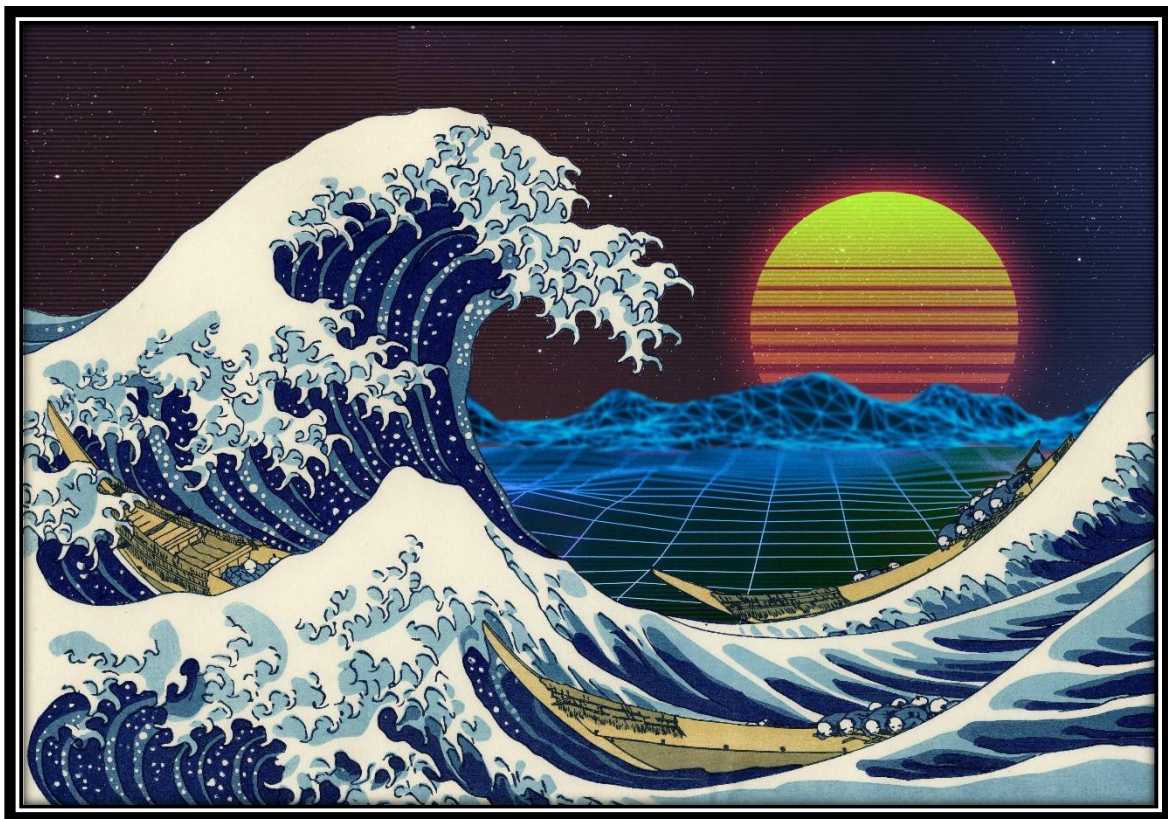




ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ ΚΑΙ
ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

**ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΑΝΕΜΟΓΕΝΩΝ ΚΥΜΑΤΙΣΜΩΝ
ΚΑΙ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΕΣ ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ**



ΑΧΙΛΛΕΑΣ ΣΤΑΜΑΤΙΑΔΗΣ

ΑΘΗΝΑ ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2019

ΕΠΙΒΛΕΠΟΥΣΑ: Βασιλική Γσουκαλά, Αναπληρώτρια Καθηγήτρια ΕΜΠ
ΣΥΝΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: Μιχάλης Χονδρός, Διδάσκων (Π.Δ. 407) ΕΜΠ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Από τα μέσα του 20ού αιώνα, για τον υπολογισμό των χαρακτηριστικών μεγεθών ενός ανεμογενούς κυματικού κλίματος στις ακτομηχανικές μελέτες χρησιμοποιούνται, ως επί το πλείστον, μαθηματικές εξισώσεις εμπειρικών μεθόδων, οι οποίες έχουν διατυπωθεί σε διαφορετικές μορφές από διάφορους ερευνητές ανά την εξέλιξη της επιστήμης της Ακτομηχανικής. Από τις αρχές του 21ου αιώνα, με την συμβολή της τεχνολογίας και της υπολογιστικής ισχύος, έχουν αναπτυχθεί αριθμητικά μοντέλα, τα οποία προσομοιώνουν περισσότερες και πολυπλοκότερες φυσικές διαδικασίες για την επίτευξη του ίδιου σκοπού.

Στην παρούσα Διπλωματική Εργασία (ΔΕ) γίνεται μια ερευνητική προσπάθεια χωρισμένη σε τρεις συνιστώσες. Πρώτον, αυτή της ανάδειξης των ιδιαιτεροτήτων των εμπειρικών μεθόδων που χρησιμοποιούνται. Δεύτερον, της επισήμανσης της ορθής εφαρμογής από τους μελετητές, καθώς μέχρι και σήμερα παρατηρούνται λανθασμένες προσεγγίσεις. Τρίτον, της αξιολόγησης των αποτελεσμάτων που αποδίδουν οι μαθηματικές εξισώσεις, κάνοντας συγκρίσεις με τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την αριθμητική προσομοίωση του μοντέλου MIKE21|sw.

Μέσω αυτών των συγκρίσεων, γεννιούνται δυναμικές σχέσεις αξιοπιστίας των μεθόδων ως προς το μοντέλο προσομοίωσης και δίνονται κατευθύνσεις σχετικά με την καταλληλότητα των μεθόδων σε τρία διακριτά πεδία. Εξετάζεται ο Λιμένας Πατρών, ως χαρακτηριστικό πεδίο περιορισμένου-στενού αναπτύγματος πελάγους, ο Λιμένας Ερμούπολης, ως χαρακτηριστικό πεδίο περιορισμένου-ευρέος αναπτύγματος πελάγους και η Χρυσή Λασιθίου, ως χαρακτηριστικό πεδίο ανοιχτής θάλασσας προς το Λιβυκό πέλαγος.

Τα συμπεράσματα που εξάγονται λειτουργούν ως κατευθυντήριες προτάσεις προς τον αναγνώστη, στα πλαίσια της χρήσης της καταλληλότερης μεθόδου ανά πιθανό γεωμετρικό πεδίο, με βάση την αξιοπιστία που προκύπτει από την σύγκριση με το μοντέλο προσομοίωσης. Συγκεκριμένα, για περιορισμένο-στενό ανάπτυγμα πελάγους προκρίνεται η μέθοδος CERC, για περιορισμένο-ευρύ ανάπτυγμα πελάγους προκρίνεται η μέθοδος Donelan και για ανάπτυγμα πελάγους ανοιχτής θάλασσας προκρίνεται η μέθοδος CEM.

ABSTRACT

From the middle of the 20th century, mathematical equations of empirical methods have been used to calculate the significant values of a wind generated wave climate in Coastal Studies. Such methods have been expressed in a variety of forms by different researchers in the evolution of Coastal Engineering. Since the beginning of the 21st century, with the contribution of technology and computational power, numerical models have been developed that simulate larger and more complex natural procedures to achieve the same goal.

In this research, the scientific effort is divided into three components. Firstly, that of highlighting the unique features of each of the empirical methods used. Secondly, the specification of the proper application of the methods by engineers, as inaccurate approaches seem common, to the present point. Third of all, assessing the results of mathematical equations, through comparing with the results obtained from the numerical simulation of the MIKE21|sw model.

The resulting of these comparisons is the occurrence of dynamic correlations between the methods and the simulation model, in terms of reliability, and the identification on the suitability of the methods in three distinct area models. The Port of Patras, as a typical example of an area with Restricted-Narrow Fetch development, the Port of Hermoupolis, as a typical example of an area with a Restricted-Wide Fetch development and the Chryssi Island of Lasithi, as a typical example of an area with an open field towards the Libyan Sea.

The conclusions emerged from the research serve as guidance to the reader, in the context of using the most appropriate method per possible geometric field scenario, based on the reliability derived from the comparison with the simulation model. To be more specific, CERC method provides satisfactory results for Restricted-Narrow Fetch, Donelan method provides satisfactory results for Restricted-Wide Fetch and CEM method provides satisfactory results for Open Sea Fetch.

Τίτλος Διπλωματικής Εργασίας: ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΑΝΕΜΟΓΕΝΩΝ ΚΥΜΑΤΙΣΜΩΝ ΚΑΙ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΕΣ ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ

Title of Thesis: NUMERICAL MODELLING OF WIND WAVES AND COMPARISON WITH MATHEMATICAL EQUATIONS

Λέξεις κλειδιά: Ανάπτυγμα Πελάγους, Κυματικά Μοντέλα, Κυματικό Κλίμα, Ανεμογενές Κύμα

Key words: Fetch, Wave Models, Wave Climate, Wind Wave

Όνομα Σπουδαστή: Αχιλλέας Σταματιάδης

Επιβλέπουσα: Βασιλική Τσουκαλά, Αν. Καθηγήτρια ΕΜΠ

Συνεπιβλέπων: Μιχάλης Χονδρός, Διδάσκων (Π.Δ. 407) ΕΜΠ

«Πάθος, Δύναμη και Πειθαρχία»

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	2
ABSTRACT	3
1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	12
1.1 Γενική Ανασκόπηση	12
1.2 Στόχοι.....	12
1.3 Μεθοδολογία	12
1.4 Δομή Διπλωματικής Εργασίας	13
1.5 Ευχαριστίες.....	13
2 ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ ΚΑΙ ΑΝΕΜΟΓΕΝΕΣ ΚΥΜΑΤΙΚΟ ΚΛΙΜΑ.....	14
2.1 Εισαγωγή.....	14
2.2 Ανάλυση στην περιοχή του χρόνου	16
2.3 Ανάλυση στην περιοχή των συχνοτήτων	18
2.3.1 Τύποι φασμάτων.....	21
2.3.2 Κατευθυντικά φάσματα	25
2.4 Ανάλυση Fourier.....	27
2.5 Κρίσιμα μεγέθη απλοποιημένων μεθόδων περιγραφής του κυματικού κλίματος.....	30
3 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΔΙΦΗΣΗ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ ΕΞΙΣΩΣΕΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΚΥΜΑΤΙΚΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΣΤΑ ΒΑΘΙΑ ΝΕΡΑ.....	32
3.1 Εισαγωγή.....	32
3.2 Μέθοδος SMB (1958).....	33
3.3 Μέθοδος Wilson (1966).....	37
3.4 Μέθοδος JONSWAP (1976)	39
3.5 Μέθοδος CERC (1984).....	42
3.6 Μέθοδος Donelan (1985)	43
3.7 Μέθοδος ACES (1992)	46
3.8 Μέθοδος CEM (2002).....	49
4 ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ ΜΟΝΤΕΛΟΥ MIKE21_{sw} ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΚΥΜΑΤΟΓΕΝΕΣΗΣ	51
4.1 Εισαγωγή.....	51
4.2 Γενικά στοιχεία του μοντέλου	51
4.3 Θεωρητικές εξισώσεις του μοντέλου.....	52
4.4 Βασικές παράμετροι εισόδου	54
4.5 Γενικά χαρακτηριστικά εφαρμογής του μοντέλου	55

5 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ ΕΞΙΣΩΣΕΩΝ ΚΑΙ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ MIKE21 sw	57
5.1 Εισαγωγή.....	57
5.2 Λανθασμένες προσεγγίσεις	57
5.3 Μεθοδολογία που ακολουθούμε και παραδοχές	59
5.3.1 Περιοχή Λιμένα Πατρών.....	60
5.3.2 Περιοχή Λιμένα Ερμούπολης.....	63
5.3.3 Περιοχή Χρυσής Λασιθίου.....	66
5.4 Εφαρμογή μαθηματικών εξισώσεων	69
5.4.1 Περιοχή Λιμένα Πατρών.....	70
5.4.2 Περιοχή Λιμένα Ερμούπολης.....	76
5.4.3 Περιοχή Χρυσής Λασιθίου.....	82
5.5 Εφαρμογή MIKE21 sw	88
5.5.1 Περιοχή Λιμένα Πατρών.....	89
5.5.2 Περιοχή Λιμένα Ερμούπολης.....	96
5.5.3 Περιοχή Χρυσής Λασιθίου.....	103
5.6 Σύγκριση εξισώσεων και μοντέλου MIKE21 sw	110
5.6.1 Περιοχή Λιμένα Πατρών.....	111
5.6.2 Περιοχή Λιμένα Ερμούπολης.....	112
5.6.3 Περιοχή Χρυσής Λασιθίου.....	114
6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	115
6.1 Σύνοψη Αποτελεσμάτων.....	115
6.1.1 Περιοχή Λιμένα Πατρών.....	116
6.1.2 Περιοχή Λιμένα Ερμούπολης.....	118
6.1.3 Περιοχή Χρυσής Λασιθίου.....	120
6.1.4 Ανάλυση σύνοψης αποτελεσμάτων	122
6.2 Συνολικά Συμπεράσματα	123
6.3 Περαιτέρω Έρευνα.....	124
7 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	125
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ	126
Παράρτημα 1. Νομογράφημα Bretschneider σε διαφορετική διάταξη (Bretschneider, 1964).....	126
Παράρτημα 2. Νομογράφημα JONSWAP κατά το Shore Protection Manual (1984).....	127
Παράρτημα 3. Πλατφόρμα βάσης δεδομένων του Ευρωπαϊκού Προγράμματος Copernicus	128
Παράρτημα 4. Πλατφόρμα βάσης δεδομένων του ΕΛ.ΚΕ.Θ.Ε. (Σύστημα Ποσειδών).....	129

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1.1 Διάγραμμα ροής σταδίων Διπλωματικής Εργασίας.....	12
Εικόνα 2.1 Φωτογραφικό στιγμιότυπο θαλάσσιας διαταραχής.....	14
Εικόνα 2.2 Εργαστηριακές μετρήσεις ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας με την πάροδο του χρόνου.	14
Εικόνα 3.1 Περιοχή διεξαγωγής πειράματος JONSWAP. (Carter, 1982)	39
Εικόνα 5.1 Αεροφωτογραφία Πατραϊκού κόλπου.....	60
Εικόνα 5.2 Στιγμιότυπο Πατραϊκού κόλπου από το Google Earth.....	61
Εικόνα 5.3 Πατραϊκός κόλπος από δορυφορική λήψη. Φαίνεται η λιμνοθάλασσα του Μεσολογγίου και το ακρωτήρι του Αράξου.....	62
Εικόνα 5.4 Φωτογραφία του λιμένα της Ερμούπολης, τραβηγμένη από την Άνω Σύρο.	63
Εικόνα 5.5 Στιγμιότυπο Αιγαίου πελάγους από το Google Earth.	64
Εικόνα 5.6 Η Σύρος από δορυφορική λήψη. Βόρεια φαίνεται η Τήνος και ανατολικά η Μύκονος. .	65
Εικόνα 5.7 Αεροφωτογραφία Χρυσής Λασιθίου.....	66
Εικόνα 5.8 Στιγμιότυπο Λιβυκού πελάγους από το Google Earth.	67
Εικόνα 5.9 Η Χρυσή από δορυφορική λήψη. Απέναντί της βρίσκεται το λιμάνι της Ιεράπετρας.	68
Εικόνα 5.10 Στιγμιότυπο ηλεκτρονικού διαγράμματος πλοήγησης Navionics του Πατραϊκού κόλπου.	89
Εικόνα 5.11 Απόδοση συλλογής στιγμιότυπων σε σχεδιαστικό πρόγραμμα CAD (μορφή ψηφιδωτού) στον Πατραϊκό κόλπο.	89
Εικόνα 5.12 Τελικό αποτέλεσμα χάραξης των ακτογραμμών του Πατραϊκού κόλπου.....	90
Εικόνα 5.13 Τελικό αποτέλεσμα χάραξης της βυθομετρίας του Πατραϊκού κόλπου.	90
Εικόνα 5.14 Αρχική μορφή ψηφιοποίησης της βυθομετρίας του Πατραϊκού κόλπου.	91
Εικόνα 5.15 Τελική μορφή ψηφιοποίησης της βυθομετρίας του Πατραϊκού κόλπου.....	91
Εικόνα 5.16 Εκκίνηση προσομοίωσης για τον Πατραϊκό κόλπο σε συνθήκες ηρεμίας.....	93
Εικόνα 5.17 Κυματικό κλίμα στον Πατραϊκό κόλπο με σημείο ενδιαφέροντος την περιοχή του λιμένα της Πάτρας για δυτικό άνεμο στα 10 Beaufort διάρκειας 1 ώρας.....	93
Εικόνα 5.18 Κυματικό κλίμα στον Πατραϊκό κόλπο με σημείο ενδιαφέροντος την περιοχή του λιμένα της Πάτρας για δυτικό άνεμο στα 10 Beaufort διάρκειας 3 ωρών.	94
Εικόνα 5.19 Κυματικό κλίμα στον Πατραϊκό κόλπο με σημείο ενδιαφέροντος την περιοχή του λιμένα της Πάτρας για δυτικό άνεμο στα 10 Beaufort διάρκειας 20 ωρών.	94
Εικόνα 5.20 Στιγμιότυπο ηλεκτρονικού διαγράμματος πλοήγησης Navionics του Αιγαίου πελάγους.	96
Εικόνα 5.21 Απόδοση συλλογής στιγμιότυπων σε σχεδιαστικό πρόγραμμα CAD (μορφή ψηφιδωτού) στο Αιγαίο πέλαγος.....	96
Εικόνα 5.22 Τελικό αποτέλεσμα χάραξης των ακτογραμμών του Αιγαίου πελάγους.	97
Εικόνα 5.23 Τελικό αποτέλεσμα χάραξης της βυθομετρίας του Αιγαίου πελάγους.	97
Εικόνα 5.24 Αρχική μορφή ψηφιοποίησης της βυθομετρίας του Αιγαίου πελάγους.....	98
Εικόνα 5.25 Τελική μορφή ψηφιοποίησης της βυθομετρίας του Αιγαίου πελάγους.	98
Εικόνα 5.26 Εκκίνηση προσομοίωσης για την Ερμούπολη Σύρου σε συνθήκες ηρεμίας.....	100
Εικόνα 5.27 Κυματικό κλίμα στο Αιγαίο πέλαγος με σημείο ενδιαφέροντος την περιοχή του λιμένα της Ερμούπολης για ανατολικό άνεμο στα 6 Beaufort διάρκειας 5 ωρών.....	100

Εικόνα 5.28 Κυματικό κλίμα στο Αιγαίο πέλαγος με σημείο ενδιαφέροντος την περιοχή του λιμένα της Ερμούπολης για ανατολικό άνεμο στα 6 Beaufort διάρκειας 12 ωρών.....	101
Εικόνα 5.29 Κυματικό κλίμα στο Αιγαίο πέλαγος με σημείο ενδιαφέροντος την περιοχή του λιμένα της Ερμούπολης για ανατολικό άνεμο στα 6 Beaufort διάρκειας 20 ωρών.....	101
Εικόνα 5.30 Στιγμιότυπο ηλεκτρονικού διαγράμματος πλοήγησης Navionics του Λιβυκού πελάγους.	103
Εικόνα 5.31 Απόδοση συλλογής στιγμιότυπων σε σχεδιαστικό πρόγραμμα CAD (μορφή ψηφιδωτού) στο Λιβυκό πέλαγος.	103
Εικόνα 5.32 Τελικό αποτέλεσμα χάραξης ακτογραμμών του Λιβυκού πελάγους.	104
Εικόνα 5.33 Τελικό αποτέλεσμα χάραξης της βυθομετρίας του Λιβυκού πελάγους.	104
Εικόνα 5.34 Αρχική μορφή ψηφιοποίησης της βυθομετρίας του Λιβυκού πελάγους.....	105
Εικόνα 5.35 Τελική μορφή ψηφιοποίησης της βυθομετρίας του Λιβυκού πελάγους.	105
Εικόνα 5.36 Εκκίνηση προσομοίωσης για τη Χρυσή Λασιθίου σε συνθήκες ηρεμίας.	107
Εικόνα 5.37 Κυματικό κλίμα στο Λιβυκό πέλαγος με σημείο ενδιαφέροντος την περιοχή της Χρυσής Λασιθίου για νότιο άνεμο στα 8 Beaufort διάρκειας 6 ωρών και 40 λεπτών.	107
Εικόνα 5.38 Κυματικό κλίμα στο Λιβυκό πέλαγος με σημείο ενδιαφέροντος την περιοχή της Χρυσής Λασιθίου για νότιο άνεμο στα 8 Beaufort διάρκειας 15 ωρών.	108
Εικόνα 5.39 Κυματικό κλίμα στο Λιβυκό πέλαγος με σημείο ενδιαφέροντος την περιοχή της Χρυσής Λασιθίου για νότιο άνεμο στα 8 Beaufort διάρκειας 40 ωρών.	108
Εικόνα 5.40 Στιγμιότυπο της προσομοίωσης κυματογένεσης στην περιοχή του Λιμένα Ερμούπολης.	113

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 2.1 Χαρακτηριστικό σχέδιο χρονικής εξέλιξης τυχαίου κυματισμού. (Ochi, 1973).....	16
Σχήμα 2.2 Κανονική κατανομή (Gauss) που ακολουθεί η ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας. (CEM, 2008)	17
Σχήμα 2.3 Κατανομή Rayleigh που ακολουθεί το ύψος κύματος και αθροιστική κατανομή. (CEM, 2008)	17
Σχήμα 2.4 Προσομοίωση τυχαίων κυματισμών με επαλληλία ημιτονοειδών. (Goda, 1985).....	19
Σχήμα 2.5 Καταγραφή χρονοσειράς ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας. (Goda, 1985).....	19
Σχήμα 2.6 Φασματική αναπαράσταση υπερτιθέμενων κυματισμών. (Goda, 1985)	19
Σχήμα 2.7 Παράδειγμα φάσματος θαλάσσιων κυματισμών. (Goda, 1985).....	20
Σχήμα 2.8 Σύγκριση φασμάτων PM και JONSWAP. (Chakrabarti, 1987)	22
Σχήμα 2.9 Σχηματική απεικόνιση δυσδιάστατου φάσματος. (CEM, 2008)	25
Σχήμα 2.10 Τυχαία περιοδική συνάρτηση περιόδου T. (Newland, 1984).....	27
Σχήμα 2.11 Γραφική παράσταση συντελεστών Fourier a_k , b_k . (Newland, 1984).....	27
Σχήμα 2.12 Πιθανά όρια του αναπτύγματος πελάγους. (Shields and Burdwell, 1970).....	30
Σχήμα 2.13 Στοιχεία γεωμετρίας περιορισμένου αναπτύγματος πελάγους. (Leenknecht, Szuwalski, & Sherlock, 1992).....	31
Σχήμα 3.1 Νομογράφημα πρόγνωσης κύματος στα βαθιά νερά κατά τη μέθοδο SMB. (Bretschneider, 1964)	34
Σχήμα 3.2 Χαρακτηριστικό ύψος κύματος κατά JONSWAP. (Carter, 1982)	39
Σχήμα 3.3 Περίοδος επαναφοράς κατά JONSWAP. (Carter, 1982)	39
Σχήμα 3.4 Σκαρίφημα συσχέτισης γωνιών (φ , θ , ψ) μεθόδου Donelan. (Bishop & Donelan, 1989).43	
Σχήμα 3.5 Διάγραμμα συσχέτισης γωνιών διεύθυνσης διάδοσης κύματος και ανέμου σε ανάπτυγμα ελλειπτικής λίμνης. (Bishop & Donelan, 1989)	43
Σχήμα 3.6 Διάγραμμα διακριτοποίησης Fetch-Limited / Fully Developed συνθηκών μεθόδου Donelan. (Bishop & Donelan, 1989)	45
Σχήμα 3.7 Συσχετίσεις μεταξύ γωνιών για την μέθοδο ACES. (Leenknecht, Szuwalski, & Sherlock, 1992)	47
Σχήμα 5.1 Διάγραμμα χαρακτηριστικού ύψους κύματος για τον Λιμένα Πατρών.....	95
Σχήμα 5.2 Διάγραμμα περιόδου κορυφής για τον Λιμένα Πατρών.	95
Σχήμα 5.3 Διάγραμμα χαρακτηριστικού ύψους κύματος για τον Λιμένα Ερμούπολης.....	102
Σχήμα 5.4 Διάγραμμα περιόδου κορυφής για τον Λιμένα Ερμούπολης.	102
Σχήμα 5.5 Διάγραμμα χαρακτηριστικού ύψους κύματος για τη Χρυσή Λασιθίου.....	109
Σχήμα 5.6 Διάγραμμα περιόδου κορυφής για τη Χρυσή Λασιθίου.	109
Σχήμα 5.7 Συγκεντρωτικό διάγραμμα χαρακτηριστικού ύψους κύματος για την περιοχή του Λιμένα Πατρών.....	111
Σχήμα 5.8 Συγκεντρωτικό διάγραμμα χαρακτηριστικού ύψους κύματος για την περιοχή του Λιμένα Ερμούπολης.....	112
Σχήμα 5.9 Συγκεντρωτικό διάγραμμα χαρακτηριστικού ύψους κύματος για την περιοχή της Χρυσής Λασιθίου.....	114

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 6.1 Σύνοψη αποτελεσμάτων για την περιοχή του Λιμένα Πατρών στα 5 Beaufort.....	116
Πίνακας 6.2 Σύνοψη αποτελεσμάτων για την περιοχή του Λιμένα Πατρών στα 6 Beaufort.....	116
Πίνακας 6.3 Σύνοψη αποτελεσμάτων για την περιοχή του Λιμένα Πατρών στα 7 Beaufort.....	116
Πίνακας 6.4 Σύνοψη αποτελεσμάτων για την περιοχή του Λιμένα Πατρών στα 8 Beaufort.....	117
Πίνακας 6.5 Σύνοψη αποτελεσμάτων για την περιοχή του Λιμένα Πατρών στα 9 Beaufort.....	117
Πίνακας 6.6 Σύνοψη αποτελεσμάτων για την περιοχή του Λιμένα Πατρών στα 10 Beaufort.....	117
Πίνακας 6.7 Σύνοψη αποτελεσμάτων για την περιοχή του Λιμένα Ερμούπολης στα 5 Beaufort. ..	118
Πίνακας 6.8 Σύνοψη αποτελεσμάτων για την περιοχή του Λιμένα Ερμούπολης στα 6 Beaufort. ..	118
Πίνακας 6.9 Σύνοψη αποτελεσμάτων για την περιοχή του Λιμένα Ερμούπολης στα 7 Beaufort. ..	118
Πίνακας 6.10 Σύνοψη αποτελεσμάτων για την περιοχή του Λιμένα Ερμούπολης στα 8 Beaufort. ..	119
Πίνακας 6.11 Σύνοψη αποτελεσμάτων για την περιοχή του Λιμένα Ερμούπολης στα 9 Beaufort. ..	119
Πίνακας 6.12 Σύνοψη αποτελεσμάτων για την περιοχή του Λιμένα Ερμούπολης στα 10 Beaufort.	119
Πίνακας 6.13 Σύνοψη αποτελεσμάτων για την περιοχή της Χρυσής Λασιθίου στα 5 Beaufort.	120
Πίνακας 6.14 Σύνοψη αποτελεσμάτων για την περιοχή της Χρυσής Λασιθίου στα 6 Beaufort.	120
Πίνακας 6.15 Σύνοψη αποτελεσμάτων για την περιοχή της Χρυσής Λασιθίου στα 7 Beaufort.	120
Πίνακας 6.16 Σύνοψη αποτελεσμάτων για την περιοχή της Χρυσής Λασιθίου στα 8 Beaufort.	121
Πίνακας 6.17 Σύνοψη αποτελεσμάτων για την περιοχή της Χρυσής Λασιθίου στα 9 Beaufort.	121
Πίνακας 6.18 Σύνοψη αποτελεσμάτων για την περιοχή της Χρυσής Λασιθίου στα 10 Beaufort. ..	121
Πίνακας 6.19 Απόδοση εμπειρικών μεθόδων σε σχέση με το μοντέλο προσομοίωσης ανά γεωμετρικό πεδίο.	122

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Γενική Ανασκόπηση

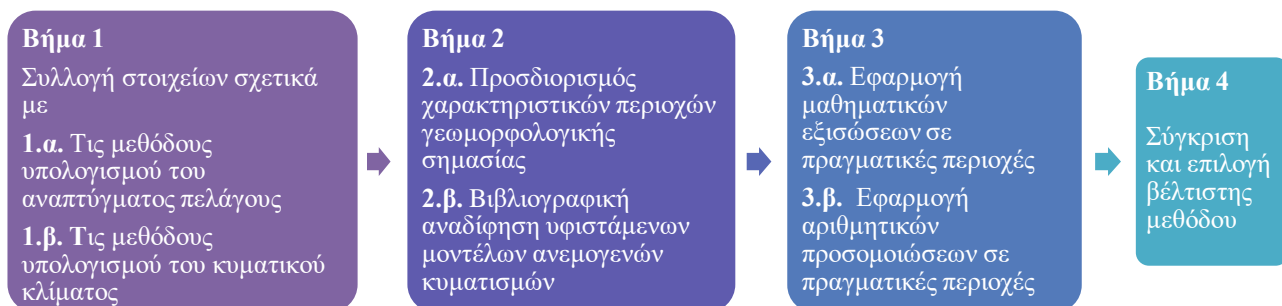
Το γενικότερο πλαίσιο της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας (ΔΕ) ενσωματώνει τη διερεύνηση της αξιοπιστίας των μαθηματικών εξισώσεων εμπειρικών μοντέλων για τον υπολογισμό χαρακτηριστικών μεγεθών των κυματισμών, μέσω της σύγκρισης με το λογισμικό αριθμητικής προσομοίωσης ανεμογενών κυματισμών του MIKE21|sw, με έμφαση στην διαφοροποίηση των εφαρμογών λόγω της γεωγραφικής ποικιλομορφίας που προσφέρουν οι ελληνικές θάλασσες και στην ανάγκη για εξακρίβωση της βέλτιστης πρακτικής ανά πιθανό σενάριο.

