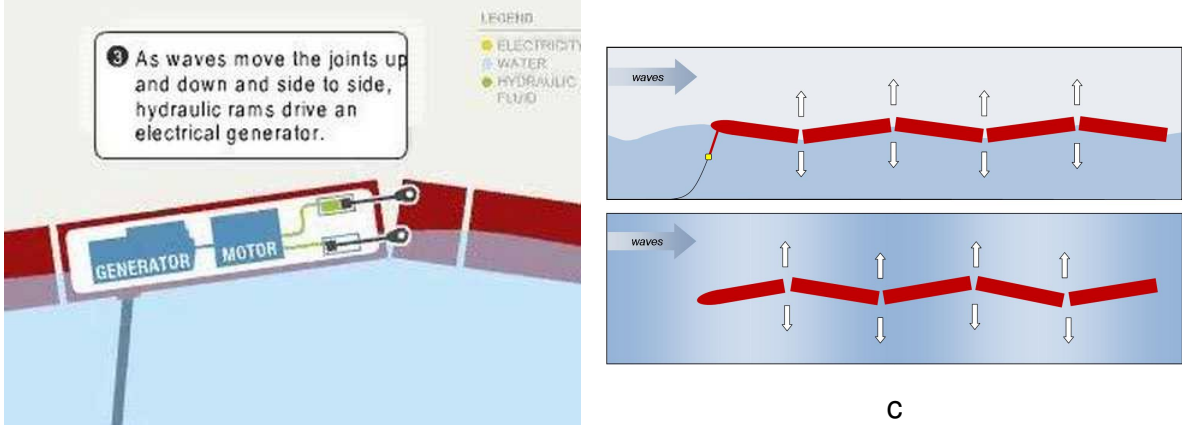
Το ενεργειακό δυναμικό σε παγκόσμια κλίμακα έχει εκτιμηθεί σε περισσότερα από 2 TW (48), ενώ οι περιοχές με το μεγαλύτερο δυναμικό είναι οι δυτικές ακτές της Ευρώπης, τα βόρεια παράλια της Μ. Βρετανίας και οι ακτές του Ειρηνικού στη Βόρεια και Νότια Αμερική. Γενικότερα, τα μέσα γεωγραφικά πλάτη ευνοούνται από τους επικρατούντες δυτικούς ανέμους που παρέχουν άφθονη ενέργεια στη θάλασσα.

Η ηλεκτροδότηση διαφόρων μονάδων, η αποθήκευση υπό μορφή ηλεκτρικής ενέργειας καθώς και η αφαλάτωση νερού είναι μερικές από τις εφαρμογές που μπορεί να χρησιμοποιηθεί η κυματική ενέργεια. Δεδομένου του τεράστιου δυναμικού της, είναι εμφανής η ανάγκη για μελέτες που αποσκοπούν στην εύρεση αποδοτικότερων μεθόδων συλλογής και εκμετάλλευσής της.

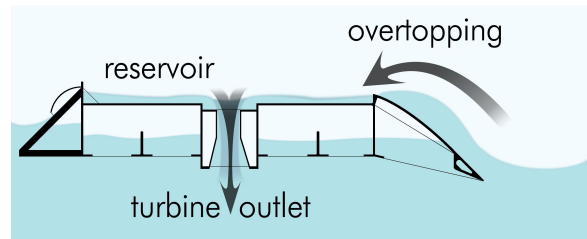
Η εκμετάλλευση του κυματικού ενεργειακού δυναμικού γίνεται από κατάλληλες μηχανές, η λειτουργία των οποίων βασίζεται σε διαφορετική αρχή κατά περίπτωση. Ειδικότερα, σε περιοχές όπου επικρατούν μεταφερόμενα κύματα, μεγαλύτερο όφελος προκύπτει από την εγκατάσταση μηχανών που συντονίζονται με την καμπυλότητα της επιφάνειας του νερού. Αντίθετα, σε περιοχές με ανεμογενές κύμα ενδείκνυται η χρήση στροβιλομηχανών ή εμβόλων.

Μερικά παραδείγματα τέτοιων μηχανών αποτελούν τα συστήματα Pelamis (εικόνες 2.5) και Wavedragon (εικόνες 2.6). Το πρώτο σύστημα παρακολουθεί την κα-

μπυλότητα της επιφάνειας της θάλασσας με αποτέλεσμα η κάμψη στους συνδέσµους να δίνει κίνηση σε έµβολα. Η δεύτερη µηχανή κάνει χρήση της ορµής των κυμάτων, ενώ τα κατευθύνει μέσω παραβολικών κατόπτρων προς ένα στρόβιλο.



Σχήμα 2.5: Η μηχανή Pelamis.



c

Σχήμα 2.6: Η μηχανή Wavedragon.

Κεφάλαιο 3

Συλλογή και Μελέτη Δεδομένων

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται οι δύο μέθοδοι που χρησιμοποιήθηκαν για να αντληθούν χρήσιμα δεδομένα για τη σύγκριση μεταξύ μοντέλων και δορυφορικών παρατηρήσεων.

3.1 Φασματικό Μοντέλο WAM

Το φασματικό μοντέλο WAM-Cycle 4 (Wave Analysis Model) επιλέχθηκε λόγω των πλεονεκτημάτων που εμφανίζει ως αριθμητικό μοντέλο προσομοίωσης κυματισμού. Ειδικότερα, πρόκειται για ένα κυματικό μοντέλο τελευταίας γενιάς που χρησιμοποιείται για την επίλυση της διαφορικής εξίσωσης μεταφοράς κύματος αριθμητικά. Οι εξισώσεις εκφράζονται με τρόπο ώστε κάθε επόμενο χρονικό βήμα να εξαρτάται μόνο από τα προγενέστερα, επομένως οι σχέσεις εμφανίζονται σε σχετικά απλή μορφή. Επιπλέον, δεν γίνεται καμία υπόθεση για το φάσμα των κυμάτων ως προς τις συχνότητες ή τις διευθύνσεις, ενώ στα θετικά στοιχεία του μοντέλου συγκαταλέγονται η υψηλή παραμετροποίησή του και οι πολλαπλές επιλογές που προσφέρει για το είδος συντεταγμένων που θα χρησιμοποιηθούν, καθώς και η ικανότητα υπολογισμών τόσο για περιοχές κοντά στις ακτές, όπου η επίδραση του βυθού είναι σημαντική, όσο και για τον ωκεανό. Ένα εξίσου σημαντικό στοιχείο για το WAM είναι το γεγονός ότι στους υπολογισμούς είναι δυνατή η χρήση υψηλής χωρικής διακριτοποίησης του πεδίου.

Η εξίσωση που επιλύεται από το φασματικό μοντέλο περιλαμβάνει τους όρους:

1. Χωροχρονική διάδοση κυματισμού

2. Δημιουργία κυματισμού λόγω της επίδρασης του ανέμου
3. Μεταβολή κυματικών χαρακτηριστικών λόγω μη γραμμικής αλληλεπίδρασης κυμάτων σε τετράδες, καθώς και κυματική διάθλαση εξαιτίας της μεταβολής του βάθους ή την ύπαρξη ρευμάτων
4. Απόσβεση κυμάτων από την επίδραση του βυθού ή τη θραύση κυμάτων

Η εξίσωση μεταφοράς για το διδιάστατο κυματικό φάσμα F είναι η ακόλουθη:

$$\frac{dF}{dt} + \frac{1}{\cos \phi} \frac{\partial}{\partial \phi} (\dot{\phi} \cos \phi F) + \frac{\partial}{\partial \lambda} (\dot{\lambda} F) + \frac{\partial}{\partial \theta} (\dot{\theta} F) = S \quad (3.1)$$

όπου θεωρείται ότι το φάσμα είναι συνάρτηση της συχνότητας f , της διεύθυνσης κύματος θ , καθώς και των χωροχρονικών συντεταγμένων ϕ , λ και t , όπου ϕ το γεωγραφικό πλάτος, λ το γεωγραφικό μήκος και t ο χρόνος.

Η παραπάνω εξίσωση 3.1 αναφέρεται στη γενική περίπτωση, για βαθιά νερά, όπου λαμβάνονται υπόψη οι όροι χρονικής μεταβολής της θέσης και της διεύθυνσης κύματος το οποίο κινείται σε ένα μέγιστο κύκλο στην επιφάνεια της γης, δηλαδή ισχύουν:

$$\dot{\phi} = \frac{v \cos \theta}{R} \quad (3.2)$$

$$\dot{\lambda} = \frac{v \sin \theta}{R \cos \phi} \quad (3.3)$$

$$\dot{\theta} = \frac{v \sin \theta \tan \phi}{R} \quad (3.4)$$

όπου $v = \frac{g}{4\pi f}$ η ταχύτητα ομάδας του κυματοπακέτου και R η ακτίνα της γης.

Ο όρος S στην εξίσωση 3.1 αναφέρεται στο σύνολο των πηγών και καταβόθρων κυματικής ενέργειας και πρακτικά περιλαμβάνει την είσοδο ενέργειας από τον άνεμο S_W , τα μη γραμμικά φαινόμενα αλληλεπίδρασης S_{NL} και τα φαινόμενα απόσβεσης S_D .

Ειδικότερα παρουσιάζονται οι τρεις όροι του S που αναφέρθηκαν παραπάνω:

- *Είσοδος Ενέργειας από τον Άνεμο S_W*

Για αυτό τον όρο, όπως έχει δείξει ο (35) με τη γραμμική θεωρία κυμάτων, ισχύει:

$$S_W = \gamma F(\theta, f) \quad (3.5)$$

όπου F το φάσμα ως προς τις διευθύνσεις και τις συχνότητες, ενώ ο συντελεστής γ εξαρτάται από την ταχύτητα τριβής u^* και από το μήκος τραχύτητας z_0 . Η παραμετροποίηση που χρησιμοποιείται για λόγους απλότητας είναι η ακόλουθη:

$$\frac{\gamma}{2\pi f} = \frac{\rho_{air}}{\rho_{water}} \beta x^2 \quad (3.6)$$

όπου f η συχνότητα και ρ_i οι πυκνότητες αέρα και υδάτων. Επίσης, η παράμετρος Miles β και η σταθερά x εξαρτώνται από την ταχύτητα τριβής, καθώς και από τη φασική ταχύτητα και διεύθυνση διάδοσης των κυμάτων.

- *Μη γραμμικές Αλληλεπιδράσεις S_{NL}*

Παρά την γραμμική προσέγγιση στην αντιμετώπιση των επιφανειακών κυμάτων, είναι απαραίτητος ο υπολογισμός της μη γραμμικότητας στις αλληλεπιδράσεις, όπως περιγράφηκαν στην παράγραφο 2.2. Ο (26) έχει περιγράψει την παραμετροποίηση Discrete Interaction Operator (DIA), την οποία και χρησιμοποιεί το μοντέλο. Συνοπτικά, η παραμετροποίηση αυτή λαμβάνει υπόψη τις αλληλεπιδράσεις των κυμάτων σε ομάδες των τεσσάρων, αγνοώντας φαινόμενα συντονισμού ή φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα σε παράκτιες περιοχές. Το όφελος από αυτή την παραμετροποίηση είναι η απλοποίηση των υπολογισμών σε μεγάλο βαθμό.

- *Φαινόμενα Απόσβεσης S_D*

Ο τελευταίος όρος αναφέρεται στην απώλεια ενέργειας, η οποία μπορεί είτε να προέρχεται από τη θραύση του κύματος, φαινόμενο γνωστό ως white-capping, είτε να οφείλεται στην ύπαρξη τυρβώδους θαλάσσιου οριακού στρώματος. Δυστυχώς, οι μηχανισμοί των φαινομένων αυτών δεν έχουν ερμηνευτεί ακόμα σε ικανοποιητικό βαθμό. Επομένως, στις εξισώσεις του μοντέλου θεωρείται η ακόλουθη σχέση, όπως έχει προταθεί από τους (7).

$$S_D = -3.33 \times 10^{-5} \bar{\omega} \left(\frac{\omega}{\bar{\omega}} \right)^2 \left(\frac{\bar{\alpha}}{\alpha_{PM}} \right)^2 F(\theta, f) \quad (3.7)$$

όπου $\bar{\omega}$ η μέση συχνότητα, ενώ $\bar{\alpha}$ μία ποσότητα που δίνεται από τη σχέση:

$$\bar{\alpha} = \bar{\omega}^4 g^{-2} \iint F(\theta, f) df d\theta \quad (3.8)$$

Τέλος, υπάρχει η σταθερά $\alpha_{PM} = 4.57 \times 10^{-3}$, η οποία αναφέρεται στη μέση τιμή του $\bar{\alpha}$ για κυματικό φάσμα τύπου Pierson-Moskowitz. Σύμφωνα με αυτή τη θεώρηση, αν άνεμος, με σταθερά χαρακτηριστικά, φυσά πάνω από ανοιχτή θάλασσα για αρκετά μεγάλο χρονικό διάστημα, τότε επέρχεται ισορροπία και η σχέση που δίνει την κατανομή της ενέργειας στα κύματα είναι ιδιαίτερα απλή.

Το αριθμητικό σχήμα επίλυσης που ακολουθείται από το μοντέλο WAM χαρακτηρίζεται από τη διαμέριση του συνεχούς κυματικού φάσματος σε ομάδες (bins) συχνοτήτων και διευθύνσεων, όπου χρησιμοποιούνται συναρτήσεις βήματος σταθερών ποσοτήτων, ενώ το μέγεθος των παραθύρων εξαρτάται από τη συχνότητα. Το κυματικό φάσμα διαχωρίζεται σε δύο μέρη, από τα οποία το ένα χρησιμοποιείται για διαγνωστικούς υπολογισμούς και το δεύτερο προγνωστικά. Αυτή η δεύτερη περιοχή χωρίζεται σε M παράθυρα συχνότητας και N παράθυρα διεύθυνσης, όπου η συχνότητα ακολουθεί μία λογαριθμική κλίμακα που χαρακτηρίζεται από $\Delta f/f = 0.1$ και καλύπτει ένα εύρος συχνοτήτων $f_{max}/f_{min} = 1.1^{M-1}$.

Η αριθμητική επίλυση της εξίσωσης 3.1 που επιχειρεί το μοντέλο γίνεται σε δύο στάδια και το αποτέλεσμά της είναι το προγνωστικό μέρος του κυματικού φάσματος που προαναφέρθηκε. Αρχικά υπολογίζονται οι όροι που σχετίζονται με τη χωρική μεταφορά, ενώ στη συνέχεια βρίσκεται η χρονική εξέλιξη, όπως αυτή προκύπτει από τους όρους που αφορούν τις πηγές και τις καταβόθρες ενέργειας.

Είναι προφανές ότι υπάρχει μία συχνότητα, πάνω από την οποία δεν μπορεί να συνεχιστεί η διαμέριση και κατ' επέκταση να ληφθεί στους υπολογισμούς. Αυτή ονομάζεται συχνότητα αποκοπής f_c και δίνεται από τη σχέση:

$$f_c = \min\{f_{max}, \max\{2.5\bar{f}, 4f_{PM}\}\} \quad (3.9)$$

όπου \bar{f} η μέση συχνότητα ενός κύματος που ξεκινά η ανάπτυξή του και f_{PM} η συχνότητα Pierson-Moskowitz που δίνεται από τον τύπο:

$$f_{PM} = a_p g^2 \omega^{-5} \exp\left[-\frac{5}{4} \left(\frac{\omega_p}{\omega}\right)^4\right] \quad (3.10)$$

Στην προηγούμενη σχέση λαμβάνεται υπόψη η μέγιστη γωνιακή συχνότητα ω_p και a_p είναι η σταθερή παράμετρος Philips.

Για συχνότητες f μεγαλύτερες της συχνότητας αποκοπής f_c στις εξισώσεις λαμβάνεται υπόψη η διαγνωστική περιοχή του κυματικού φάσματος $F(\theta, f)$, σύμφωνα με την ακόλουθη σχέση:

$$F(\theta, f) = F(\theta, f_c) \left(\frac{f}{f_c}\right)^{-5} \quad (3.11)$$

Στο καθαρά τεχνικό και υπολογιστικό μέρος που αφορά την επίλυση της εξίσωσης μεταφοράς 3.1, η χρήση της μεθόδου πεπερασμένων διαφορών πρώτης τάξης, αν και εμφανίζει μεγαλύτερες αριθμητικές αποκλίσεις από τις αντίστοιχες μεθόδους δεύτερης τάξης, προσφέρει ένα καλό συνδυασμό ακρίβειας αποτελεσμάτων και μικρών υπολογιστικών απαιτήσεων, για τις πράξεις που δίνουν την οριζόντια μεταφορά και διάθλαση. Επιπλέον, η χρήση οκταγωνικού συστήματος συντεταγμένων συνεισφέρει στην ακρίβεια των υπολογισμών για τις περιπτώσεις απώλειας

ενέργειας κοντά στην ακτή και με κατεύθυνση διάδοσης παράλληλη προς αυτή, έναντι του τετραγωνικού συστήματος, όπως έχουν δείξει οι (11).

Σχετικά με την επίλυση της χρονικής εξάρτησης, σύμφωνα με το κριτήριο CFL απαιτείται το χρονικό βήμα ολοκλήρωσης Δt να ικανοποιεί την ανίσωση $\Delta t < \Delta x/c_g$, όπου c_g η ταχύτητα ομάδας. Το ημιπεπλεγμένο σχήμα, που επιλέγεται να χρησιμοποιηθεί από το μοντέλο επιτρέπει χρονικά βήματα τα οποία είναι κατάλληλα για τη μελέτη της φασματικής περιοχής με τη μεγαλύτερη ενέργεια. Από την άλλη πλευρά, τα βήματα αυτά είναι ακατάλληλα για τις υψίσυχνες συνιστώσες που λαμβάνονται υπόψη στην προγνωστική επίλυση του φάσματος, δεν δημιουργείται τελικά ιδιαίτερο πρόβλημα. Ακολούθως, εξαιτίας του γεγονότος ότι κανένας όρος του S στην εξίσωση μεταφοράς 3.1 δεν είναι γραμμικός, θεωρείται ανάπτυγμα Taylor στη ακόλουθη μορφή και θεωρώντας εξάρτηση του S από το φάσμα F :

$$S_{n+1} = S_n + \frac{\partial S_n}{\partial F} \Delta F + \dots \quad (3.12)$$

Ένας επιπλέον περιορισμός προστίθεται στο μοντέλο για λόγους αριθμητικής ευστάθειας και προβλέπει την ύπαρξη ορίου στην ανάπτυξη του φάσματος. Οι πιο πρόσφατες εξελίξεις γύρω από αυτό το ζήτημα είναι δύο, με την τελευταία να έχει ήδη ενσωματωθεί στον κώδικα του μοντέλου. Ειδικότερα ο (49) απέδειξε ένα όριο της μορφής:

$$|\Delta F|_{max} = 6.4 \times 10^{-7} g^2 f^{-5} \frac{\Delta t}{1200} \quad (3.13)$$

όπου το χρονικό βήμα μετριέται σε s . Ακολούθως, οι (32) έδειξαν ένα νέο όριο με καλύτερη αριθμητική συμπεριφορά, το οποίο σχετίζεται με την ανάπτυξη του ανέμου και είναι το εξής:

$$|\Delta F|_{max} = 3 \times 10^{-7} g \bar{u}^* f^{-4} f_c \Delta t \quad (3.14)$$

όπου $\bar{u}^* = \max\{u^*, g \frac{f_{PM}^*}{f}\}$ η αδιάστατη ταχύτητα τριβής και $f_{PM}^* = 5.6 \times 10^{-3}$ η αδιάστατη συχνότητα της φασματικής κορυφής, όπως προκύπτει από τη θεώρηση Pierson-Moskowitz.

Η πλέον πρόσφατη εξέλιξη στον κώδικα του μοντέλου WAM αφορά στη μεταβολή του σχήματος ολοκλήρωσης της οριζόντιας μεταφοράς ενέργειας. Το προηγούμενο σχήμα που χρησιμοποιούταν, όπως προαναφέρθηκε, ήταν αυτό των πεπερασμένων διαφορών πρώτης τάξης, όπου στη λύση συνεισφέρουν τα πλησιέστερα γειτονικά σημεία της διαμέρισης. Το κυριότερο μειονέκτημα αυτής της αντιμετώπισης είναι η έλλειψη συνεισφοράς από τα γωνιακά σημεία, πρόβλημα που λύνεται αν επεκταθεί το ήδη υπάρχον σχήμα με το CTU (Corner Transport Upstream).

Για την κατανόηση αυτής της τεχνικής θεωρείται η μορφή της εξίσωσης 3.1 σε καρτεσιανές συντεταγμένες $x - y$:

$$\frac{\partial}{\partial t} F + \frac{\partial}{\partial x} (u_g F) + \frac{\partial}{\partial y} (v_g F) = 0 \quad (3.15)$$

Λαμβάνοντας ένα τετράγωνο κομμάτι διαμέρισης του πεδίου με κέντρο το σημείο (i, j) , η οριζόντια μεταφορά για ένα προηγούμενο ή επόμενο χρονικό βήμα δίνει για την ομαδική ταχύτητα στα όρια του παραθύρου:

$$u_g(i \pm 1/2) = \frac{u_g(i) + u_g(i \pm 1)}{2} \quad (3.16)$$

$$v_g(j \pm 1/2) = \frac{v_g(j) + v_g(j \pm 1)}{2} \quad (3.17)$$

Όπως φαίνεται και στο σχήμα 3.1 το τετράγωνο της διαμέρισης για προγενέστερο χρονικό σημείο κατά $n + 1$ επικαλύπτει κατά ένα ποσοστό τα επόμενα παράθυρα. Αυτό το ποσοστό λαμβάνεται υπόψη για τον υπολογισμό του φάσματος τη χρονική στιγμή n . Η σχέση που προκύπτει για το φάσμα τότε, είναι η εξής:

$$F_{i,j}^{n+1} = (1 - C_u^d)(1 - C_v^d)F_{i,j}^n + C_u^u(1 - C_v^d)F_{i-1,j}^n + C_v^u(1 - C_u^d)F_{i,j-1}^n + C_u^u C_v^u F_{i-1,j-1}^n \quad (3.18)$$

όπου C είναι οι αριθμοί Courant για τις διαυθύνσεις x, y του επιπέδου, για τους οποίους πρέπει να ισχύει $0 < C < 1$:

$$C_u^u = \frac{u_g(i - 1/2)\Delta t}{\Delta x} \quad (3.19)$$

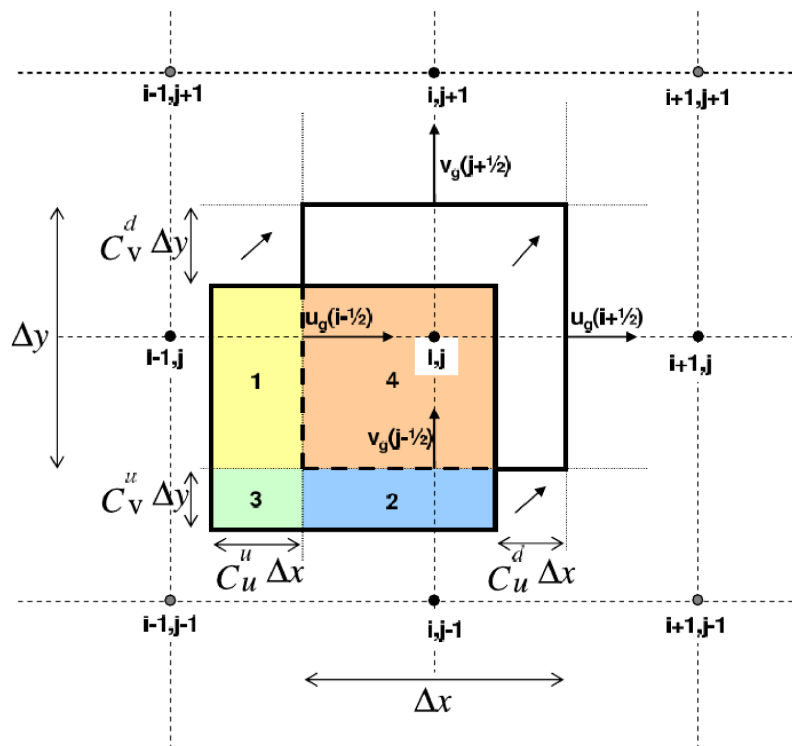
$$C_v^u = \frac{v_g(j - 1/2)\Delta t}{\Delta y} \quad (3.20)$$

$$C_u^d = \frac{u_g(i + 1/2)\Delta t}{\Delta x} \quad (3.21)$$

$$C_v^d = \frac{v_g(j + 1/2)\Delta t}{\Delta y} \quad (3.22)$$

Το μεγαλύτερο όφελος από αυτή την τεχνική προκύπτει για τις παράκτιες περιοχές και τα νησιά, ενώ η διάδοση του φάσματος γίνεται πιο ομοιόμορφη ως προς όλες τις διευθύνσεις.

Ολοκληρώνοντας την περιγραφή του μοντέλου, είναι χρήσιμο να σημειωθεί ότι για την παρούσα εργασία, χρησιμοποιήθηκαν τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων από το μοντέλο WAM, που έτρεξε για τις περιοχές της Ισπανίας, της Μεγάλης Βρετανίας και την ευρύτερη περιοχή της Μεσογείου. Η χρονική διάρκεια για την οποία έγινε φασματική ανάλυση και σύγκριση κυματικών δεδομένων είναι συνολικά 17 μήνες και συγκεκριμένα ξεκινά από τον Αύγουστο του 2009 έως και το Δεκέμβριο του 2010.



Σχήμα 3.1: Σχηματική αναπαράσταση του σχήματος οριζόντιας μεταφοράς ενέργειας

3.2 Δορυφορικά Δεδομένα από τον ASAR-Envisat

Με σκοπό να γίνει η σύγκριση των αποτελεσμάτων του φασματικού μοντέλου WAM με παρατηρήσεις, χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από τον δορυφόρο Envisat για τις ίδιες χρονικές περιόδους και περιοχές, με αυτές του WAM.

Η έρευνα σχετικά με τις μεθόδους τηλεπισκόπησης των θαλάσσιων κυμάτων και ειδικά αυτών που βασίζονται σε δορυφόρους παρουσιάζει σημαντική ανάπτυξη και βελτίωση τα τελευταία χρόνια, ενώ οι πρώτες προσπάθειες συλλογής κυματικών δεδομένων εντοπίζονται τη δεκαετία του 1970 με αποστολές των ΗΠΑ και της Σοβιετικής Ένωσης. Ενδεικτικά, μπορούν να αναφερθούν ορισμένοι σύγχρονοι δορυφόροι που χρησιμοποιήθηκαν για παρατηρήσεις των ωκεανών, όπως η αποστολή TOPEX/Poseidon (1992), με τις διάδοχες αποστολές Jason-1 (2001) και OSTM/Jason-2 (2008), καθώς και οι δορυφόροι ERS-1 (1991) και ERS-2 (1995). Σημαντική ήταν και η συνεισφορά του δορυφόρου Envisat, ο οποίος αν και δεν

είχε αποκλειστική αποστολή την παρατήρηση της θάλασσας, δύο από τα όργανά του, και συγκεκριμένα τα RA-2 και ASAR, προσέφεραν μετρήσεις για τα κυματικά χαρακτηριστικά.

Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία προέρχονται από τον δορυφόρο Envisat, η πλήρης ονομασία του οποίου είναι Environmental Satellite. Ο δορυφόρος αυτός, εκτοξεύθηκε το Μάρτιο 2002, αλλά στις 9 Μαΐου 2012 η European Space Agency (ESA) ανακοίνωσε την παύση του δορυφόρου, καθώς ήδη περίπου ένα μήνα νωρίτερα είχε χαθεί η επαφή με το έδαφος.

Πρόκειται για δορυφόρο που βρισκόταν σε πολική τροχιά γύρω από τη Γη, ενώ ήταν σε φάση με την περιστροφή της, ώστε η αντανάκλαση από την Ήλιο στην επιφάνεια της Γης να είναι πάντα ίδια για μία δεδομένη περιοχή. Το μέσο ύψος της τροχιάς ήταν 790 km, ενώ εκτελούσε μία πολική περιστροφή κάθε 101 λεπτά της ώρας. Επίσης, η περιφορά γύρω από όλα τα γεωγραφικά μήκη ολοκληρωνόταν σε 35 ημέρες.

Ο δορυφόρος αυτός αποτέλεσε τον μεγαλύτερο σε μέγεθος πολιτικό δορυφόρο που τέθηκε σε τροχιά, ενώ το αντικείμενό του ήταν οι περιβαλλοντικές μελέτες και είχε εξοπλιστεί με μία πλειάδα μετρητικών διατάξεων με εφαρμογές σε τομείς όπως ατμοσφαιρική χημεία, παρακολούθηση ρύπων, φυσικές και βιολογικές ωκεανογραφικές μελέτες, ανάλυση του κύκλου του νερού, ακόμα και παρακολούθηση φυσικών καταστροφών.

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, δύο από τα συνολικά εννέα όργανα του Envisat ήταν σε θέση να παρέχουν πληροφορίες για το θαλάσσιο περιβάλλον. Η πρώτη μετρητική συσκευή RA-2 (Radar Altimeter 2) εντάσσεται στην ευρύτερη κατηγορία ανιχνευτών που ονομάζονται αλτίμετρα. Η λειτουργία του βασίζεται στη μέτρηση της διπλής κατεύθυνσης καθυστέρηση του ανακλώμενου σήματος από το ραντάρ πάνω στη θαλάσσια επιφάνεια, ενώ μπορεί να μετρηθεί και η ισχύς και μορφή του επιστρεφόμενου παλμού. Τα δεδομένα που παρέχονται είναι η ωκεάνια τοπογραφία, η κυκλοφορία, καθώς και η βαθυμετρία. Επιπλέον, από τα χαρακτηριστικά της ηχούς του ραντάρ μπορούν να υπολογιστούν το σημαντικό ύψος κύματος και η ταχύτητα του ανέμου.

Η ακρίβεια των μετρήσεων που λαμβάνει το όργανο είναι 1 ns για τη χρονική καθυστέρηση, ενώ για την τοπογραφία είναι 5 cm και για το ύψος κύματος 25 cm . Επίσης, οι περιοχές λειτουργίας στο φάσμα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας είναι οι λεγόμενες Ku και S, δηλαδή στα 13.575 GHz και 3.2 GHz αντίστοιχα.

Η δεύτερη ανιχνευτική διάταξη ονομάζεται Advanced Synthetic Aperture Radar (ASAR) και αποτελεί μία από τις πλέον σύγχρονες μεθόδους τηλεπισκόπησης χρησιμοποιώντας ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία και συγκεκριμένα ανιχνεύει στη C περιοχή του φάσματος, δηλαδή μεταξύ 4-8 GHz. Το όργανο αυτό επιτελεί πολλαπλές λειτουργίες μέτρησης, χρησιμοποιώντας την πόλωση του φωτός, διάφο-

ρες γωνίες πρόσπτωσης και ανάκλασης της ακτινοβολίας αλλά και μεταβλητή χωρική ανάλυση στην υπό μελέτη περιοχή. Οι υψομετρικές μεταβολές που μπορούν να μετρηθούν από αυτό το σύστημα είναι της τάξης των χιλιοστών του μέτρου ή και λίγο μικρότερες.

Για τη συλλογή δεδομένων υψηλής ανάλυσης είναι απαραίτητες κεραίες μεγαλύτερων διαστάσεων από αυτές που μπορούσαν να ενσωματωθούν στο δορυφόρο. Το πρόβλημα αυτό ξεπεράστηκε συνδυάζοντας υψηλή συχνότητα εκπομπής παλμών και την ίδια την κίνηση του συστήματος. Με την κατάλληλη επεξεργασία σήματος, προκύπτουν αποτελέσματα που προσομοιώνουν αυτά μίας μεγαλύτερης ανιχνευτικής διάταξης, άρα υψηλότερης ανάλυσης.

Η εικόνα που παράγεται από το ASAR απέχει σημαντικά από το πραγματικό κυματικό φάσμα, οπότε απαιτείται αριθμητική επεξεργασία για την εύρεση των ζητούμενων χαρακτηριστικών. Ένα μειονέκτημα του ASAR εμφανίζεται εξαιτίας της πολυπλοκότητας των αλγορίθμων και της ιδιαίτερης συμπεριφοράς του μηχανισμού επανασκέδασης, με αποτέλεσμα η ακρίβεια των αποτελεσμάτων των κατευθυντικών φασμάτων να είναι μέτρια. Μία ακόμα πηγή σφάλματος στα δεδομένα αποτελεί η μειωμένη ευαισθησία του ανιχνευτή σε κατεύθυνση παράλληλη με αυτή της διασποράς του ραντάρ, ενώ δεν απουσιάζει και η εισαγωγή θορύβου, φαινόμενο που μπορεί να μετριαστεί χρησιμοποιώντας τεχνικές συνδυασμού φάσματος.

Ολοκληρώνοντας την αναφορά στο δορυφόρο Envisat αξίζει να σημειωθεί ότι τα φάσματα που παρέχονται αποτελούν τη μέση κατάσταση που επικρατεί σε περιοχές διάστασης $5 \times 5 \text{ km}$, με την ακρίβεια μέτρησης για το ύψος κύματος να αγγίζει τα 0.35 m για κυματικές περιόδους μεγαλύτερες των 12 s , ενώ τα δεδομένα θεωρούνται αξιόπιστα για τιμές ανέμου εύρους $3 - 14 \text{ m/s}$, αφού για ταχύτητες εκτός αυτής της περιοχής το SAR δεν είναι αρκετά ευαίσθητο για μέτρηση της ωκεάνιας επιφάνειας.

Κεφάλαιο 4

Αξιολόγηση των αποτελεσμάτων του μοντέλου

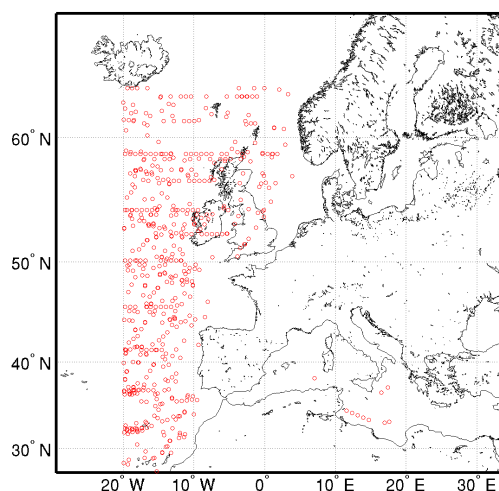
Σε αυτό το κεφάλαιο επιχειρείται η ανάλυση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης που προκύπτει από το κυματικό μοντέλο WAM, μέσω της μελέτης των στατιστικών στοιχείων του κύματος, αλλά και του ενεργειακού φάσματος.

4.1 Ανάλυση Ύψους Κύματος και Περιόδου

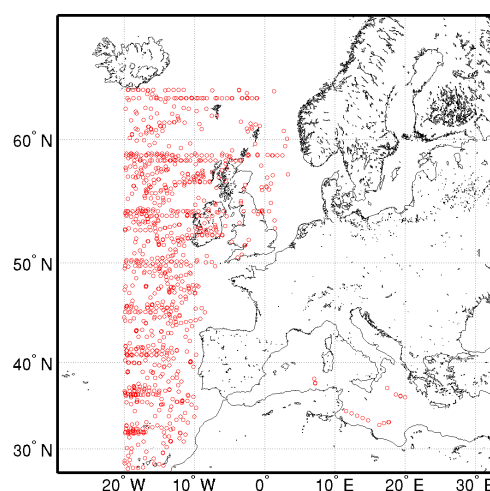
Τα στατιστικά χαρακτηριστικά που αξιολογούνται στην εργασία αυτή, είναι το ύψος κύματος H_s και η μέση περίοδος T_e για τις περιοχές της Μεγάλης Βρετανίας, της Ισπανίας, καθώς και την ευρύτερη περιοχή της Μεσογείου, για τη χρονική περίοδο μεταξύ των μηνών Αύγουστος 2009 έως και Δεκέμβριος 2010.

Στις εικόνες του σχήματος 4.1, παρουσιάζονται τα σημεία διάβασης του δορυφόρου, για τα οποία υπάρχουν έχει δώσει μετρήσεις.

Satellite Passage Points 2009



Satellite Passage Points 2010



Σχήμα 4.1: Σημεία διάβασης του δορυφόρου Envisat για τα έτη 2009 και 2010.

Με δεδομένα τα σημεία αυτά, ελήφθησαν τα αποτελέσματα του μοντέλου για το ύψος κύματος και την περίοδο κύματος, λαμβάνοντας υπόψη την χωρική του ανάλυση των 0.05° , δηλαδή θεωρώντας τις πλησιέστερες γεωγραφικές θέσεις στην ακτίνα αυτή.

Σε αυτό το σημείο, αξίζει να αναφερθεί η διαμόρφωση του σχήματος και των χαρακτηριστικών βάση των οποίων τρέχει το μοντέλο. Η γεωγραφική περιοχή που καλύπτει περιορίζεται στο βόρειο ημισφαίριο μεταξύ 20° και 75° , ενώ τα όρια στο γεωγραφικό μήκος είναι 50° δυτικά (W) και 30° ανατολικά (E). Η χωρική ανάλυση είναι, όπως προαναφέρθηκε $0.05^\circ \times 0.05^\circ$ και αποτελείται από 1601×1101 σημεία. Το μοντέλο μπορεί, επίσης να δώσει φασματικά δεδομένα σε επιλεγμένα σημεία της διαμέρισης. Η ελάχιστη συχνότητα κύματος που μπορεί να προσομοιωθεί είναι 0.055 Hz , με την πρόγνωση να αναλύεται σε 25 κυματικές συχνότητες και 24 κατευθύνσεις. Όπως έχει ήδη αναφερθεί εκτενέστερα στο κεφάλαιο 3, το μοντέλο έχει προσαρμοστεί ώστε να τρέχει σε παράλληλα συστήματα, ενώ έχει ενσωματωθεί ένα νέο σχήμα για την οριζόντια μεταφορά (Corner Transport Upstream), το οποίο παίζει καθοριστικό ρόλο στη χρονική εξέλιξη του κυματικού φάσματος, καθώς και στον καθορισμό της κύρτωσης του κυματικού πεδίου. Τέλος, πρέπει να σημειωθεί ότι το μέγιστο ύψος κύματος που προκύπτει από το WAM προκύπτει ως αποτέλεσμα της εφαρμογής του τύπου κατανομής πιθανότητας για την ανύψωση της επιφάνειας της θάλασσας.

Η στατιστική ανάλυση που ακολουθεί, βασίζεται αφενός στα διαγράμματα των αποτελεσμάτων και αφετέρου σε συγκεκριμένες στατιστικές παραμέτρους, όπως

είναι το μέσο σχετικό σφάλμα μεταξύ των δορυφορικών μετρήσεων και των αποτελεσμάτων του μοντέλου WAM, το μέσο σχετικό απόλυτο σφάλμα, το RMSE καθώς και η σχετική απόκλιση. Οι τύποι που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό των παραπάνω παραμέτρων είναι οι ακόλουθοι:

$$\text{Mean Bias} \quad MB = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{M_i - O_i}{O_i} \right) \quad (4.1)$$

$$\text{Mean Normalized Bias} \quad MNB = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{M_i - O_i}{O_i} \right) \times 100\% \quad (4.2)$$

$$\text{Mean Normalized Gross Error} \quad MNGE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{|M_i - O_i|}{O_i} \right) \times 100\% \quad (4.3)$$

$$\text{Root Mean Square Error} \quad RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (M_i - O_i)^2} \quad (4.4)$$

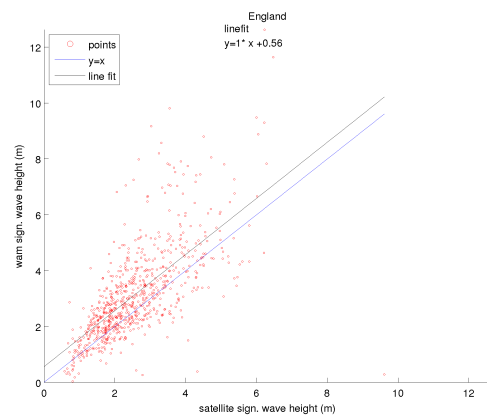
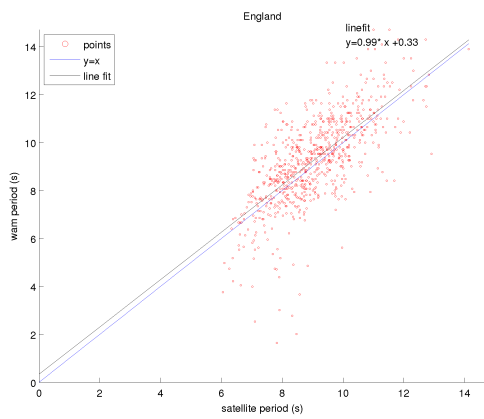
$$\text{Standard Deviation} \quad \sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (M_i - O_i - B_{MB})^2} \quad (4.5)$$

όπου στους παραπάνω τύπους N είναι το πλήθος των τιμών, M_i οι τιμές που δίνει το μοντέλο και O_i οι δορυφορικές παρατηρήσεις.