1.2 Στόχοι

Ο στόχος της Διπλωματικής Εργασίας, όπως προκύπτει και από τη Γενική Ανασκόπηση είναι η διερεύνηση και η αποσαφήνιση των διαφορετικών μαθηματικών εξισώσεων εμπειρικών μοντέλων υπολογισμού ανεμογενών κυματισμών, όπου λόγω της ποικιλίας αυτών, δημιουργείται μια σύγχυση, τόσο όσον αφορά τον υπολογισμό του αναπτύγματος πελάγους όσο και των χαρακτηριστικών μεγεθών ενός κυματικού κλίματος και συμπληρωματικά, η πρόταση της βέλτιστης μεθόδου ανά πιθανό γεωμετρικό πεδίο για τους υπολογισμούς αυτούς. Η αναμενόμενη χρησιμότητα από την επίτευξη του στόχου της Διπλωματικής Εργασίας κρίνεται σημαντική κυρίως για τους μελετητές-μηχανικούς που σχεδιάζουν παράκτια έργα προστασίας.

1.3 Μεθοδολογία

Συνοπτικά τα βασικά στάδια της εκτέλεσης της Διπλωματικής Εργασίας: α) συλλογή στοιχείων σχετικά με τους τρόπους υπολογισμού του αναπτύγματος πελάγους, β) συλλογή στοιχείων σχετικά με τα εμπειρικά μοντέλα και τις μαθηματικές εξισώσεις που τα περιγράφουν, γ) βιβλιογραφική αναδίφηση υφιστάμενων μοντέλων ανεμογενών κυματισμών, δ) προσδιορισμός χαρακτηριστικών περιοχών ώστε να καλύπτονται τα πιθανά γεωμετρικά πεδία ε) εφαρμογή μαθηματικών εξισώσεων και αριθμητικών προσομοιώσεων σε πραγματικές περιοχές, ζ) σύγκριση και επιλογή βέλτιστης μεθόδου. Παρακάτω παρατίθεται ένα διάγραμμα ροής των σταδίων της Διπλωματικής Εργασίας (**Εικ.1.1**), απεικονίζοντας μία συνολική εικόνα για το αντικείμενο της Διπλωματικής Εργασίας και την αλληλουχία των ενεργειών για την αντιμετώπισή του.



Εικόνα 1.1 Διάγραμμα ροής σταδίων Διπλωματικής Εργασίας

1.4 Δομή Διπλωματικής Εργασίας

Η παρούσα ΔΕ έχει δομηθεί σε έξι κεφάλαια. Στο πρώτο Κεφάλαιο δίνεται μια ανασκόπηση του αντικειμένου, των στόχων και της μεθοδολογίας που ακολούθησε η ΔΕ. Το Κεφάλαιο αυτό κλείνει με τις ευχαριστίες προς όλους όσους συντέλεσαν στην ολοκλήρωση της εργασίας. Στο δεύτερο Κεφάλαιο παρουσιάζεται η συλλογή των στοιχείων που εκπονήθηκε σχετικά με την περιγραφή του ανεμογενούς κυματικού κλίματος και των μεθόδων υπολογισμού τόσο του αναπτύγματος πελάγους όσο και των χαρακτηριστικών μεγεθών του κύματος. Στο τρίτο Κεφάλαιο, σε συνέχεια του προηγούμενου, παρουσιάζονται αναλυτικά τα εμπειρικά μοντέλα και οι μαθηματικές εξισώσεις που τα περιγράφουν, με έμφαση στην αποσαφήνιση και την διακριτοποίηση αυτών. Στο τέταρτο Κεφάλαιο παρουσιάζεται η μεθοδολογία του αριθμητικής προσομοίωσης του λογισμικού που χρησιμοποιήθηκε ώστε να γίνει μια απευθείας σύγκριση με τα αποτελέσματα των μαθηματικών εξισώσεων των εμπειρικών μοντέλων. Στο Κεφάλαιο 5 γίνεται εφαρμογή των μοντέλων, σε τρεις διαφορετικές πραγματικές περιπτώσεις, οι οποίες περιγράφουν το φάσμα της γεωμορφολογίας μιας περιοχής και επιλέγεται ανά σενάριο η βέλτιστη με κριτήρια αξιοπιστίας ως προς τα αποτελέσματα. Τέλος στο Κεφάλαιο 6, το οποίο αποτελεί και το σημαντικότερο Κεφάλαιο της παρούσας ΔΕ, πραγματοποιείται η σύνθεση των πρωτότυπων συμπερασμάτων και προτάσεων ως επιστέγασμα ολόκληρης της ερευνητικής προσπάθειας της ΔΕ, περιλαμβάνοντας σύντομη σύνοψη των αποτελεσμάτων, τα συνολικά συμπεράσματα καθώς και τις προτάσεις εφαρμογής των αποτελεσμάτων και περαιτέρω έρευνας.

1.5 Ευχαριστίες

Στις ευχαριστίες δεν χωράνε τυπικές εκθέσεις, χωράει μόνο η ανθρωπιά. Οι άνθρωποι που αναφέρονται παρακάτω συνέβαλαν το κατά δύναμιν σε επιστημονικό αλλά και σε ανθρώπινο επίπεδο, έτσι ώστε να προκύψει το βέλτιστο δυνατό αποτέλεσμα σε αυτή την προσπάθεια.

Ευχαριστώ τη Βασιλική Τσουκαλά για όλα. Τον Μιχάλη Χονδρό για τα περισσότερα. Τον Ανδρέα Παπαδημητρίου για αρκετά. Τον Τάσο Μεταλληνό για κάποια. Τον Κωνσταντίνο Μέμο για τις σαρδέλες. Τον Ελπιδοφόρο και τη Μαρία για το ευχάριστο κλίμα. Ήταν ωραία.

Ευχαριστώ, επίσης, τον Ηλία Μουσούλη, Διευθυντή Πωλήσεων της DHI στην Ελλάδα και στην Κύπρο, για την δωρεάν παραχώρηση του λογισμικού του MIKE21 στα πλαίσια της εκπόνησης της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας.

2 ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ ΚΑΙ ΑΝΕΜΟΓΕΝΕΣ ΚΥΜΑΤΙΚΟ ΚΛΙΜΑ

2.1 Εισαγωγή

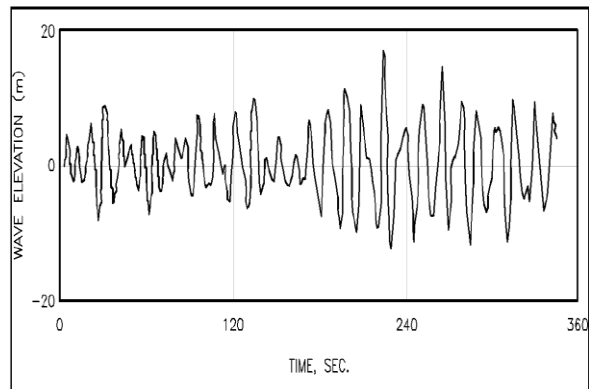
Κύματα στην επιφάνεια της θάλασσας με περίοδο 3-25 δευτερόλεπτα, παράγονται κυρίως από την επίδραση του ανέμου και είναι ένα θεμελιώδες γνώρισμα όλων των παράκτιων περιοχών του κόσμου. Άλλα γενεσιουργά αίτια ταλάντωσης της ελεύθερης επιφάνειας είναι οι σεισμοί, οι παλίρροιες και οι γρήγορες μεταβολές της ατμοσφαιρικής πίεσης. Στο εξής οι κυματισμοί που αναφέρονται στην παρούσα εργασία είναι μόνο ανεμογενείς. Η πρόβλεψη και εκτίμηση των κυματικών συνθηκών, είναι απαραίτητη σχεδόν σε όλες τις ακτομηχανικές μελέτες.

Στις περισσότερες προσεγγίσεις γίνεται η παραδοχή ότι οι κυματισμοί στην επιφάνεια της θάλασσας έχουν προφίλ περίπου ημιτονοειδές με σταθερό ύψος, περίοδο και κατεύθυνση (μονοχρωματικοί). Όμως, οπτική παρατήρηση της θαλάσσιας επιφάνειας (**Εικ.2.1**) όπως επίσης και εργαστηριακές μετρήσεις (**Εικ.2.2**) δείχνουν ότι αποτελείται από μια επαλληλία πολλών κυματισμών με ποικίλα ύψη και περιόδους, κινούμενα προς διαφορετικές κατευθύνσεις.

Και οι δύο εικόνες φανερώνουν ότι οι κυματισμοί στη φύση δεν έχουν ημιτονοειδές προφίλ.



Εικόνα 2.1 Φωτογραφικό στιγμιότυπο θαλάσσιας διαταραχής.



Εικόνα 2.2 Εργαστηριακές μετρήσεις ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας με την πάροδο του χρόνου.

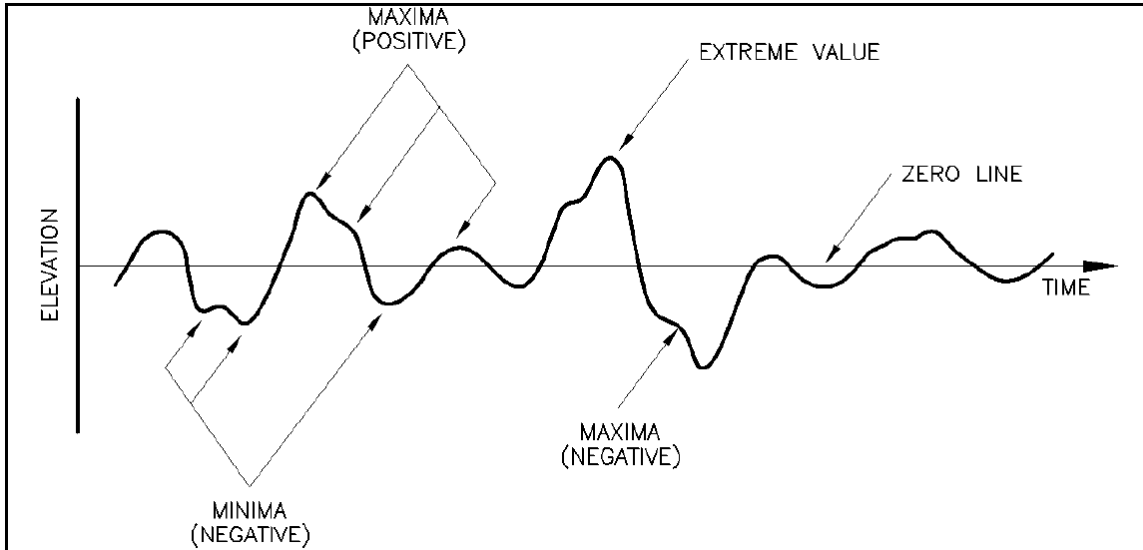
Τα χαρακτηριστικά του κύματος (ύψος H , περίοδος T , διεύθυνση) στους απλούς κυματισμούς μελετώνται σαν ντετερμινιστικές ποσότητες, αντίθετα τα χαρακτηριστικά των πραγματικών κυματισμών πρέπει να μελετηθούν με στατιστικούς όρους. Αυτό, κάνει περίπλοκη τη προσέγγισή τους αλλά περιγράφει ρεαλιστικότερα την κατάσταση στη φύση, αφού μονοχρωματικοί κυματισμοί με σταθερές ιδιότητες είναι πολύ σπάνιοι στην πραγματικότητα και παράγονται κυρίως στα εργαστήρια. Κυματισμοί που έχουν διαδοθεί μακριά από τη περιοχή γένεσής τους ονομάζονται «αποθάλασσα» (swell). Η αποθάλασσα περιγράφει φυσικούς κυματισμούς που εμφανίζονται με ιδιότητες παρόμοιες των μονοχρωματικών στα βαθιά νερά. Συνήθως όμως, η επιφάνεια της θάλασσας είναι ένας συνδυασμός κυματισμών ποικίλων χαρακτηριστικών, τα οποία δημιουργούνται από την αλληλεπίδραση της διεπιφάνειας ανέμου-θαλάσσης.

Δυο προσεγγίσεις υπάρχουν για την επεξεργασία των σύνθετων κυματισμών: η ανάλυση στο χρόνο και η φασματική ανάλυση. Η τελευταία βασίζεται στον μετασχηματισμό Fourier της θαλάσσιας επιφάνειας. Όντως, αυτή αποτελεί την πιο κατάλληλη, μαθηματικά, επεξεργασία για την ανάλυση μιας χρονικά εξαρτώμενης, τρισδιάστατης καταγραφής της ελεύθερης επιφάνειας. Στην ανάλυση στο χρόνο χρησιμοποιείται μια καταγραφή χρονοσειράς της θαλάσσιας επιφάνειας σε ένα συγκεκριμένο σημείο και τα στατιστικά της εξάγονται. Είναι μια πολύ φυσική εισαγωγή στους σύνθετους κυματισμούς και θα παρουσιαστεί στην επόμενη υποενότητα πριν τις πιο πολύπλοκες φασματικές προσεγγίσεις. Το μέγιστο μειονέκτημα της όμως είναι ότι δεν μπορεί να αναδείξει πλήρως την κατεύθυνση των κυματισμών. Έτσι, κάτι που εμφανίζεται σαν απλός κυματισμός σε ένα σημείο μπορεί να είναι τοπική υπέρθεση δυο μικρότερων κυματισμών από διαφορετικές κατευθύνσεις που έτυχε να διασταυρωθούν τη δεδομένη χρονική στιγμή. Από την άλλη μεριά μειονέκτημα της φασματικής προσέγγισης αποτελεί το γεγονός ότι είναι γραμμική και μπορεί να παραποιήσει την αναπαράσταση των μη γραμμικών κυματισμών.

Σκοπός του κεφαλαίου αυτού είναι να παραθέσει τις θεωρίες και τους μαθηματικές σχέσεις που έχουν αναπτυχθεί για να περιγράψουν τα επιφανειακά κύματα, τις ταχύτητες και τις επιταχύνσεις τους, καθώς και τις δυνάμεις που αυτά προκαλούν. Αυτό το κεφάλαιο έχει βασιστεί κυρίως στο εγχειρίδιο (CEM, 2008), και στα βιβλία των (Goda, 1985) και (Newland, 1993). Αναπτύσσονται οι δύο μέθοδοι ανάλυσης των τυχαίων κυματισμών, παρουσιάζεται η μαθηματική μετάβαση από το πεδίο του χρόνου στο πεδίο συχνοτήτων και αντίστροφα και τέλος γίνεται αναφορά στις απλοποιημένες μεθόδους περιγραφής των κυματισμών, εξηγώντας τα βασικά μεγέθη από τις οποίες απαρτίζονται.

2.2 Ανάλυση στην περιοχή του χρόνου

Η συγκεκριμένη προσέγγιση απαιτεί κατευθείαν μετρήσεις από τη θάλασσα. Η χρονοσειρά ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας σε ένα σημείο είναι ένα τυχαία εμφανιζόμενο σήμα εμφανίζοντας πολλά μέγιστα και ελάχιστα (Σχ.2.1).



Σχήμα 2.1 Χαρακτηριστικό σχέδιο χρονικής εξέλιξης τυχαίου κυματισμού. (Ochi, 1973)

Στην ανάλυση του χρόνου οι χρονοσειρές της επιφάνειας πρέπει να χωριστούν σε διακριτά τμήματα που στη συνέχεια θεωρούνται ως ξεχωριστά κύματα. Το ύψος και η περίοδος τους προσδιορίζονται. Προσοχή πρέπει να δοθεί στον υπολογισμό της περιόδου, καθώς μπορούν να εμφανίζονται δυο κορυφές σε μια κοιλιά κάτω από τη μέση στάθμη ύδατος (ΜΣΥ). Ένας τρόπος υπολογισμού της περιόδου είναι το χρονικό διάστημα μεταξύ διαδοχικών τομών της ελεύθερης επιφάνειας με τη ΜΣΥ με καθοδική διεύθυνση (zero down-crossing period) ή με ανοδική (zero up-crossing period). Έπειτα υπολογίζονται τα στατιστικά χαρακτηριστικά της καταγραφής, τα οποία όπως θα παρουσιαστεί, ακολουθούν γνωστές στατιστικές κατανομές.

Δύο από τις πιο σημαντικές παραμέτρους, που είναι απαραίτητες για τον επαρκή καθορισμό μιας δεδομένης θαλάσσιας διακύμανσης, είναι το χαρακτηριστικό ύψος κύματος και η χαρακτηριστική περίοδος. Το πρώτο μπορεί να οριστεί ποικιλοτρόπως, όπως: το μέσο ύψος όλων των κυμάτων H_m , το μέσο τετραγωνικό ύψος H_{rms} , το μέγιστο ύψος H_{max} και το μέσο ύψος των ένα- τρίτο υψηλότερων κυματισμών $H_{1/3}$, γνωστό ως σημαντικό ύψος κύματος H_s όπως πρωτοπαρουσιάστηκε από τους Sverdrup και Munk (1947).

$$H_s = \frac{1}{N/3} \sum_{i=1}^{N/3} H_i \quad (2-1)$$

όπου, H_i τα ύψη κύματος σε φθίνουσα σειρά

N ο συνολικός αριθμός των κυματισμών της καταγραφής

Η πιθανότητα ένα κύμα να έχει μεγαλύτερο ή ίσο ύψος από αυτό του σχεδιασμού H_d , μπορεί να υπολογιστεί από:

$$P(H > H_d) = m/N \quad (2-2)$$

$$P(H \leq H_d) = 1 - m/N \quad (2-3)$$

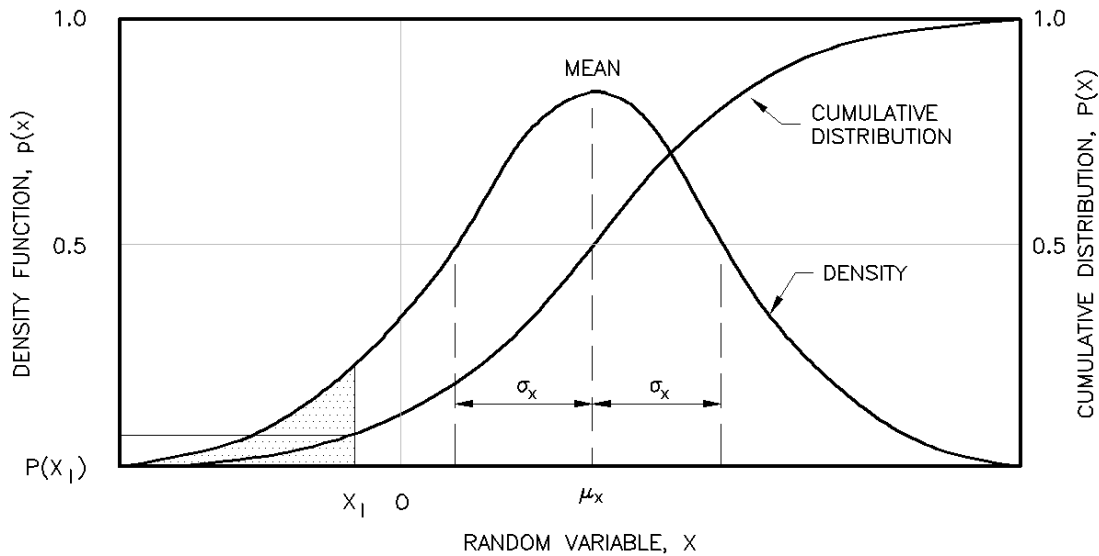
όπου, m ο αριθμός των κυμάτων μεγαλύτερα από το H_d .

Το μέσο τετραγωνικό ύψος μπορεί να οριστεί ως:

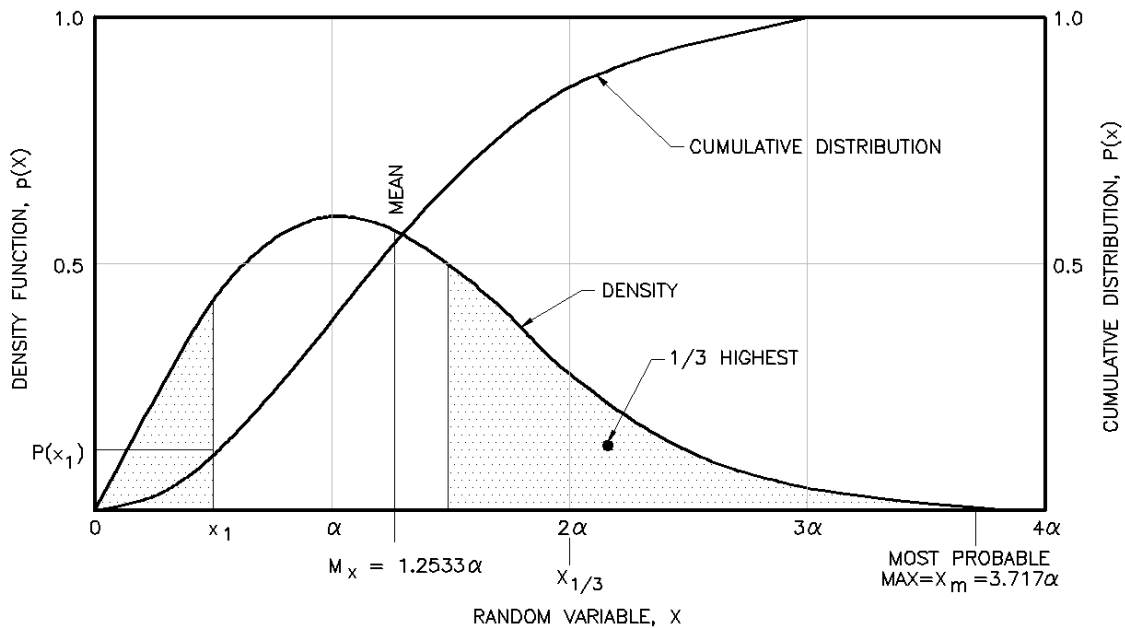
$$H_{rms} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N H_j^2} \tag{2-4}$$

όπου, H_j τα ξεχωριστά ύψη κύματος της καταγραφής

Οι πιο κοινές κατανομές στη μελέτη τυχαίων θαλάσσιων κυματισμών είναι η κανονική κατανομή (Gaussian) (Σχ.2.2) και η κατανομή Rayleigh (Σχ.2.3).



Σχήμα 2.2 Κανονική κατανομή (Gauss) που ακολουθεί η ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας. (CEM, 2008)



Σχήμα 2.3 Κατανομή Rayleigh που ακολουθεί το ύψος κύματος και αθροιστική κατανομή. (CEM, 2008)

Η πρώτη είναι κατάλληλη να περιγράψει τις βραχυχρόνιες πιθανότητες της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας ζ , ενώ η δεύτερη περιγράφει την κατανομή των υψών κυματισμού προσδιορίζοντας ταυτόχρονα και κάποιες εκτιμήσεις για τα ύψη κύματος.

$$H_{1/3} \approx 4.00\sqrt{m_0} = 1.416H_{\text{rms}} \quad (2-5)$$

$$H_{1/10} = 1.27H_{1/3} = 1.80H_{\text{rms}} = 5.091\sqrt{m_0} \quad (2-6)$$

$$H_{1/100} = 1.67H_{1/3} = 2.36H_{\text{rms}} = 6.672\sqrt{m_0} \quad (2-7)$$

$$H_{\text{max}} = 1.86H_{1/3} \quad (2-8)$$

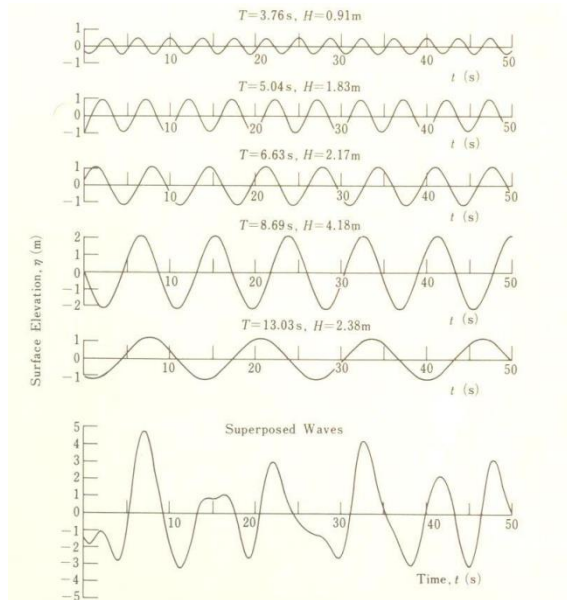
2.3 Ανάλυση στην περιοχή των συχνοτήτων

Αντίθετα με την παραπάνω ανάλυση, η φασματική ανάλυση προσδιορίζει την κατανομή της κυματικής ενέργειας και τα μέσα στατιστικά χαρακτηριστικά για κάθε συχνότητα μετατρέποντας τις χρονοσειρές σε φάσμα. Ουσιαστικά πρόκειται για μια μετατροπή από το πεδίο του χρόνου στο πεδίο συχνοτήτων και εφαρμόζεται όπως θα δούμε παρακάτω με την τεχνική των μετασχηματισμών Fourier.

Η σύλληψη της ιδέας του φάσματος μπορεί να αποδοθεί στον Newton, που ανακάλυψε ότι το φως του ήλιου μπορεί να αποσυντεθεί σε ένα φάσμα χρωμάτων από το κόκκινο ως το βιολετί με τη βοήθεια ενός πρίσματος (Encyclopedia Britannica, 1964). Η ιδέα βασίζεται στην αρχή ότι το λευκό χρώμα αποτελείται από πολυάριθμες συνιστώσες φωτός ποικίλων χρωμάτων (μηκών κύματος). Η τεχνική της αποσύνθεσης ενός πολύπλοκου φυσικού φαινομένου σε μεμονωμένα μέρη έχει επεκταθεί σε πολλά φυσικά προβλήματα.