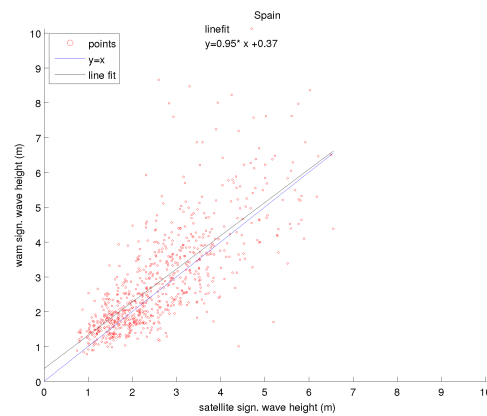
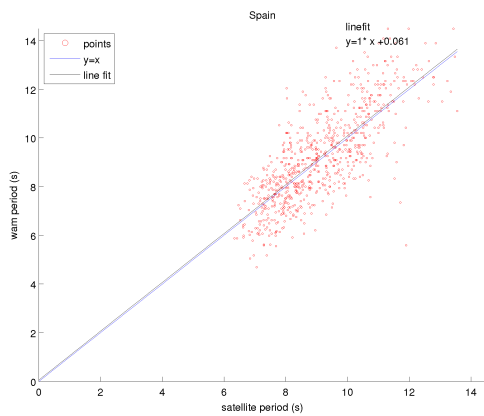
Εκτός από αυτές τις στατιστικές παραμέτρους, τα αποτελέσματα μελετήθηκαν και με τη χρήση στατιστικών κατανομών. Συγκεκριμένα, δημιουργούνται κλάσεις τιμών για το ύψος κύματος και τη μέση περίοδο, οι οποίες έχουν ίδιο εύρος και άκρα τόσο για τις τιμές που δίνει το μοντέλο, όσο και για τις δορυφορικές μετρήσεις. Μετά από αυτή τη διαμέριση δοκιμάζεται η προσαρμογή στα ιστογράμματα της κατανομής Weibull. Ελέγχοντας την ποιότητα προσαρμογής από τους αντίστοιχους δείκτες, γίνεται μία σύγκριση των τιμών των παραμέτρων, καθώς και ένας ποιοτικός έλεγχος μεταξύ των κατανομών του μοντέλου και του δορυφόρου.

4.1.1 Αποτελέσματα για το σύνολο των δεδομένων

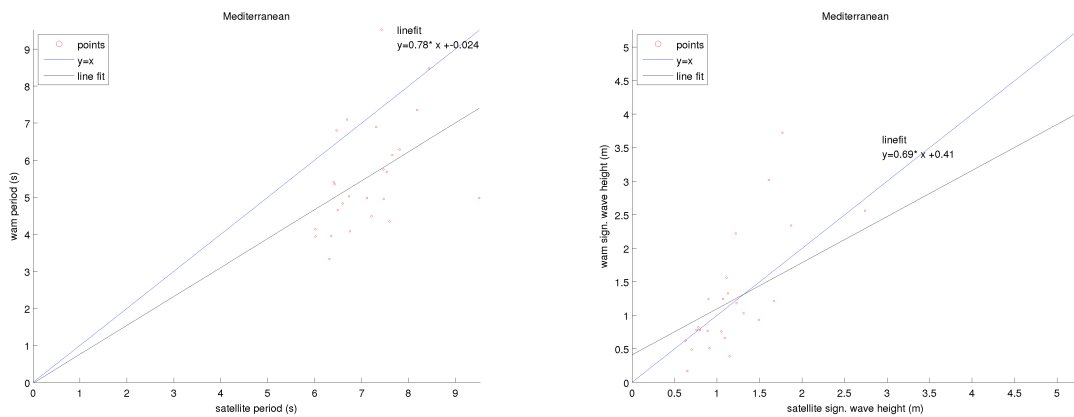
Μία πρώτη παρουσίαση των αποτελεσμάτων ανά περιοχή, αλλά για ολόκληρη τη χρονική περίοδο μελέτης, είναι αυτή που φαίνεται στα σχήματα 4.2, 4.3 και 4.4.



Σχήμα 4.2: Διαγράμματα συσχέτισης δεδομένων περιόδου και ύψους κύματος για την περιοχή της Μ. Βρετανίας.



Σχήμα 4.3: Διαγράμματα συσχέτισης δεδομένων περιόδου και ύψους κύματος για την περιοχή της Ισπανίας.



Σχήμα 4.4: Διαγράμματα συσχέτισης δεδομένων περιόδου και ύψους κύματος για την περιοχή της Μεσογείου.

Συμπληρωματικά προς τα γραφήματα παρουσιάζονται στον πίνακα 4.1 οι στατιστικοί δείκτες για τα δεδομένα, όπως υπολογίστηκαν σύμφωνα με τους τύπους 4.2-4.5.

Significant Wave Height Data				
	MNB	MNGE	RMSE	σ
England	25%	36%	1.3	1.2
Spain	12%	28%	1.0	0.97
Mediterranean	-0.4%	34%	0.74	0.74

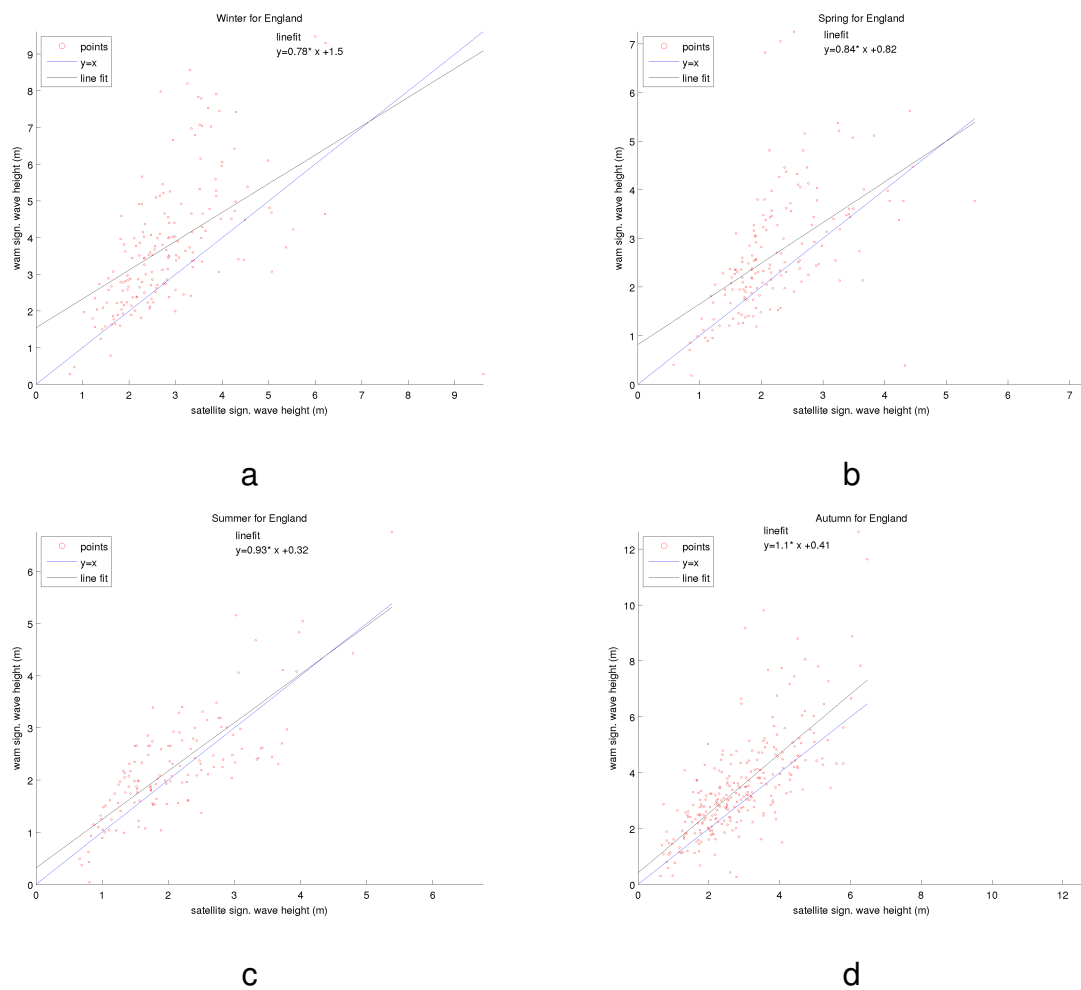
Mean Wave Period Data				
	MNB	MNGE	RMSE	σ
England	11%	11%	1.3	1.3
Spain	10%	10%	1.2	1.2
Mediterranean	26%	26%	2.0	1.3

Πίνακας 4.1: Πίνακας στατιστικών στοιχείων για το σύνολο των δεδομένων.

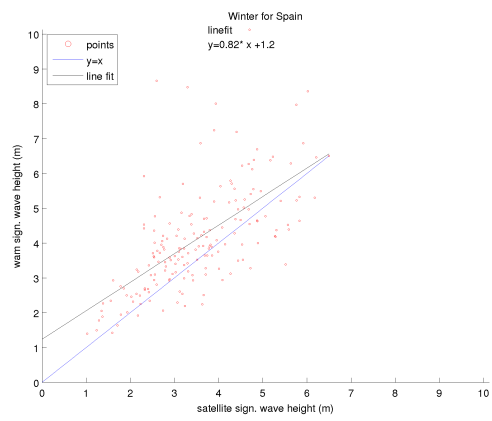
Η γενική εικόνα από τα διαγράμματα ανά περιοχή δείχνει ότι το μοντέλο τείνει να υπερεκτιμά το ύψος κύματος. Αντίθετα, στην περίπτωση της μέσης περιόδου, τα αποτελέσματα του μοντέλου WAM εμφανίζουν στατιστικά μεγαλύτερη σύμπτωση με τις δορυφορικές παρατηρήσεις. Ειδικότερα, για την περιοχή της Μ. Βρετανίας, η υπερεκτίμηση του ύψους κύματος είναι σταθερή για το μοντέλο, ενώ στην Ισπανία τείνει να εμφανιστεί στα κύματα μεγαλύτερου μεγέθους. Τα αποτελέσματα για τη Μεσόγειο αν και φαίνεται να συμφωνούν με αυτά των άλλων δύο περιοχών, είναι περιορισμένα σε πλήθος για να εξαχθούν ασφαλή συμπεράσματα.

4.1.2 Αποτελέσματα ανά εποχή

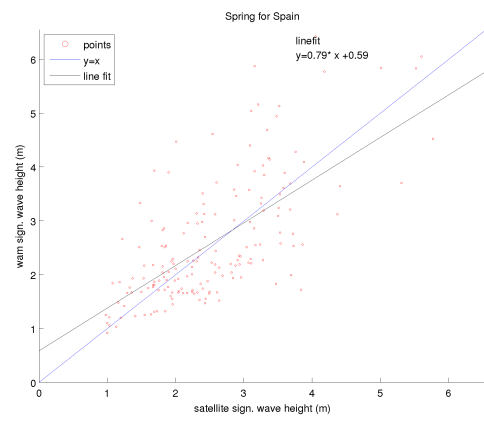
Με σκοπό την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων του μοντέλου WAM σε εποχική βάση, κατασκευάστηκαν τα διαγράμματα συσχέτισης των δεδομένων ύψους κύματος και μέσης περιόδου σε κάθε μία από τις περιοχές μελέτης, ανά εποχή. Ειδικότερα, στα διαγράμματα 4.5, 4.6 και 4.7, παρουσιάζονται οι περιπτώσεις για το ύψος κύματος, ενώ στα διαγράμματα 4.8, 4.9 και 4.10 οι αντίστοιχες για τη μέση περίοδο.



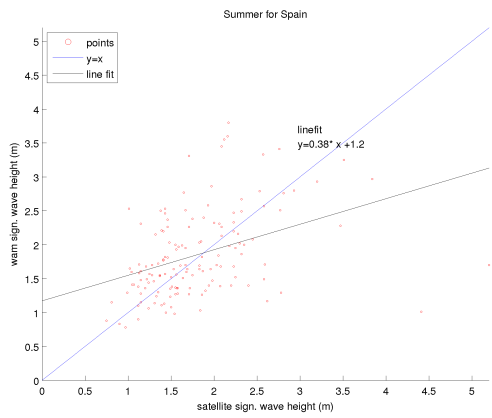
Σχήμα 4.5: Διαγράμματα συσχέτισης δεδομένων ύψους κύματος για την περιοχή της Μ. Βρετανίας.



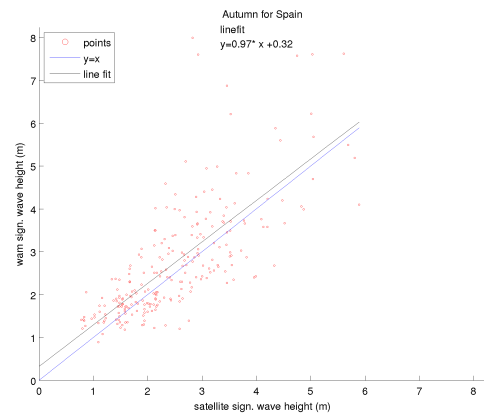
a



b

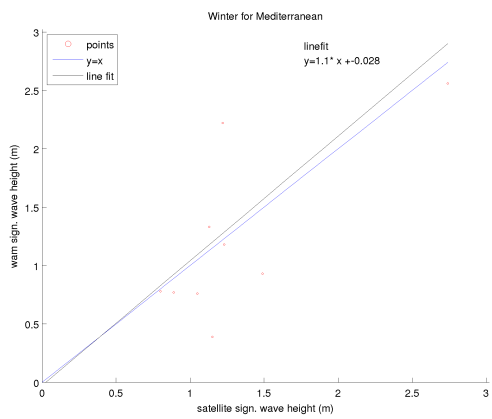


c

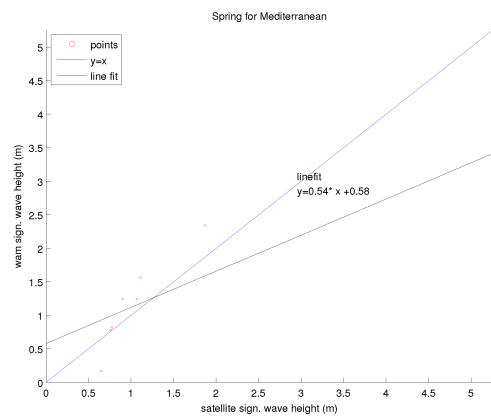


d

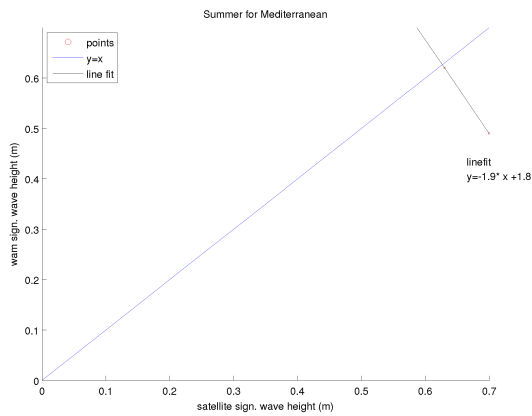
Σχήμα 4.6: Διαγράμματα συσχέτισης δεδομένων ύψους κύματος για την περιοχή της Ισπανίας.



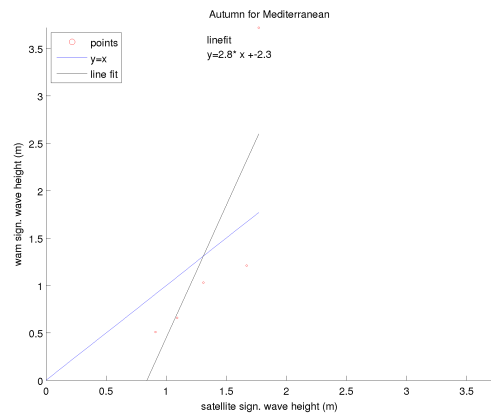
a



b

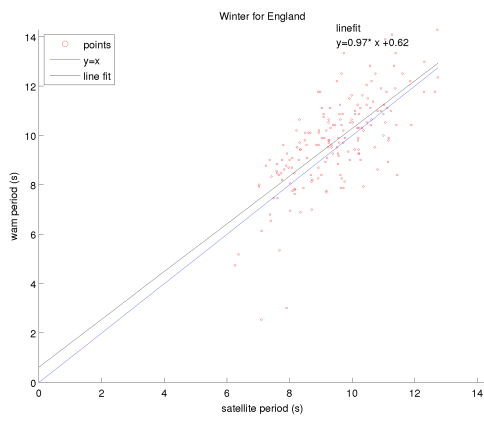


c

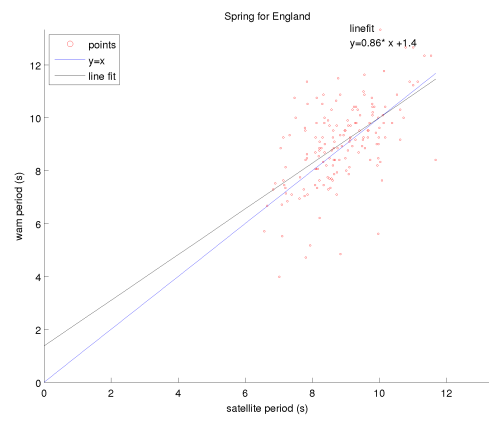


d

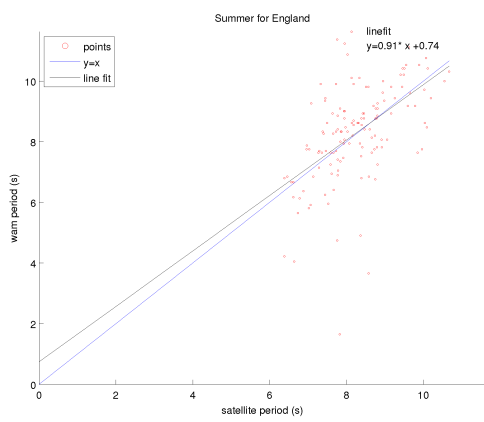
Σχήμα 4.7: Διαγράμματα συσχέτισης δεδομένων ύψους κύματος για την περιοχή της Μεσογείου.



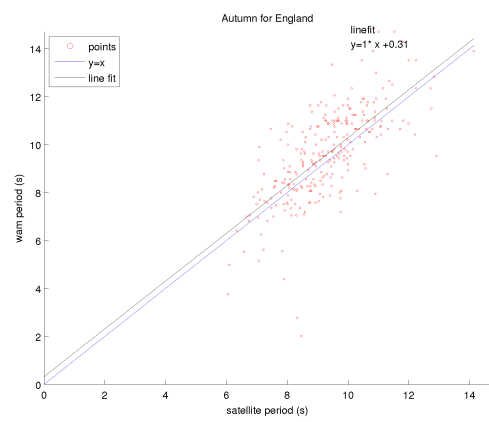
a



b

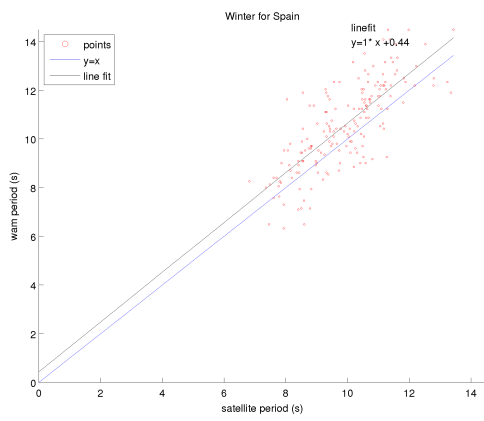


c

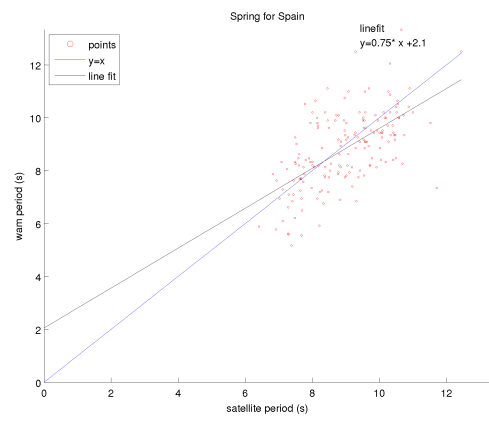


d

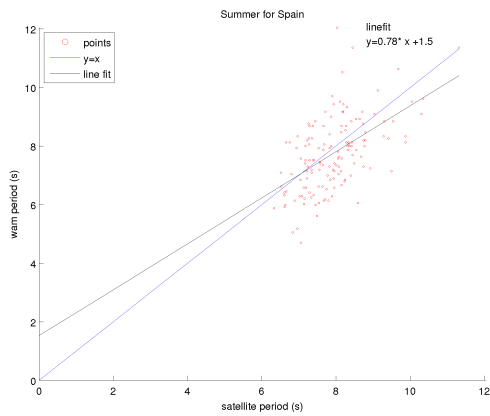
Σχήμα 4.8: Διαγράμματα συσχέτισης δεδομένων μέσης περιόδου για την περιοχή της Μ. Βρετανίας.