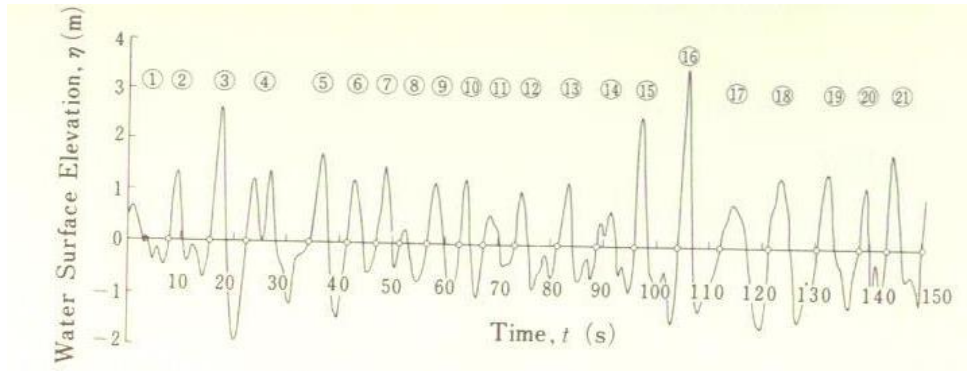
Οι θαλάσσιοι κυματισμοί, που αρχικά εμφανίζονται σε τυχαία μορφή, μπορούν να αναλυθούν, θεωρώντας ότι αποτελούνται από ένα πεπερασμένο αριθμό κυματιδίων με διαφορετικές συχνότητες και κατευθύνσεις. Η κατανομή της ενέργειας των κυματιδίων αυτών, όταν απεικονιστεί συγκριτικά με τη συχνότητα και την κατεύθυνση ονομάζεται κυματικό φάσμα. Πιο συγκεκριμένα, η κατανομή της κυματικής ενέργειας αναφορικά μόνο με τη συχνότητα ονομάζεται φάσμα συχνοτήτων, ενώ σαν συνάρτηση και της συχνότητας και της κατεύθυνσης ονομάζεται κατευθυντικό φάσμα (Κεφ. 2.3.2).

Στο παρακάτω σχήμα (Σχ.2.4) δίνεται παράδειγμα ενός σύνθετου κυματικού προφίλ, το οποίο προήλθε από την άθροιση πέντε ημιτονοειδών κυμάτων με διαφορετικά ύψη κύματος και διαφορετικές περιόδους.



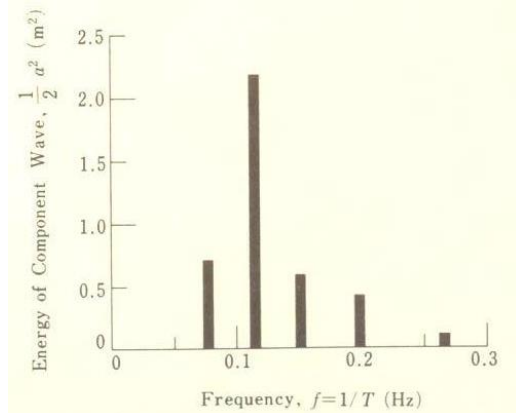
Σχήμα 2.4 Προσομοίωση τυχαίων κυματισμών με επαλληλία ημιτονοειδών. (Goda, 1985)

Παρόλο που το συγκεκριμένο προφίλ δεν είναι πολύ τυχαίο, μπορούμε να παράγουμε σύνθετα προφίλ παρόμοια με αυτά των πραγματικών θαλάσσιων κυματισμών, αυξάνοντας τον αριθμό των κυματιδίων που αθροίζονται. Η αντίστροφη διαδικασία είναι επίσης εφικτή, και τυχαία κυματικά προφίλ όπως το παρακάτω (Σχ. 2.5) μπορούν να αναλυθούν σε ένα αριθμό ξεχωριστών κυματισμών.



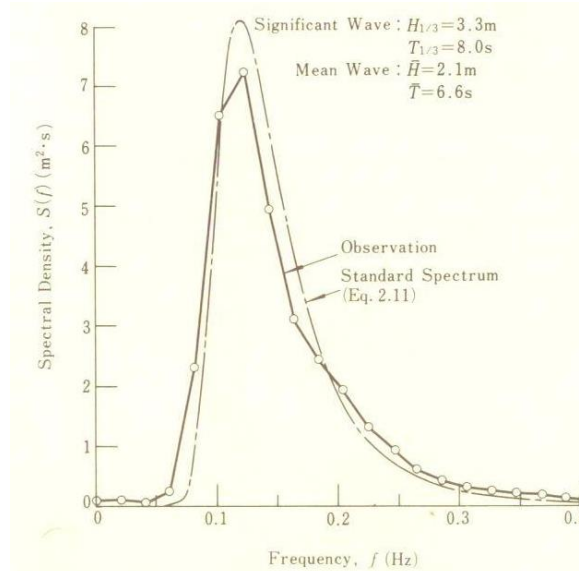
Σχήμα 2.5 Καταγραφή χρονοσειράς ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας. (Goda, 1985)

Το τυχαίο κυματικό προφίλ του Σχ. 2.4 αντιπροσωπεύεται από το παρακάτω διάγραμμα (Σχ. 2.6) με τις πέντε στήλες που απεικονίζουν την ενέργεια των κυματιδίων για την αντίστοιχη συχνότητα.



Σχήμα 2.6 Φασματική αναπαράσταση υπερτιθέμενων κυματισμών. (Goda, 1985)

Στην περίπτωση των πραγματικών κυματισμών η κατανομή της ενέργειας απεικονίζεται με μια συνεχή καμπύλη επειδή αποτελείται από ένα άπειρο αριθμό συχνοτήτων. Η καταγραφή της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας χρησιμοποιήθηκε για να υπολογιστεί το συνεχές φάσμα του (Σχ. 2.7), και με πιο ακριβή ορολογία ονομάζεται συνάρτηση πυκνότητας φάσματος συχνοτήτων και έχει μονάδες m^2s στον κάθετο άξονα και s^{-1} στον οριζόντιο.



Σχήμα 2.7 Παράδειγμα φάσματος θαλάσσιων κυματισμών. (Goda, 1985)

Στο παραπάνω φάσμα ορίζεται ως ροπή μηδενικής τάξης το εμβαδόν της καμπύλης του φάσματος.

$$\int_0^{\infty} E(f)df = m_0 \quad (2-9)$$

Οι ροπές ανώτερων τάξεων υπολογίζονται ως εξής:

$$\int_0^{\infty} f^i E(f)df = m_i \quad (2-10)$$

όπου, $i = 0, 1, 2, \dots$

Χρησιμοποιώντας αυτό τον ορισμό προσδιορίζεται το σημαντικό ύψος κύματος για κατανομή Rayleigh (Longuet-Higgins 1952):

$$H_s = 3.8\sqrt{m_0} \approx 4\sqrt{m_0} \quad (2-11)$$

Κατά τη διάρκεια έντονων ανεμολογικών γεγονότων το φάσμα τείνει να έχει μια κεντρική κορυφή και ένα αρκετά προβλέψιμο σχήμα. Για την «αποθάλασσα» (swell) που έχει διαδοθεί σε μεγάλη απόσταση από τη πηγή γένεσης, οι κυματισμοί τείνουν να έχουν μια απότομη κορυφή. Οι κυματισμοί στα ρηγά κοντά στη ζώνη θραύσης τείνουν να έχουν μια απότομη κορυφή στην αντίστοιχη συχνότητα κορυφής f_p και συγχρόνως μια σειρά από μικρότερες κορυφές στις συχνότητες $2f_p, 3f_p$ κοκ. τα οποία αποτελούν αρμονικές του κύριου κυματισμού. Η παρουσία των αρμονικών υποδεικνύει ότι το κύμα έχει μια απότομη κορυφή και μια επίπεδη κοιλία αντίστοιχη των έντονα μη γραμμικών κυματισμών όπως κοντά στη θραύση.

Δυο παράμετροι χρησιμοποιούνται συχνά στην στοχαστική απεικόνιση των κυματισμών. Το φασματικό πλάτος ν και το φασματικό εύρος ε και χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό του σχήματος του φάσματος. Αυτοί οι παράμετροι κυμαίνονται μεταξύ της μονάδας και του μηδέν και μπορούν να προσεγγιστούν με τις ροπές:

$$\nu = \sqrt{\frac{m_0 m_2}{m_1^2} - 1} \quad (2-12)$$

$$\varepsilon = \sqrt{1 - \frac{m_2^2}{m_0 m_4}} \quad (2-13)$$

Για ένα στενό φάσμα και τα δυο πλησιάζουν στο 0. Για παράδειγμα για τα δυο πιο κοινά εμπειρικά φάσματα Pierson-Moskowitz (PM) (Pierson & Moskowitz, 1964) και JONSWAP (Hasselmann et al., 1973), που παρουσιάζονται παρακάτω $\nu=0.425$ και 0.389 αντίστοιχα και $\varepsilon=1$ και για τα δυο. Ο Goda (1974) πρότεινε μια φασματική παράμετρο κορυφής Q_p που ορίζεται:

$$Q_p = \frac{2}{m_0^2} \int_0^{\infty} f E^2(f) df \quad (2-14)$$

Η παραπάνω παράμετρος Q_p εξαρτάται μόνο από την ροπή μηδενικής τάξης του φάσματος και δεν συνδέεται άμεσα από το φασματικό εύρος ε . Γενικά ένα μικρό ε σημαίνει ότι το Q_p είναι μεγάλο και το αντίθετο.

Στα βαθιά και ενδιάμεσα νερά, το σημαντικό ύψος κύματος που υπολογίζεται από τη φασματική ανάλυση είναι συνήθως μεγαλύτερο από αυτό που εξάγει η ανάλυση στο χρόνο.

2.3.1 Τύποι φασμάτων

Υπάρχουν πολλοί τύποι ενεργειακών φασμάτων που χρησιμοποιούνται πρακτικά και βασίζονται σε μια ή παραπάνω παραμέτρους όπως η ταχύτητα ανέμου, το σημαντικό ύψος κύματος, η περίοδος, συντελεστές σχήματος κ.α. Τα πιο γνωστά από αυτά παρουσιάζονται παρακάτω.

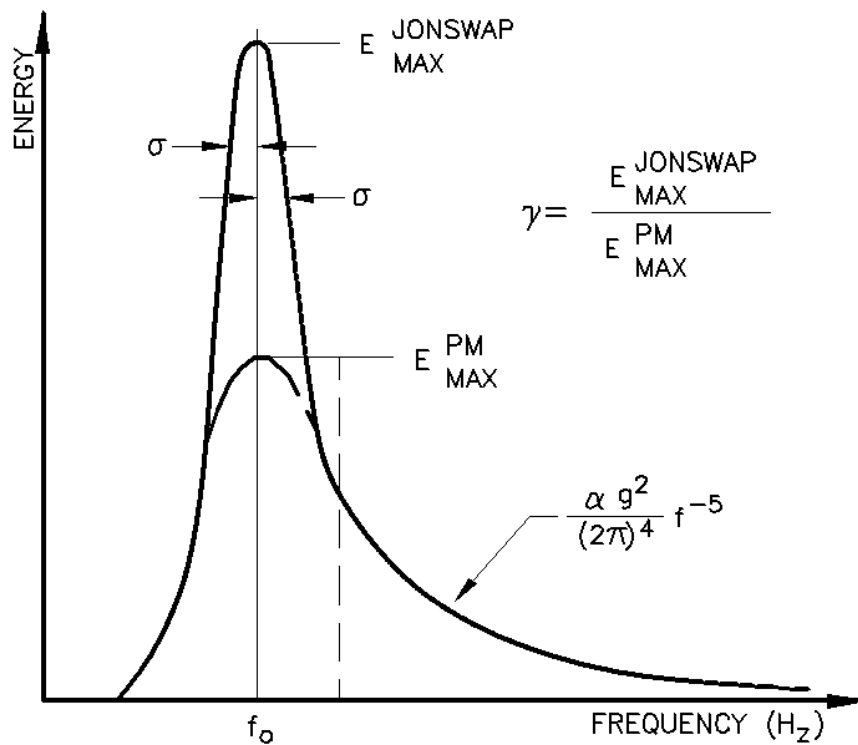
Ο Phillips (1958) κατέστρωσε μια εξίσωση για το ισοδύναμο πεδίο φάσματος για πλήρως ανεπτυγμένη θάλασσα στα βαθιά νερά, το οποίο αποτέλεσε τη βάση για τις περισσότερες μεταγενέστερες προσεγγίσεις και γράφεται σε όρους της γωνιακής συχνότητας:

$$E(\omega) = \alpha \cdot g^2 \cdot \omega^{-5} \quad (2-15)$$

όπου, α είναι η σταθερά Phillip (=0.0081)

g η επιτάχυνση της βαρύτητας

Ένα ευρέως διαδεδομένο φάσμα είναι το φάσμα με μια παράμετρο Pierson-Moskowitz (PM) (Pierson και Moskowitz 1964). Μια επέκταση του είναι το JONSWAP (Hasselmann et al. 1973) με πέντε παραμέτρους, παρόλο που οι τρεις από αυτές συνήθως παραμένουν σταθερές. Η σχέση μεταξύ τους φαίνεται στο (Σχ. 2.8).



Σχήμα 2.8 Σύγκριση φασμάτων PM και JONSWAP. (Chakrabarti, 1987)

Άλλα φάσματα με δυο παραμέτρους παράγωγα των προηγούμενων είναι αυτά που προτάθηκαν από τους: Bretschneider (1959), ISSC (1964), Scott (1965), ITTC (1966), Liu (1971), Mitsuyasu (1972), Goda (1985a) και Bouws et al. (1985).

Ένα φάσμα με έξι παραμέτρους προτάθηκε από τους Ochi και Hubble (1976). Η χρησιμότητα του συγκεκριμένου είναι ότι μπορεί να περιγράψει ενεργειακό φάσμα με πολλές κορυφές συνδυάζοντας θαλάσσιους κυματισμούς και «αποθάλασσα».

Ο τύπος του φάσματος PM για πλήρως ανεπτυγμένη θάλασσα ορίζεται:

$$E(f) = \frac{0.0081g^2}{(2\pi)^4 f^5} \exp\left(-0.74 \left[\frac{2U_w \pi f}{g}\right]^4\right) \tag{2-16}$$

όπου, U_w η ταχύτητα του ανέμου 19.5 μέτρα πάνω από τη ΜΣΥ

Το φάσμα PM περιγράφει μια πλήρως ανεπτυγμένη θάλασσα με μια παράμετρο, την ταχύτητα ανέμου και υποθέτει ότι το ανάπτυγμα πελάγους και η διάρκεια τείνουν στο άπειρο. Αυτή η εξιδανίκευση απαντάται όταν ο άνεμος πνέει σε μια μεγάλη περιοχή με σταθερή ταχύτητα χωρίς ουσιαστική αλλαγή κατεύθυνσης.

Το φάσμα JONSWAP για θάλασσες με πεπερασμένο ανάπτγμα πελάγους αναπτύχθηκε κατά το Joint North Sea Wave Project (Hasselmann et al. 1973) και μπορεί να εκφραστεί ως:

$$E(f) = \frac{ag^2}{(2\pi)^4 f^5} \exp\left[-1.25\left(\frac{f}{f_p}\right)^{-4}\right] \gamma \exp\left[-\frac{\left(\frac{f}{f_p}-1\right)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (2-17)$$

$$\text{όπου, } f_p = 3.5 \left[\frac{g^2 F}{U_{10}^3} \right]^{-0.33}$$

$$a = 0.076 \left[\frac{gF}{U_{10}^2} \right]^{-0.22}$$

$$1 \leq \gamma \leq 7$$

$$\sigma = 0.07 \text{ για } f \leq f_p$$

$$\sigma = 0.09 \text{ για } f \geq f_p$$

Στην εξίσωση αυτή, a είναι η παράμετρος κλίμακας

γ ο συντελεστής κορυφής της κορυφής με μέση τιμή 3.3

f_p η συχνότητα κορυφής

U_{10} η ταχύτητα ανέμου 10 μέτρα πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας

F το μήκος του αναπτύγματος πελάγους.

Ο Goda (1988) βασιζόμενος σε αριθμητική ανάλυση κυματικών προφίλ, επαναδιατύπωσε την έκφραση του παραπάνω φάσματος σε όρους σημαντικού ύψους κύματος H_s και περιόδου T_p :

$$E(f) = \beta_J H_s^2 T_p^{-4} f^{-5} \exp\left[-1.25(T_p f)^{-4}\right] \gamma \exp\left[-\frac{(T_p f - 1)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (2-18)$$

όπου,

$$\beta_J = \frac{0.0624[1.094 - 0.01915 \ln \gamma]}{0.23 + 0.0336\gamma - 0.185(1.9 + \gamma)^{-1}} \quad (2-19)$$

Στα ρηχά νερά το κυματικό φάσμα διαφέρει από τις κλασσικές μορφές που παρουσιάστηκαν, εξαιτίας της επίδρασης του πυθμένα στους κυματισμούς και την συνεπαγόμενη αλληλεπίδραση των συνιστωσών του φάσματος μεταξύ τους. Οι Bouws et al. (1984) πρότειναν μια αλλαγή στο JONSWAP για την αναπαράσταση του φάσματος στα ρηχά και ονομάστηκε φάσμα TMA από τις τρεις πηγές δεδομένων που χρησιμοποίησαν στην επεξεργασία τους (Texel, Marsen και Arsløe) και η εξίσωση του διαμορφώνεται ως:

$$S_{TMA}(\omega, d) = S_{JONSWAP}(\omega) \Phi(\omega^*, d) \quad (2-20)$$

$$\text{όπου, } \Phi(\omega^*, d) = \frac{1}{[f(\omega^*)]^2} \left[1 + \frac{K}{\sinh K} \right]^{-1}$$

$$K = 2\omega^{*2} f(\omega^*)$$

$$f(\omega^*) = \tanh^{-1} [k(\omega^* d)]$$

$$k = 2\pi/L$$

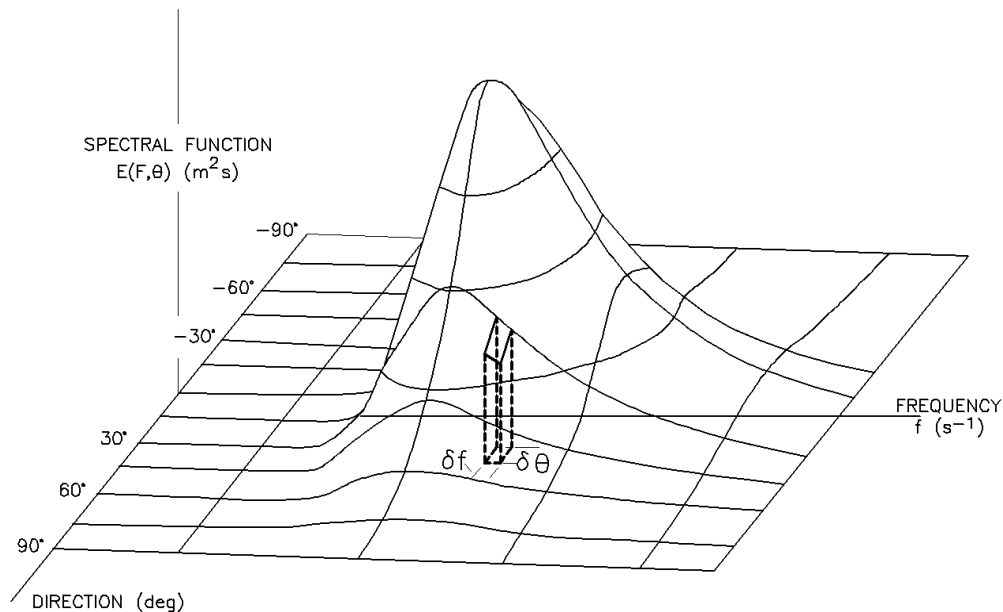
$$\omega^* = \omega \sqrt{\frac{d}{g}}$$

$$\omega = 2\pi/T$$

Αυτή η αλλαγή μεταμορφώνει την απώλεια ή την κλίση της συνάρτησης πυκνότητας φάσματος (JONSWAP) στην πλευρά των υψίσυχνων, από ω^{-5} σε ω^{-3} κατά τη διάρκεια της ρήχωσης, που προσεγγίζεται από τη γραμμική θεωρία.

2.3.2 Κατευθυντικά φάσματα

Τα κυματικά φάσματα παραπάνω θεωρήθηκαν μονοδιάστατα φάσματα συχνότητας. Η διεύθυνση του κυματισμού δεν εμφανίζεται σε αυτές τις απεικονίσεις, συνεπώς η αλλαγή της κυματικής ενέργειας συναρτήσει της διεύθυνσης δεν αξιολογήθηκε. Η θαλάσσια επιφάνεια όμως συχνά αποτελείται από πολλούς κυματισμούς προερχόμενους από διαφορετικές διευθύνσεις. Έτσι τα φάσματα που συμπεριλαμβάνουν και τη διεύθυνση θ ονομάζονται δισδιάστατα $E(f, \theta)$ (Σχ. 2.9).



Σχήμα 2.9 Σχηματική απεικόνιση δισδιάστατου φάσματος. (CEM, 2008)

Μια μαθηματική περιγραφή της κατευθυντικής κατάστασης της θάλασσας είναι δυνατή θεωρώντας ότι αυτή αποτελείται από υπέρθεση μεγάλου αριθμού ημιτονοειδών κυματισμών με διαφορετικές συχνότητες και κατευθύνσεις. Είναι κατάλληλο να εκφράζεται το φάσμα $E(f, \theta)$, που περιγράφει τη γωνιακή κατανομή ενέργειας στις αντίστοιχες συχνότητες, ως εξής:

$$E(f, \theta) = E(f)G(f, \theta) \quad (2-21)$$

όπου, $G(f, \theta)$ είναι η κατευθυντική συνάρτηση διάχυσης για την οποία ισχύει

$$\int_{-\pi/2}^{\pi/2} G(f, \theta) d\theta = 1 \quad (2-22)$$

Μια πρώτη προσέγγιση σε σχέση με τη μορφή της κατευθυντικής συνάρτησης διάχυσης έγινε από τους Pierson et al. (1952) οι οποίοι εισήγαγαν την παρακάτω $\cos^2\theta$ συνάρτηση στην ανάλυση της διάθλασης κυματισμών με κατευθυντικότητα:

$$D(\theta) = \begin{cases} \frac{2}{\pi} \cos^2 \theta & |\theta| \leq \pi/2 \\ 0 & |\theta| > \pi/2 \end{cases} \quad (2-23)$$

Η συνάρτηση αυτή εξελίχθηκε στη συνέχεια από αρκετούς ερευνητές σε τύπο συνημίτονου δύναμης $2I$, ώστε να εκφράζει διάφορους βαθμούς κατευθυντική διάχυσης. Ο Nagai (1972) για παράδειγμα, χρησιμοποίησε μια συνάρτηση τέτοιου τύπου για τον υπολογισμό της περίθλασης κατευθυντικών κυματισμών γύρω από κυματοθραύστες, η οποία εκφράζεται ως εξής:

$$D(\theta) = \begin{cases} \frac{2!!!}{\pi(2I-1)!!} \cos^2 \theta & |\theta| \leq \pi/2 \\ 0 & |\theta| > \pi/2 \end{cases} \quad (2-24)$$

όπου η γωνία κατευθυντικότητας θ μετράται από την κύρια διεύθυνση διάδοσης των κυματισμών.

Η εξίσωση (2.23) εφαρμόζεται στο ημιεπίπεδο $|\theta| \leq \pi/2$, όπως νοείται διαισθητικά για κύματα που προωθούνται γύρω από μια κύρια διεύθυνση. Όμως στην ανάλυση μετρήσεων πεδίου η διεύθυνση των κυματικών συνιστωσών δεν μπορεί να περιορίζεται στο ημιεπίπεδο αλλά πρέπει να επιτρέπεται να παίρνει τιμές σε ολόκληρο το διάστημα $0 \leq \theta \leq 2\pi$. Για το λόγο αυτό, πολλοί ερευνητές με πρώτους τους Longuet-Higgins et al. (1963) υιοθέτησαν την ακόλουθη συνάρτηση διάχυσης

$$D(\theta) = \frac{2^{2s-1}}{\pi} \frac{\Gamma^2(s+1)}{\Gamma(2s+1)} \cos^{2s} \left(\frac{\theta}{2} \right) \quad (2-25)$$

Η παράμετρος διάχυσης s έχει αποδειχθεί ότι εξαρτάται από τη συχνότητα όπως θα παρουσιαστεί στη συνέχεια κατά την ανάπτυξη της συνάρτησης διάχυσης τύπου Mitsuyasu.

Ο Borgman (1965), χρησιμοποίησε την παρακάτω κυκλική –κανονική συνάρτηση διάχυσης για την προσομοίωση τυχαίων κατευθυντικών κυματισμών:

$$D(\theta) = \frac{\exp(\kappa \cos \theta)}{2\pi I_0(\kappa)} \quad (2-26)$$

όπου, I_0 είναι η τροποποιημένη συνάρτηση Bessel μηδενικής τάξης
 κ μια παράμετρος διάχυσης

Η ανάλυση πολλών μετρήσεων πεδίου κατευθυντικών κυματισμών, κατέδειξε ότι η κατευθυντική διάχυση είναι στενότερη γύρω από τη φασματική συχνότητα κορυφής f_p , ενώ διευρύνεται καθώς η συχνότητα απομακρύνεται από την κορυφή και προς τις χαμηλές και τις υψηλές τιμές. Έτσι η παράμετρος διάχυσης s παίρνει την υψηλότερη της τιμή στην συχνότητα κορυφής και η τιμή της μειώνεται καθώς μεταβαίνουμε τόσο προς υψηλότερες όσο και προς χαμηλότερες συχνότητες.

Οι Mitsuyasu et al. (1975) ήταν οι πρώτοι οι οποίοι τυποποίησαν την μεταβολή της κατευθυντικής διάχυσης συναρτήσει της συχνότητας, σε όρους της παραμέτρου s ως εξής:

$$s = \begin{cases} s_{\max} \left(\frac{f}{f_p} \right)^5 & f \leq f_p \\ s_{\max} \left(\frac{f}{f_p} \right)^{-2/5} & f > f_p \end{cases} \quad (2-27)$$

Στην ίδια εργασία η τιμή της παραμέτρου s_{\max} προσδιορίστηκε μεταξύ 5 και 30, με μέση τιμή 10 για ανεμογενείς κυματισμούς, παράλληλα δε η s_{\max} εκφράστηκε σαν συνάρτηση της αδιάστατης ταχύτητας ανέμου.

2.4 Ανάλυση Fourier

Μια περιοδική ανάλυση $g(t)$ με περίοδο T (Σχ. 2.10) είναι δυνατόν να εκφραστεί σαν μια άπειρη τριγωνομετρική σειρά της μορφής:

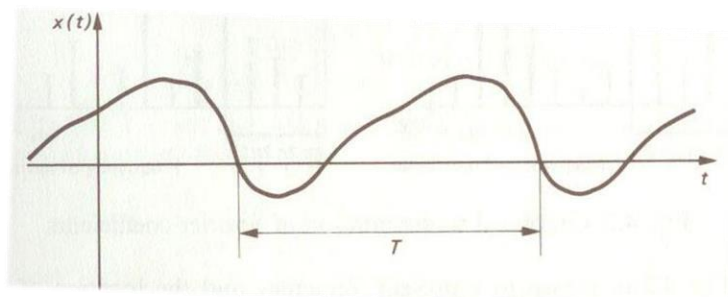
$$g(t) = a_0 + \sum_{k=1}^{\infty} \left(a_k \cos \frac{2kt\pi}{T} + b_k \sin \frac{2kt\pi}{T} \right) \quad (2-28)$$

όπου, a_0, a_k, b_k είναι οι σταθεροί συντελεστές Fourier που δίνονται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} g(t) dt \quad (2-29)$$

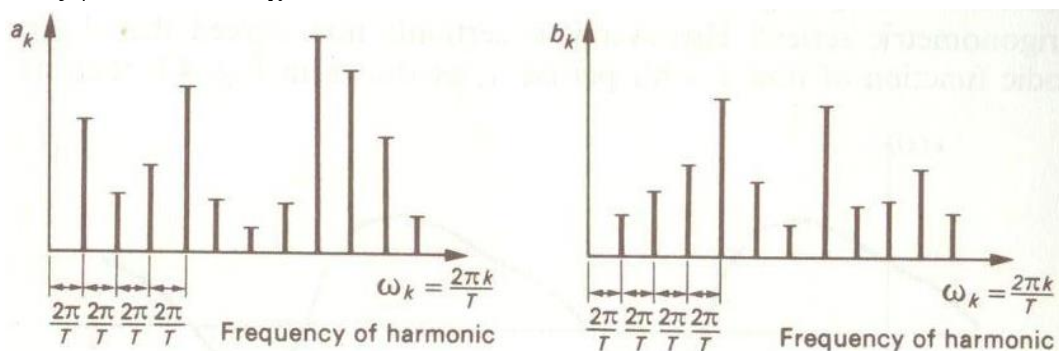
$$a_k = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} g(t) \cos \frac{2kt\pi}{T} dt \quad (2-30)$$

$$b_k = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} g(t) \sin \frac{2kt\pi}{T} dt \quad (2-31)$$



Σχήμα 2.10 Τυχαία περιοδική συνάρτηση περιόδου T . (Newland, 1984)

Αν υποθεθεί ότι η θέση του άξονα t στο Σχ. 2.10 μετατοπιστεί έτσι ώστε η μέση τιμή της $g(t)$ να είναι ίση με το μηδέν, τότε σύμφωνα με τη σχέση (2.29) ο συντελεστής a_0 μηδενίζεται. Οι υπόλοιποι συντελεστές a_k, b_k , είναι γενικά διαφορετικοί μεταξύ τους και οι τιμές τους μπορεί να παρασταθούν γραφικά όπως φαίνεται στο Σχ. 2.11.



Σχήμα 2.11 Γραφική παράσταση συντελεστών Fourier a_k, b_k . (Newland, 1984)

Ο οριζόντιος άξονας παριστάνει συχνότητα και ο συντελεστής με δείκτη k βρίσκεται στη θέση

$$\omega_k = \frac{2\pi k}{T} \quad (2-32)$$

που είναι η συχνότητα της k αρμονικής. Η διαφορά μεταξύ δύο διαδοχικών αρμονικών είναι

$$\Delta\omega = \frac{2\pi}{T} \quad (2-33)$$

και είναι φανερό ότι όταν η περίοδος T γίνει μεγάλη, τότε η διαφορά των συχνοτήτων $\Delta\omega$ γίνεται μικρή και οι συντελεστές Fourier τείνουν να προσεγγίσουν ο ένας τον άλλο. Στο όριο όταν $T \rightarrow \infty$, οι συντελεστές συμπίπτουν μεταξύ τους. Στην περίπτωση αυτή η συνάρτηση $g(t)$ παύει να είναι περιοδική και δεν είναι δυνατόν να αναλυθεί σε διακριτές αρμονικές συνιστώσες. Ωστόσο τότε, κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες, μπορούμε να ακολουθήσουμε παρόμοια διαδικασία κατά την οποία η σειρά Fourier (2.28) μετασχηματίζεται σε ολοκλήρωμα Fourier και οι συντελεστές Fourier σε συνεχείς συναρτήσεις συχνότητας που ονομάζονται μετασχηματισμοί Fourier.

Αντικαθιστώντας τις τιμές των a_k, b_k στη σχέση (2.28) για $a_0=0$, είναι:

$$g(t) = \sum_{k=1}^{\infty} \left\{ \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} g(t) \cos \frac{2\pi kt}{T} dt \right\} \cos \frac{2\pi kt}{T} + \sum_{k=1}^{\infty} \left\{ \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} g(t) \sin \frac{2\pi kt}{T} dt \right\} \sin \frac{2\pi kt}{T} \quad (2-34)$$

Οπότε από τις σχέσεις (2.32) και (2.33) η (2.34) γράφεται:

$$g(t) = \sum_{k=1}^{\infty} \left\{ \frac{\Delta\omega}{\pi} \int_{-T/2}^{T/2} g(t) \cos \omega_k t dt \right\} \cos \omega_k t + \sum_{k=1}^{\infty} \left\{ \frac{\Delta\omega}{\pi} \int_{-T/2}^{T/2} g(t) \sin \omega_k t dt \right\} \sin \omega_k t \quad (2-35)$$

Όταν η περίοδος $T \rightarrow \infty$ το $\Delta\omega \rightarrow d\omega$ και το άθροισμα Σ γίνεται ολοκλήρωμα με όρια από $\omega=0$ μέχρι $\omega=\infty$.

$$g(t) = \int_{\omega=0}^{\infty} \frac{d\omega}{\pi} \left\{ \int_{-\infty}^{\infty} g(t) \cos \omega t dt \right\} \cos \omega t + \int_{\omega=0}^{\infty} \frac{d\omega}{\pi} \left\{ \int_{-\infty}^{\infty} g(t) \sin \omega t dt \right\} \sin \omega t \quad (2-36)$$

Θέτοντας,

$$A(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} g(t) \cos \omega t dt \quad (2-37)$$

$$B(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} g(t) \sin \omega t dt \quad (2-38)$$

Προκύπτει ότι

$$g(t) = 2 \int_0^{\infty} A(\omega) \cos \omega t d\omega + 2 \int_0^{\infty} B(\omega) \sin \omega t d\omega \quad (2-39)$$

Οι όροι $A(\omega)$ και $B(\omega)$ που ορίζονται από τις εξισώσεις (2.37) και (2.38) είναι οι συνιστώσες του μετασχηματισμού Fourier της $g(t)$ και η εξίσωση (2.39) είναι μια αναπαράσταση της $g(t)$ με ένα ολοκλήρωμα Fourier ή αντίστροφο μετασχηματισμό Fourier.

Οι σχέσεις (2.37)-(2.39) είναι δυνατόν να γραφούν σε μιγαδική μορφή, χρησιμοποιώντας τον τύπο του De Moivre:

$$e^{i\theta} = \cos\theta + i\sin\theta \quad (2-40)$$

Ορίζοντας τη συνάρτηση $G(\omega)$,

$$G(\omega) = A(\omega) - iB(\omega) \quad (2-41)$$

Και με αντικατάσταση των $A(\omega)$ και $B(\omega)$ από τις εξισώσεις (2.37) και (2.38) παίρνουμε:

$$G(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} g(t)(\cos\omega t - i\sin\omega t) dt = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} g(t)e^{-i\omega t} dt \quad (2-42)$$

Η συνάρτηση $X(\omega)$ ονομάζεται μετασχηματισμός της $x(t)$ κατά Fourier.

Αποδεικνύεται εύκολα ότι η σχέση (2.39) μπορεί να γραφεί με τη μορφή:

$$g(t) = \int_{-\infty}^{\infty} G(\omega)e^{i\omega t} d\omega \quad (2-43)$$

Σημειώνεται ότι για να υφίσταται το ολοκλήρωμα της σχέσης (2.42), η συνάρτηση $x(t)$ πρέπει να ικανοποιεί τη συνθήκη:

$$\int_{-\infty}^{\infty} |g(t)| dt < \infty \quad (2-44)$$

Συνεπώς η $g(t)$ να τείνει στο μηδέν όταν $t \rightarrow \infty$, ενώ αντίστοιχα για να ισχύει η σχέση (2.43) πρέπει η

$g(t)$ να είναι συνεχής και το ολοκλήρωμα $\int_{-\infty}^{\infty} \{g(t)\}^2 dt$ να είναι πεπερασμένο.

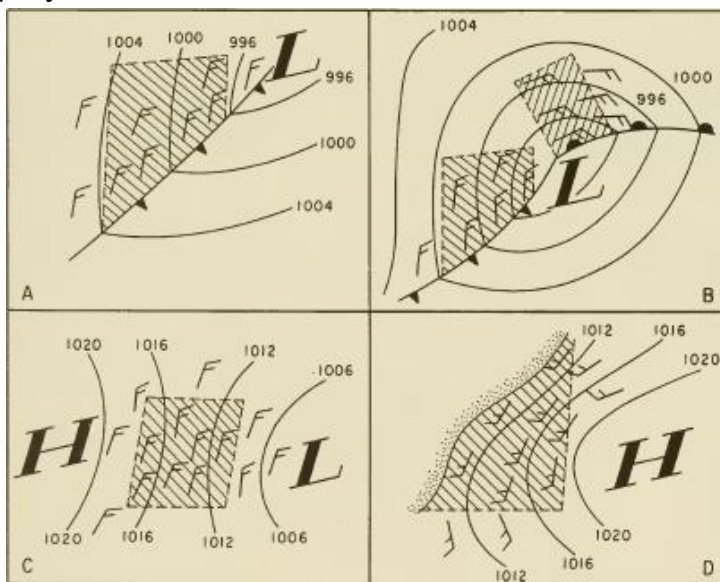
Οι συναρτήσεις $g(t)$ και $G(\omega)$ αποτελούν ένα ζεύγος μετασχηματισμού Fourier. Μάλιστα αν η $g(t)$ είναι πραγματική και άρτια, τότε και η $G(\omega)$ είναι πραγματική και άρτια.

2.5 Κρίσιμα μεγέθη απλοποιημένων μεθόδων περιγραφής του κυματικού κλίματος

Για τον υπολογισμό του ύψους, της περιόδου και της διεύθυνσης διάδοσης του κύματος, τα αριθμητικά μοντέλα που περιγράφονται παραπάνω καθιστούν τα πιο ακριβή και αξιόπιστα εργαλεία. Ωστόσο, συχνά υπάρχουν περιπτώσεις όπου ούτε ο διαθέσιμος χρόνος, ούτε τα οικονομοτεχνικά κριτήρια δικαιολογούν τη χρήση των πολύπλοκων αυτών μοντέλων. Σε αυτές τις περιπτώσεις, προκρίνεται η χρήση απλοποιημένων μεθόδων. Στο επόμενο κεφάλαιο, γίνεται εκτενής αναφορά σε μαθηματικές εξισώσεις και νομογραφήματα, τα οποία εξάγουν αποτελέσματα όσον αφορά τις τιμές του χαρακτηριστικού ύψους κύματος H_s και της περιόδου της φασματικής κορυφής T_s , συναρτήσει της ταχύτητας του ανέμου U , της διάρκειας πνοής του ανέμου t και του μήκους του αναπτύγματος πελάγους F ή παραγώγων αυτών. Παρακάτω, παρατίθεται μια σύντομη παρουσίαση των μεγεθών αυτών.

Οριοθετώντας το ανάπτυγμα πελάγους

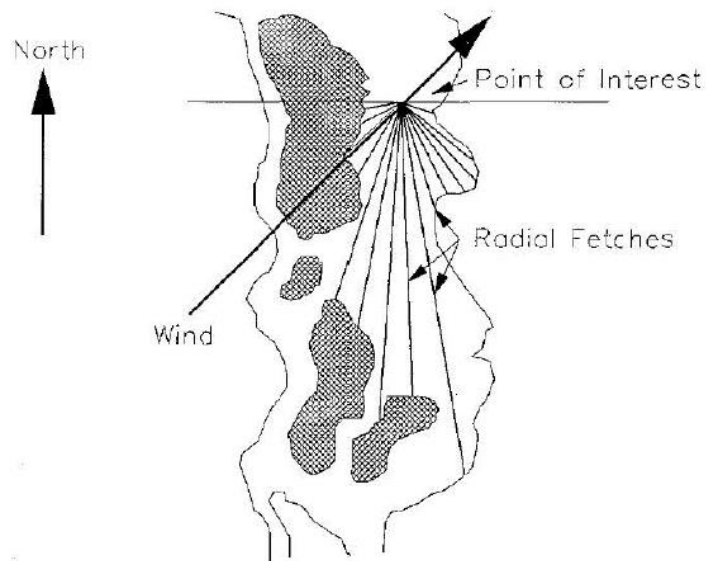
Ως ανάπτυγμα πελάγους ορίζεται η περιοχή στην οποία η ταχύτητα και η διεύθυνση διάδοσης του ανέμου επιδρούν στο κυματικό κλίμα κάτω από σχετικά αμετάβλητες τιμές. Η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων μειώνεται όταν οι διευθύνσεις διάδοσης του ανέμου αποκλίνουν πάνω από 15° , ενώ μειώνεται δραματικά όταν οι αποκλίσεις υπερβαίνουν τις 45° . Τα αποτελέσματα είναι ευαίσθητα σε αλλαγές της τάξης του 0.5 m/s στην ταχύτητα του ανέμου, όμως είναι αδύνατο σε οποιαδήποτε χωρική κλίμακα να εκτιμηθεί η ταχύτητα του ανέμου με τόση ακρίβεια. Πρακτικά, για την πρόγνωση κυματισμών, θεωρείται ικανοποιητική η παραδοχή σταθερής ταχύτητας του ανέμου, εάν οι αποκλίσεις δεν ξεπερνούν τα 2.5 m/s από τη μέση τιμή. Η ακτογραμμή που συναντάται από το σημείο ενδιαφέροντος προς τη διεύθυνση διάδοσης του ανέμου αποτελεί όριο για το ανάπτυγμα πελάγους. Άλλα όρια για το ανάπτυγμα πελάγους μπορεί να είναι είτε η καμπυλότητα, είτε η διασπορά των ισοβαρών, όπως φαίνεται στο (Σχ.2.12), είτε μια καθοριστική μεταβολή στη διεύθυνση διάδοσης του ανέμου. Οποιαδήποτε ασυνέχεια στο μετεωρολογικό προφίλ είναι ικανή να αποτελέσει όριο του αναπτύγματος πελάγους.



Σχήμα 2.12 Πιθανά όρια του αναπτύγματος πελάγους.
(Shields and Burdwell, 1970)

Απαραίτητη εκτίμηση για την πρόγνωση ενός κυματισμού είναι, επίσης, η διάρκεια πνοής του ανέμου. Τα αποτελέσματα, ιδιαίτερα για μικρές διάρκειες πνοής και μεγάλες ταχύτητες ανέμου, μπορεί να είναι ευαίσθητα σε διαφοροποιήσεις της τάξης μερικών λεπτών όσον αφορά τη διάρκεια. Καθώς τα δεδομένα από τα μετεωρολογικά δελτία πρόγνωσης μπορεί να έχουν χρονικό βήμα ακόμα και τις 6 ώρες, γίνεται απαραίτητη η χρήση σχέσεων παρεμβολής για τον καθορισμό της διάρκειας πνοής. Η γραμμική παρεμβολή θεωρείται επαρκής διαδικασία, εκτός βέβαια κι αν τα αποτελέσματα δίνουν προφανή λάθη. Συνίσταται ιδιαίτερη προσοχή, καθώς σε φαινόμενα μικρής διάρκειας, όπως οι καταιγίδες, η παρεμβολή μπορεί να οδηγήσει σε υπολογιστικό σφάλμα. Η διάρκεια πνοής του ανέμου είναι αυτή που καθορίζει τελικά το κρίσιμο μέγεθος στους υπολογισμούς ενός κυματικού κλίματος. Εάν είναι επαρκής ώστε να αναπτυχθεί εξολοκλήρου ένας κυματισμός ως προς την ενέργεια που μπορεί να μεταφέρει, τότε επικρατούν συνθήκες με περιορισμό ως προς το ανάπτυγμα πελάγους (Fetch-Limited), δηλαδή το κρίσιμο μέγεθος για τον προσδιορισμό του κυματικού κλίματος είναι το μήκος του αναπτύγματος πελάγους. Εάν η διάρκεια πνοής δεν είναι επαρκής, τότε επικρατούν συνθήκες με περιορισμό ως προς την διάρκεια πνοής του ανέμου (Duration-Limited), δηλαδή το κρίσιμο μέγεθος που επηρεάζει την ανάπτυξη ενός κυματισμού είναι η διάρκεια κατά την οποία στον κυματισμό αυτό μεταφέρεται ενέργεια, χωρίς όμως να εξαντλεί τις δυνατότητές του. Σε περίπτωση που υφίστανται όλες οι ευεργετικές συνθήκες, δηλαδή ένας κυματισμός δεν περιορίζεται από τα παραπάνω, τότε η θάλασσα χαρακτηρίζεται ως πλήρως ανεπτυγμένη (Fully Developed).

Η επίδραση του πλάτους του αναπτύγματος πελάγους στην οριοθέτηση της περιοχής γένεσης ενός κύματος συχνά παραλείπεται, όταν το πλάτος είναι σε παρόμοια τάξη μεγέθους με το μήκος του. Σε χερσαία ύδατα ή σε περίπλοκες θαλάσσιες γεωμορφολογίες (π.χ. ποτάμια, λίμνες, ταμειυτήρες, κόλπους, νησιωτικά συμπλέγματα), τα αναπτύγματα πελάγους οριοθετούνται από την γη που περιβάλλει το υδάτινο σώμα. Αναπτύγματα πελάγους με μεγάλο μήκος σε σχέση με το πλάτος τους δεν είναι καθόλου σπάνια. Κατά περίπτωση, θα πρέπει να γίνεται διαχωρισμός μεταξύ αναπτύγματος πελάγους ανοιχτής θάλασσας (Open Sea Fetch), περιορισμένου-ευρέος (Restricted-Wide Fetch) (Σχ.2.13) και περιορισμένου-στενού αναπτύγματος πελάγους (Restricted-Narrow Fetch).



Σχήμα 2.13 Στοιχεία γεωμετρίας περιορισμένου αναπτύγματος πελάγους.
(Leenknecht, Suwalski, & Sherlock, 1992)

3 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΔΙΦΗΣΗ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ ΕΞΙΣΩΣΕΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΚΥΜΑΤΙΚΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΣΤΑ ΒΑΘΙΑ ΝΕΡΑ

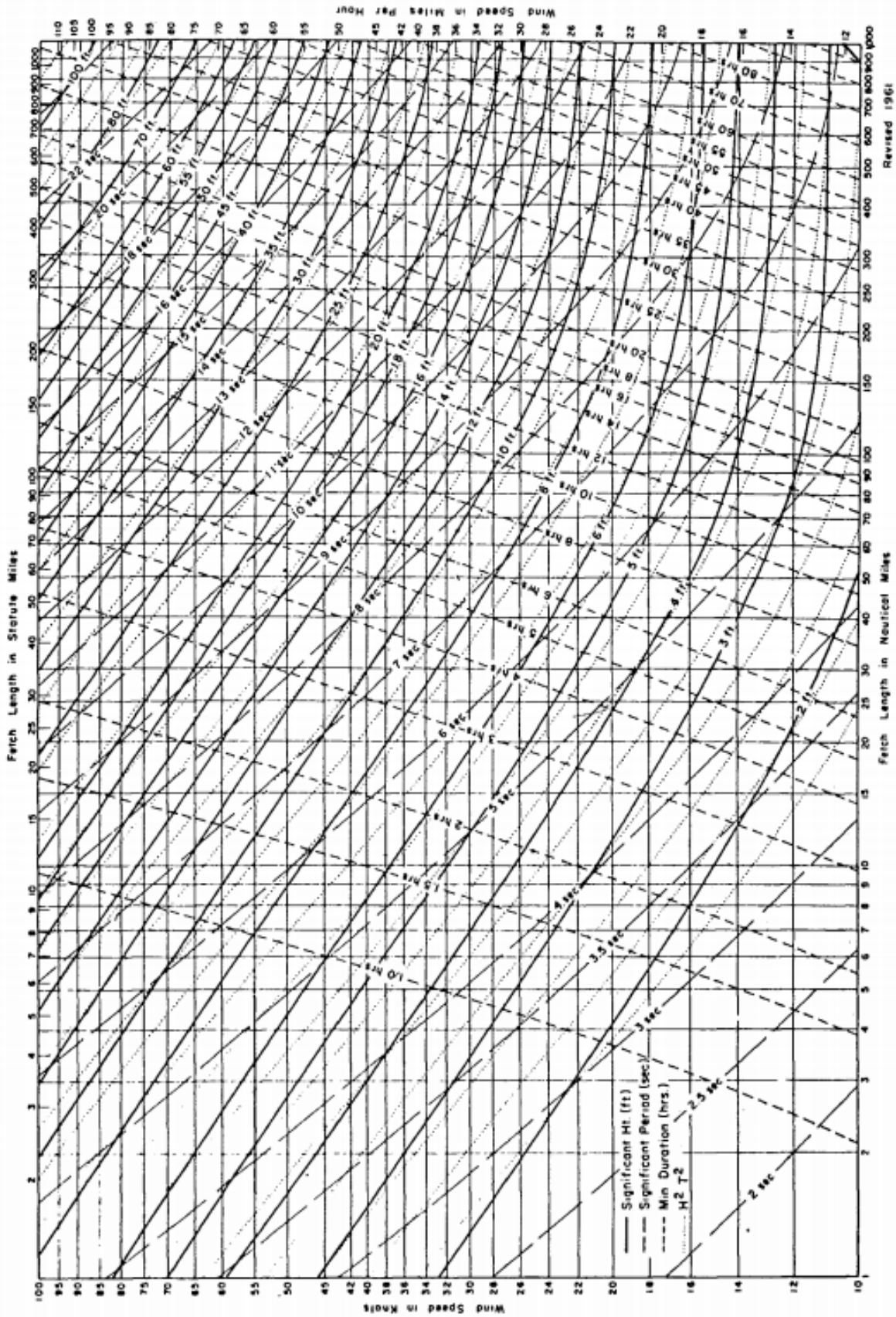
3.1 Εισαγωγή

Σκοπός αυτού του κεφαλαίου είναι να δημιουργηθεί και να παρουσιαστεί μια συλλογή με τις επικρατέστερες μεθόδους υπολογισμού κυματικών χαρακτηριστικών στα βαθιά νερά με χρήση μαθηματικών εξισώσεων. Για να πραγματοποιηθεί ο σκοπός αυτός, χρειάστηκε να γίνει ενδελεχής έρευνα στις βιβλιογραφικές αναφορές, καθώς έως και την παρούσα ΔΕ παρατηρείται μια ασαφής και συγγέουσα εικόνα, η οποία οφείλεται είτε στο γεγονός ότι λαμβάνουν χώρα πολλαπλές αναδημοσιεύσεις των ίδιων ερευνών με διορθωτικές αλλαγές, είτε στο ότι πολλοί ερευνητές έχουν προτείνει την δική τους μεθοδολογία και κατ' επέκταση μαθηματική εξίσωση που την περιγράφει. Βασική αιτία των παραπάνω είναι η έλλειψη επαρκών στατιστικών στοιχείων των χαρακτηριστικών μεγεθών που περιγράφουν ένα κυματικό κλίμα, από όπου προκύπτει η ανάγκη παραγωγής μαθηματικών εξισώσεων που να περιγράφουν την υφιστάμενη κατάσταση που έχει να αντιμετωπίσει ο κάθε ερευνητής. Η διακριτοποίηση, λοιπόν, των μεθόδων, όπως φαίνεται παρακάτω, γίνεται σε μια προσπάθεια να αποσαφηνιστεί η σύγχυση και να αναδειχθούν οι ιδιαιτερότητες κάθε μεθόδου ξεχωριστά.

3.2 Μέθοδος SMB (1958)

Η μέθοδος αυτή αρχικά αναπτύχθηκε από την ανάλυση χαρακτηριστικών μεγεθών ανέμων και κυμάτων. Συνδυάζοντας εμπειρικές και αριθμητικές διαδικασίες οι Sverdrup & Munk (1947) κατασκεύασαν ένα νομογράφημα πρόγνωσης κυματικού κλίματος, το οποίο έγινε το πρώτο εργαλείο προς ευρεία χρήση για τους μελετητές. Αναθεωρήθηκε από τον Bretschneider (1952, 1958, 1961) με την βοήθεια επιπλέον εμπειρικών δεδομένων. Τελικά, επικράτησε να αναφέρεται ως μέθοδος Sverdrup Munk Bretschneider ή αλλιώς μέθοδος SMB. (SPM, 1984)

Στο **Σχήμα 3.1** φαίνεται το νομογράφημα πρόγνωσης ανεμογενών κυματισμών στα βαθιά νερά συναρτήσει του μήκους του αναπτύγματος πελάγους, της ταχύτητας του ανέμου και της διάρκειας πνοής του ανέμου, όπως παρουσιάζεται στη μέθοδο SMB, αναθεωρημένο από τον Bretschneider το 1961. Στους κατακόρυφους άξονες αναγράφονται οι τιμές της ταχύτητας του ανέμου (αριστερά σε κόμβους, δεξιά σε μίλια ανά ώρα) και στους οριζόντιους άξονες το μήκος του αναπτύγματος πελάγους (πάνω σε μίλια, κάτω σε ναυτικά μίλια). Διαγωνίως, με διακεκομμένη γραμμή, αναγράφεται η διάρκεια πνοής του ανέμου σε ώρες. (Bretschneider, 1964)



Σχήμα 3.1 Νομογράφημα πρόγνωσης κύματος στα βαθιά νερά κατά τη μέθοδο S.M.B. (Bretschneider, 1964)

Υπολογισμός ενεργού αναπτύγματος πελάγους (Fetch effective - F_{eff})

Για τον υπολογισμό του αναπτύγματος πελάγους με τη μέθοδο SMB γίνεται χρήση του μεγέθους του ενεργού αναπτύγματος πελάγους ή αλλιώς Fetch effective. Ανά την επιθυμητή προς διερεύνηση διεύθυνση του ανέμου και κατ' επέκταση διεύθυνση διάδοσης του κύματος, συστήνεται η χάραξη ακτινών με κέντρο το σημείο ενδιαφέροντος και κατάληξη στο εγγύτερο όριο ακτογραμμής ανά 6° , σε ένα τόξο 90° συνολικά, δηλαδή $\pm 45^\circ$ με κέντρο την ευθεία που ταυτίζεται με την κύρια διεύθυνση, ώστε να δημιουργηθεί ένα σύνολο 15 ακτινών. Συνίσταται προσοχή στο ότι δεν χαράσσεται ακτίνα η οποία να ταυτίζεται με την κύρια διεύθυνση. Οι πλησιέστερες ακτίνες στην κύρια διεύθυνση απέχουν 3° από αυτήν εκάστη. (Saville, 1954)

Συνοπτικά:

$$a = 90^\circ$$

$$i = 15$$

$$\gamma = a/i = 6^\circ$$

όπου, a το τόξο της περιοχής αναπτύγματος με κέντρο την κύρια διεύθυνση
 i ο συνολικός αριθμός των ακτινών
 γ η γωνία μεταξύ διαδοχικών ακτινών αναπτύγματος

Το ενεργό ανάπτυγμα πελάγους υπολογίζεται ως:

$$F_{eff} = \frac{\sum f_i \cdot \cos \theta_i}{\sum \cos \theta_i} \quad (3-1)$$

όπου, f_i το μήκος της προβολής κάθε ακτίνας στην κύρια διεύθυνση [m]
 $\cos \theta_i$ το συνημίτονο της γωνίας μεταξύ κάθε ακτίνας και κύριας διεύθυνσης [$^\circ$]

Υπολογισμός χαρακτηριστικών μεγεθών κυματικού κλίματος ($H_s / T_s / t_{min}$)

Ο υπολογισμός των χαρακτηριστικών μεγεθών του κυματικού κλίματος ενός σημείου ενδιαφέροντος γίνεται υπό την παραδοχή σταθερής ταχύτητας ανέμου.

Οι παρακάτω μαθηματικές εξισώσεις είναι συναρτήσεις των εξής τεσσάρων μεταβλητών:

U [m/s], η ταχύτητα του ανέμου

t [s], η διάρκεια πνοής του ανέμου

g [m/s²], η επιτάχυνση της βαρύτητας ($\approx 9,81$)

$\Phi = \frac{g \cdot F_{eff}}{U^2}$, ο συντελεστής του αναπτύγματος πελάγους

Ο πρώτος απαραίτητος έλεγχος είναι αυτός της οριακής διάρκειας πνοής ανέμου (t_{min}), όπου:

$$t_{min} = 6.588 \cdot e^{\left[\sqrt{(0.0161 \cdot \ln(\Phi)^2 - 0.369 \cdot \ln(\Phi) + 2.2024)} + 0.8798 \cdot \ln(\Phi)\right]} \cdot \frac{U}{g} \quad (3-2)$$

Σε περίπτωση που $t < t_{min}$, με (t) την διάρκεια πνοής του σταθερού σε τιμή ανέμου, θα πρέπει να αναπροσαρμοστεί το μέγεθος του F_{eff} . Το F_{min} , πλέον, θα υπολογίζεται μέσω της εξίσωσης (3-2), έτσι ώστε στο αποτέλεσμα να προκύπτει η τιμή της διάρκειας πνοής ανέμου (t) που εξετάζεται.