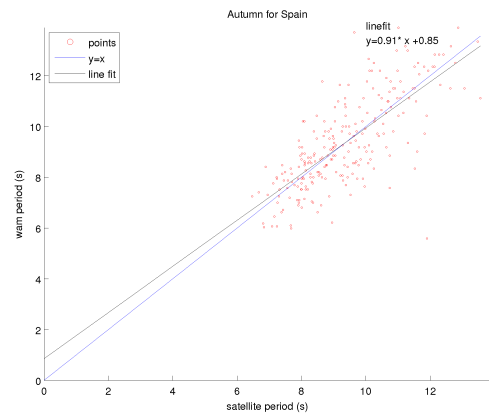
a



b

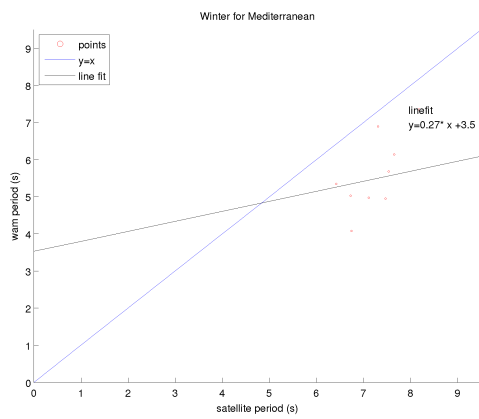


c

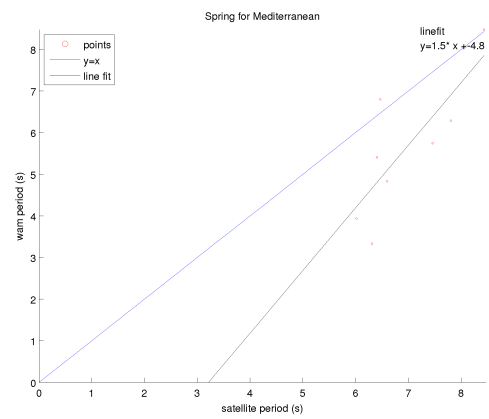


d

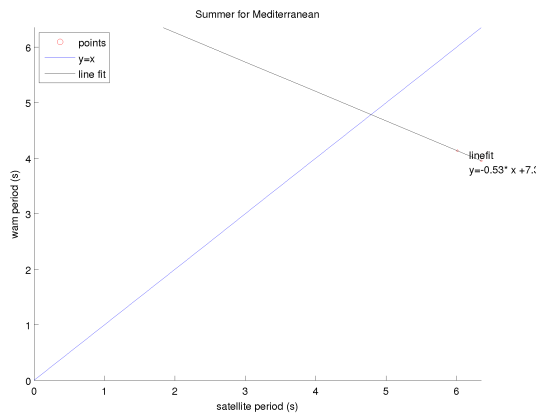
Σχήμα 4.9: Διαγράμματα συσχέτισης δεδομένων μέσης περιόδου για την περιοχή της Ισπανίας.



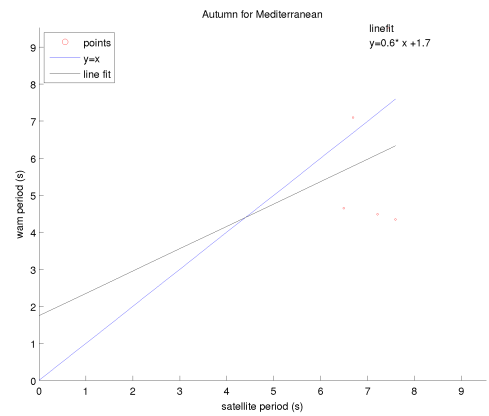
a



b



c



d

Σχήμα 4.10: Διαγράμματα συσχέτισης δεδομένων μέσης περιόδου για την περιοχή της Μεσογείου.

Από τη στατιστική επεξεργασία των δεδομένων στα διαγράμματα 4.5-4.10, προκύπτει ο πίνακας 4.2, όπου παρουσιάζονται όλοι οι στατιστικοί δείκτες για την κάθε περιοχή, ανά εποχή.

Significant Wave Height Data					
		MNB	MNGE	RMSE	σ
England	Winter	36%	44%	1.8	1.5
	Spring	22%	34%	1.1	1.0
	Summer	11%	27%	0.65	0.63
	Autumn	25%	37%	1.4	1.2
Spain	Winter	21%	29%	1.3	1.2
	Spring	6%	27%	0.86	0.86
	Summer	8%	28%	0.72	0.71
	Autumn	13%	27%	0.96	0.93
Mediterranean	Winter	3%	35%	0.64	0.64
	Spring	2%	30%	0.80	0.79
	Summer	-16%	16%	0.15	0.10
	Autumn	-4%	49%	0.94	0.94

Mean Wave Period Data					
		MNB	MNGE	RMSE	σ
England	Winter	11%	11%	1.3	1.3
	Spring	11%	11%	1.3	1.3
	Summer	12%	12%	1.4	1.4
	Autumn	11%	11%	1.4	1.3
Spain	Winter	11%	11%	1.3	1.1
	Spring	11%	11%	1.2	1.2
	Summer	11%	11%	1.1	1.1
	Autumn	10%	10%	1.2	1.2
Mediterranean	Winter	25%	25%	2.2	1.1
	Spring	22%	22%	1.7	1.0
	Summer	35%	35%	2.2	0.26
	Autumn	29%	29%	2.3	2.0

Πίνακας 4.2: Πίνακας στατιστικών στοιχείων των δεδομένων ανά εποχή.

Από την εποχική ανάλυση των δεδομένων προέκυψε ότι τη χειμερινή περίοδο τα δεδομένα για το σημαντικό ύψος κύματος εμφανίζουν σημαντικές διακυμάνσεις, σε αντίθεση με το καλοκαίρι, όπου οι διαφορές ελαχιστοποιούνται. Επιπλέον, η μέση περίοδος φαίνεται να υπολογίζεται σε όλη τη διάρκεια του χρόνου χωρίς σημαντικές αποκλίσεις.

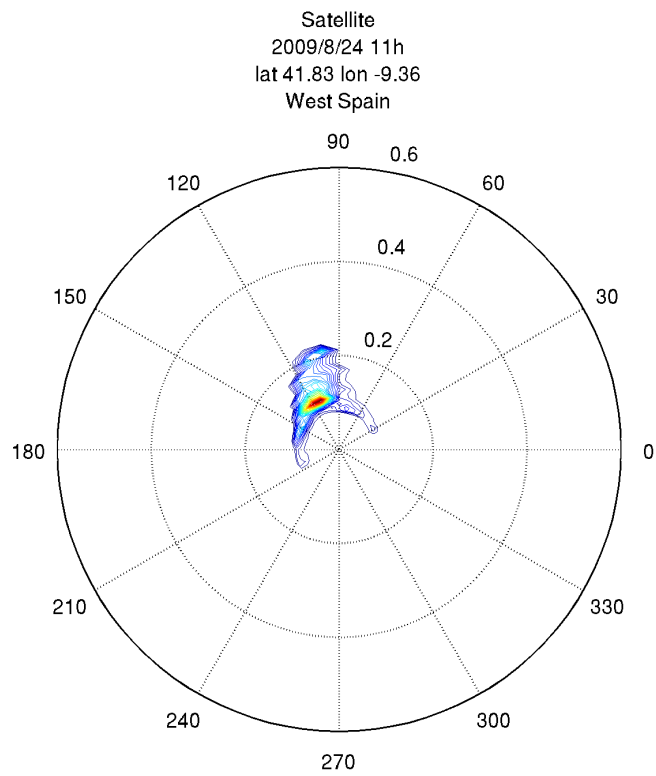
Ολοκληρώνοντας, πρέπει να σημειωθεί ότι η ανάλυση για την περιοχή της Μεσογείου εμφανίζει σημαντικά σφάλματα και δεν μπορεί να δώσει ξεκάθαρα αποτελέσματα, λόγω, κυρίως, του μικρού όγκου δορυφορικών δεδομένων.

4.2 Ανάλυση Ενεργειακού Φάσματος

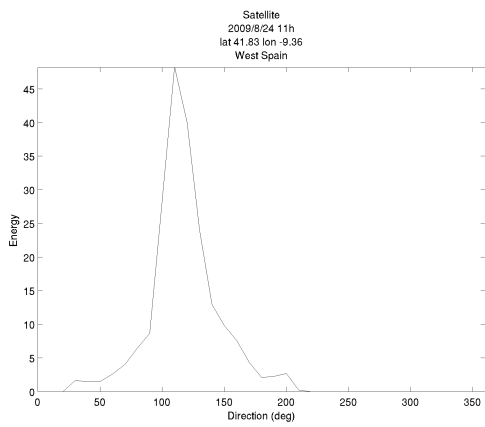
Στα πλαίσια της αξιολόγησης-επαλήθευσης του κυματικού μοντέλου συμπεριλήφθηκε η σύγκριση των φασμάτων που προκύπτουν για διάφορα σημεία, η επιλογή των οποίων γίνεται ως προς το χώρο και το χρόνο. Συγκεκριμένα, επιλέγονται συνδυασμοί σημείων για τα οποία υπάρχει κυματικό φάσμα από το δορυφόρο, αλλά και δεδομένα του μοντέλου εντός τετραγωνικής περιοχής ακμής 0.3° ή $33km$ περίπου. Επιπλέον, η χρονική απόσταση δεν είναι μεγαλύτερη από μισή ώρα, με την πλειοψηφία των δεδομένων να απέχουν χρονικά $10min$.

Οι παραπάνω προϋποθέσεις θεωρούνται ικανοποιητικές για περιοχές που βρίσκονται σε ανοιχτή θάλασσα, μακριά από τις ακτές, άρα και οι επικρατούσες συνθήκες εκεί, παραμένουν σταθερές για ικανοποιητικά χωρικά και χρονικά διαστήματα.

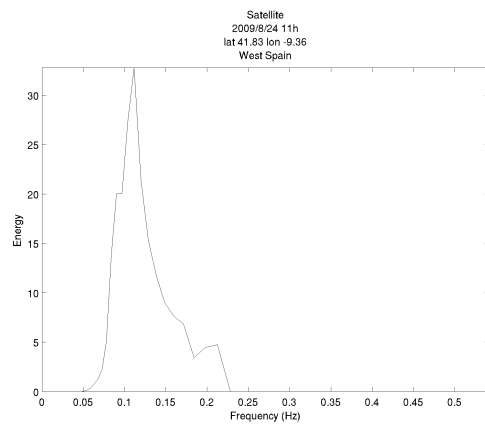
Ακολουθούν κάποια χαρακτηριστικά φάσματα που ελήφθησαν, ενώ παρουσιάζονται και διαγράμματα όπου εμφανίζεται αθροιστικά η ενέργεια ανά διεύθυνση θ ή συχνότητα f . Ειδικότερα, σε πολικά διαγράμματα παρουσιάζεται η ενέργεια του κύματος σε χρωματική κλίμακα, ενώ οι διευθύνσεις μεταβάλλονται κατά τη γωνιακή διεύθυνση και οι συχνότητες κατά την ακτινική. Επιπλέον, τα μονοδιάστατα διαγράμματα χρησιμεύουν στην ανάλυση της κατανομής της ενέργειας συγκεντρωτικά σε μία διεύθυνση ή μία συχνότητα.



a



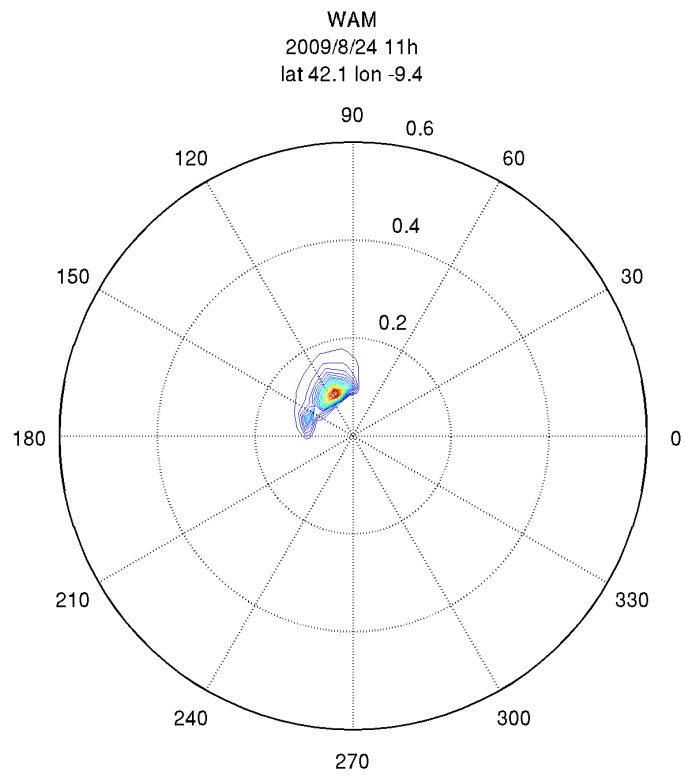
b



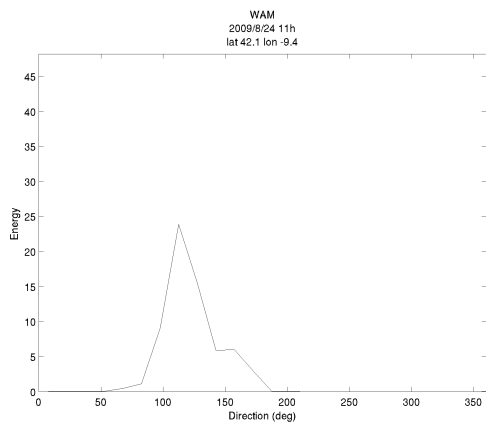
c

Σχήμα 4.11: Φάσμα από δορυφορική παρατήρηση (a), καθώς και διαγράμματα ενέργειας ανά διεύθυνση (b) και συχνότητα (c)

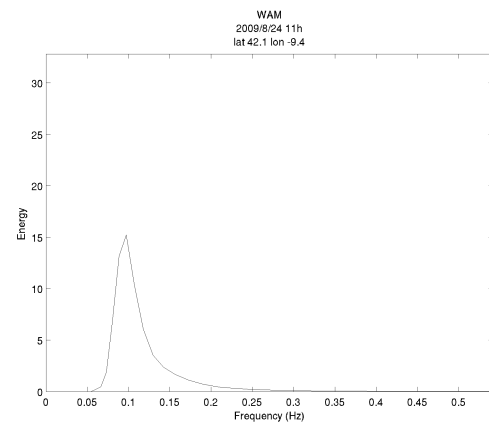
Στο σχήμα 4.12 παρουσιάζονται τα διαγράμματα που προκύπτουν από το αριθμητικό μοντέλο WAM και αντιστοιχούν με τα διαγράμματα του σχήματος 4.11. Η περιοχή στην οποία που αφορούν τα γραφήματα είναι 35 km δυτικά των ακτών της Β. Πορτογαλίας.



a



b

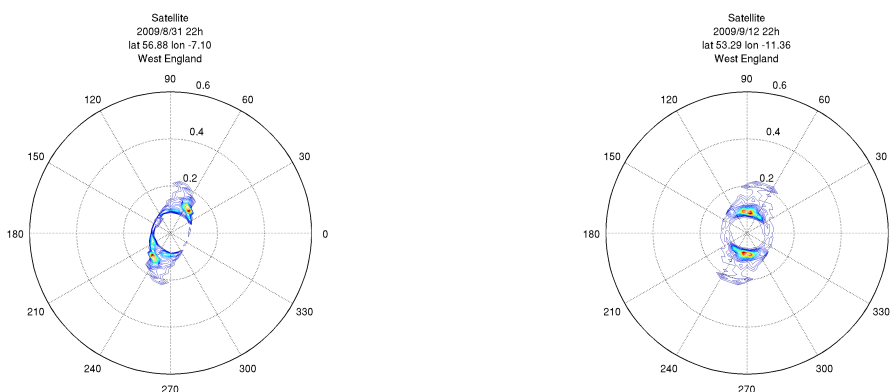


c

Σχήμα 4.12: Αποτελέσματα αριθμητικού μοντέλου WAM για το φάσμα (a), την ενέργεια ανά διεύθυνση (b) και ανά συχνότητα (c)

Πέρα από τις παραπάνω περιπτώσεις, υπήρξαν και φάσματα τα οποία εμφανίζουν ιδιαίτερα χαρακτηριστικά συμμετρίας. Αυτά τα γραφήματα, αν και φαίνονται λανθασμένα, οφείλονται στον αλγόριθμο επεξεργασίας που χρησιμοποιείται από τα δορυφορικά συστήματα τύπου ASAR. Στα συστήματα αυτά, ο υπολογισμός του φάσματος γίνεται με πολλαπλές μεθόδους, καθεμιά από τις οποίες εμφανίζει μειονεκτήματα. Ενδεικτικά αναφέρονται κάποιες διαδικασίες, όπως υπολογισμός με τη βοήθεια κάποιου αρχικού φάσματος που δίνεται από αριθμητικά μοντέλα όπως το WAM και στη μετέπειτα επίλυση του συστήματος για τον καθορισμό του φάσματος, είτε λήψη δεδομένων σε δύο διαφορετικές πολωτικές διευθύνσεις και σύνθεση των εικόνων. Τα βασικότερα προβλήματα που εμφανίζονται στις παραπάνω διαδικασίες είναι η ελλιπής γνώση των συναρτήσεων μεταφοράς για τις διάφορες καταστάσεις του ανέμου και της θάλασσας, ενώ και οι αισθητήρες μέτρησης εμφανίζουν μειωμένη ευαισθησία και ανάλυση σε διευθύνσεις που ταυτίζονται με αυτή της κίνησης του δορυφόρου.

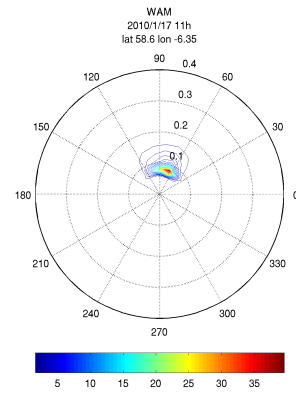
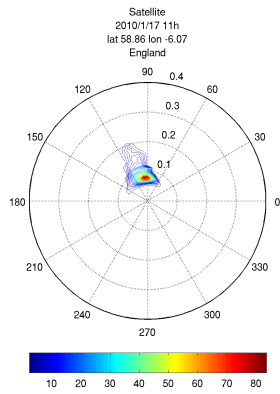
Ο αλγόριθμος ο οποίος καθορίζει το φάσμα, προσπαθεί να ελαχιστοποιεί τη μέση τιμή του τετραγώνου της διαφοράς μεταξύ του φάσματος που παρατηρεί απευθείας το σύστημα και του φάσματος που προκύπτει από υπολογισμούς. Το τελευταίο αποτελεί το αποτέλεσμα της δράσης ενός μη γραμμικού μετασχηματισμού αντιστροφής που έχει ως είσοδο το μετρούμενο φάσμα. Είναι προφανές ότι η διαδικασία συχνά εισάγει σημαντικό σφάλμα στα δεδομένα με αποτελέσματα όπως αυτά που φαίνονται στα σχήματα 4.13.



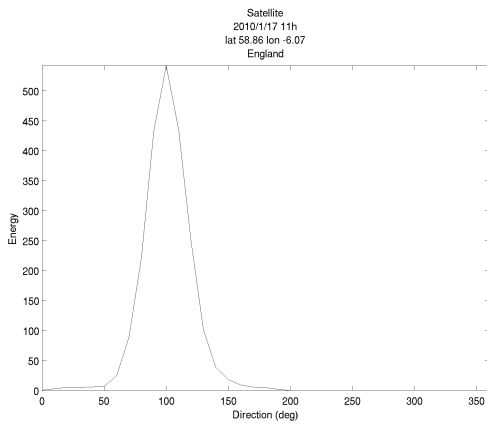
Σχήμα 4.13: Συμμετρικά φάσματα από δορυφόρο

Σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν προηγουμένως, ακολουθώντας ένα ποιοτικό έλεγχο των φασμάτων που προέκυψαν από το δορυφόρο και εμφάνισαν τέτοια συμπεριφορά αγνοήθηκαν από περαιτέρω μελέτη.