Εφόσον γίνουν οι απαραίτητοι έλεγχοι, υπολογίζονται τα χαρακτηριστικά μεγέθη του κύματος.

Το χαρακτηριστικό ύψος κύματος H_s υπολογίζεται ως:

$$H_s = 0.283 \cdot \tanh(0.0125 \cdot \Phi^{0.42}) \cdot \frac{U^2}{g} \quad (3-3)$$

Η περίοδος κορυφής T_p υπολογίζεται ως:

$$T_p = 7.54 \cdot \tanh(0.077 \cdot \Phi^{0.25}) \cdot \frac{U}{g} \quad (3-4)$$

Οι μη γραμμικές εξισώσεις της μεθόδου SMB λαμβάνουν υπόψη όλες τις συνθήκες, επομένως δεν προβλέπονται ξεχωριστές σχέσεις για τον υπολογισμό των χαρακτηριστικών μεγεθών σε συνθήκες ανοιχτής θάλασσας. (Bishop & Donelan, 1989)

3.3 Μέθοδος Wilson (1966)

Πρόκειται, ουσιαστικά, για μια αναθεώρηση της μεθόδου SMB από τον Wilson (1965), η οποία δημοσιεύθηκε στην τεχνική αναφορά “Shore Protection, Planning and Design” (1966). Παρόλο που δεν χρησιμοποιήθηκε από τους Αμερικάνους μελετητές, θεωρείται αρκετά αξιόπιστη, τόσο μάλιστα που οι Ιάπωνες μελετητές την ακολουθούν ως πρότυπη από το 1971. (Goda, Revisiting Wilson’s formulas for simplified wind-wave prediction, 2003)

Υπολογισμός ενεργού αναπτύγματος πελάγους (Fetch effective - F_{eff})

Για τον υπολογισμό του αναπτύγματος πελάγους χρησιμοποιείται η ίδια διαδικασία που χρησιμοποιείται και στην μέθοδο SMB. Ανά την επιθυμητή προς διερεύνηση διεύθυνση του ανέμου και κατ’ επέκταση διεύθυνση διάδοσης του κύματος, συστήνεται η χάραξη ακτινών με κέντρο το σημείο ενδιαφέροντος και κατάληξη στο εγγύτερο όριο ακτογραμμής ανά 6° , σε ένα τόξο 90° συνολικά, δηλαδή $\pm 45^\circ$ με κέντρο την ευθεία που ταυτίζεται με την κύρια διεύθυνση, ώστε να δημιουργηθεί ένα σύνολο 15 ακτινών. Συνίσταται προσοχή στο ότι δεν χαράσσεται ακτίνα η οποία να ταυτίζεται με την κύρια διεύθυνση. Οι πλησιέστερες ακτίνες στην κύρια διεύθυνση απέχουν 3° από αυτήν εκάστη. (Saville, 1954)

Το ενεργό ανάπτυγμα πελάγους υπολογίζεται ως:

$$F_{eff} = \frac{\sum f_i \cdot \cos^2 \theta_i}{\sum \cos \theta_i} \quad (3-5)$$

όπου, f_i το μήκος της κάθε ακτίνας [m]

$\cos \theta_i$ το συνημίτονο της γωνίας μεταξύ κάθε ευθείας και κύριας διεύθυνσης [$^\circ$]

Υπολογισμός χαρακτηριστικών μεγεθών κυματικού κλίματος ($H_s / T_s / t_{min}$)

Ο υπολογισμός των χαρακτηριστικών μεγεθών του κυματικού κλίματος ενός σημείου ενδιαφέροντος γίνεται υπό την παραδοχή σταθερής ταχύτητας ανέμου.

Οι παρακάτω μαθηματικές εξισώσεις είναι συναρτήσεις των εξής τεσσάρων μεταβλητών:

U [m/s], η ταχύτητα του ανέμου

t [s], η διάρκεια πνοής του ανέμου

g [m/s²], η επιτάχυνση της βαρύτητας ($\approx 9,81$)

$\Phi = \frac{g \cdot F_{eff}}{U^2}$, ο συντελεστής του αναπτύγματος πελάγους

Ο πρώτος απαραίτητος έλεγχος είναι αυτός της οριακής διάρκειας πνοής ανέμου (t_{min}), όπου:

$$t_{min} = 43 \cdot \frac{F_{eff}^{0.73}}{U^{0.46} \cdot g^{0.27}} \quad (3-6)$$

Σε περίπτωση που $t < t_{min}$, με (t) την διάρκεια πνοής του σταθερού σε τιμή ανέμου, θα πρέπει να αναπροσαρμοστεί το μέγεθος του F_{eff} . Το F_{min} , πλέον, θα υπολογίζεται μέσω της εξίσωσης (3-6), έτσι ώστε στο αποτέλεσμα να προκύπτει η τιμή της διάρκειας πνοής ανέμου (t) που εξετάζεται.

Εφόσον γίνουν οι απαραίτητοι έλεγχοι, υπολογίζονται τα χαρακτηριστικά μεγέθη του κύματος.

Το χαρακτηριστικό ύψος κύματος H_s υπολογίζεται ως:

$$H_s = 0.3 \cdot (1 - (1 + 0.004 \cdot \Phi^{1/2})^{-2}) \cdot \frac{U^2}{g} \quad (3-7)$$

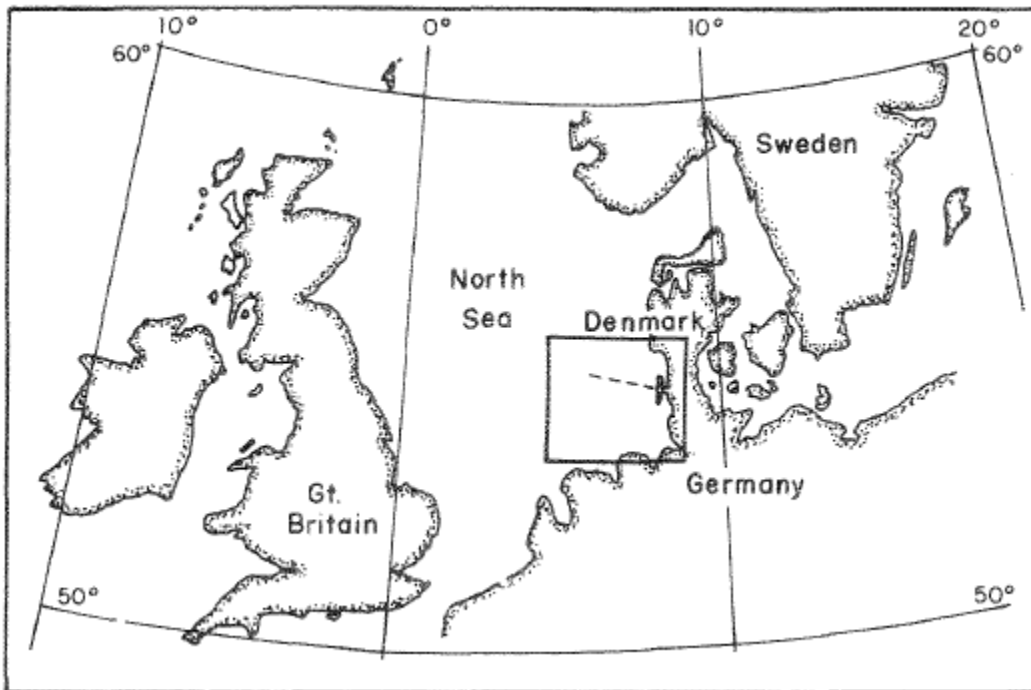
Η περίοδος κορυφής T_p υπολογίζεται ως:

$$T_p = 1.37 \cdot (1 - (1 + 0.008 \cdot \Phi^{1/3})^{-5}) \cdot \frac{U}{g} \quad (3-8)$$

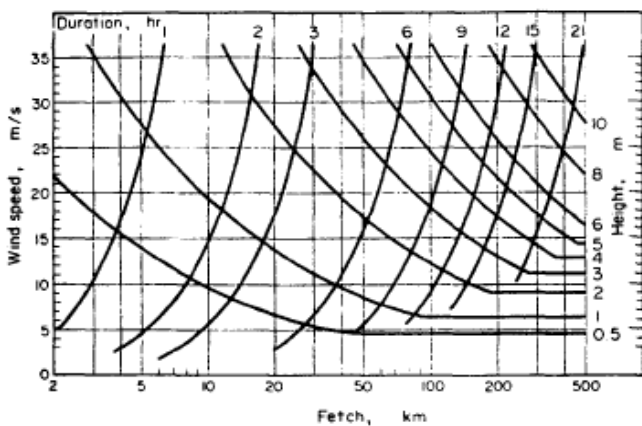
Όπως και για τις εξισώσεις SMB (Bishop & Donelan, 1989), έτσι και οι μη γραμμικές εξισώσεις της μεθόδου Wilson λαμβάνουν υπόψη όλες τις συνθήκες, επομένως δεν προβλέπονται ξεχωριστές σχέσεις για τον υπολογισμό των χαρακτηριστικών μεγεθών σε συνθήκες ανοιχτής θάλασσας.

3.4 Μέθοδος JONSWAP (1976)

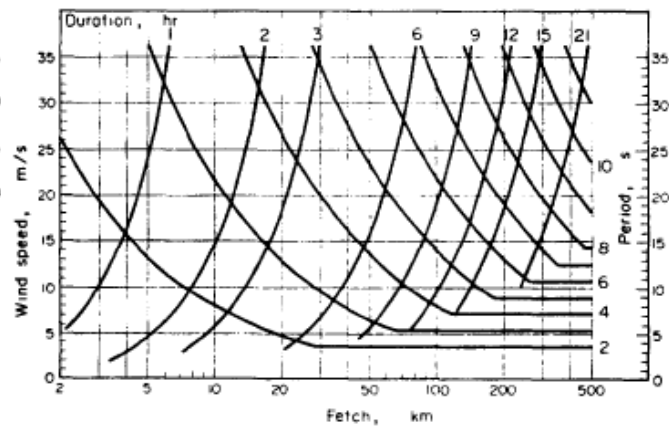
Τα αποτελέσματα από το Joint North Sea Wave Project ή αλλιώς JONSWAP, το οποίο πραγματοποιήθηκε στη Βόρεια Θάλασσα το 1969 (Εικ.3.1), χρησιμοποιήθηκαν για την κατάστρωση μαθηματικών εξισώσεων από τις οποίες υπολογίζονται το χαρακτηριστικό ύψος κύματος και η περίοδος επαναφοράς ενός κύματος. Τα αντίστοιχα νομογραφήματα φαίνονται στο Σχ. 3.2 και στο Σχ. 3.3. Η μέθοδος αναπτύχθηκε από τους Hasselmann et al. (1973, 1976) και προέκυψε μέσω διαστατικής ανάλυσης των πειραματικών αποτελεσμάτων που εξήχθησαν (Carter, 1982). Η μέθοδος χρησιμοποιείται ευρέως (Smith, 1991) και θεωρείται ικανοποιητική σε περίπτωση που υπάρχουν ελλιπή δεδομένα και περιορισμένος χρόνος (SPM, 1984).



Εικόνα 3.1 Περιοχή διεξαγωγής πειράματος JONSWAP. (Carter, 1982)



Σχήμα 3.2 Χαρακτηριστικό ύψος κύματος κατά JONSWAP. (Carter, 1982)



Σχήμα 3.3 Περίοδος επαναφοράς κατά JONSWAP. (Carter, 1982)

Υπολογισμός ενεργού αναπτύγματος πελάγους (Fetch effective - F_{eff})

Για τον υπολογισμό του αναπτύγματος πελάγους με τη μέθοδο JONSWAP γίνεται χρήση του ενεργού αναπτύγματος πελάγους ή αλλιώς Fetch effective. Ανά την επιθυμητή προς διερεύνηση διεύθυνση του ανέμου και κατ' επέκταση διεύθυνση διάδοσης του κύματος, συστήνεται η χάραξη ακτινών με κέντρο το σημείο ενδιαφέροντος και κατάληξη στο εγγύτερο όριο ακτογραμμής ανά 3° , σε ένα τόξο 24° συνολικά, δηλαδή $\pm 12^\circ$ με κέντρο την ευθεία που ταυτίζεται με την κύρια διεύθυνση, ώστε να δημιουργηθεί ένα σύνολο 9 ακτινών. (SPM, 1984)

Συνοπτικά:

$$a = 24^\circ$$

$$i = 9$$

$$\gamma = a/i = 3^\circ$$

όπου, a το τόξο της περιοχής αναπτύγματος με κέντρο την κύρια διεύθυνση

i το πλήθος των ακτινών

γ η γωνία μεταξύ διαδοχικών ακτινών αναπτύγματος

Το ενεργό ανάπτυγμα πελάγους υπολογίζεται ως:

$$F_{eff} = \frac{\sum f_i}{i} \quad (3-9)$$

όπου, f_i το μήκος της προβολής κάθε ακτίνας στην κύρια διεύθυνση [m]

i το πλήθος των ακτινών

Υπολογισμός χαρακτηριστικών μεγεθών κυματικού κλίματος ($H_s / T_s / t_{min}$)

Ο υπολογισμός των χαρακτηριστικών μεγεθών του κυματικού κλίματος ενός σημείου ενδιαφέροντος γίνεται υπό την παραδοχή σταθερής ταχύτητας ανέμου.

Οι παρακάτω μαθηματικές εξισώσεις είναι συναρτήσεις των εξής τεσσάρων μεταβλητών:

U [m/s], η ταχύτητα του ανέμου

t [s], η διάρκεια πνοής του ανέμου

g [m/s²], η επιτάχυνση της βαρύτητας ($\approx 9,81$)

$\Phi = \frac{g * F_{eff}}{U^2}$, ο συντελεστής του αναπτύγματος πελάγους

Ο πρώτος απαραίτητος έλεγχος είναι αυτός της οριακής διάρκειας πνοής ανέμου (t_{min}), όπου:

$$t_{min} = 68.8 \cdot \Phi^{2/3} \cdot \frac{U}{g} \quad (3-10)$$

Σε περίπτωση που $t < t_{min}$, με (t) την διάρκεια πνοής του σταθερού σε τιμή ανέμου, υφίστανται συνθήκες από τις οποίες το κρίσιμο μέγεθος για τον υπολογισμό των χαρακτηριστικών μεγεθών δεν είναι το ενεργό ανάπτυγμα πελάγους (F_{eff}) αλλά η διάρκεια πνοής του ανέμου (t).

Το χαρακτηριστικό ύψος κύματος H_s και περίοδος κορυφής T_p υπολογίζονται ως:

Fetch-Limited ($t \geq t_{min}$)

$$H_s = 0.0016 \cdot \Phi^{1/2} \cdot \frac{U^2}{g} \quad (3-11)$$

$$T_p = 0.2857 \cdot \Phi^{1/3} \cdot \frac{U}{g} \quad (3-13)$$

Duration-Limited ($t < t_{min}$)

$$H_s = 8.29 \cdot 10^{-5} \cdot \left(\frac{g \cdot t}{U}\right)^{5/7} \cdot \frac{U^2}{g} \quad (3-12)$$

$$T_p = 0.0676 \cdot \left(\frac{g \cdot t}{U}\right)^{3/7} \cdot \frac{U}{g} \quad (3-14)$$

Για την περίπτωση πλήρως αναπτυγμένης θάλασσας, όπου $\frac{g \cdot t}{U} \geq 7100$ και $\frac{g \cdot F}{U^2} \geq 22800$, οι εξισώσεις διαμορφώνονται ως εξής:

Fully Developed

$$H_s = 0.2433 \cdot \frac{U^2}{g} \quad (3-15)$$

$$T_p = 8.134 \cdot \frac{U}{g} \quad (3-16)$$

3.5 Μέθοδος CERC (1984)

Πρόκειται ουσιαστικά για μια τροποποίηση της μεθόδου JONSWAP, η οποία συντάχθηκε από τον Charles L. Vincent και εκδόθηκε από το Coastal Engineering Research Center τον Νοέμβριο του 1984, όπου γίνονται διορθώσεις στις μαθηματικές εξισώσεις, ώστε να ανταποκρίνονται καλύτερα στις Duration-Limited συνθήκες. Επίσης, σημειώνεται πως σε περιπτώσεις στενού αναπτύγματος πελάγους, δεν θα πρέπει να λογίζεται η μέθοδος του Seville (1952) για τον υπολογισμό του ενεργού αναπτύγματος πελάγους, αλλά είτε το fetch να θεωρείται μια ευθεία γραμμή από το σημείο ενδιαφέροντος προς το όριο της ακτογραμμής κατά την διεύθυνση διάδοσης του ανέμου, είτε να υπολογίζεται ως το μέσο ανάπτυγμα πελάγους ενός τόξου 22.5° με κέντρο τη διεύθυνση διάδοσης του ανέμου. (Vincent, 1984)

Για τον υπολογισμό των χαρακτηριστικών μεγεθών σε Fetch-Limited και σε Fully Developed συνθήκες, οι μαθηματικές εξισώσεις της μεθόδου JONSWAP δεν διαφοροποιούνται.

Για **Duration-Limited** συνθήκες οι μαθηματικές εξισώσεις έχουν ως εξής:

$$H_s = 8.51 \cdot 10^{-5} \cdot \left(\frac{g \cdot t}{U}\right)^{5/7} \cdot \frac{U^2}{g} \quad (3-17)$$

$$T_p = 7.02 \cdot 10^{-2} \cdot \left(\frac{g \cdot t}{U}\right)^{0.411} \cdot \frac{U}{g} \quad (3-18)$$

3.6 Μέθοδος Donelan (1985)

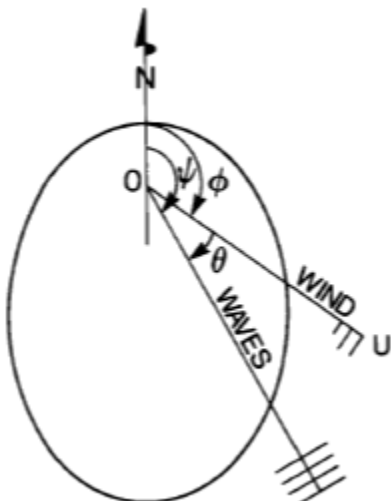
Η μέθοδος Donelan αναπτύχθηκε από τους Donelan et al. (1985) και διαφοροποιείται ως προς τη λογική για τον υπολογισμό του αναπτύγματος πελάγους. Αντικαθιστά την έννοια του ενεργού αναπτύγματος πελάγους (Fetch effective), η οποία επικρατούσε ολοκληρωτικά ως προς τον υπολογισμό του μήκους του αναπτύγματος πελάγους στα εμπειρικά μοντέλα, με μια νέα θεωρία, αυτή της επικρατέστερης διεύθυνσης διάδοσης κυματισμού (Dominant Wave Direction).

Μέχρι τότε, τα περισσότερα μοντέλα πρόγνωσης κυμάτων στα βαθιά νερά λειτουργούν με την υπόθεση ότι η διεύθυνση διάδοσης του κύματος συμπίπτει με την διεύθυνση διάδοσης του ανέμου ($\theta=0$, όπου θ η γωνία μεταξύ των διευθύνσεων διάδοσης ανέμου και κύματος). Όμως, υπήρξαν μετρήσεις, οι οποίες έδειξαν πως κυματισμοί με συχνότητες που πλησιάζουν την φασματική αιχμή, σε μη στάσιμες (non-stationary) (Hasselmann et al., 1980) ή Fetch-Limited (Donelan et al., 1985) συνθήκες, διαδίδονται σε γωνίες διαφορετικές από αυτές του ανέμου. Στη Λίμνη Οντάριο παρατηρήθηκαν τιμές του θ μέχρι και στις 50° (Donelan, 1980). Μάλιστα, ακόμα και αν η γωνία μεταξύ μιας ακτίνας του αναπτύγματος πελάγους και της διεύθυνσης του ανέμου είναι μεγάλη, αναμένεται η διεύθυνση διάδοσης του κύματος να τείνει να είναι αυτή των μεγαλύτερων ακτινών, εάν η απομειωμένη, λόγω της μεγάλης γωνίας θ , συνιστώσα της κυματογένεσης του ανέμου ($U \cdot \cos\theta$) ισοζυγίζεται από την τιμή του μεγάλου μήκους της ακτίνας του αναπτύγματος πελάγους στην οποία αυτός ο άνεμος επιδρά (Donelan, 1980). (Bishop & Donelan, 1989)

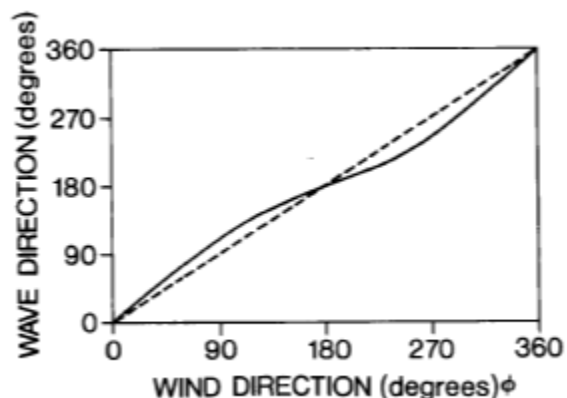
Η σχέση μεταξύ της επικρατέστερης διεύθυνσης διάδοσης του κύματος (ψ) και της διεύθυνσης διάδοσης του ανέμου (ϕ) στα βαθιά νερά μπορεί εύκολα να καθοριστεί σε οποιαδήποτε θέση (Σχ. 3.4). Για Fetch-Limited συνθήκες, οι Donelan et al. (1985) βρήκαν πως η σχέση μεταξύ των γωνιών ψ και ϕ για ένα σημείο με γνωστό ανάπτυγμα πελάγους μπορεί να περιγραφεί μεγιστοποιώντας τη σχέση:

$$\cos\theta \cdot F_{\psi}^{0.426} \quad (3-19)$$

Η συσχέτιση μεταξύ των γωνιών ψ και ϕ για ένα σημείο ενδιαφέροντος σε μια ελλειπτική λίμνη φαίνεται στο (Σχ. 3.5).



Σχήμα 3.4 Σκαρίφημα συσχέτισης γωνιών (ϕ , θ , ψ) μεθόδου Donelan. (Bishop & Donelan, 1989)



Σχήμα 3.5 Διάγραμμα συσχέτισης γωνιών διεύθυνσης διάδοσης κύματος και ανέμου σε ανάπτυγμα ελλειπτικής λίμνης. (Bishop & Donelan, 1989)

Η διαδικασία εύρεσης της συσχέτισης μεταξύ των γωνιών ψ και φ για οποιοδήποτε σημείο ενδιαφέροντος έχει ως εξής:

1. Για την εξεταζόμενη διεύθυνση διάδοσης του ανέμου, από το σημείο ενδιαφέροντος επεκτείνονται οι ακτίνες του αναπτύγματος πελάγους ως και το όριο της ακτογραμμής με βήμα γωνίας μεταξύ των ακτίνων μεταξύ 3° και 5° δημιουργώντας ένα τόξο συνολικά 30° ($\pm 15^\circ$).
2. Μετρώνται τα μήκη των ακτίνων του αναπτύγματος πελάγους.
3. Για κάθε ακτίνα υπολογίζεται η τιμή $\cos\theta \cdot F_\psi^{0.426}$.
4. Η μέγιστη τιμή της έκφρασης $\cos\theta \cdot F_\psi^{0.426}$ δίνει την επικρατέστερη διεύθυνση διάδοσης του κυματισμού και κατά συνέπεια το μήκος της ακτίνας του αναπτύγματος πελάγους, πάνω στο οποίο επιδρά περισσότερο η διεύθυνση του ανέμου που εξετάζεται.

Στην ίδια λογική, χρησιμοποιώντας μια μέση τιμή του fetch σε ένα τόξο 30° με κέντρο την διεύθυνση διάδοσης οποιουδήποτε ανέμου, συγκρίνοντας τους διαφορετικές διεύθυνσης αλλά σταθερής ταχύτητας ανέμους μεταξύ τους, είναι δυνατή η πρόγνωση του μεγαλύτερου ανερχόμενου κυματισμού συνολικά.

Η διαδικασία αυτή μπορεί εύκολα να προγραμματιστεί. Ο υπολογισμός της επικρατέστερης διεύθυνσης διάδοσης του κύματος, αν και δεν εγγυάται την πρόγνωση όλων των κυματισμών, είναι ιδιαίτερος σημαντικός στο σχεδιασμό κατασκευών στα βαθιά νερά, στην εκτίμηση ενός κυματικού κλίματος και λοιπές εφαρμογές. Στα ρηχά και μεταβατικά βάθη, η επίδραση της διάθλασης αναμένεται να αλλάξει τη διεύθυνση διάδοσης του κύματος ακόμα περισσότερο.

Η προσθήκη της πληροφορίας της συσχέτισης μεταξύ των γωνιών ψ και φ , βοήθησε στην βελτίωση της ευστοχίας της πρόγνωσης του χαρακτηριστικού ύψους κύματος H_s και της περιόδου επαναφοράς T_s στα βαθιά νερά.

Ο πρώτος απαραίτητος έλεγχος είναι αυτός της οριακής διάρκειας πνοής ανέμου (t_{min}), όπου:

$$t_{min} = 30.1 \cdot \left[\frac{g \cdot F_\psi}{(U \cdot \cos\theta)^2} \right]^{0.77} \cdot \frac{U \cdot \cos\theta}{g} \quad (3-20)$$

Σε περίπτωση που $t < t_{min}$, με (t) την διάρκεια πνοής του σταθερού σε τιμή ανέμου, θα πρέπει να αναπροσαρμοστεί το μέγεθος του F_ψ . Το $F_{\psi_{min}}$, πλέον, θα υπολογίζεται μέσω της εξίσωσης (3-20), έτσι ώστε στο αποτέλεσμα να προκύπτει η τιμή της διάρκειας πνοής ανέμου (t) που εξετάζεται. Τότε θα πρέπει να γίνεται ξανά ο έλεγχος της μέγιστης τιμής του $\cos\theta \cdot F_\psi^{0.426}$ σε σχέση με τις υπόλοιπες ακτίνες του αναπτύγματος πελάγους, ώστε να αναδειχθεί εκ νέου η επικρατέστερη διεύθυνση διάδοσης του κύματος σε Duration-Limited συνθήκες.

Εφόσον γίνουν οι απαραίτητοι έλεγχοι, υπολογίζονται τα χαρακτηριστικά μεγέθη του κύματος.