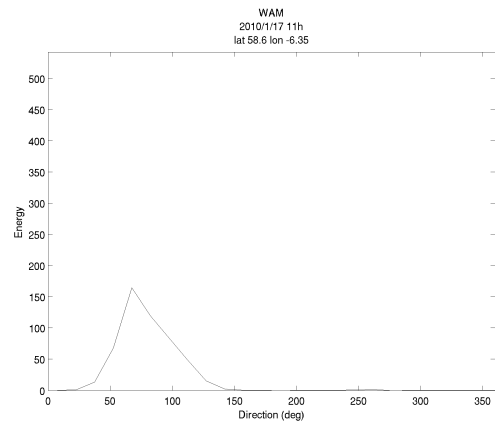
Άλλα χαρακτηριστικά παραδείγματα περιοχών όπου τα φάσματα εμφανίζουν παραπλήσια μορφή είναι αυτά που ακολουθούν:



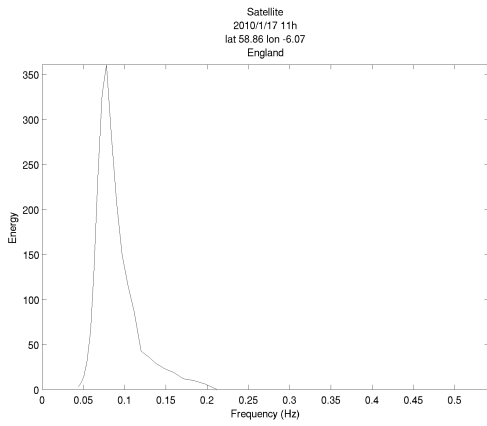
a1



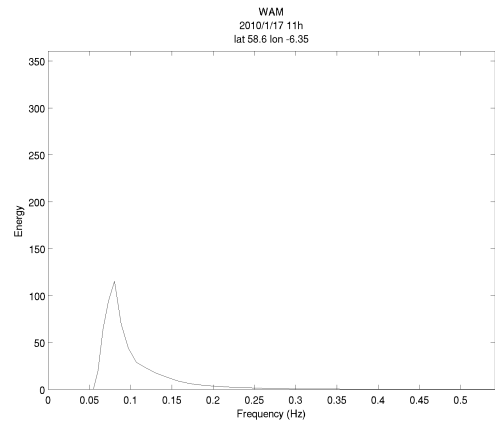
a2



b1



b2

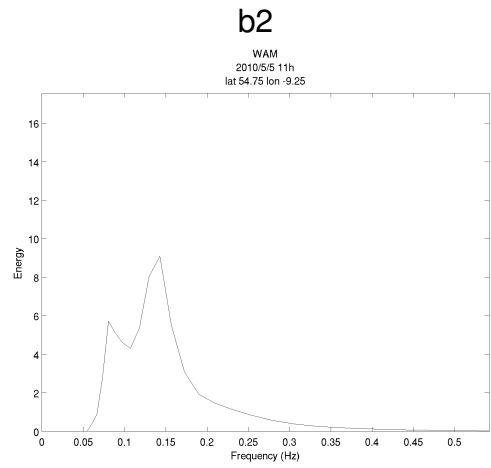
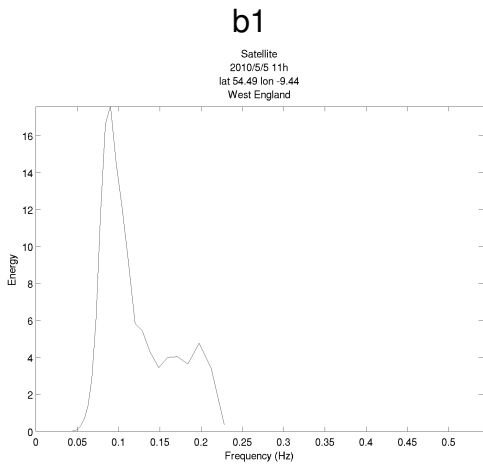
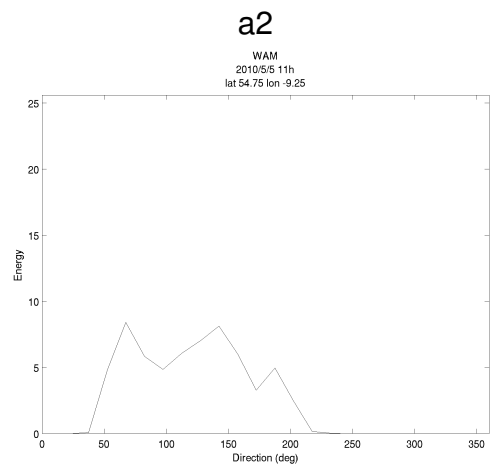
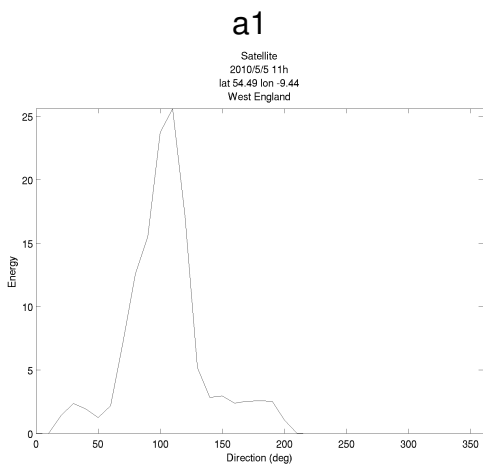
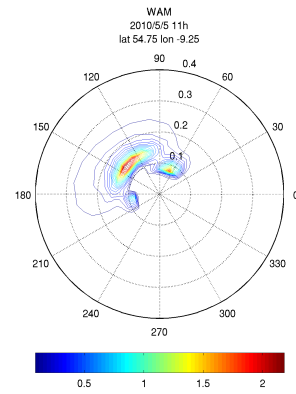
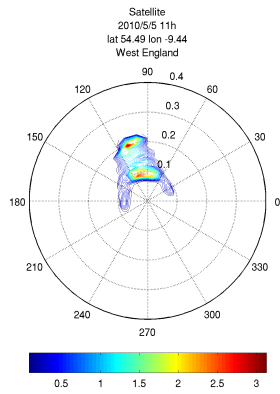


c1

c2

Σχήμα 4.14: Σύγκριση παρατηρήσεων δορυφόρου και αποτελεσμάτων μοντέλου για το φάσμα (a1-a2), την ενέργεια ανά διεύθυνση (b1-b2) και ανά συχνότητα (c1-c2)

Το γραφήματα 4.14 αναφέρονται σε περιοχή του Βόρειου Ατλαντικού, 50 *km* περίπου από τις ακτές της Μ. Βρετανίας. Τα επόμενα διαγράμματα 4.15 παρουσιάζουν τα δεδομένα για περιοχή 30 *km* δυτικά των ακτών της Ιρλανδίας.



c1

c2

Σχήμα 4.15: Σύγκριση παρατηρήσεων δορυφόρου και αποτελεσμάτων μοντέλου για το φάσμα (a1-a2), την ενέργεια ανά διεύθυνση (b1-b2) και ανά συχνότητα (c1-c2)

Σε αυτά τα διαγράμματα γίνεται φανερή η καλή σύμπτωση των αποτελεσμάτων του μοντέλου με τα δορυφορικά δεδομένα σε σχέση με τη διεύθυνση και τη συχνότητα του κυματισμού, όπως αυτό παρουσιάζεται στο φάσμα. Επιπλέον, από τα γραφήματα ενέργειας-διεύθυνσης και ενέργειας-συχνότητας, εμφανίζεται η τάση του μοντέλου WAM για υποεκτίμηση της ενέργειας ως προς τη μέγιστη τιμή της, κατά κύριο λόγο. Μελετώντας τα φάσματα όμως, παρουσιάζεται μεγαλύτερη διασπορά της ενέργειας στις συχνότητες και τις διευθύνσεις σύμφωνα με τα αποτελέσματα του μοντέλου, επομένως η συνολική ποσότητα δεν επηρεάζεται σημαντικά.

Κεφάλαιο 5

Εκτίμηση της κυματικής ενέργειας

5.1 Τρόποι Υπολογισμού

Η ενέργεια των θαλάσσιων κυμάτων είναι δυνατόν να εκτιμηθεί σύμφωνα με τα παρατηρούμενα χαρακτηριστικά τους. Η ακρίβεια των αποτελεσμάτων επηρεάζεται από παραδοχές που υιοθετούνται προς όφελος της ταχύτητας ολοκλήρωσης των υπολογισμών. Η απαίτηση αποτελεσμάτων υψηλότερης ακρίβειας συνεπάγεται τη χρήση αναλυτικών σχέσεων και δεδομένων που μπορεί να μην είναι διαθέσιμα, όπως η βαθυμετρία της περιοχής.

Όπως έχει ήδη αναλυθεί στο κεφάλαιο 2, η μέση ενέργεια ενός κύματος με μέτωπο πλάτους $1m$, δίνεται από τη σχέση:

$$E_i = \frac{1}{2} \rho g \alpha^2 \quad (5.1)$$

Πρόκειται για το άθροισμα της μέσης κινητικής και της μέσης δυναμικής ενέργειάς του ως προς το χρόνο ανά μοναδιαία επιφάνεια. Το αποτέλεσμα αυτό προκύπτει λαμβάνοντας υπόψη τη γραμμική θεωρία κυμάτων, ενώ αφού εξαρτάται από το τετράγωνο του πλάτους α αποτελεί χαρακτηριστικό δεύτερης τάξης.

Η σχέση που δίνει τη ροή ενέργειας προκύπτει από τον προηγούμενο τύπο 5.1 και την ταχύτητα ομάδας του κύματος για την περίπτωση βαθέων υδάτων.

$$P = E \cdot c_g \quad (5.2)$$

Αντικαθιστώντας στην παραπάνω σχέση την ταχύτητα $c_g = g/2\omega$ και στη σχέση της ενέργειας 5.1, το πλάτος $\alpha = H/2$, όπου H το ύψος κύματος, προκύπτει η εξίσωση της ισχύος που χαρακτηρίζει ένα μέτωπο κύματος πλάτους $1m$:

$$P = \frac{\rho g^2 T H^2}{64\pi} \quad (5.3)$$

Αυτή η απλοποιημένη προσέγγιση για το υπολογισμό της ενεργειακής ισχύος των κυμάτων μπορεί να αντιπαρατεθεί με τις σχέσεις υπολογισμού της ενέργειας μέσω του δισδιάστατου κυματικού φάσματος στις διευθύνσεις και τις συχνότητες. Ο τύπος της ολοκλήρωσης, όπως παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο 2 είναι ο ακόλουθος:

$$P = \rho g \int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} c_g(f, D) E(f, \theta) df d\theta \quad (5.4)$$

όπου η ταχύτητα ομάδας c_g εξαρτάται από τη συχνότητα f και το βάθος D των υδάτων, άρα προκύπτουν δύο τύποι υπολογισμού που διακρίνονται σε περιοχές βαθέων και ρηχών υδάτων. Συγκεκριμένα, η ταχύτητα ομάδας δίνεται από τις σχέσεις 2.26 και 2.27

Για να γίνει αυστηρά η διάκριση των δύο τύπων, θα πρέπει να ελέγχεται η σχέση μεταξύ βάθους D και κυματαριθμού $k = 2\pi/\lambda$. Όταν $kh \gg 1$ ισχύει η περίπτωση βαθέων υδάτων, ενώ για $kh \ll 1$ η περιοχή θεωρείται με ρηχά νερά. Όμως από τη θεωρία είναι γνωστό ότι το μήκος κύματος επηρεάζεται από το βάθος, οπότε ο έλεγχος καθίσταται αναξιόπιστος και δύσκολος.

Κατά τη διερεύνηση για τη βέλτιστη μέθοδο υπολογισμού της κυματικής ενέργειας, προέκυψε η ανάγκη καθορισμού ενός ορίου σχετικό με το διαχωρισμό των υδάτων σε ρηχά ή βαθιά. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η ορθή σύγκριση γίνεται κάθε φορά λαμβάνοντας υπόψη το ύψος κύματος, καθώς και το βάθος της θάλασσας στην περιοχή. Στην πραγματικότητα, το ίδιο το κύμα επηρεάζεται από το βάθος, συνεπώς δεν υπάρχει αντικειμενικός τρόπος επιλογής. Για την πληρότητα της μελέτης, αν και θεωρήθηκε ένα αρχικό όριο στα 40 m, μελετήθηκαν οι περιπτώσεις και άλλων τιμών.

Η επιλογή του ορίου των 40 m έγινε σύμφωνα με τη θεωρία, η οποία προβλέπει ότι κύματα με ύψος μεγαλύτερο από 36 m είναι στατιστικά σπάνια, ενώ τα περισσότερα σημεία βρίσκονται κοντά σε ακτές, όπου δεν αποτελεί σημαντικό σφάλμα η προσέγγιση των ρηχών υδάτων.

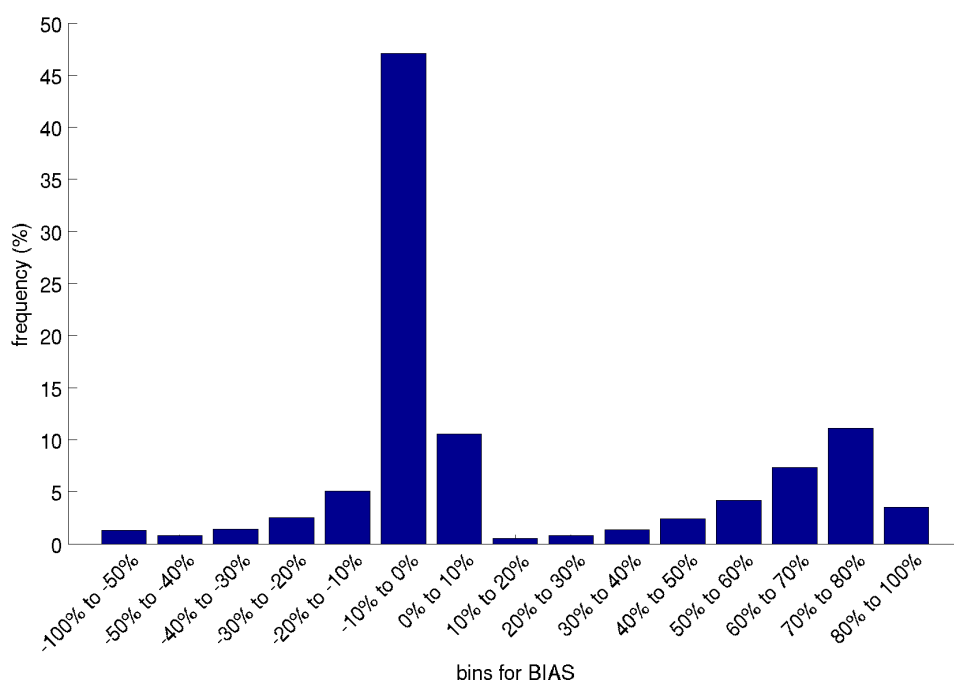
Για την ακόλουθη ανάλυση είναι απαραίτητη η διευκρίνιση σχετικά με τον ορισμό του bias που χρησιμοποιείται. Συνεπώς, ο τύπος υπολογισμού είναι:

$$bias = (E_{spec} - E_{simp}) / E_{spec} \quad (5.5)$$

όπου E_{spec} είναι η ενέργεια υπολογισμένη από το φάσμα και E_{simp} η ενέργεια όπως υπολογίζεται με την προσέγγιση.

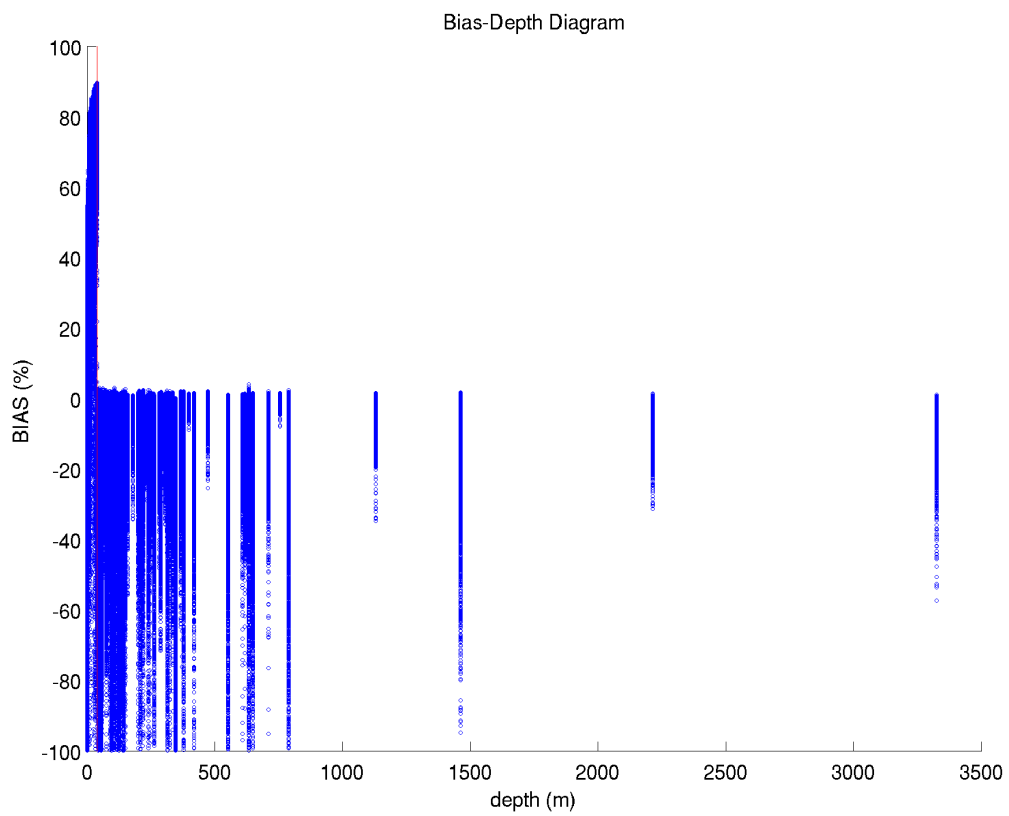
5.2 Ανάλυση αποκλίσεων για τις δύο προσεγγίσεις

Με σκοπό τη σύγκριση των αποτελεσμάτων που προκύπτουν αφενός από τον υπολογισμό μέσω του φάσματος και αφετέρου με τη βοήθεια της προσεγγιστικής σχέσης για την ενέργεια, γίνεται μελέτη της σχετικής διαφοράς τους σε κάθε σημείο. Συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο γράφημα 5.1, όπου τα δεδομένα ομαδοποιούνται σε κλάσεις.

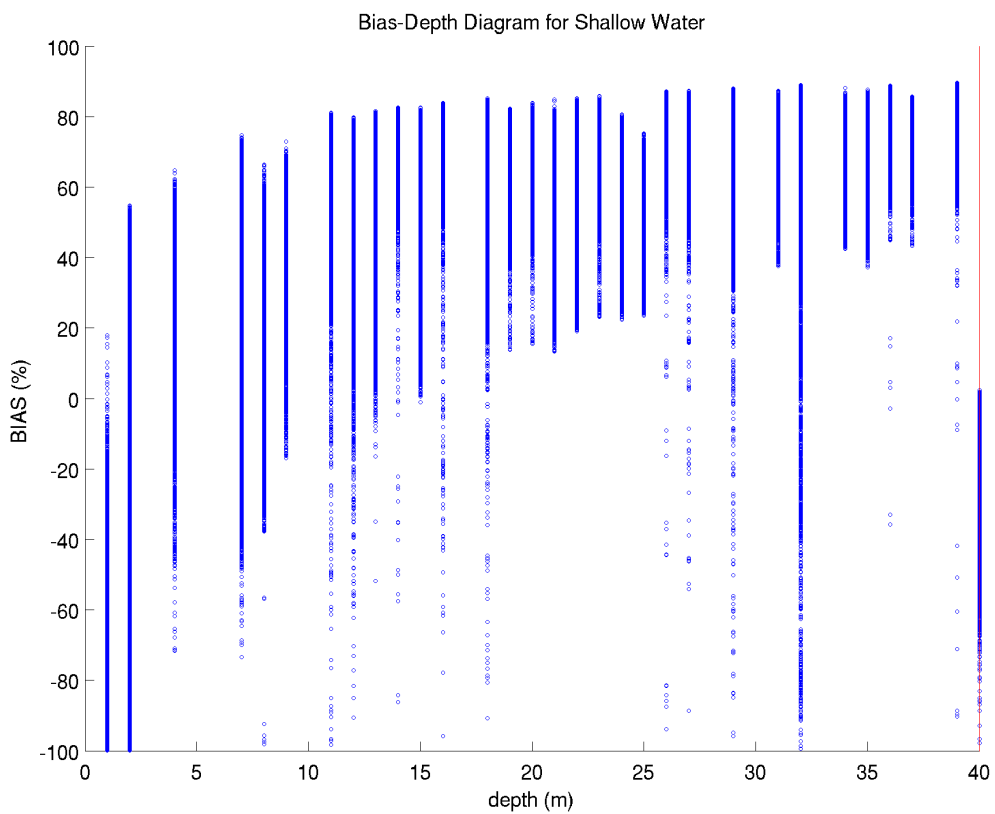


Σχήμα 5.1: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα για τη διαφορά (%) που παρουσιάζει ο υπολογισμός της ενέργειας από το φάσμα και τον απλό τύπο.

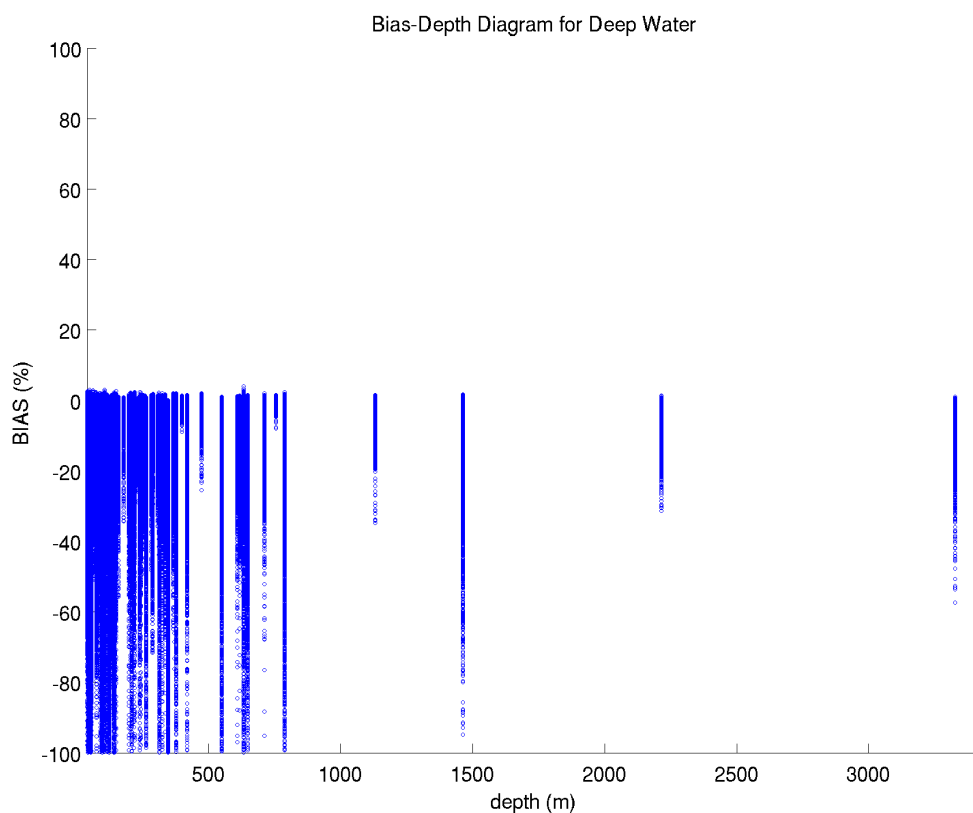
Επίσης, δοκιμάζεται η συσχέτιση των υπολογισμένων αποκλίσεων με τη βαθυμετρία της γεωγραφικής περιοχής. Ακολουθεί το αντίστοιχο διάγραμμα 5.2, ενώ παρατίθενται διαγράμματα όπου εμφανίζονται οι περιπτώσεις αβαθών και βαθέων υδάτων, ειδικότερα.



Σχήμα 5.2: Διάγραμμα συσχέτισης bias με τη βαθυμετρία.



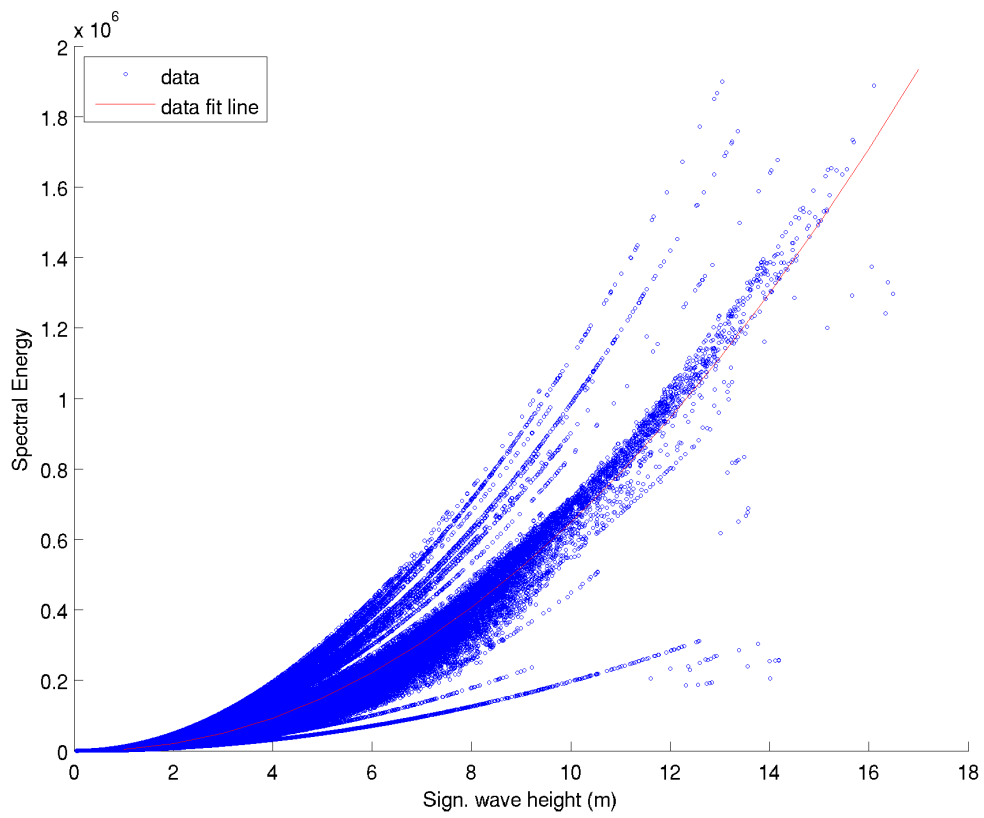
Σχήμα 5.3: Διάγραμμα συσχέτισης bias με το βάθος για ρηχά νερά.



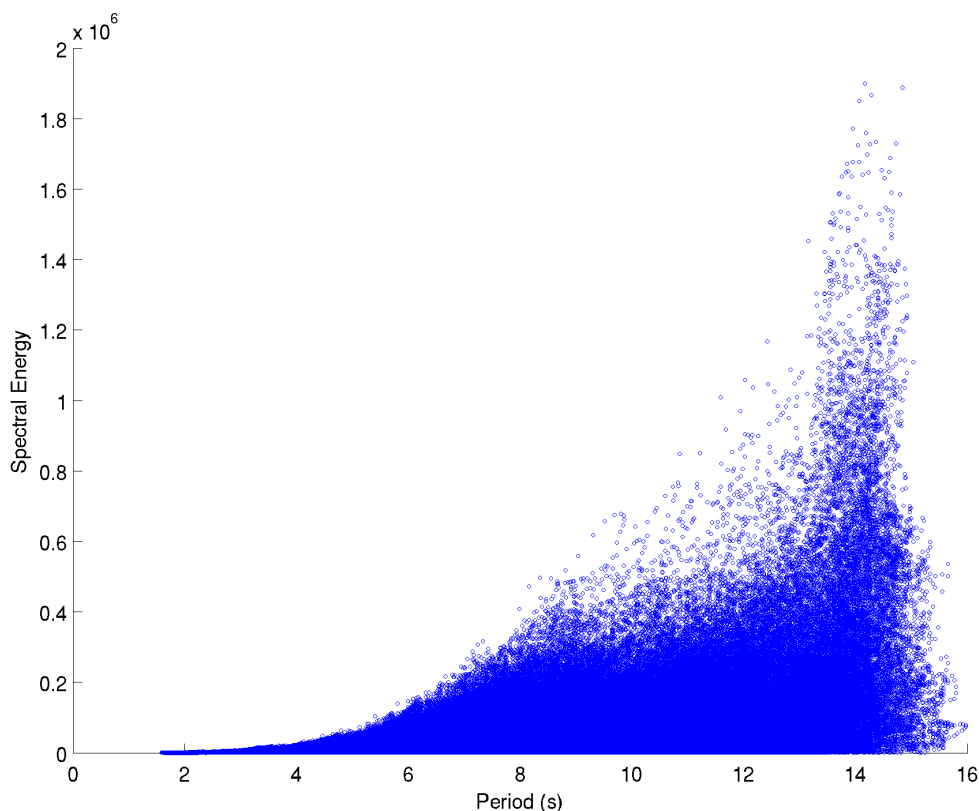
Σχήμα 5.4: Διάγραμμα συσχέτισης bias με το βάθος για βαθιά νερά.

Όπως φαίνεται και στα διαγράμματα 5.2-5.4, ο απλός τύπος μετά το όριο των 40 *m* που είχε τεθεί, υπερεκτιμά την ενέργεια, ενώ για μικρότερα βάθη η συμπεριφορά είναι πιο ισορροπημένη. Συγκεκριμένα, η μέση τιμή σφάλματος για το σύνολο των δεδομένων είναι 16%. Για τα βαθιά νερά η μέση τιμή διαμορφώνεται σε -5%, ενώ για μικρά βάθη 57%.

Στη συνέχεια, επιχειρείται η συσχέτιση της φασματικής ενέργειας με το ύψος κύματος και τη μέση περίοδο. Πρακτικά αναμένεται να επιβεβαιωθεί η εξάρτηση της ενέργειας από το ύψος κύματος και την περίοδο, όπως αυτή παρουσιάζεται στη σχέση 2.28.



Σχήμα 5.5: Διάγραμμα συσχέτισης φασματικής ενέργειας με το σημαντικό ύψος κύματος.



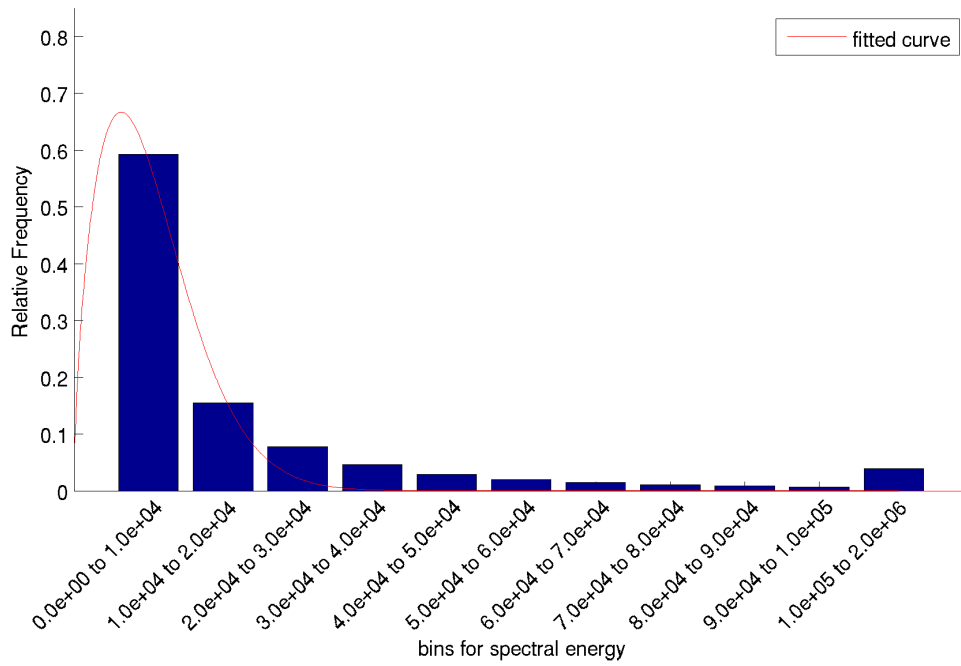
Σχήμα 5.6: Διάγραμμα συσχέτισης φασματικής ενέργειας με τη μέση περίοδο κύματος.

Στο διάγραμμα 5.5, εμφανίζονται τα δεδομένα να ακολουθούν μία καμπύλη τετραγωνικής μορφής, όπως είναι αναμενόμενο. Στη συνέχεια, με τη βοήθεια της μεθόδου ελαχίστων τετραγώνων προκύπτει η καμπύλη που εμφανίζεται με κόκκινο χρώμα στο διάγραμμα 5.5. Η σχέση που περιγράφει την αντίστοιχη καμπύλη είναι η ακόλουθη:

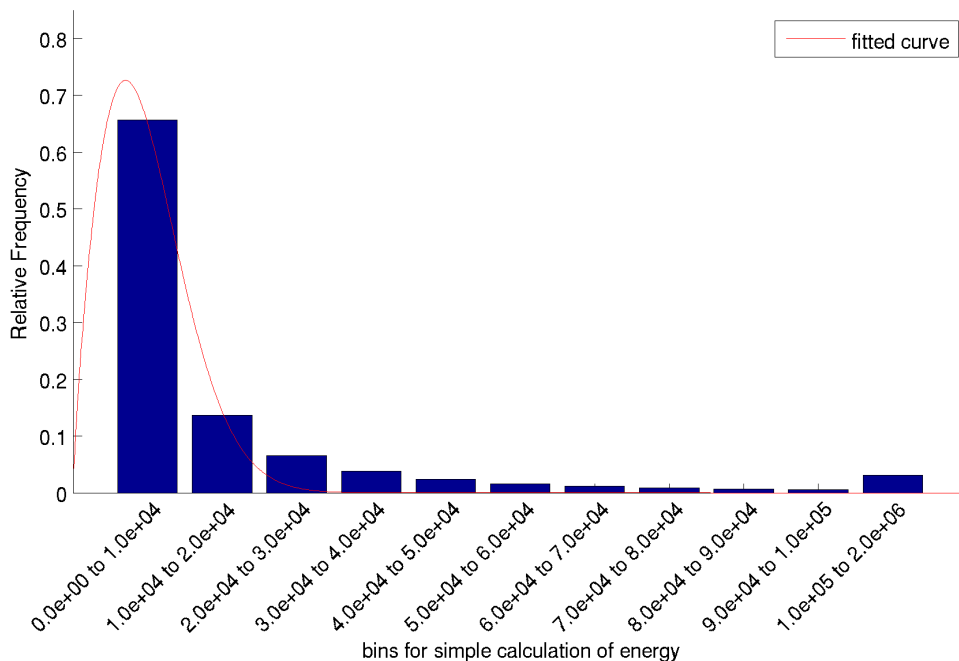
$$Energy_{spec} = A_1 \cdot swh^2 + A_2 \cdot swh + A_3 \quad (5.6)$$

όπου $A_1 = 7000$, $A_2 = -5600$ και $A_3 = 2900$ είναι οι συντελεστές με τους οποίους επιτυγχάνεται η βέλτιστη προσαρμογή. Επιπλέον, στο διάγραμμα της περιόδου 5.6, γίνεται φανερό ότι τα κύματα με μεγάλη περίοδο τείνουν να μεταφέρουν και μεγαλύτερα ποσά ενέργειας.

Με σκοπό να μελετηθεί η συμπεριφορά του μοντέλου ως συνολική απόδοση ενέργειας που προκύπτει από το φάσμα, τα δεδομένα χωρίζονται σε ενεργειακές κλάσεις και δοκιμάζεται η προσαρμογή κατανομών και ο υπολογισμών των αντίστοιχων παραμέτρων τους.



Σχήμα 5.7: Διάγραμμα κλάσεων φασματικής ενέργειας και προσαρμογή της καμπύλης Weibull.



Σχήμα 5.8: Διάγραμμα κλάσεων δεδομένων ενέργειας από προσεγγιστικό τύπο και προσαρμογή της καμπύλης Weibull.

Ο τύπος της κατανομής Weibull είναι ο εξής:

$$y = a \cdot b \cdot x^{b-1} \cdot \exp^{-a \cdot x^b} \quad (5.7)$$

Για τα σχήματα 5.7 και 5.8 υπολογίζονται και συγκρίνονται οι τιμές των παραμέτρων a και b . Ειδικότερα για τις παραμέτρους του σχήματος 5.7 υπολογίστηκε ότι $a = 0.8 \pm 0.2$ και $b = 1.6 \pm 0.3$. Αντίστοιχα, για το σχήμα 5.8 οι παράμετροι είναι $a = 0.83 \pm 0.23$ και $b = 1.8 \pm 0.2$.

Επιπλέον, μελετήθηκε ποια καμπύλη κατανομής προσαρμόζεται καλύτερα στα δεδομένα. Πέρα από την κατανομή Weibull που φαίνεται στα σχήματα 5.7 και 5.8, δοκιμάστηκε η Weibull τριών παραμέτρων καθώς και η Lognormal δύο και τριών παραμέτρων. Οι σχέσεις που δίνουν τις προηγούμενες κατανομές είναι οι ακό-

λουθες:

$$f(x) = \frac{a}{b} \cdot \left(\frac{x-c}{b}\right)^{(a-1)} \cdot \exp\left(-\left(\frac{x-c}{b}\right)^a\right) \quad \text{Weibull 3 param.} \quad (5.8)$$

$$f(x) = \frac{\exp\left(-0.5 \cdot \left(\frac{\log x - \mu}{\sigma}\right)^2\right)}{x \cdot \sigma \cdot \sqrt{2\pi}} \quad \text{Lognormal} \quad (5.9)$$

$$f(x) = \frac{\exp\left(-0.5 \cdot \left(\frac{\log(x-\gamma) - \mu}{\sigma}\right)^2\right)}{(x-\gamma) \cdot \sigma \cdot \sqrt{2\pi}} \quad \text{Lognormal 3 param.} \quad (5.10)$$

Στον πίνακα 5.1 παρουσιάζονται οι στατιστικοί δείκτες που αφορούν την προσαρμογή της κάθε κατανομής.

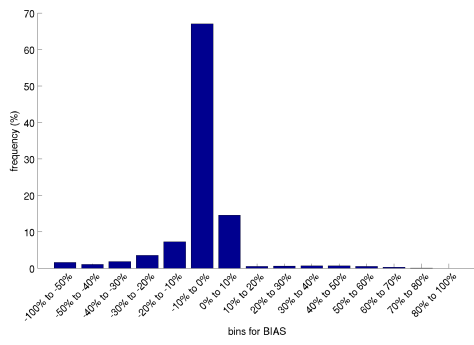
	x^2		R^2		$\text{adj}R^2$		RMSE	
	E_{spec}	E_{simp}	E_{spec}	E_{simp}	E_{spec}	E_{simp}	E_{spec}	E_{simp}
Weibull		$7 \cdot 10^{-4}$		0.98		0.97		0.027
Weibull 3P		$8 \cdot 10^{-5}$		0.99		0.99		0.009
Lognormal		$8 \cdot 10^{-5}$		0.95		0.94		0.009
Lognormal 3P		$6 \cdot 10^{-4}$		0.72		0.59		0.024

Πίνακας 5.1: Πίνακας στατιστικών στοιχείων για την ποιότητα προσαρμογής των κατανομών.

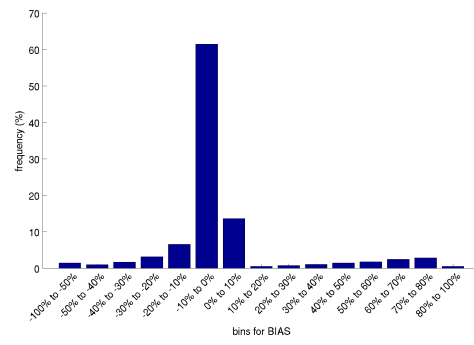
5.2.1 Ανάλυση αποκλίσεων για διαφορετικό κριτήριο βάθους

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, τα σχήματα 5.1 έως και 5.8 έχουν προκύψει λαμβάνοντας υπόψη ως κριτήριο για το βάθος των υδάτων τα 40 m. Με σκοπό να μελετηθεί κατά πόσο η επιλογή του κριτηρίου μπορεί να επηρεάσει τα συμπεράσματα και τα αποτελέσματα, παρατίθενται τα αντίστοιχα διαγράμματα για τιμές του κριτηρίου βάθους από 10 m έως και 70 m σε βήματα των 10 m. Αξίζει να αναφερθεί ότι σε αυτή την ενότητα γίνεται ανάλυση στο σύνολο των δεδομένων, ανεξάρτητα από τη γεωγραφική τους θέση.

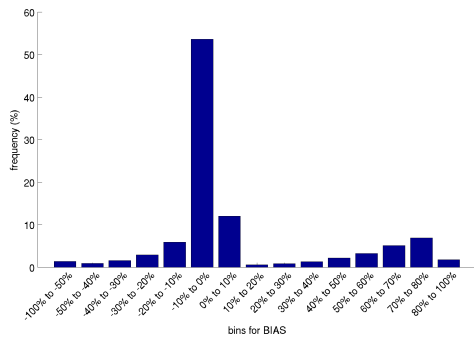
Αν και τα διαγράμματα και τα αποτελέσματα για την προσεγγιστική σχέση δεν επηρεάζονται σε κανένα βαθμό, τα δεδομένα που προκύπτουν από την ολοκλήρωση του φάσματος εμφανίζουν κάποιες αποκλίσεις. Στα διαγράμματα 5.9 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για σύγκριση.