Το χαρακτηριστικό ύψος κύματος H_s υπολογίζεται ως:

$$H_s = 0.00366 \cdot \left[\frac{g \cdot F_\psi}{(U \cdot \cos \theta)^2} \right]^{0.38} \cdot \frac{(U \cdot \cos \theta)^2}{g} \quad (3-21)$$

Η περίοδος κορυφής T_p υπολογίζεται ως:

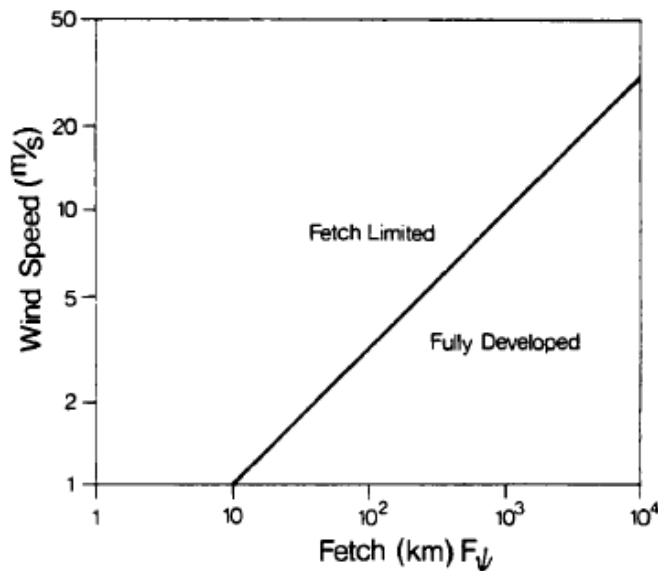
$$T_p = 0.542 \cdot \left[\frac{g \cdot F_\psi}{(U \cdot \cos \theta)^2} \right]^{0.23} \cdot \frac{U \cdot \cos \theta}{g} \quad (3-22)$$

όπου, F_ψ το μήκος της ακτίνας του αναπτύγματος πελάγους της επικρατέστερης διεύθυνσης διάδοσης του κύματος

Για την περίπτωση πλήρως αναπτυγμένης θάλασσας (Σχ. 3.6), όπου $\frac{g \cdot F_\psi}{(U \cdot \cos \theta)^2} \geq 9.47 \cdot 10^4$, οι εξισώσεις διαμορφώνονται ως εξής:

$$H_s = 0.285 \cdot \frac{U^2}{g} \quad (3-23)$$

$$T_p = 7.54 \cdot \frac{U}{g} \quad (3-24)$$



Σχήμα 3.6 Διάγραμμα διακριτοποίησης Fetch-Limited / Fully Developed συνθηκών μεθόδου Donelan. (Bishop & Donelan, 1989)

3.7 Μέθοδος ACES (1992)

Πρόκειται για το επιστέγασμα ολόκληρης της προσπάθειας της επιστημονικής κοινότητας της ακτομηχανικής να αναπτύξει ένα αξιόπιστο μοντέλο πρόγνωσης ενός κυματικού κλίματος μέχρι εκείνη τη χρονική στιγμή. Δανείζεται όσα στοιχεία δείχνουν να παράγουν αξιόλογα αποτελέσματα από όλες τις μεθόδους που έχουν προηγηθεί, με στόχο την δημιουργία μιας απλοποιημένης, αλλά ταυτόχρονα βέλτιστης μεθόδου πρόγνωσης των χαρακτηριστικών μεγεθών του κύματος. Η μέθοδος ACES (Automated Coastal Engineering System) παρουσιάζεται από το Coastal Engineering Research Center τον Σεπτέμβριο του 1992, όπου συνδυάζοντας την λογική υπολογισμού του αναπτύγματος πελάγους της μεθόδου Donelan (Donelan, 1985), την λογική υπολογισμού των χαρακτηριστικών μεγεθών της μεθόδου JONSWAP για ανοιχτή θάλασσα (Vincent, 1984) και την λογική υπολογισμού των χαρακτηριστικών μεγεθών του μοντέλου NARFET (Smith, 1991) για περιορισμένα αναπτύγματα πελάγους, δημιουργεί ένα σύμπλεγμα μεθοδολογιών και μαθηματικών εξισώσεων. (Leenknecht, Szuwalski, & Sherlock, 1992)

Τρόποι υπολογισμού του αναπτύγματος πελάγους (Fetch)

Γίνεται σαφής διαχωρισμός μεταξύ συνθηκών ανοιχτής θάλασσας και συνθηκών σύνθετης γεωμετρίας αναπτύγματος πελάγους.

➤ Ανοιχτή θάλασσα (Open Water Fetches)

Θεωρείται πως σε συνθήκες ανοιχτής θάλασσας η γένεση του κύματος εξαρτάται από την ένταση των μεγεθών του μετεωρολογικού καθεστώτος, ενώ το πλάτος του αναπτύγματος πελάγους έχει την ίδια τάξη μεγέθους με το αντίστοιχο μήκος του. Οι απλοποιημένες μέθοδοι εκτίμησης της κυματογένεσης σε ανοιχτή θάλασσα προκρίνουν ως σημαντικό το μήκος του αναπτύγματος πελάγους (αλλά όχι το πλάτος ή το σχήμα). Η ανάπτυξη των κυμάτων θεωρείται ότι συμβαίνει κατά μήκος του αναπτύγματος πελάγους κατά την κατεύθυνση του ανέμου.

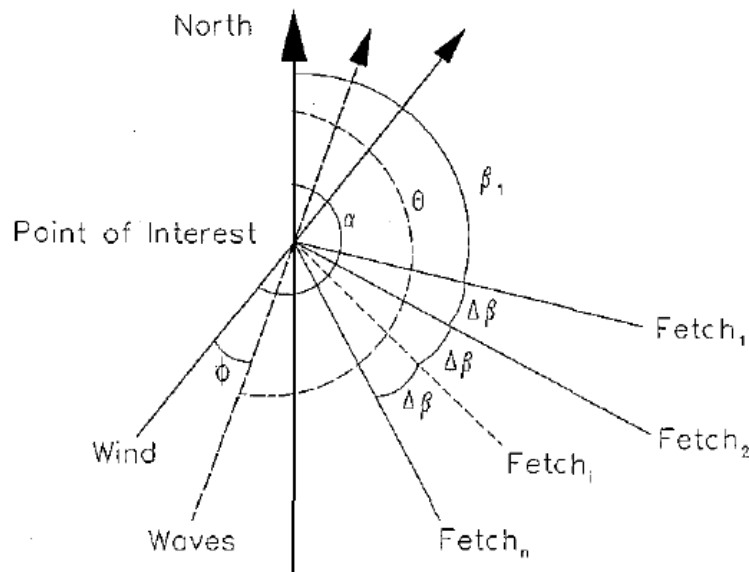
➤ Περιορισμένα αναπτύγματα (Restricted Fetches)

Όσο πιο περιορισμένη ή σύνθετη είναι η γεωμετρία της περιοχής ενδιαφέροντος, τόσο πιο μεγάλη η επίδραση στην ανάπτυξη των ανεμογενών κυματισμών. Η συγκεκριμένη μεθοδολογία βασίζεται στην λογική που χρησιμοποίησε ο Donelan (1980) και δανείστηκε η Smith (1991) σχετικά με την διεύθυνση διάδοσης του επικρατέστερου κυματισμού. Στην συγκεκριμένη κατηγορία υπεισέρχεται η περίπτωση του περιορισμένου-στενού αναπτύγματος πελάγους (Restricted-Narrow Fetch), όπως και του περιορισμένου-ευρέος αναπτύγματος πελάγους (Restricted-Wide Fetch) όσον αφορά τις διαδικασίες υπολογισμού.

Ερευνάται η επικρατέστερη διεύθυνση διάδοσης των κυμάτων (θ) μέσω της μεγιστοποίησης της σχέσης:

$$F_{\varphi}^{0.28} \cdot (\cos \varphi)^{0.44} \quad (3-25)$$

όπου, φ η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ της κάθε ακτίνας του αναπτύγματος πελάγους και της διεύθυνσης διάδοσης του ανέμου (Σχ. 3.7).



Σχήμα 3.7 Συσχετίσεις μεταξύ γωνιών για την μέθοδο ACES.
(Leenknecht, Szuwalski, & Sherlock, 1992)

Η διαδικασία εύρεσης της συσχέτισης μεταξύ των γωνιών της διεύθυνσης διάδοσης του ανέμου ψ και της διεύθυνσης διάδοσης του κύματος θ , όπου $|\psi - \theta| = \varphi$ για οποιοδήποτε σημείο ενδιαφέροντος έχει ως εξής:

1. Για την εξεταζόμενη διεύθυνση διάδοσης του ανέμου, από το σημείο ενδιαφέροντος επεκτείνονται οι ακτίνες του αναπτύγματος πελάγους ως και το όριο της ακτογραμμής, με βήμα γωνίας μεταξύ των ακτινών ίσο με 1° , δημιουργώντας ένα τόξο συνολικά 15° ($\pm 7.5^\circ$).
2. Μετρούνται τα μήκη των ακτινών του αναπτύγματος πελάγους.
3. Για κάθε ακτίνα υπολογίζεται η τιμή $F_{\varphi}^{0.28} \cdot (\cos \varphi)^{0.44}$.
4. Η μέγιστη τιμή της έκφρασης $F_{\varphi}^{0.28} \cdot (\cos \varphi)^{0.44}$ δίνει την επικρατέστερη διεύθυνση διάδοσης του κυματισμού και κατά συνέπεια το μήκος της ακτίνας του αναπτύγματος πελάγους, πάνω στο οποίο επιδρά περισσότερο η διεύθυνση του ανέμου που εξετάζεται.

Υπολογισμός χαρακτηριστικών μεγεθών κυματικού κλίματος ($H_s / T_s / t_{min}$)

Ο πρώτος απαραίτητος έλεγχος είναι αυτός της οριακής διάρκειας πνοής ανέμου (t_{min}), όπου:

Σε ανοιχτή θάλασσα (Open Water)

$$t_{min} = 68.8 \cdot \frac{F^{2/3}}{g^{1/3} \cdot U^{1/3}} \quad (3-26)$$

Σε σύνθετη γεωμετρία (Restricted Fetches)

$$t_{min} = 51.09 \cdot \frac{F^{0.72}}{g^{0.28} \cdot U^{0.44}} \quad (3-27)$$

Το χαρακτηριστικό ύψος κύματος H_s και περίοδος κορυφής T_p υπολογίζονται ως:

**Σε ανοιχτή θάλασσα
(Open Water)**

$$H_s = 8.51 \cdot 10^{-5} \cdot \frac{U^2}{g} \cdot \left(\frac{g \cdot t}{U}\right)^{5/7} \quad (3-28)$$

Duration-Limited

$$(t < t_{min})$$

$$T_p = 0.0702 \cdot \frac{U}{g} \cdot \left(\frac{g \cdot t}{U}\right)^{0.411} \quad (3-30)$$

**Σε σύνθετη γεωμετρία
(Restricted Fetches)**

$$H_s = 10.3 \cdot 10^{-5} \cdot \frac{U^2}{g} \cdot \left(\frac{g \cdot t}{U}\right)^{0.69} \quad (3-29)$$

$$T_p = 0.082 \cdot \frac{U}{g} \cdot \left(\frac{g \cdot t}{U}\right)^{0.39} \quad (3-31)$$

----ή----

$$H_s = 0.0016 \cdot \frac{U^2}{g} \cdot \left(\frac{g \cdot F}{U^2}\right)^{1/2} \quad (3-32)$$

Fetch-Limited

$$(t \geq t_{min})$$

$$T_p = 0.2857 \cdot \frac{U}{g} \cdot \left(\frac{g \cdot F}{U^2}\right)^{1/3} \quad (3-34)$$

$$H_s = 0.0015 \cdot \frac{U^2}{g} \cdot \left(\frac{g \cdot F}{U^2}\right)^{1/2} \quad (3-33)$$

$$T_p = 0.3704 \cdot \frac{U}{g} \cdot \left(\frac{g \cdot F}{U^2}\right)^{0.28} \quad (3-35)$$

Για τον έλεγχο **πλήρους ανεπτυγμένης θάλασσας (Fully Developed)** ισχύουν καθολικά τα εξής:

$$H_{fd} = 0.2433 \cdot \frac{U^2}{g} \quad (3-36)$$

$$T_{fd} = 8.134 \cdot \frac{U}{g} \quad (3-37)$$

όπου δεν θα πρέπει να παραβλέπεται ο έλεγχος:

$$H = \min(H_s, H_{fd}) \quad (3-38)$$

$$T = \min(T_s, T_{fd}) \quad (3-39)$$

3.8 Μέθοδος CEM (2002)

Η μέθοδος CEM είναι μια πρόταση βελτίωσης της μεθόδου JONSWAP και περιγράφεται στο Coastal Engineering Manual (CEM) το οποίο εκδόθηκε το 2002. Πρόκειται για έναν συνδυασμό της μεθόδου JONSWAP για την ανάπτυξη των κυματισμών περί της συχνότητας κορυφής, της συχνότητας για πλήρως αναπτυγμένες θάλασσες και της υπόθεσης ότι μια τοπική ομάδα κυματισμών διαδίδεται με ταχύτητα περίπου ίση με το 85% της αντίστοιχης ταχύτητας ομάδας των αρμονικών περί της κορυφής του φάσματος.

Υπολογισμός ενεργού αναπτύγματος πελάγους (*Fetch effective* - F_{eff})

Για τον υπολογισμό του αναπτύγματος πελάγους χρησιμοποιείται το ενεργό ανάπτυγμα πελάγους ή αλλιώς *Fetch effective* (F_{eff}). Ανά την επιθυμητή προς διερεύνηση διεύθυνση του ανέμου και κατ' επέκταση διεύθυνση διάδοσης του κύματος, συστήνεται η χάραξη ακτινών με κέντρο το σημείο ενδιαφέροντος και κατάληξη στο εγγύτερο όριο ακτογραμμής ανά 1° , σε ένα τόξο 30° συνολικά, δηλαδή $\pm 15^\circ$ με κέντρο την ευθεία που ταυτίζεται με την κύρια διεύθυνση, ώστε να δημιουργηθεί ένα σύνολο 31 ακτινών.

Το ενεργό ανάπτυγμα πελάγους υπολογίζεται ως:

$$F_{eff} = \frac{\sum f_i}{i} \quad (3-40)$$

όπου, f_i το μήκος της κάθε ακτίνας [m]
 i το πλήθος των ακτινών

Υπολογισμός χαρακτηριστικών μεγεθών κυματικού κλίματος ($H_s / T_s / t_{min}$)

Ο υπολογισμός των χαρακτηριστικών μεγεθών του κυματικού κλίματος ενός σημείου ενδιαφέροντος γίνεται υπό την παραδοχή σταθερής ταχύτητας ανέμου.

Οι παρακάτω μαθηματικές εξισώσεις είναι συναρτήσεις των εξής τεσσάρων μεταβλητών:

t [s], η διάρκεια πνοής του ανέμου

g [m/s^2], η επιτάχυνση της βαρύτητας ($\approx 9,81$)

U [m/s], η ταχύτητα του ανέμου

u_* [m/s], η διατμητική ταχύτητα του ανέμου επί της επιφάνειας του νερού (friction velocity)

$$\text{όπου, } C_d = \frac{u_*^2}{U^2}$$

$$C_d = 0.001 \cdot (1.1 + 0.035 \cdot U)$$

Ο πρώτος απαραίτητος έλεγχος είναι αυτός της οριακής διάρκειας πνοής ανέμου (t_{min}), όπου:

$$t_{min} = 77.23 \cdot \frac{F_{eff}^{0.67}}{U^{0.34} \cdot g^{0.33}} \quad (3-41)$$

Σε περίπτωση που $t < t_{min}$, με (t) την διάρκεια πνοής του σταθερού σε τιμή ανέμου, θα πρέπει να αναπροσαρμοστεί το μέγεθος του F_{eff} . Το F_{min} , πλέον, θα υπολογίζεται ως εξής:

$$F_{min} = 5.23 \cdot 10^{-3} \cdot \left(\frac{g \cdot t}{u_*} \right)^{3/2} \cdot \frac{u_*^2}{g} \quad (3-42)$$

Εφόσον γίνουν οι απαραίτητοι έλεγχοι, υπολογίζονται τα χαρακτηριστικά μεγέθη του κύματος.

Το χαρακτηριστικό ύψος κύματος H_s υπολογίζεται ως:

$$H_s = 4.13 \cdot 10^{-2} \cdot \left(\frac{g \cdot F_{eff}}{u_*^2} \right)^{1/2} \cdot \frac{u_*^2}{g} \quad (3-43)$$

Η περίοδος κορυφής T_p υπολογίζεται ως:

$$T_p = 0.751 \cdot \left(\frac{g \cdot F_{eff}}{u_*^2} \right)^{1/3} \cdot \frac{u_*}{g} \quad (3-44)$$

Για την περίπτωση πλήρως αναπτυγμένης θάλασσας, οι εξισώσεις διαμορφώνονται ως εξής:

$$H_s = 211.5 \cdot \frac{u_*^2}{g} \quad (3-45)$$

$$T_p = 239.8 \cdot \frac{u_*}{g} \quad (3-46)$$

4 ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΜΙΚΕ21|sw ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΚΥΜΑΤΟΓΕΝΕΣΗΣ

4.1 Εισαγωγή

Μοντέλο κυματικής διάδοσης – MIKE21|sw

Για να μεταφερθούν τα κυματικά δεδομένα από τα βαθιά στα ενδιάμεσα νερά, θα χρησιμοποιηθεί το κυματικό μοντέλο MIKE21 Spectral Waves το οποίο συνιστά ένα επιμέρους μοντέλο του γενικού υπολογιστικού πακέτου MIKE21 (που αναπτύχθηκε από το Danish Hydraulic Institute). Το εν λόγω μοντέλο είναι ένα εργαλείο για την μελέτη της κυματογένεσης και κυματικής διάδοσης και κυματικών μετασχηματισμών από τα βαθιά στα ενδιάμεσα και ρηχά νερά.

4.2 Γενικά στοιχεία του μοντέλου

Το MIKE21|sw είναι ένα τρίτης γενιάς φασματικό μοντέλο κυμάτων και ανέμων, το οποίο προσομοιώνει την ανάπτυξη, την απόσβεση και τον μετασχηματισμό των ανεμογενών κυμάτων και της αποθάλασσας (swell) στη ζώνη των βαθέων νερών και τις παράκτιες περιοχές. Το μοντέλο περιλαμβάνει δυο διαφορετικά είδη σύνθεσης:

- Πλήρως φασματική ανάπτυξη
- Κατευθυντική ανάλυση μεμονωμένων παραμέτρων

Η πλήρως φασματική ανάπτυξη βασίζεται στην εξίσωσης διατήρησης της κυματικής δράσης όπως περιγράφεται από τους Kompen (1994) και Young (1999). Η κατευθυντική ανάλυση μεμονωμένων παραμέτρων βασίζεται στην παραμετροποίηση της εξίσωσης διατήρησης της κυματικής δράσης. Η παραμετροποίηση αυτή πραγματοποιείται στον χώρο των συχνοτήτων εισάγοντας τη μηδενική και την αρχική στιγμή του φάσματος της κυματικής ενέργειας.

Τα φαινόμενα που υπεισέρχονται στους υπολογισμούς του MIKE21|sw είναι:

- Η ανάπτυξη των κυματισμών από τη δράση των ανέμων
- Η μη γραμμική αλληλεπίδραση των κυμάτων
- Η διασπορά λόγω της θραύσης στην ανοιχτή θάλασσα
- Η διασπορά λόγω της τριβής στον πυθμένα
- Η διασπορά λόγω της θραύσης των κυματισμών
- Η διάθλαση και ρήχωση
- Η αλληλεπίδραση κύματος και ρεύματος
- Η επίδραση του χρονικά μεταβαλλόμενου βάθους του νερού
- Η επίδραση του πάγου στη περιοχή των κυμάτων

Το MIKE21|sw χρησιμοποιείται για την εκτίμηση του κυματικού κλίματος στη περιοχή των βαθέων υδάτων και στις παράκτιες περιοχές σε hindcast και forecast προσομοιώσεις. Το μοντέλο αυτό χρησιμοποιείται κυρίως στον σχεδιασμό έργων ανοικτής θαλάσσης καθώς και παράκτιων και λιμενικών έργων όπου η ακριβής εκτίμηση των κυματικών φορτίων αποτελεί υψίστης σημασίας για τον ασφαλή και οικονομικό σχεδιασμό αυτών των κατασκευών. Επιπλέον τα αποτελέσματα του χρησιμοποιούνται από άλλα μοντέλα του MIKE21 για τον υπολογισμό της παράκτιας στερεομεταφοράς, η οποία καθορίζεται κυρίως από τις κυματικές συνθήκες και τα κυματογενή ρεύματα.

Τα βασικά στοιχεία που προκύπτουν από το μοντέλο είναι ολοκληρωμένες κυματικές παράμετροι, όπως το σημαντικό ύψος κύματος (H_{m0}), η περίοδος κορυφής (T_p), η μέση περίοδος (T_{01}), η μέγιστη και μέση κατεύθυνση των κυματισμών (θ_p και θ_m αντίστοιχα), η κατευθυντική τυπική απόκλιση (σ) καθώς επίσης και οι τάσεις ακτινοβολίας (S_{xx} , S_{xy} , S_{yy}) οι οποίες συμβάλλουν στη δημιουργία των κυματογενών ρευμάτων.

4.3 Θεωρητικές εξισώσεις του μοντέλου

Στο μοντέλο MIKE21|sw, τα ανεμογενή κύματα αναπαρίστανται από τη φασματική πυκνότητα της κυματικής δράσης $N(\sigma, \theta)$. Ως ανεξάρτητες παράμετροι έχουν επιλεγθεί η σχετική γωνιακή συχνότητα ($\sigma = 2\pi f$) και η διεύθυνση του προσπίπτοντος κυματισμού θ . Η σχέση μεταξύ της σχετικής γωνιακής συχνότητας και της απόλυτης γωνιακής συχνότητας ω δίνεται από τη γραμμική σχέση διασποράς:

$$\sigma = \sqrt{gk \tanh(kd)} = \omega - \bar{k} \cdot \bar{U} \quad (4-1)$$

όπου, g είναι η επιτάχυνση της βαρύτητας

d το βάθος του νερού

\bar{U} το διάνυσμα της ταχύτητας του ρεύματος

\bar{k} το διάνυσμα του κύματος με μέτρο k και διεύθυνση θ .

Η πυκνότητα δράσης $N(\sigma, \theta)$ σχετίζεται με την πυκνότητα της ενέργειας $E(\sigma, \theta)$ μέσω της σχέσης:

$$N = \frac{E}{\sigma} \quad (4-2)$$

Πλήρως Φασματική ανάπτυξη

Η εξίσωση που διέπει το MIKE21|sw είναι η εξίσωση ισορροπίας της κυματικής δράσης σε καρτεσιανές ή σφαιρικές συντεταγμένες. Στις οριζόντιες καρτεσιανές συντεταγμένες, η εξίσωση διατήρησης της κυματικής δράσης είναι η εξής:

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{v}N) = \frac{S}{\sigma} \quad (4-3)$$

όπου, $N = (x, \sigma, \theta, t)$ είναι η πυκνότητα δράσης

t ο χρόνος

$\bar{x} = (x, y)$ είναι οι καρτεσιανές συντεταγμένες

$\bar{v} = (c_x, c_y, c_\sigma, c_\theta)$ είναι η ταχύτητα διάδοσης ομάδας κυμάτων σε τεσσάρων διαστάσεων χώρο

S η πηγή για την εξίσωση ισορροπίας της κυματικής ενέργειας

∇ ο τεσσάρων διαστάσεων διαφορικός τελεστής στο χώρο \bar{x}, σ, θ

Οι συνιστώσες των ταχυτήτων διάδοσης δίνονται από τις γραμμικές κινηματικές σχέσεις:

$$(c_x, c_y) = \frac{d\bar{x}}{dt} = \bar{c}_g + \bar{U} = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{2kd}{\sinh(2kd)} \right) \frac{\sigma}{k} + \bar{U} \quad (4-4)$$

$$c_\sigma = \frac{d\sigma}{dt} = \frac{\partial \sigma}{\partial d} \cdot \left[\frac{\partial d}{\partial t} + \bar{U} \cdot \nabla_{\bar{x}} d \right] - c_g \bar{k} \cdot \frac{\partial \bar{U}}{\partial s} \quad (4-5)$$

$$c_\theta = \frac{d\theta}{dt} = -\frac{1}{k} \left[\frac{\partial \sigma}{\partial d} \frac{\partial d}{\partial m} + \bar{k} \cdot \frac{\partial \bar{U}}{\partial m} \right] \quad (4-6)$$

όπου, s είναι η χωρική συντεταγμένη της διεύθυνσης θ του κυματισμού

m είναι η συντεταγμένη κάθετη στο s

$\nabla_{\bar{x}}$ είναι ο δισδιάστατος διαφορικός τελεστής στο χώρο \bar{x}

Εξίσωση πηγής

Ο όρος της πηγής στο β' μέλος της εξίσωσης διατήρησης της κυματικής δράσης δίνεται από τη σχέση:

$$S = S_{in} + S_{nl} + S_{ds} + S_{bot} + S_{surf} \quad (4-7)$$

όπου, S_{in} η στιγμιαία μετάδοση της ενέργειας του ανέμου για τη γένεση των κυμάτων

S_{nl} η μεταφορά ενέργειας λόγω της μη γραμμικής αλληλεπίδρασης των κυμάτων

S_{ds} η διασπορά της κυματικής ενέργειας λόγω θραύσης της κορυφής των κυμάτων στα βαθιά

S_{bot} η διασπορά λόγω της τριβής στο πυθμένα

S_{surf} η διασπορά της κυματικής ενέργειας λόγω της θραύσης των κυματισμών

Κατευθυντική ανάλυση μεμονωμένων παραμέτρων

Η παραμετροποίηση της εξίσωσης διατήρησης της κυματικής δράσης οδηγεί στις ακόλουθες εξισώσεις:

$$\frac{\partial(m_0)}{\partial t} + \frac{\partial(c_x m_0)}{\partial x} + \frac{\partial(c_y m_0)}{\partial y} + \frac{\partial(c_\theta m_0)}{\partial \theta} = T_0 \quad (4-8)$$

$$\frac{\partial(m_1)}{\partial t} + \frac{\partial(c_x m_1)}{\partial x} + \frac{\partial(c_y m_1)}{\partial y} + \frac{\partial(c_\theta m_1)}{\partial \theta} = T_1 \quad (4-9)$$

όπου, $m_0(x, y, \theta)$ και $m_1(x, y, \theta)$ είναι η μηδενική και η αρχική στιγμή του φάσματος δράσης $N(x, y, \sigma, \theta)$
 $T_0(x, y, \theta)$ και $T_1(x, y, \theta)$ είναι οι συναρτήσεις πηγής στο φάσμα δράσης

Τα στιγμιότυπα $m_n(x, y, \theta)$ ορίζονται με τη σχέση:

$$m_n(x, y, \theta) = \int_0^\infty \omega^n N(x, y, \omega, \theta) d\omega \quad (4-10)$$

Οι συναρτήσεις πηγής T_0 και T_1 λαμβάνουν υπόψιν την επίδραση της δημιουργίας των τοπικών ανέμων (για την λειτουργία stationary, ή αλλιώς στάσιμων, κυμάτων) και της διασποράς της ενέργειας λόγω της τριβής στον πυθμένα και της θραύσης των κυματισμών. Επιπρόσθετα περιλαμβάνεται το αποτέλεσμα της αλληλεπίδρασης των κυμάτων-ρευμάτων. Οι συναρτήσεις πηγής για την τοπική δημιουργία ανέμων προέρχονται από την εμπειρικές σχέσεις εξέλιξης Johnson (1998).

4.4 Βασικές παράμετροι εισόδου

Για την καλύτερη δυνατή προσομοίωση και την ορθότητα των αποτελεσμάτων σε σχέση με τις πραγματικές συνθήκες είναι απαραίτητο να δοθεί ιδιαίτερη σημασία στις εξής παραμέτρους του προγράμματος που αποτελούν και τα βασικά δεδομένα εισόδου του μοντέλου. Αυτά μπορούν να κατηγοριοποιηθούν στις εξής ομάδες:

- Πεδίο Μελέτης και χρονικές παράμετροι
 - Κάναβος περιοχής μελέτης
 - Τύπος συντεταγμένων (καρτεσιανές ή σφαιρικές)
 - Χρόνος προσομοίωσης και χρονικό βήμα
- Εξισώσεις, διακριτοποίηση και μέθοδος επίλυσης
 - Μέθοδος σύνθεσης
 - Συχνότητα και κατευθυντική διακριτοποίηση
 - Αριθμός ομάδων χρονικών βημάτων
- Κινητήριες Παράμετροι
 - Δεδομένα στάθμης θαλάσσιας επιφάνειας
 - Δεδομένα ρευμάτων
 - Δεδομένα ανέμων
 - Δεδομένα κάλυψης πάγου
- Παράμετροι Συναρτήσεων Πηγής
 - Μη γραμμική μετάδοση ενέργειας
 - Θραύση κυματισμών (ρηγά νερά)
 - Τριβή πυθμένα
 - Θραύσης στα ανοιχτά

- Αρχικές συνθήκες
 - Μηδενικό φάσμα (cold start)
 - Εμπειρικά δεδομένα
 - Δεδομένα αρχεία από προηγούμενο μοντέλο προσομοίωσης
- Οριακές συνθήκες
 - Κλειστά όρια
 - Ανοιχτά όρια (περιγραφή συνθηκών και δεδομένα κυματικών χαρακτηριστικών στο ανοιχτό όριο)

4.5 Γενικά χαρακτηριστικά εφαρμογής του μοντέλου

Η εισαγωγή των διαφόρων παραμέτρων στο μοντέλο γίνεται σε τρεις βασικές καρτέλες:

1. Τομέας μελέτης (Domain)

Στη καρτέλα αυτή εισάγεται η βαθυμετρία της περιοχής μελέτης σε αρχείο mesh με γεωαναφορά το οποίο κατασκευάστηκε μέσω του εργαλείου MIKE Zero Mesh Generator. Στο αρχείο αυτό αναπαρίσταται η βαθυμετρία σε τριγωνικό κάναβο με μεγαλύτερη πυκνωση κοντά στην ακτογραμμή και στο λιμάνι καθώς επιδιώκεται μεγαλύτερη ακρίβεια. Επιπλέον, στη καρτέλα αυτή μπορούν να οριστούν κάποια στοιχεία του mesh όπως ο επανυπολογισμός των στοιχείων και των κόμβων του κανάβου, η αλλαγή σημείου γεωαναφοράς και το ελάχιστο βάθος στο οποίο περιορίζεται ο κάναβός μας. Στην προσομοίωση μας λήφθηκε υπόψιν ο επανυπολογισμός και χρησιμοποιήθηκαν οι τιμές του προγράμματος για τα υπόλοιπα καθώς εισήχθησαν τα απαραίτητα στοιχεία για την περιοχή μελέτης κατά την δημιουργία του mesh.