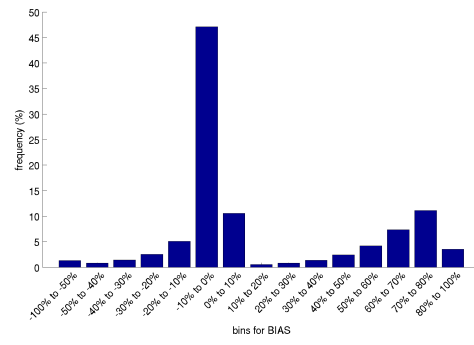
10 m



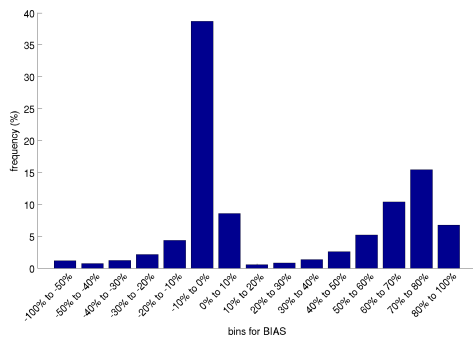
20 m



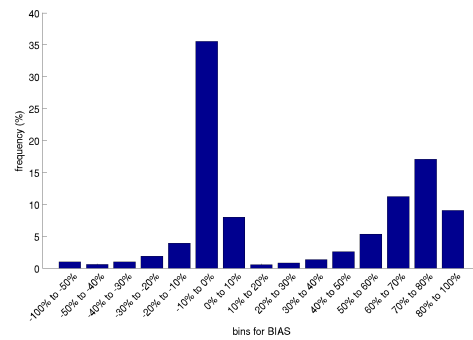
30 m



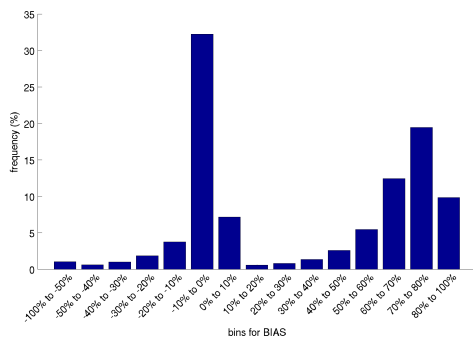
40 m



50 m



60 m



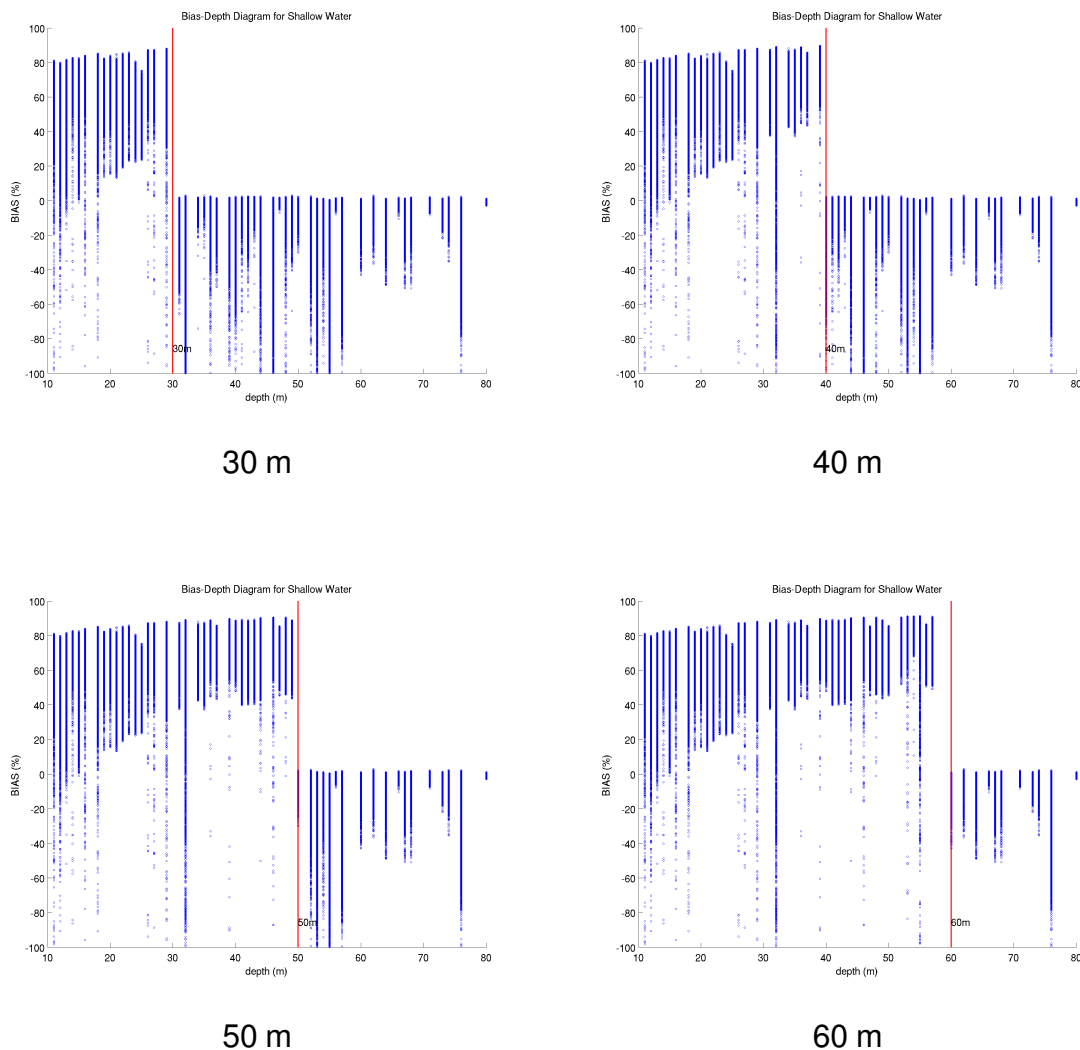
70 m

Σχήμα 5.9: Διαγράμματα σύγκρισης αποτελεσμάτων bias (%) για διαφορετικές επιλογές τιμής κριτηρίου βάθους.

Προφανώς, οι διαφορετική κατανομή του bias οφείλεται στο πλήθος των γεωγραφικών σημείων στα οποία η βαθυμετρία είναι κοντά στο όριο που αλλάζει, με συνέπεια να χρησιμοποιείται στη μία περίπτωση η σχέση για τα αβαθή ύδατα και στην άλλη περίπτωση ο τύπος για τα βαθιά νερά. Μία καλύτερη εικόνα αυτής της συμπεριφοράς δίνεται στα γραφήματα 5.10.

Επιπλέον, στα διαγράμματα 5.9 φαίνεται μία τάση να εμφανιστεί ένα μέγιστο θετικό bias όσο το κριτήριο βάθους παίρνει μεγαλύτερη τιμή. Αυτό το δεύτερο μέγιστο βρίσκεται στην κλάση τιμών 70 – 80%, ενώ το πρωτεύον μέγιστο παρουσιάζεται σταθερά στην κλάση –10 – 0%. Η αιτία αυτής της συμπεριφοράς μπορεί να αποδοθεί και στο γεγονός ότι μία από τις υποθέσεις εξαγωγής και χρήσης του

προσεγγιστικού τύπου υπολογισμού της κυματικής ενέργειας είναι η ύπαρξη βαθύων υδάτων. Συνεπώς, αυξάνοντας το όριο, ολοένα και περισσότερα σημεία θεωρούνται ρηχά νερά και η απόκλιση μεταξύ των δύο μεθόδων γίνεται εντονότερη.

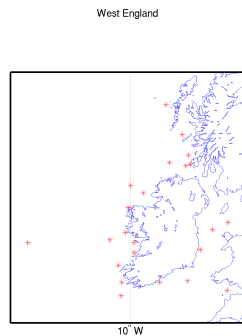


Σχήμα 5.10: Διαγράμματα bias-βάθους, όπου εστιάζονται στο όριο αλλαγής χαρακτηρισμού των υδάτων.

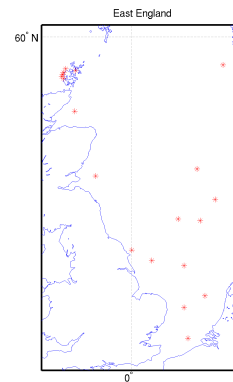
5.3 Ανάλυση ανά περιοχή

Τα αποτελέσματα του μοντέλου χρησιμοποιήθηκαν στη μελέτη των κυματικών χαρακτηριστικών που εμφανίζονται σε συγκεκριμένες περιοχές, όπως είναι οι ανατολικές και δυτικές ακτές της Ισπανίας και της Μεγάλης Βρετανίας, ενώ μελετή-

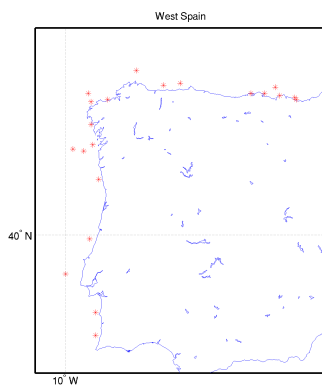
θηκε και η περιοχή του Αιγαίου. Στα διαγράμματα 5.11 παρουσιάζονται οι περιοχές, καθώς και τα γεωγραφικά σημεία από τα οποία προέρχονται τα δεδομένα.



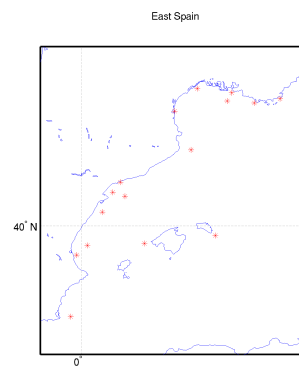
Δυτικές ακτές Μ. Βρετανίας.



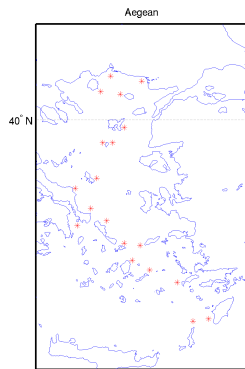
Ανατολικές ακτές Μ. Βρετανίας.



Δυτικές ακτές Ισπανίας.



Ανατολικές ακτές Ισπανίας.

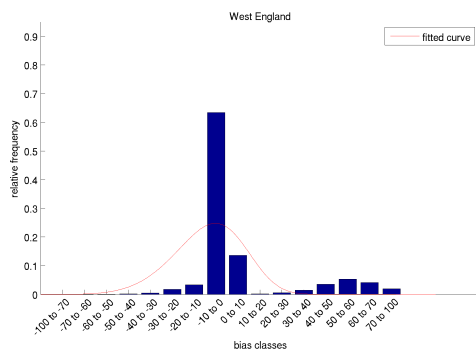


Αιγαίο Πέλαγος.

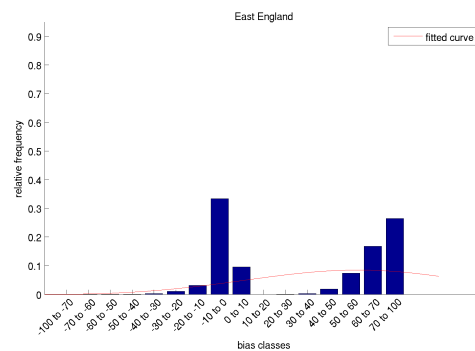
Σχήμα 5.11: Χάρτες περιοχών μελέτης κυματικών χαρακτηριστικών.

Θεωρώντας και πάλι ως κριτήριο χαρακτηρισμού του βάθους των υδάτων τα 40 m , μελετώνται η μέση περίοδος κύματος, το σημαντικό ύψος κύματος, καθώς και η ενεργειακή απόδοση της εκάστοτε περιοχής. Το σύνολο των δεδομένων προέρχεται από τα σημεία που παρουσιάζονται στα γραφήματα 5.11 σε βάθος χρόνου από τον Αύγουστο του 2009 έως και το Δεκέμβριο του 2010.

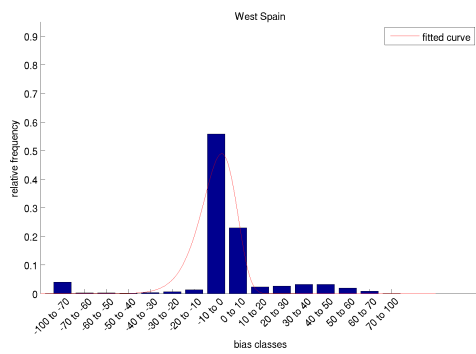
Με σκοπό να μελετηθεί η συμπεριφορά της απλοποιημένης σχέσης υπολογισμού της κυματικής ενέργειας, σε σχέση με το φασματικό τρόπο υπολογισμού, δημιουργήθηκαν τα διαγράμματα κλάσεων 5.12 για τις τιμές του bias ανά περιοχή.



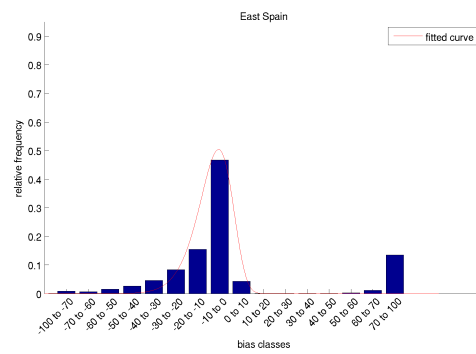
Δυτικές ακτές Μ. Βρετανίας.



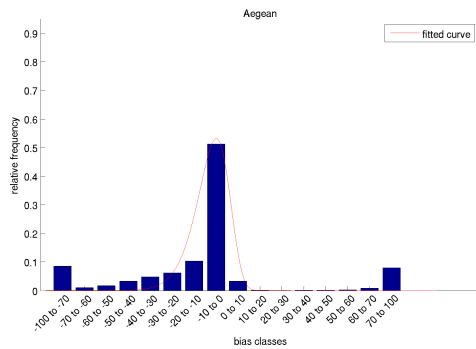
Ανατολικές ακτές Μ. Βρετανίας.



Δυτικές ακτές Ισπανίας.



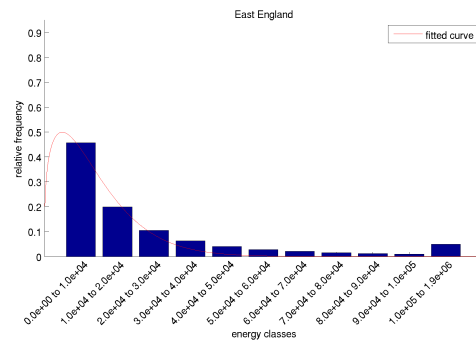
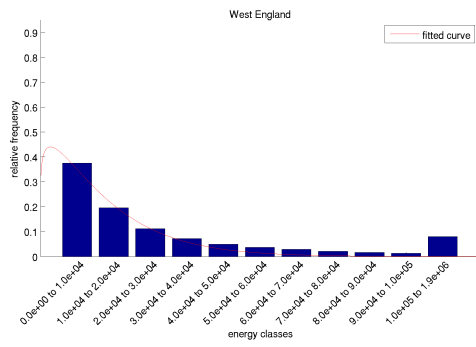
Ανατολικές ακτές Ισπανίας.



Αιγαίο Πέλαγος.

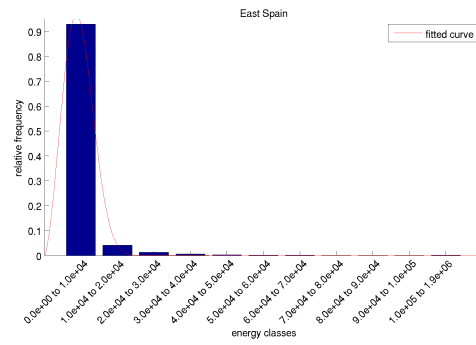
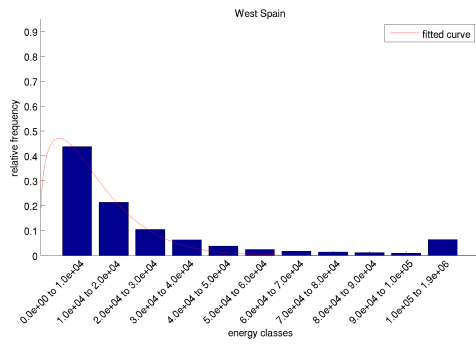
Σχήμα 5.12: Διαγράμματα κατανομής του bias ανά περιοχή μελέτης.

Στα γραφήματα 5.13 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για τη φασματική ενέργεια για κάθε περιοχή μελέτης. Όπως γίνεται φανερό, η κυματική ενέργεια περιοχών που βρίσκονται εντός της Μεσογείου, όπως είναι το Αιγαίο Πέλαγος και οι ανατολικές ακτές της Ισπανίας, είναι περιορισμένη σε σχέση με τα ποσά ενέργειας που παρουσιάζονται στις δυτικές ακτές των περιοχών που βρίσκονται προς τον Ατλαντικό ωκεανό.



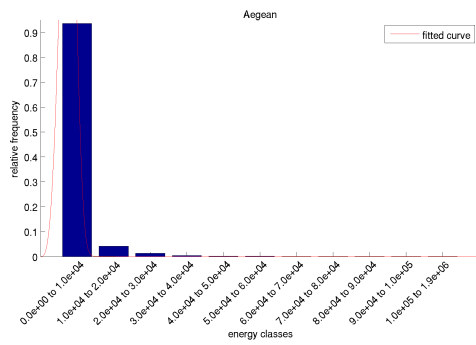
Δυτικές ακτές Μ. Βρετανίας.

Ανατολικές ακτές Μ. Βρετανίας.



Δυτικές ακτές Ισπανίας.

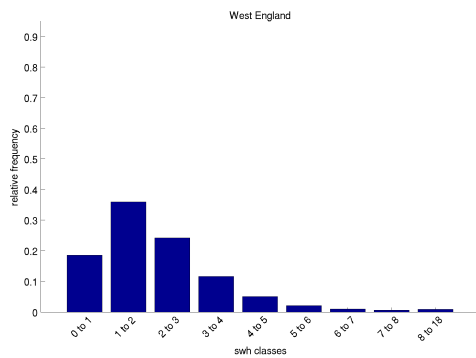
Ανατολικές ακτές Ισπανίας.



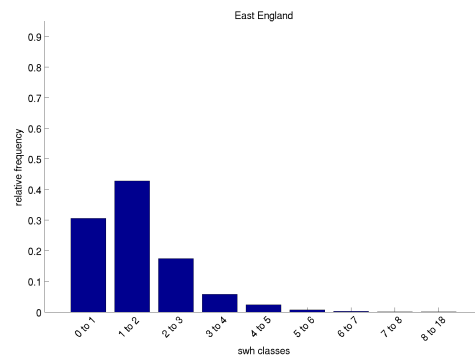
Αιγαίο Πέλαγος.

Σχήμα 5.13: Διαγράμματα κατανομής φασματικής ενέργειας ανά περιοχή μελέτης.

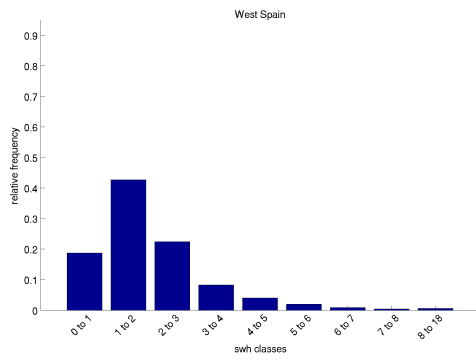
Επιπλέον, παρουσιάζονται οι κατανομές ανά περιοχή για το σημαντικό ύψος κύματος, καθώς και τη μέση κυματική περίοδο στα γραφήματα 5.14 και 5.15, αντίστοιχα.



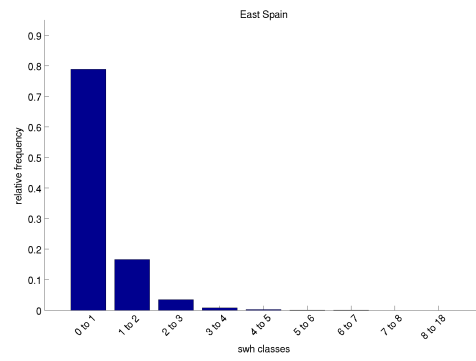
Δυτικές ακτές Μ. Βρετανίας.



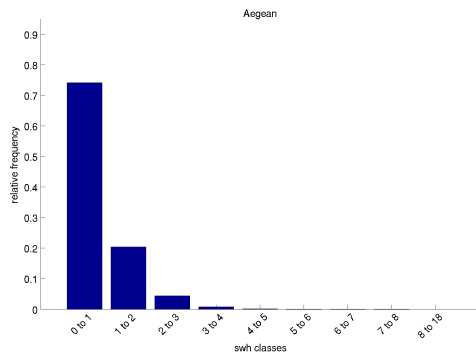
Ανατολικές ακτές Μ. Βρετανίας.



Δυτικές ακτές Ισπανίας.

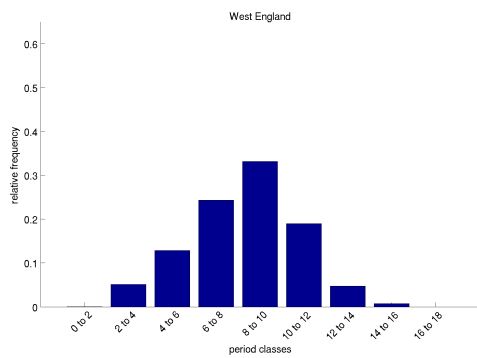


Ανατολικές ακτές Ισπανίας.

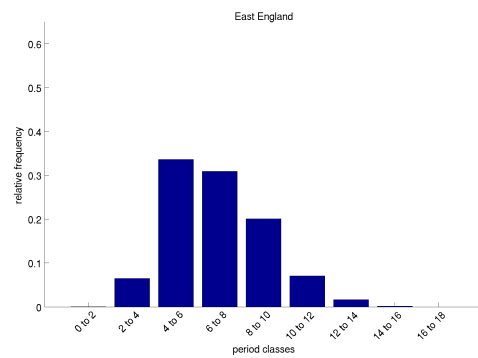


Αιγαίο Πέλαγος.

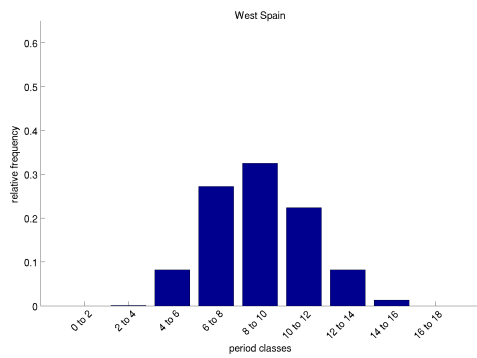
Σχήμα 5.14: Διαγράμματα κατανομής σημαντικού ύψους κύματος ανά περιοχή μελέτης.