2. Χρόνος (Time)

Η δεύτερη καρτέλα αφορά τον χρόνο προσομοίωσης στον οποίο εισάγεται ο αριθμός των χρονικών βημάτων των αντιπροσωπευτικών κυματισμών του ισοδύναμου κυματικού κλίματος καθώς και της κάθε καταιγίδας, το βήμα τους και την έναρξη τους. Στο σημείο αυτό αναφέρεται και το τέλος της όπου μπορεί κανείς να ελέγξει την ορθότητα των δεδομένων στην καρτέλα αυτή.

3. Ενότητα φασματικού κύματος (Spectral wave module)

Η καρτέλα αυτή αποτελείται από 16 μικρότερες καρτέλες όπου εισάγονται οι βασικές παράμετροι που αναφέρθηκαν στην παράγραφο 4.4 καθώς και η μέθοδος ανάλυσης της προσομοίωσης που επεξηγήθηκε στην παράγραφο 4.3.

Στη παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε ο τύπος της πλήρους φασματικής ανάπτυξης και επιλέχθηκε ο τύπος των μη στατικών κυματισμών (instationary formulation). Για το ισοδύναμο κυματικό κλίμα και το κάθε ανεμολογικό καθεστώς διατηρήθηκαν οι προκαθορισμένες ρυθμίσεις όσον αφορά τον αριθμό των συχνοτήτων, τη μικρότερη τιμή της συχνότητας και τον αριθμό των διαφορετικών γωνιών πρόσπτωσης των κυματισμών. Η ανάλυση που πραγματοποιήθηκε έγινε με την επιλογή low order, fast algorithm όπου ελέγχθηκε ο αριθμός των επαναλήψεων και του συντελεστή relaxation factor σύμφωνα με τα επιτρεπτά όρια του οδηγού του μοντέλου.

Αναφορικά με τις καρτέλες για τη στάθμη της θαλάσσιας επιφάνειας, των ρευμάτων, των ανέμων και της κάλυψης πάγου δεν προστέθηκαν αρχεία με αυτές τις πληροφορίες. Επιπλέον δεν προστέθηκαν κατασκευές στις περιοχές μελέτης, καθώς τα σημεία ενδιαφέροντος βρίσκονται στα βαθιά νερά και συγκεκριμένα στην ισοβαθή των 70 μέτρων από την εκάστοτε ακτογραμμή ή λιμάνι. Αντιθέτως για τις καρτέλες περίθλασης, μετάδοσης της ενέργειας, θραύσης των κυματισμών, τριβής στον πυθμένα και θραύσης της κορυφής των κυμάτων στα βαθιά χρησιμοποιήθηκαν οι προεπιλεγμένες τιμές του προγράμματος.

Καθοριστικό σημείο στη προσομοίωση αποτελεί ο ορισμός των αρχικών και οριακών συνθηκών της προσομοίωσης καθώς και των αποτελεσμάτων που επιθυμούμε ως δεδομένα εξόδου. Για τις αρχικές συνθήκες επιλέχθηκε το φάσμα εμπειρικών τύπων και η μέθοδος JONSWAP με τις προεπιλεγμένες τιμές του μοντέλου και για τις οριακές επιλέχθηκαν οι κυματικές παράμετροι τύπου 1 και εισήχθη το dfs0 αρχείο για το ισοδύναμο κυματικό κλίμα και το κάθε σενάριο μελέτης που μεταβάλλονται με το χρόνο στη περιοχή. Τέλος ως αποτελέσματα επιλέχθηκαν το σημαντικό ύψος κύματος (H_{m0}), η περίοδος κορυφής (T_p), η μέση διεύθυνση των κυματισμών (θ_m) και οι διανυσματικές συνιστώσες της μέσης διεύθυνσης διάδοσης του κυματισμού (θ_{mx}, θ_{my}).

5 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ ΕΞΙΣΩΣΕΩΝ ΚΑΙ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ MIKE21|sw

5.1 Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο εφαρμόζονται όσα έχουν αναφερθεί προηγουμένως. Γίνεται μια συγκεντρωτική αναφορά των λαθών που έχουν παρατηρηθεί κατά συρροή, έτσι ώστε να διευκολυνθεί ο αναγνώστης στην πράξη. Παρουσιάζεται η μεθοδολογία σε τρία διαφορετικά γεωμορφολογικά καθεστάτα, καλύπτοντας έτσι κάθε πιθανό σενάριο μελέτης, όπως θα εξηγηθεί παρακάτω. Έπειτα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που έχουν προκύψει με τη χρήση κάθε μεθόδου. Ο σκοπός αυτού του κεφαλαίου είναι να γίνει σαφής η εφαρμογή κάθε μεθόδου και να αναδειχθούν οι μεταξύ τους διαφορές ή ομοιότητες.

5.2 Λανθασμένες προσεγγίσεις

Οι μελετητές έως σήμερα ακολουθούν την συνήθη πρακτική να εφαρμόζουν τις μαθηματικές εξισώσεις και όχι αριθμητικά μοντέλα προσομοίωσης, όπως παραδείγματος χάριν το MIKE21, το οποίο προσομοιώνει περισσότερες και πιο πολύπλοκες διαδικασίες. Ακόμα και η εφαρμογή αυτών των μαθηματικών εξισώσεων γίνεται με λάθος τρόπο, είτε λόγω ελλιπούς γνώσης, είτε λόγω σύγχυσης εκ των βιβλιογραφικών αναφορών. Τα πιο νευραλγικά λάθη αναλύονται παρακάτω σε τρεις θεματικές κατηγορίες με σκοπό να επισταθεί η προσοχή και να λυθούν οι σχετικές παρεξηγήσεις:

- Πρώτο βασικό λάθος είναι ο τρόπος υπολογισμού του αναπτύγματος πελάγους (Fetch) και του ενεργού αναπτύγματος πελάγους (Fetch effective). Λόγω της ύπαρξης διαφόρων απλοποιημένων μεθόδων είναι σημαντικό, ο μελετητής να ακολουθεί την κατάλληλη διαδικασία υπολογισμού που προτείνεται ανά μέθοδο, καθώς οι μαθηματικές εξισώσεις που διέπουν την κάθε μέθοδο έχουν μετασχηματιστεί με συγκεκριμένο τρόπο, ώστε να αποδίδονται τα πειραματικά δεδομένα πάνω στα οποία αναπτύχθηκε. Η συνδυαστική χρήση εξισώσεων μεταξύ διαφορετικών μεθόδων δίνει λανθασμένα αποτελέσματα. Αναλυτικά:
 - Αλληλεμπλέκονται διαδικασίες υπολογισμού του αναπτύγματος πελάγους (Fetch) με μαθηματικές εξισώσεις διαφορετικών μεθόδων. Είναι σημαντικό να τηρείται η αντιστοιχία, καθώς τα εμπειρικά μοντέλα έχουν προκύψει από μαθηματικές διαδικασίες και είναι ευαίσθητα ως προς την αξιοπιστία τους σε τέτοιες αλλαγές.
 - Φαινομενικά, συναντώνται δύο διαφορετικοί τύποι υπολογισμού του ενεργού αναπτύγματος πελάγους κατά Saville (1954), ενώ στην πραγματικότητα πρόκειται για διαφορετική ανάγνωση της ίδιας πρότασης, καθώς στην μία μορφή του τύπου γίνεται χρήση των προβολών των ακτινών του αναπτύγματος πελάγους ως προς την κύρια διεύθυνση ($F_{eff} = \frac{\sum f_i \cdot \cos \theta_i}{\sum \cos \theta_i}$, f_i το μήκος της προβολής), ενώ στην άλλη οι ίδιες οι ακτίνες ($F_{eff} = \frac{\sum f_i \cdot \cos^2 \theta_i}{\sum \cos \theta_i}$, f_i το μήκος της ακτίνας). Θα πρέπει να δίνεται προσοχή ώστε να λαμβάνονται τα σωστά μεγέθη.

- Δεύτερο βασικό λάθος είναι η σύγκριση μεταξύ Fetch-Limited και Duration-Limited συνθηκών. Είναι αναγκαίο να τηρείται ο έλεγχος της οριακής διάρκειας πνοής του ανέμου και να δίνεται έμφαση στον σωστό προσδιορισμό της κρίσιμης αυτής τιμής. Σε περίπτωση που ο έλεγχος δεν επαληθεύεται θα πρέπει να γίνεται η κατάλληλη αναπροσαρμογή του μήκους του αναπτύγματος πελάγους, όπως περιγράφεται ανά μέθοδο. Αναλυτικά:
 - Υπολογίζεται λάθος η τιμή της διάρκειας πνοής του ανέμου, καθώς προκύπτει από τις μέσες ετήσιες συχνότητες ανέμου, κάτι που μεταφράζεται σε στατιστικό λάθος. Δεν είναι δυνατόν από τις μέσες ετήσιες συχνότητες ανέμου να προκύψουν οι διάρκειες των γεγονότων πνοής ανέμου. Αν δεν υπάρχουν τα κατάλληλα δεδομένα ή μέσα καταγραφής αυτών, τότε είναι σημαντικό να αξιολογείται η σκοπιμότητα της μελέτης και αν κρίνεται αναγκαίο, υπέρ της ασφαλείας, να γίνεται χρήση των εξισώσεων για Fetch-Limited συνθήκες.
 - Συχνά λαμβάνονται υπόψιν, χωρίς την εφαρμογή κριτηρίων, οι Fetch-Limited συνθήκες, οι οποίες αποτελούν ουσιαστικά τους μέγιστους κυματισμούς ανά διεύθυνση για κάθε σταθερή τιμή της ταχύτητας του ανέμου. Ωστόσο, σε περιπτώσεις που το ζητούμενο είναι η περιγραφή του μέσου ετήσιου κυματικού κλίματος, πχ. σε ακτομηχανικές μελέτες ή μελέτες κυματικής διαταραχής, είναι λάθος να λογίζονται αυτές οι ακραίες τιμές. Θα πρέπει να καθορίζονται οι ανάγκες της χρήσης των μαθηματικών εξισώσεων, ώστε να εξάγονται τα επιθυμητά αποτελέσματα.
 - Χρησιμοποιούνται οι τιμές του αναπτύγματος πελάγους ή του ενεργού αναπτύγματος πελάγους ανά μέθοδο, χωρίς να γίνεται η αναπροσαρμογή των μεγεθών αυτών στο ελάχιστο ανάπτυγμα πελάγους (F_{min}) όταν υφίστανται Duration-Limited συνθήκες. Καθώς το μήκος του αναπτύγματος πελάγους είναι ο δείκτης της εισερχόμενης ενέργειας στο εκάστοτε σύστημα και οι μαθηματικές εξισώσεις έχουν διαχωριστεί με γνώμονα αυτή την παραδοχή, τα αποτελέσματα είναι ιδιαίτερα ευαίσθητα στις μεταβολές της τιμής του, επομένως είναι καθοριστικό να ακολουθείται πάντα ο μετασχηματισμός αυτός, όπως συνίσταται σε κάθε μέθοδο.
- Τρίτο βασικό λάθος είναι το γεγονός ότι παραβλέπεται ο έλεγχος για συνθήκες πλήρως ανεπτυγμένης θάλασσας (Fully Developed). Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι μερικές από τις απλοποιημένες μεθόδους ενσωματώνουν σε μια κοινή μαθηματική εξίσωση όλα τα πιθανά σενάρια υφιστάμενων συνθηκών (πχ. SMB, Wilson), δηλαδή Fetch-Limited, Duration-Limited & Fully Developed. Όμως, αυτό δεν συμβαίνει καθολικά. Επομένως, είναι σημαντικό να τηρείται ο έλεγχος, όπως προτείνεται ανά μέθοδο και να λαμβάνεται η ελάχιστη τιμή μεταξύ των αποτελεσμάτων των μαθηματικών εξισώσεων για Fetch-Limited και Fully Developed συνθήκες.

5.3 Μεθοδολογία που ακολουθούμε και παραδοχές

Η μεθοδολογία που υιοθετείται από την παρούσα ΔΕ στοχεύει στην εκπλήρωση ενός διττού σκοπού:

- Να παρουσιαστεί η ορθή εφαρμογή των μαθηματικών εξισώσεων του παραπάνω κεφαλαίου.
- Να διερευνηθεί η σύγκλιση ή απόκλιση των αποτελεσμάτων των αριθμητικών εξισώσεων μεταξύ τους αλλά και με το μοντέλο προσομοίωσης MIKE21|sw.

Σε αυτό το πλαίσιο επιλέχθηκαν με συγκεκριμένα γεωμορφολογικά κριτήρια 3 χαρακτηριστικές περιοχές μελέτης:

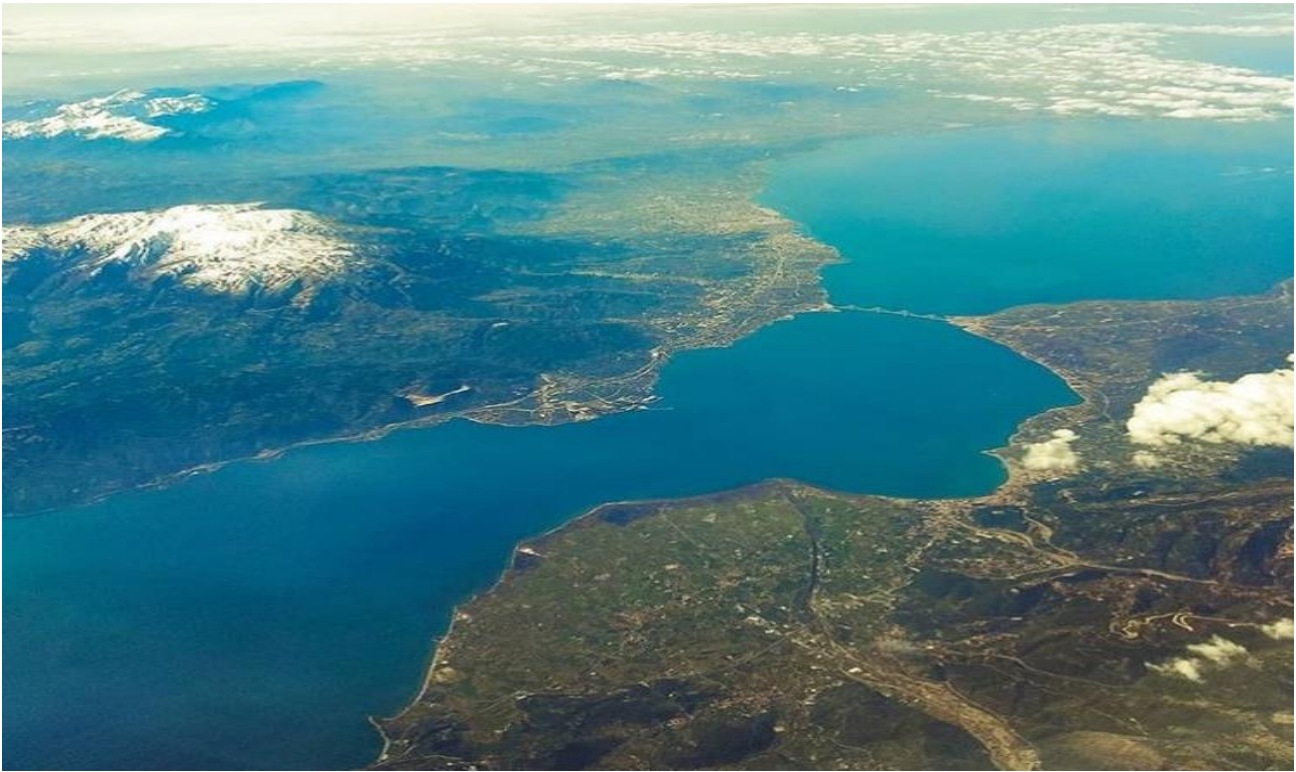
- Πάτρα → περιορισμένο-στενό ανάπτυγμα πελάγους από τον Πατραϊκό κόλπο πλην μερικών διευθύνσεων προς το Ιόνιο πέλαγος, όπου το ανάπτυγμα είναι πολλαπλάσιο (Restricted-Narrow Fetch).
- Ερμούπολη → περιορισμένο-ευρύ ανάπτυγμα πελάγους καθώς το λιμάνι βρίσκεται σε κεντρική θέση στο νησιωτικό σύμπλεγμα των Κυκλάδων (Restricted-Wide Fetch).
- Χρυσή Λασιθίου → ανοιχτή θάλασσα, χωρίς κανένα εμπόδιο, με πλήρως αναπτυγμένους κυματισμούς, οι οποίοι αναπτύσσονται και διαδίδονται στο Λιβυκό πέλαγος (Open Sea).

Για να είναι εφικτή μια δίκαιη σύγκριση μεταξύ των μαθηματικών εξισώσεων, κρίθηκε αναγκαίο να γίνουν οι εξής παραδοχές:

- Η επιλογή του σημείου εκκίνησης της μέτρησης των μηκών του αναπτύγματος πελάγους είναι τέτοια ώστε να βρισκόμαστε σε βαθιά νερά, και συγκεκριμένα στα 70 μ., σε κάθε μία από τις περιοχές.
- Ως ταχύτητα ανέμου σε κάθε μια από τις εφαρμογές που λαμβάνουν χώρα, τίθεται η μέγιστη ταχύτητα που αντιστοιχεί σε κάθε τιμή της κλίμακας Beaufort.
- Δεν γίνονται οι μετασχηματισμοί που προτείνει κάθε μέθοδος για την ταχύτητα ανέμου, από την τιμή U_{10} του μετεωρολογικού σταθμού, δηλαδή την ταχύτητα του ανέμου 10 μέτρα πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας, στην τιμή U_* , δηλαδή την διατμητική ταχύτητα του ανέμου επί της επιφάνειας του νερού (friction velocity). Εξαιρείται η μέθοδος CEM, η οποία εισάγει αυτή την τιμή υποχρεωτικά. Αυτό γίνεται με σκοπό να εισάγεται σε κάθε μοντέλο η ίδια τιμή ταχύτητας ανέμου, εφόσον στην παρούσα ΔΕ δεν δίνεται έμφαση στην μελέτη πραγματικών μετεωρολογικών σεναρίων, αλλά στην απόδοση κάθε μαθηματικής εξίσωσης στις ίδιες εξωτερικές συνθήκες.
- Δεν εξετάζονται πραγματικά μετεωρολογικά φαινόμενα. Η διεύθυνση διάδοσης του ανέμου, η ταχύτητα του ανέμου και η διάρκεια πνοής του ανέμου λαμβάνονται με τέτοιο τρόπο ώστε να εξυπηρετούν τους σκοπούς της έρευνας, δηλαδή την εξαγωγή συμπερασμάτων μέσω της παραγωγής αποτελεσμάτων και της σύγκρισης αυτών κάτω από την επίδραση κοινών και σαφώς ορισμένων συνθηκών.

5.3.1 Περιοχή Λιμένα Πατρών

«Περιορισμένο ανάπτυγμα πελάγους από τον Πατραϊκό κόλπο πλην μερικών διευθύνσεων προς το Ιόνιο πέλαγος, όπου το ανάπτυγμα είναι πολλαπλάσιο. (Restricted-Narrow Fetch)»



Εικόνα 5.1 Αεροφωτογραφία Πατραϊκού κόλπου.

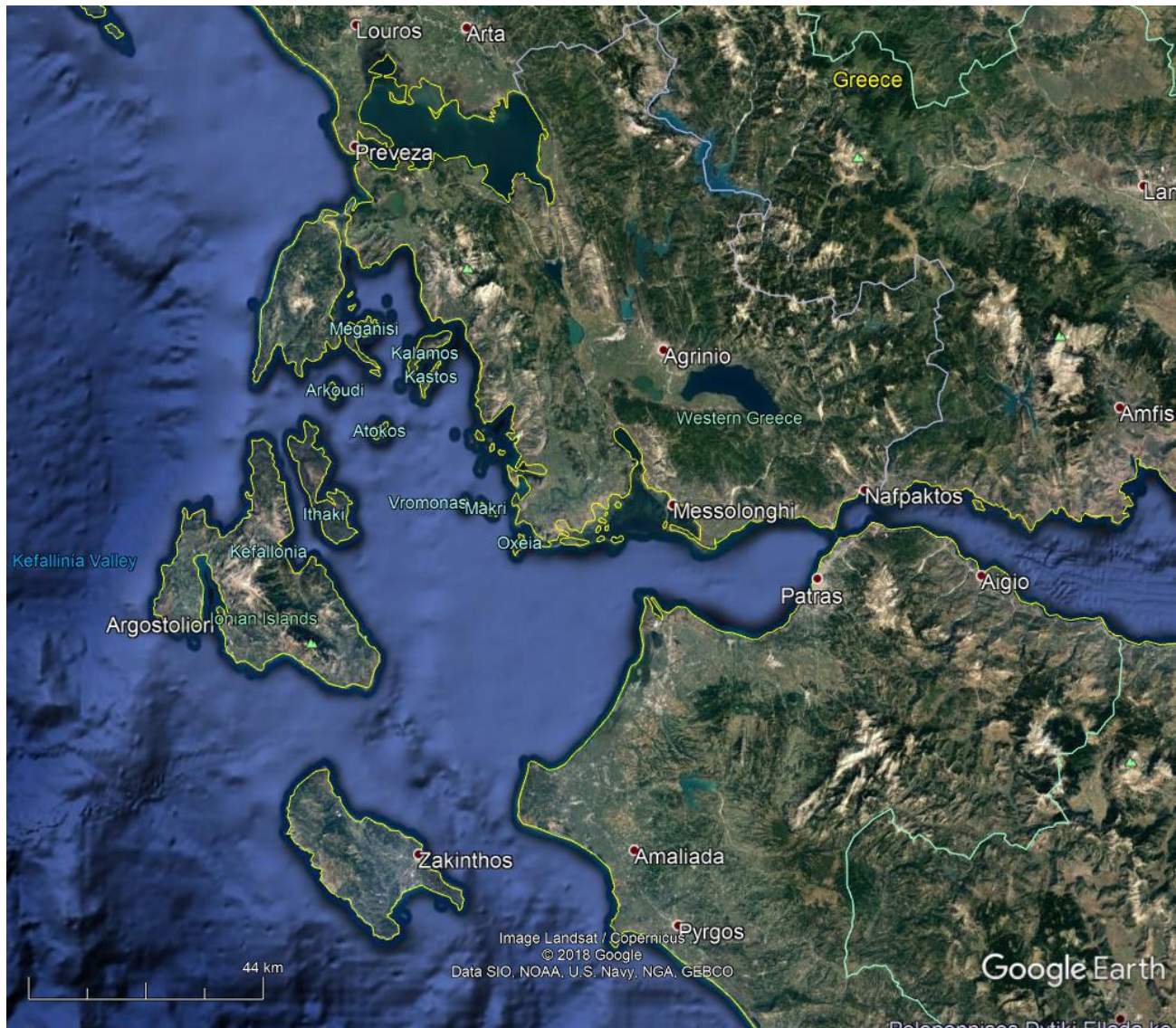
Περιγραφή περιοχής

Ο Πατραϊκός κόλπος (Εικόνες 5.1, 5.2 & 5.3) είναι τμήμα του Ιονίου Πελάγους μεταξύ της δυτικής Στερεάς Ελλάδας και της Πελοποννήσου, που βρέχει μεταξύ άλλων και την πόλη της Πάτρας, από την οποία έχει πάρει και την ονομασία του.

Στα δυτικά ορίζεται από μία νοητή γραμμή, από το νησάκι Οξεία ως το ακρωτήριο του Αράζου. Ανατολικά περικλείεται από το στενό 2.500 μέτρων περίπου, από το Ρίο μέχρι το Αντίρριο και την ομώνυμη σύγχρονη γέφυρα.

Ο Πατραϊκός έχει μήκος 40-50 χλμ. και πλάτος 10-20 χλμ. Καλύπτει μια επιφάνεια 350-400 km² ενώ ο όγκος του εκτιμάται σε 45 km³. Το μέγιστο βάθος του είναι 130 μέτρα περίπου σε μία κοιλότητα ανοιχτά της Λακκόπετρας. Ο κόλπος είναι πλούσιος σε ψάρια και είναι κατάλληλος για αλιεία.

Ο μόνος σημαντικός λιμένας στον Πατραϊκό κόλπο είναι το λιμάνι της Πάτρας, που αποτελεί το δεύτερο μεγαλύτερο της Ελλάδας και το κύριο με επικοινωνία με την Ευρώπη. Εξυπηρετεί τα πορθμεία προς την Αγκώνα, την Βενετία, το Πρίντεζι και την Τεργέστη της Ιταλίας καθώς προς την Κεφαλλονιά και άλλα νησιά του Ιονίου. Από τα νερά του Πατραϊκού βρέχεται και το Μεσολόγγι με τη περίφημη λιμνοθάλασσά του, η οποία αποτελεί τη μεγαλύτερη της χώρας. Εντός της λιμνοθάλασσας Μεσολογγίου βρίσκεται ο λιμένας της πόλης.

Γεωγραφικές ΣυντεταγμένεςΓεωγραφικό πλάτος: 38.284666° Γεωγραφικό μήκος: 21.603365° **Εικόνα 5.2 Στιγμιότυπο Πατραϊκού κόλπου από το Google Earth.**



Εικόνα 5.3 Πατραϊκός κόλπος από δορυφορική λήψη. Φαίνεται η λιμνοθάλασσα του Μεσολογγίου και το ακρωτήριο του Αράξου.

5.3.2 Περιοχή Λιμένα Ερμούπολης

«Περιορισμένο-ευρύ ανάπτυγμα πελάγους καθώς το λιμάνι βρίσκεται σε κεντρική θέση στο νησιωτικό σύμπλεγμα των Κυκλάδων. (Restricted-Wide Fetch)»



Εικόνα 5.4 Φωτογραφία του λιμένα της Ερμούπολης, τραβηγμένη από την Άνω Σύρο.

Περιγραφή περιοχής

Η Σύρος είναι νησί των Κυκλάδων και οι κάτοικοί της επίσημα λέγονται Σύριοι/Σύριες (ή και Συριανοί/Συριανές στην καθομιλουμένη). Πρωτεύουσά της είναι η Ερμούπολη (Εικόνες 5.4, 5.5 & 5.6), η οποία είναι πρωτεύουσα και του Νομού Κυκλάδων καθώς και έδρα της Περιφέρειας Νοτίου Αιγαίου. Η Σύρος αναπτύχθηκε ιδιαίτερα μετά το 1826, όταν εγκαταστάθηκαν πρόσφυγες από τα Ψαρά, τη Χίο, την Κρήτη και τη Μικρά Ασία. Υπήρξε ναυτικό, βιομηχανικό και πολιτιστικό κέντρο του νέου ελληνικού κράτους.