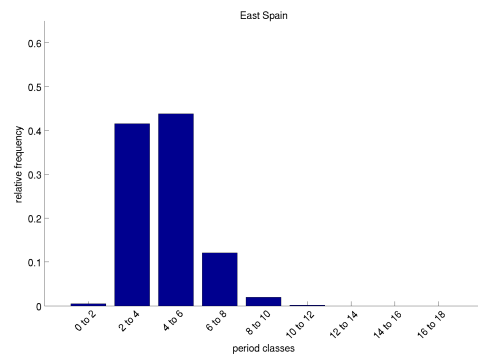
Δυτικές ακτές Μ. Βρετανίας.



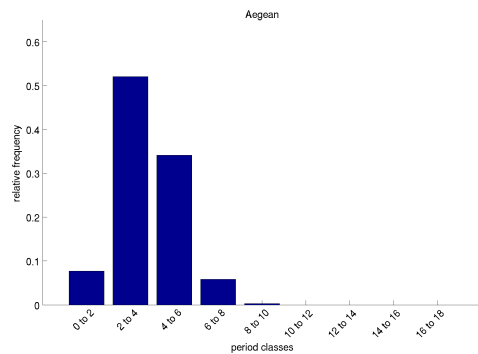
Ανατολικές ακτές Μ. Βρετανίας.



Δυτικές ακτές Ισπανίας.



Ανατολικές ακτές Ισπανίας.



Αιγαίο Πέλαγος.

Σχήμα 5.15: Διαγράμματα κατανομής μέσης περιόδου κύματος ανά περιοχή μελέτης.

Όπως είναι αναμενόμενο, στα διαγράμματα 5.14 το σημαντικό ύψος κύματος για τις περιοχές της Μεσογείου είναι μικρότερο και συγκεκριμένα είναι το πολύ 1 m συνήθως, σε αντίθεση με τις περιοχές του Ατλαντικού, όπου ύψη κύματος μεγαλύτερα από 2 m εμφανίζονται συχνότερα.

Η ίδια εικόνα επικρατεί και για τη μέση περίοδο κύματος, όπου οι περιοχές της Μεσογείου παρουσιάζουν τιμές περιόδου από 2 έως 6 m , ενώ για τον Ατλαντικό οι μέγιστες συχνότητες εμφάνισης αντιστοιχούν σε τιμές μεγαλύτερες από 6 m οι οποίες μπορούν να φτάσουν έως και $10 - 12\text{ m}$.

Κεφάλαιο 6

Τελικά συμπεράσματα-προτάσεις

Η παρούσα μελέτη είχε ως στόχο την παρουσίαση και ανάλυση των μεθόδων υπολογισμού της κυματικής ενέργειας, καθώς και μία αξιολόγηση του μοντέλου προσομοίωσης θαλάσσιου κυματισμού WAM. Οι δύο μέθοδοι που συγκρίθηκαν είναι οι ακόλουθες:

1. Ολοκλήρωση του φάσματος ενέργειας των κυμάτων, λαμβάνοντας υπόψη την παράμετρο του βάθους.
2. Χρήση προσεγγιστικής σχέσης υπολογισμού της μεταφερόμενης ενέργειας, η οποία βασίζεται σε συγκεκριμένες παραδοχές.

Κατά τη διάρκεια της παραπάνω ανάλυσης επιχειρήθηκε και η αξιολόγηση του μοντέλου WAM είτε με τη βοήθεια δορυφορικών παρατηρήσεων είτε με τη μελέτη γεωγραφικών περιοχών με αναμενόμενα κυματικά χαρακτηριστικά. Τα βασικά συμπεράσματα της ανάλυσης που έγινε για την αξιολόγηση του WAM είναι τα ακόλουθα:

- Υπάρχει, γενικά, καλή εκτίμηση των κυματικών παραμέτρων από το μοντέλο με πολύ μικρά στατιστικά σφάλματα.
- Το ύψος κύματος και ειδικότερα οι ακραίες τιμές του, φαίνεται να υπερεκτιμάται στις περιοχές μελέτης σε ποσοστό που μπορεί να αγγίξει το 25% της παρατηρούμενης από το δορυφόρο τιμής. Αυτή η συμπεριφορά μπορεί να εξηγηθεί και από το γεγονός ότι οι δορυφόροι εμφανίζουν εγγενή αδυναμία στην καταγραφή ακραίων τιμών.

- Η μέση περίοδος εκτιμάται με μεγαλύτερη αξιοπιστία, δεδομένου ότι οι αποκλίσεις δεν ξεπερνούν το 10%.
- Από την εποχική ανάλυση, προκύπτει ότι ο χειμώνας είναι η εποχή με τις μεγαλύτερες αποκλίσεις ως προς το ύψος κύματος, ενώ το καλοκαίρι τα σφάλματα ελαχιστοποιούνται.
- Η σύγκριση ενεργειακών φασμάτων τόσο ποιοτικά, όσο και ως προς συχνότητες και διευθύνσεις, φανερώνει την καλή συμφωνία μεταξύ δορυφορικών παρατηρήσεων και φασματικού μοντέλου. Μία υποεκτίμηση των μέγιστων τιμών της υπολογιζόμενης ενέργειας μπορεί να ισοσταθμιστεί από τη μεγαλύτερη διασπορά σε συχνότητες και διευθύνσεις.

Από τη σύγκριση των μεθόδων υπολογισμού της κυματικής ενέργειας, προέκυψαν τα ακόλουθα αποτελέσματα:

- Ο απλουστευμένος τύπος τείνει να υπερεκτιμά τις υπολογιζόμενες τιμές ενέργειας σε ποσοστό 10%.
- Στις περιπτώσεις οι οποίες θεωρούνται βαθιά νερά, η προσεγγιστική τιμή είναι, σχεδόν πάντα, μεγαλύτερη αυτής που προκύπτει φασματικά.
- Σε ρηχά νερά οι αποκλίσεις είναι καλύτερα κατανοητές, παρότι εμφανίζεται μία τάση για υποεκτίμηση της ενέργειας από τον προσεγγιστικό τύπο.
- Επιβεβαιώνεται η εξάρτηση της ενέργειας από το σημαντικό ύψος κύματος με τετραγωνική σχέση.
- Αντίθετα, η εξάρτηση από τη μέση περίοδο, η οποία αναμενόταν γραμμική, εμφανίζεται περισσότερο χαοτική, φανερώνοντας όμως το γεγονός ότι κύματα με μεγάλη περίοδο μεταφέρουν υψηλότερα ποσά ενέργειας.
- Μεταβάλλοντας την τιμή του κριτηρίου βάθους για βαθιά ή αβαθή νερά, επιβεβαιώνεται η τάση για ελαφριά υπερεκτίμηση από τον απλό τύπο της ενέργειας. Από την άλλη πλευρά, αυξάνοντας την κρίσιμη τιμή, αρχίζει να εμφανίζεται ένα δευτερεύον μέγιστο σε αποκλίσεις μεγαλύτερες από 70%. Αυτό

μπορεί να οφείλεται στο πλήθος σημείων με βάθη κοντά στις τιμές του κριτηρίου, τα οποία, κατά τη φασματική ολοκλήρωση, αλλάζουν χαρακτηρισμό, άρα και τύπο ολοκλήρωσης.

- Η ανάλυση ανά περιοχή ακολουθεί τη γενική εικόνα της μικρής υπερεκτίμησης από τον απλό τύπο σε ποσοστά όχι μεγαλύτερα από 10%.
- Οι κατανομές της μέσης περιόδου κύματος σε συγκεκριμένες περιοχές, συμφωνούν με τη θεωρία, η οποία προβλέπει ότι η περίοδος είναι άμεσα εξαρτημένη από το μέγεθος των συστημάτων στα οποία υπόκεινται οι περιοχές. Για παράδειγμα, οι ακτές του Ατλαντικού ωκεανού εμφανίζουν κύματα με μεγαλύτερες περιόδους, σε σχέση με τις ακτές της Μεσογείου, ενώ στην περιοχή του Αιγαίου Πελάγους η περίοδος είναι λίγο μικρότερη.

Ολοκληρώνοντας τη μελέτη, σημειώνονται κάποιες προτάσεις για μελλοντική έρευνα:

- Μελέτη μιας περιοχής με στόχο την εγκατάσταση κατάλληλου τύπου μηχανής εκμετάλλευσης κυματικής ενέργειας, ώστε να ανταποκρίνεται στα χαρακτηριστικά του κύματος που αναπτύσσεται εκεί.
- Βελτίωση του φασματικού μοντέλου, ώστε να λαμβάνονται υπόψη περισσότεροι παράγοντες που επηρεάζουν το κύμα, όπως είναι τα θαλάσσια ρεύματα.
- Χρήση δεδομένων υψηλότερης ανάλυσης για παράκτιες περιοχές.

Βιβλιογραφία

- [1] Ναυσίβιος Χώρα, 2006.
- [2] L. Burroughs M. Reistad-M. Khandekar-L. Holthuijsen J.A. Ewing D.J.T. Carter A.K. Laing, A.K. Magnusson, editor. *Guide to wave analysis and forecasting*. World Meteorological Organization, 1998.
- [3] Helmut Baumert, Georges Chapalain, Hassan Smaoui, Julia P McManus, Hiroshi Yagi, Matthias Regener, Jorgen Sondermann, and Barnabas Szilagyi. Modelling and numerical simulation of turbulence, waves and suspended sediments for pre-operational use in coastal seas. *Coastal Engineering*, 41(1-3):63 – 93, 2000.
- [4] Hans Bernhoff, Elisabeth Sjöstedt, and Mats Leijon. Wave energy resources in sheltered sea areas: A case study of the baltic sea. *Renewable Energy*, 31(13):2164 – 2170, 2006.
- [5] J.-R Bidlot and M.W Holt. Numerical wave modelling at operational weather centres. *Coastal Engineering*, 37(3-4):409 – 429, 1999.
- [6] A.V. Boukhanovsky and C. Guedes Soares. Modelling of multi-peaked directional wave spectra. *Applied Ocean Research*, 31(2):132 – 141, 2009.
- [7] E. Bouws and G.J. Komen. On the balance between growth and dissipation in an extreme depth limited wind-sea in the southern north sea. *Journal of Physical Oceanography*, 13:1653–1658, 1983.
- [8] Jennifer M. Brown, Alejandro J. Souza, and Judith Wolf. An 11-year validation of wave-surge modelling in the irish sea, using a nested polcoms-wam modelling system. *Ocean Modelling*, 33(1-2):118 – 128, 2010.
- [9] Sandro Carniel, John C. Warner, Jacopo Chiggiato, and Mauro Sclavo. Investigating the impact of surface wave breaking on modeling the trajectories of drifters in the northern adriatic sea during a wind-storm event. *Ocean Modelling*, 30(2-3):225 – 239, 2009.

- [10] L. Cavaleri, J.-H.G.M. Alves, F. Ardhuin, A. Babanin, M. Banner, K. Belibassakis, M. Benoit, M. Donelan, J. Groeneweg, T.H.C. Herbers, P. Hwang, P.A.E.M. Janssen, T. Janssen, I.V. Lavrenov, R. Magne, J. Monbaliu, M. Onorato, V. Polnikov, D. Resio, W.E. Rogers, A. Sheremet, J. McKee Smith, H.L. Tolman, G. van Vledder, J. Wolf, and I. Young. Wave modelling - the state of the art. *Progress in Oceanography*, 75(4):603 – 674, 2007.
- [11] L. Cavaleri and M. Sclavo. Characteristics of quadrant and octant advection schemes in wave models. *Coastal Engineering*, 34:221–242, 1998.
- [12] Falcao A. Fiorentino A.-Gardner F.-Hammarlund K. Lemonis G. Lewis T. Nielsen K. Petroncini S. Pontes M.T. Schild P. Sjostrom B.O. Sorensen H.C. Thorpe T. Clement A., McCullen P. Wave energy in europe: current status and perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 6:405–431, 2002.
- [13] Cees de Valk, Ad Reniers, John Atanga, Ascension Vizinho, and Jur Vogelzang. Monitoring surface waves in coastal waters by integrating hf radar measurement and modelling. *Coastal Engineering*, 37(3-4):431 – 453, 1999.
- [14] George Emmanouil, George Galanis, and George Kallos. A new methodology for using buoy measurements in sea wave data assimilation. *Ocean Dynamics*, 60:1205–1218, 2010.
- [15] Xiangbo Feng, Jinhai Zheng, and Yixin Yan. Wave spectra assimilation in typhoon wave modeling for the east china sea. *Coastal Engineering*, 69(0):29 – 41, 2012.
- [16] Christian Ferrarin, Aron Roland, Marco Bajo, Georg Umgiesser, Andrea Cucco, Silvio Davolio, Andrea Buzzi, Piero Malguzzi, and Oxana Drofa. Tide-surge-wave modelling and forecasting in the mediterranean sea with focus on the italian coast. *Ocean Modelling*, 61(0):38 – 48, 2013.
- [17] G. Kallos L. A. Breivik H. Heiberg G. Emmanouil, G. Galanis and M. Reistad. Assimilation of radar altimeter data in numerical wave models: an impact study in two different wave climate regions. *Annales Geophysicae*, 25:581–595, 2007.
- [18] G. Kallos L.A. Breivik H. Heiberg M. Reistad G. Emmanouil, G. Galanis. Assimilation of radar altimeter data in numerical wave models: an impact study in two different wave climate regions. *Annales Geophysicae*, 25:581–595, 2007.
- [19] George Galanis, George Emmanouil, Peter C. Chu, and George Kallos. A new methodology for the extension of the impact of data assimilation on ocean wave prediction. *Ocean Dynamics*, 59:523–535, 2009.

- [20] Hayes D. Nikolaidis A. Georgiou G. Stylianou S. Kallos G. Kalogeri C. Chu P.C. Charalambous A. Savvidou K. Michaelides S. Galanis G., Zodiatis G. Numerical wave modeling and wave energy estimation. In *COMECAP*, 2012.
- [21] Hayes D. Nikolaidis A. Georgiou G. Stylianou S. Kallos G. Kalogeri C. Chu P.C. Charalampous A. Savvidou K. Michaelides S. Galanis G., Zodiatis G. ΤΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ e-wave: ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΟΥ ΘΑΛΑΣΣΙΟΥ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟΥ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΗΣ ΚΥΠΡΟΥ. In *10ο ΠΑΝΕΛΛΗΝΙΟ ΣΥΜΠΟΣΙΟ ΩΚΕΑΝΟΓΡΑΦΙΑΣ & ΑΛΙΕΙΑΣ*, 2012.
- [22] George Kallos George Emmanouil, George Galanis. Combination of statistical kalman filters and data assimilation for improving ocean waves analysis and forecasting. Revised for publication 2012.
- [23] George Zodiatis Peter C. Chu Yu-Heng Kuo George Kallos George Galanis, Dan Hayes. Wave height characteristics in the mediterranean sea by means of numerical modeling, satellite data, statistical and geometrical techniques. *Mar Geophys Res*, 33:1–15, 2012.
- [24] Peter C. Chu Yu-Heng Kuo-C.T.J. Dodson George Galanis, G. Kallos. Wave height characteristics in the north atlantic ocean: a new approach based on statistical and geometrical techniques. *Stoch Environ Res Risk Assess*, 26:83–103, 2012.
- [25] L.J. Hamilton. Characterising spectral sea wave conditions with statistical clustering of actual spectra. *Applied Ocean Research*, 32(3):332 – 342, 2010.
- [26] Hasselmann K. Hasselmann, S. Computations and parameterizations of the nonlinear energy transfer in a gravity-wave spectrum, part 1: A new method for efficient computations of the exact nonlinear transfer integral. *Journal of Physical Oceanography*, 15:1369–1377, 1985.
- [27] K. Hasselmann. Weak-interaction theory of ocean waves. In Maurice Holt, editor, *Basic Developments in Fluid Dynamics*, pages 117 – 182. Academic Press, 1968.
- [28] Sverre Haver. Effects of wave directionality and choice of wave spectrum on the extreme response of a deep water jacket. *Marine Structures*, 4(6):503 – 531, 1991.
- [29] Patrick Heimbach and Klaus Hasselmann. Chapter 2 development and application of satellite retrievals of ocean wave spectra. In David Halpern, editor, *Satellites, oceanography and society*, volume 63 of *Elsevier Oceanography Series*, pages 5 – 33. Elsevier, 2000.

- [30] Agnieszka Herman, Ralf Kaiser, and Hanz D. Niemeyer. Wind-wave variability in a shallow tidal sea-spectral modelling combined with neural network methods. *Coastal Engineering*, 56(7):759 – 772, 2009.
- [31] H. Hersbach and S. Abdalla. The global validation of ers wind and wave products at ecmwf. In *Envisat & ERS Symposium*, 2004.
- [32] H. Hersbach and P. Janssen. Improvement of the short fetch behavior in the wam model. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 16:884–892, 1999.
- [33] Leo H. Holthuijsen. *Waves in oceanic and coastal waters*. Cambridge University Press, 2007.
- [34] P. Izquierdo and C. Guedes Soares. Analysis of sea waves and wind from x-band radar. *Ocean Engineering*, 32(11–12):1404 – 1419, 2005.
- [35] Peter A. E. M. Janssen. Wave-induced stress and the drag of air flow over sea waves. *J. Phys. Oceanogr.*, 19:745–754, 1989.
- [36] Anette Jonsson, Barry Broman, and Lars Rahm. Variations in the baltic sea wave fields. *Ocean Engineering*, 30(1):107 – 126, 2003.
- [37] S.A. Kitagorodskii. Israel program of scientific transaction. 1973.
- [38] Jian-Guo Li and Andrew Saulter. Assessment of the updated envisat asar ocean surface wave spectra with buoy and altimeter data. *Remote Sensing of Environment*, 126(0):72 – 83, 2012.
- [39] M.S. Longuet-Higgins. On the statistical distribution of the wave heights of sea waves. *Jour. Marine Res.*, 11:245–266, 1952.
- [40] M.E. McCormick and D.R.B. Kraemer. Wave energy. In Editor in Chief: John H. Steele, editor, *Encyclopedia of Ocean Sciences*, pages 3187 – 3191. Academic Press, Oxford, 2001.
- [41] Michael E. McCormick. A modified linear analysis of a wave-energy conversion buoy. *Ocean Engineering*, 3(3):133 – 144, 1976.
- [42] Jaak Monbaliu, Roberto Padilla-Hernández, Julia C Hargreaves, Juan Carlos Carretero Albiach, Weimin Luo, Mauro Sclavo, and Heinz Günther. The spectral wave model, wam, adapted for applications with high spatial resolution. *Coastal Engineering*, 41(1–3):41 – 62, 2000.
- [43] Rodolfo Piscopia, Andrea Panizzo, and Paolo De Girolamo. An efficient method to identify cross-sea states from wave measurements. *Coastal Engineering*, 51(10):941 – 965, 2004.

- [44] G. Rodriguez and C. Guedes Soares. A criterion for the automatic identification of multimodal sea wave spectra. *Applied Ocean Research*, 21(6):329 – 333, 1999.
- [45] Christoph Schneggenburger, Heinz Gunther, and Wolfgang Rosenthal. Spectral wave modelling with non-linear dissipation: validation and applications in a coastal tidal environment. *Coastal Engineering*, 41(1-3):201 – 235, 2000.
- [46] R. L. Snyder, F. W. Dobson, J. A. Elliott, and R. B. Long. Array measurements of atmospheric pressure fluctuations above surface gravity waves. *Journal of Fluid Mechanics*, 102:1–59, 0 1981.
- [47] C. Guedes Soares. Representation of double-peaked sea wave spectra. *Ocean Engineering*, 11(2):185 – 207, 1984.
- [48] T. W. Thorpe. An overview of wave energy technologies: Status, performance and costs. *Wave Power: Moving towards Commercial Viability*, 1999.
- [49] H. Tolman. Effects of numerics on the physics in a third-generation wind-wave model. *Journal of Physical Oceanography*, 22:1095–1111, 1992.
- [50] Hendrik L. Tolman and Jose-Henrique G.M. Alves. Numerical modeling of wind waves generated by tropical cyclones using moving grids. *Ocean Modelling*, 9(4):305 – 323, 2005.
- [51] Hendrik L. Tolman, Vladimir M. Krasnopolsky, and Dmitry V. Chalikov. Neural network approximations for nonlinear interactions in wind wave spectra: direct mapping for wind seas in deep water. *Ocean Modelling*, 8(3):253 – 278, 2005.
- [52] Kathrin Wahle, Heinz Gunther, and Helmut Schiller. Neural network parameterisation of the mapping of wave spectra onto nonlinear four-wave interactions. *Ocean Modelling*, 30(1):48 – 55, 2009.
- [53] Ακριβή Καπερώνη. Το Πρόβλημα της Πρόγνωσης Παραγωγής Αιολικής Ενέργειας και Τρόποι Αντιμετώπισής του. Master's thesis, ΕΚΠΑ, Τμήμα Φυσικής, Τομέας Φυσικής Περιβάλλοντος-Μετεωρολογίας, 2011.
- [54] Χρήστος-Μάριος Σταθόπουλος. ΝΕΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΠΡΟΓΝΩΣΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΑΙΟΛΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ. Master's thesis, ΕΚΠΑ, Τμήμα Φυσικής, Τομέας Φυσικής Περιβάλλοντος-Μετεωρολογίας, 2011.