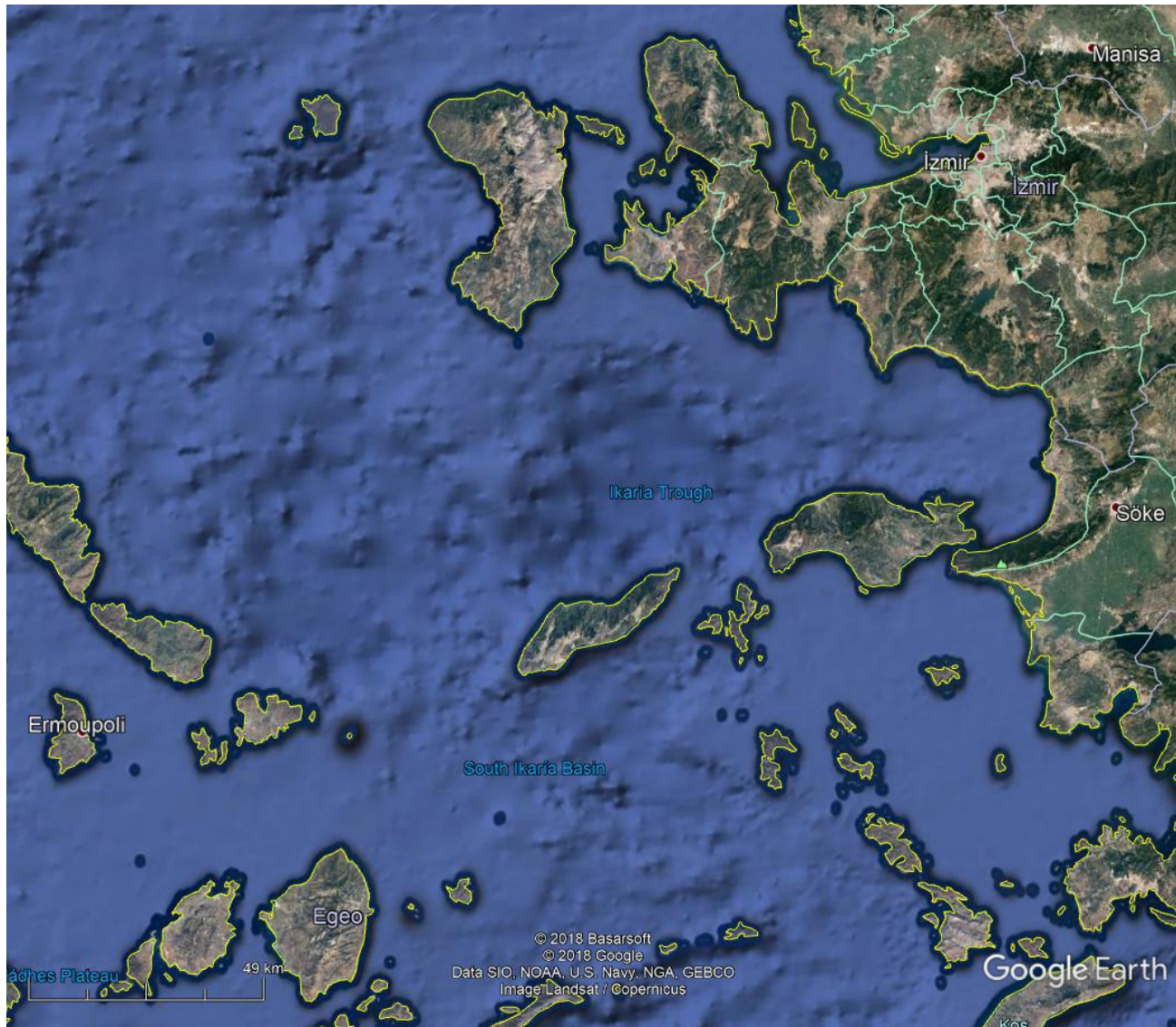
Η Σύρος βρίσκεται στο κεντρικό σημείο των Κυκλάδων και απέχει 83 ναυτικά μίλια από τον Πειραιά και 62 από τη Ραφήνα. Η έκτασή της είναι 84,069 τ.χλμ..

Γειτνιάζει με αρκετά νησιά του κυκλαδίτικου συμπλέγματος. Στα βόρεια βρίσκεται η Άνδρος, βορειοανατολικά η Τήνος και ανατολικά η Μύκονος καθώς και τα μικρά νησιά της Δήλου και της Ρήνειας. Βορειοδυτικά βρίσκονται η Κέα και η Γυάρος, δυτικά η Κύθνος και νοτιοδυτικά η Σέριφος. Στα νότια βρίσκονται η Σίφνος, η Αντίπαρος, η Πάρος και η Νάξος.

Γεωγραφικές Συντεταγμένες

Γεωγραφικό πλάτος: 37.447311°

Γεωγραφικό μήκος: 25.027502°



Εικόνα 5.5 Στιγμιότυπο Αιγαίου πελάγους από το Google Earth.



Εικόνα 5.6 Η Σύρος από δορυφορική λήψη. Βόρεια φαίνεται η Τήνος και ανατολικά η Μύκονος.

5.3.3 Περιοχή Χρυσής Λασιθίου

«Ανοιχτή θάλασσα, χωρίς κανένα εμπόδιο, με πλήρως αναπτυγμένους κυματισμούς, οι οποίοι αναπτύσσονται και διαδίδονται στο Λιβυκό πέλαγος. (Open Sea)»



Εικόνα 5.7 Αεροφωτογραφία Χρυσής Λασιθίου.

Περιγραφή περιοχής

Η Χρυσή (Εικόνες 5.7, 5.8 & 5.9), αποκαλούμενη και ως Γαϊδουρονήσι, είναι νησίδα του Λιβυκού πελάγους, και βρίσκεται περίπου 15 χλμ. (9 μίλια) νότια της Ιεράπετρας ενώ 700 περίπου μέτρα ανατολικά της, βρίσκεται η νησίδα Μικρονήσι. Είναι μία από τις πολλές νησίδες που περιτριγυρίζουν την Κρήτη. Έχει έκταση 4,743 τ.χλμ. και 2 κατοίκους. Η Χρυσή περιτριγυρίζεται από πολλές παραλίες με χρυσαφένια αμμουδιά, στις οποίες οφείλει άλλωστε και το σύγχρονο όνομά της. Είναι νησί εξαιρετικής φυσικής ομορφιάς και πάνω του βρίσκεται το μεγαλύτερο φυσικά διαμορφωμένο δάσος Άρκευθου (επιστ. ονομασία *Juniperus macrocarpa*). Είναι γνωστή στην Ελλάδα και με τις ονομασίες γιουνίπερος και κέδρο (το), ενώ στην Κύπρο φέρει την ονομασία αόρατος. Τα περισσότερα κέδρα είναι ηλικίας 200 ετών και φτάνουν σε ύψος τα 7 μέτρα. Η πυκνότητα της βλάστησης είναι περίπου 28 δέντρα το εκτάριο.

Γεωγραφικές Συντεταγμένες

Γεωγραφικό πλάτος: 34.852934°

Γεωγραφικό μήκος: 25.710818°



Εικόνα 5.8 Στιγμιότυπο Λιβυκού πελάγους από το Google Earth.



Εικόνα 5.9 Η Χρυσή από δορυφορική λήψη. Απέναντί της βρίσκεται το λιμάνι της Ιεράπετρας.

5.4 Εφαρμογή μαθηματικών εξισώσεων

Περιγραφή διαδικασίας χάραξης και μέτρησης αναπτύγματος πελάγους

Για την εφαρμογή των μαθηματικών εξισώσεων, είναι απαραίτητη η χρήση δεδομένων που αφορούν τα μήκη του αναπτύγματος πελάγους, τα οποία είναι αναγκαίο να παραχθούν από τον μελετητή. Αυτό συμβαίνει καθώς το σημείο ενδιαφέροντος αποφασίζεται από τις ανάγκες κάθε πιθανής μελέτης. Ακόμα και αν μελετάται η ίδια περιοχή, είναι πολύ πιθανό λόγω διαφορετικών αναγκών, να χρειάζεται να παρθεί διαφορετικό σημείο εκκίνησης χάραξης αναπτύγματος πελάγους, κάτι που ενδέχεται να επηρεάζει το τελικό αποτέλεσμα, ιδιαίτερα σε περιοχές με περίπλοκες γεωμετρίες. Οι διαδικασίες χάραξης και μέτρησης του αναπτύγματος πελάγους παρουσιάζονται παρακάτω:

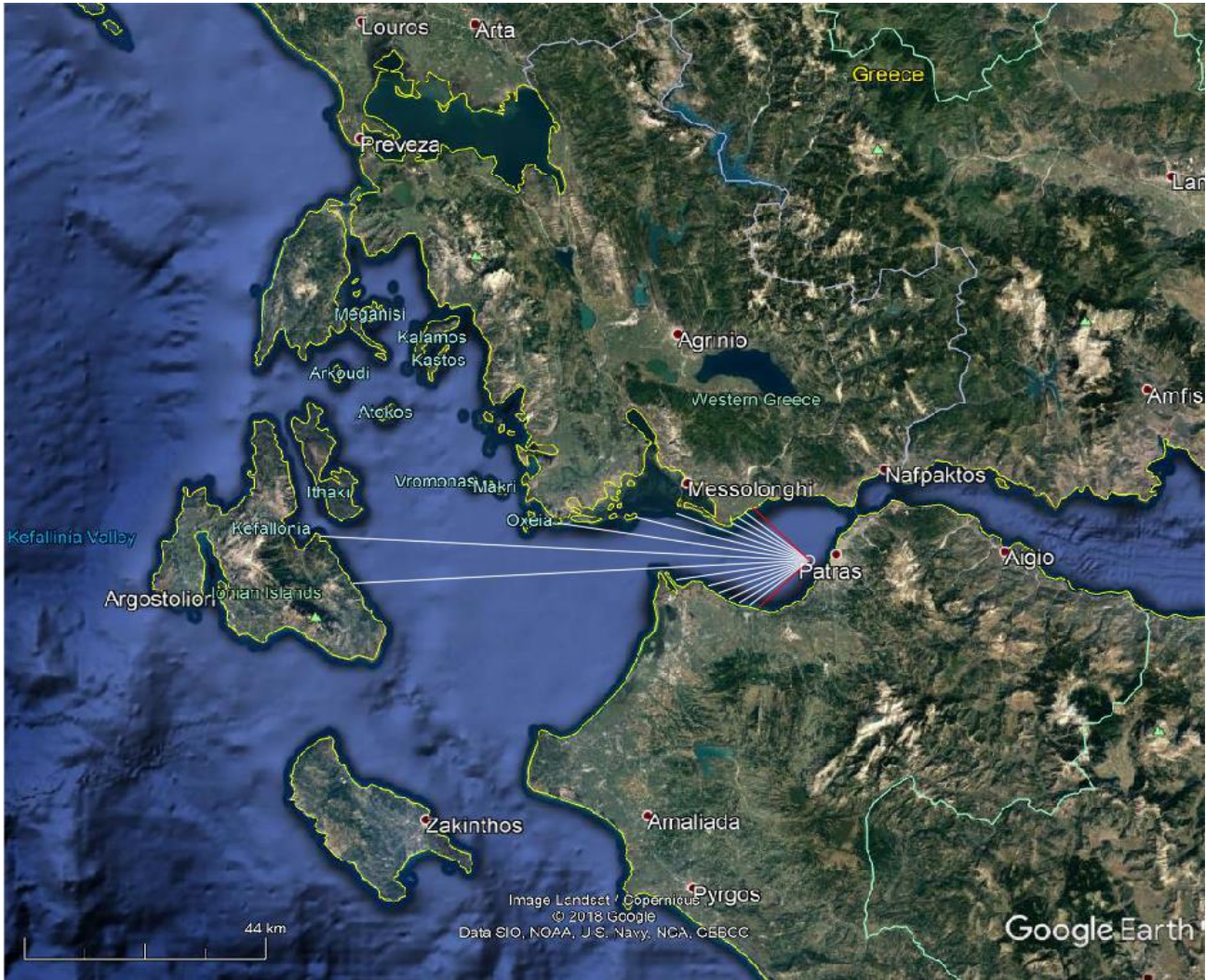
- 1) Εύρεση της περιοχής μελέτης στο Google Earth και διαλογή του σημείου ενδιαφέροντος, δηλαδή του σημείου εκκίνησης χάραξης του αναπτύγματος πελάγους.
!!! Σε περίπτωση που κριτήριο για την επιλογή του σημείου ενδιαφέροντος είναι η βαθυμετρία, αναζήτηση σε κατάλληλα μέσα (ηλεκτρονικά διαγράμματα πλοήγησης Navionics). Ωστόσο, συστήνεται, λόγω αξιοπιστίας, η διαδικασία να εφαρμόζεται τελικά στους χάρτες του Google Earth, καθώς άλλα συστήματα ενδέχεται να έχουν σημαντικές αποκλίσεις από την πραγματικότητα, όσον αφορά την τοπογραφική αποτύπωση.
- 2) Λήψη στιγμιότυπου, τέτοιου ώστε να είναι ορατή και εφικτή η οριοθέτηση του αναπτύγματος πελάγους από όλα τα χερσαία στοιχεία που παρεμβάλλονται.
- 3) Απόδοση του στιγμιότυπου σε κατάλληλο υπολογιστικό σχεδιαστικό πρόγραμμα (CAD).
- 4) Χάραξη, επί του στιγμιότυπου, των ορίων των ακτογραμμών που δύναται να παρεμβάλλονται στο ανάπτυγμα πελάγους, όπως αυτό ορίζεται ανά εμπειρική μέθοδο.
- 5) Μετατροπή της αποτύπωσης σε κλίμακα 1:1 με τη βοήθεια της κλίμακας του υπομνήματος.
- 6) Εφαρμογή του αναπτύγματος πελάγους, όπως αυτό ορίζεται ανά εμπειρική μέθοδο, με σημείο εκκίνησης το σημείο ενδιαφέροντος, και ανάπτυξη αυτού ως τα όρια των υφιστάμενων ακτογραμμών.
- 7) Μέτρηση του μήκους κάθε ακτίνας του αναπτύγματος πελάγους, υπολογισμός και εξαγωγή δεδομένων, όπως απαιτείται ανά μέθοδο.
- 8) Υπολογισμός των χαρακτηριστικών μεγεθών του κυματικού κλίματος με χρήση μαθηματικών εξισώσεων, όπως ορίζεται ανά εμπειρική μέθοδο.

Σημειώνεται πως η παρουσίαση των συγκεκριμένων διαδικασιών γίνεται συμβουλευτικά προς τον αναγνώστη. Είναι σαφές, πως οι τιμές του μήκους του αναπτύγματος πελάγους μπορεί να ληφθούν με διάφορους τρόπους.

Στη συνέχεια, παρατίθενται ενδεικτικά τα αποτελέσματα της διαδικασίας και η εξαγωγή αποτελεσμάτων για κάθε ένα από τα τρία ορισμένα γεωμετρικά πεδία.

5.4.1 Περιοχή Λιμένα Πατρών

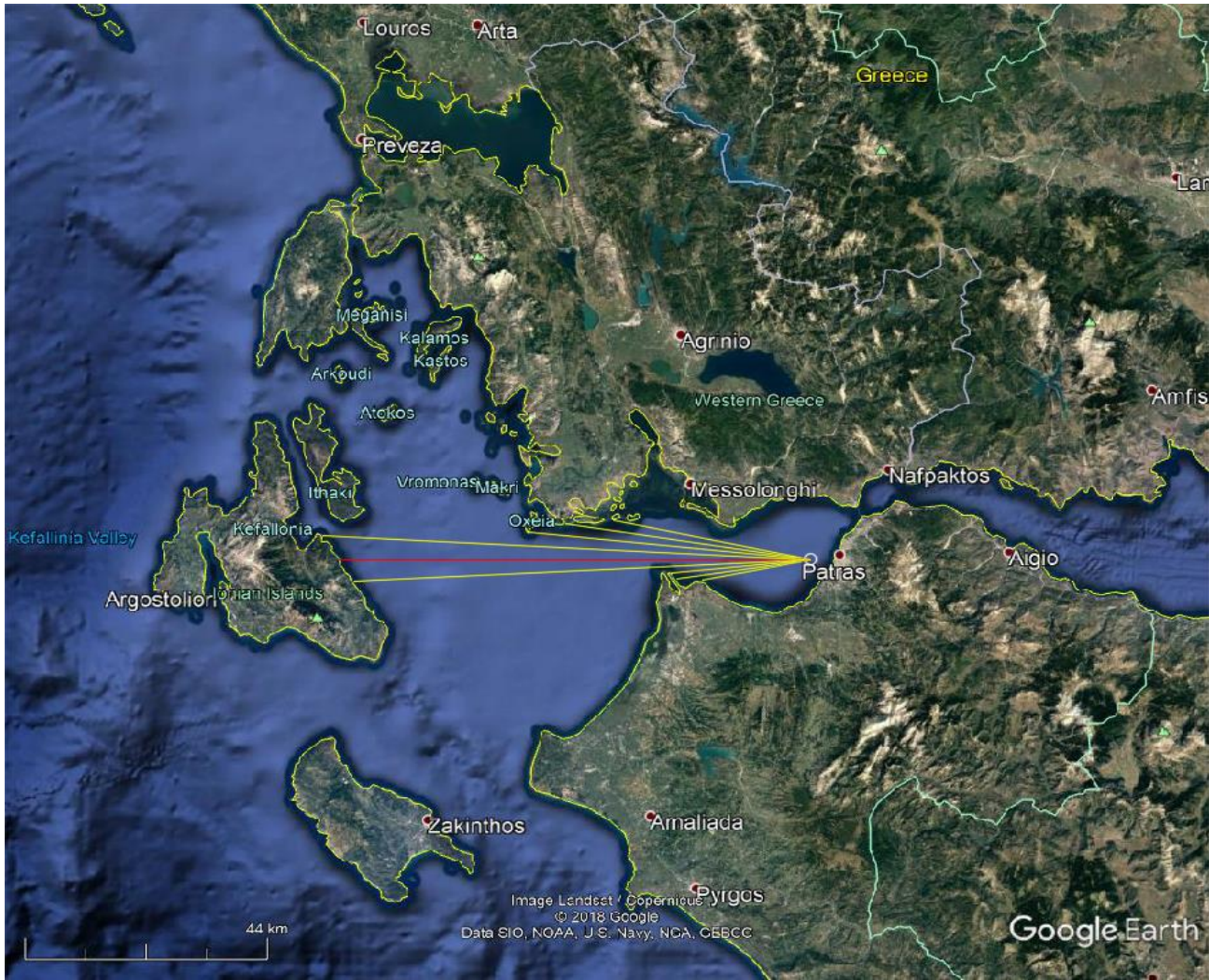
Εφαρμογή κατά τις μεθόδους SMB – Wilson



θ_i	-45°	-39°	-33°	-27°	-21°	-15°	-9°	-3°	3°	9°	15°	21°	27°	33°	39°	45°
$F_i [m]$	12645.7	13502.2	14966.9	16057.5	17206.3	18739.5	24155.6	81747.3	87626.2	45639.2	32179.4	25373.5	15526.0	15427.3	14742.1	14465.9

$F_{eff} [m]$	28077.2											
	Beaufort											
	5		6		7		8		9		10	
$H_s [m]$	SMB	Wilson	SMB	Wilson	SMB	Wilson	SMB	Wilson	SMB	Wilson	SMB	Wilson
$T_s [s]$	1.08	1.07	1.47	1.45	1.90	1.86	2.38	2.31	2.88	2.78	3.44	3.29
$t_{min} [h]$	4.12	3.76	4.77	4.27	5.37	4.73	5.97	5.17	6.52	5.56	7.08	5.94
	3.40	3.81	2.97	3.40	2.65	3.08	2.39	2.82	2.19	2.44	2.03	2.44

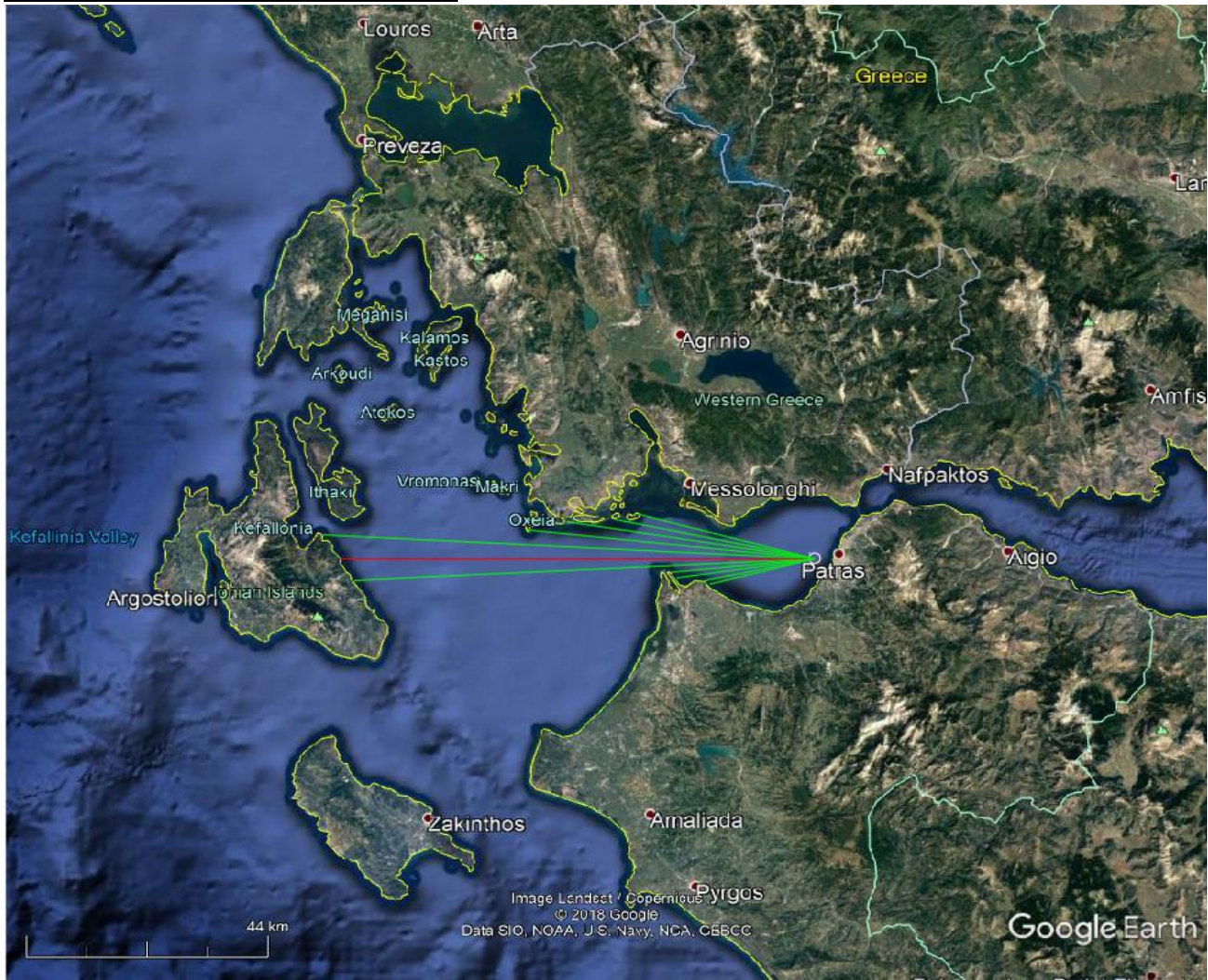
Εφαρμογή κατά τη μέθοδο JONSWAP



θ_i	-12°	-9°	-6°	-3°	0	3°	6°	9°	12°
$F_i [m]$	19732.8	24155.6	24885.0	81633.7	83948.7	85956.9	50601.2	44142.8	36002.5

$F_{eff} [m]$	50117.7					
	Beaufort					
	5	6	7	8	9	10
$H_s [m]$	1.24	1.59	1.97	2.38	2.80	3.26
$T_s [s]$	5.08	5.53	5.93	6.32	6.68	7.02
$t_{min} [h]$	5.49	5.05	4.70	4.41	4.18	3.97

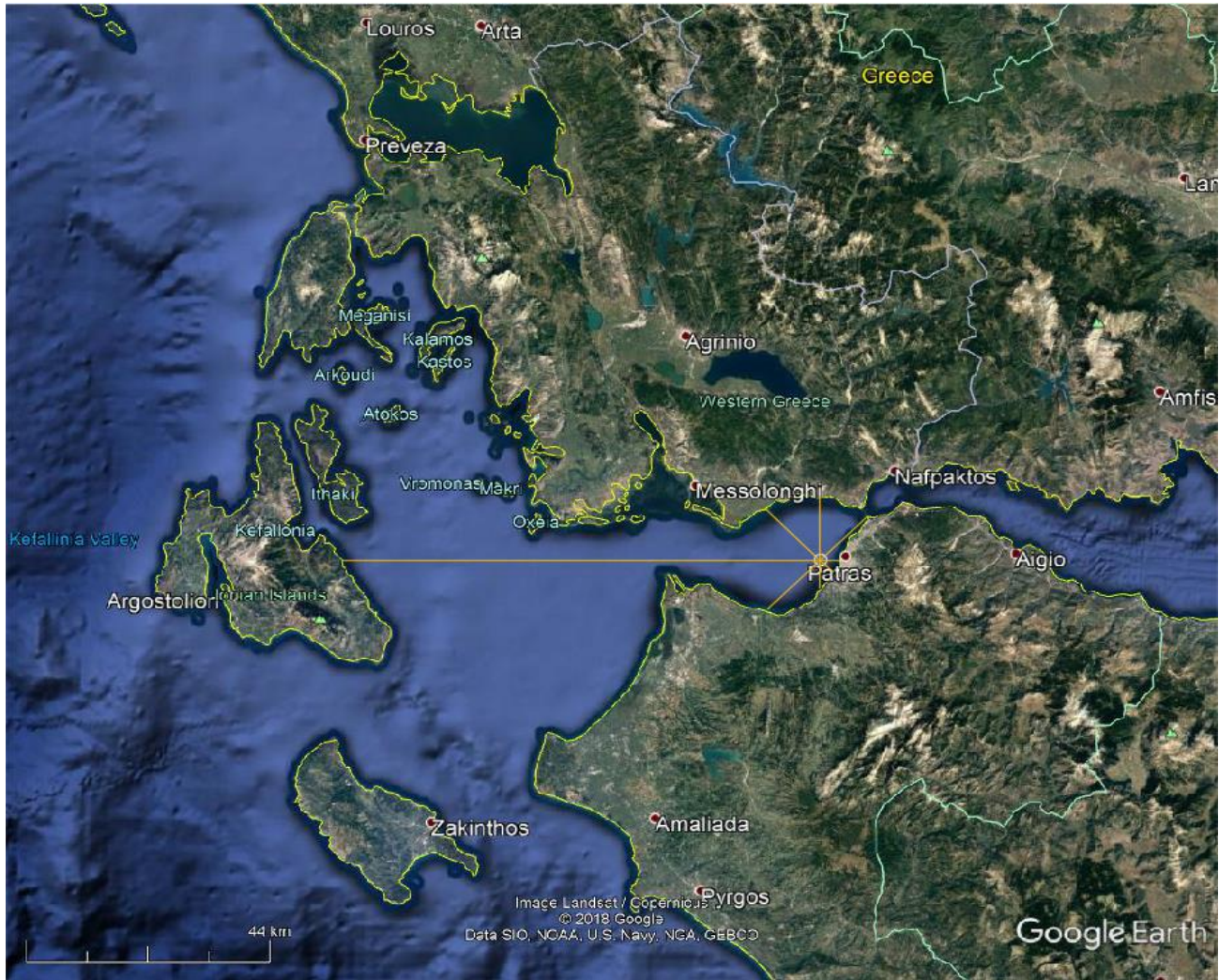
Εφαρμογή κατά τη μέθοδο Donelan



θ_i	-15°	-12°	-9°	-6°	-3°	0	3°	6°	9°	12°	15°
$F_i [m]$	19435.1	20024.5	24914.7	25578.3	82418.0	84830.6	88135.1	51496.7	44857.7	36550.1	32459.0
$\cos\theta \cdot F_\psi^{0.426}$	64.85	66.51	73.71	75.05	124.06	125.77	127.65	101.12	94.69	85.94	80.68

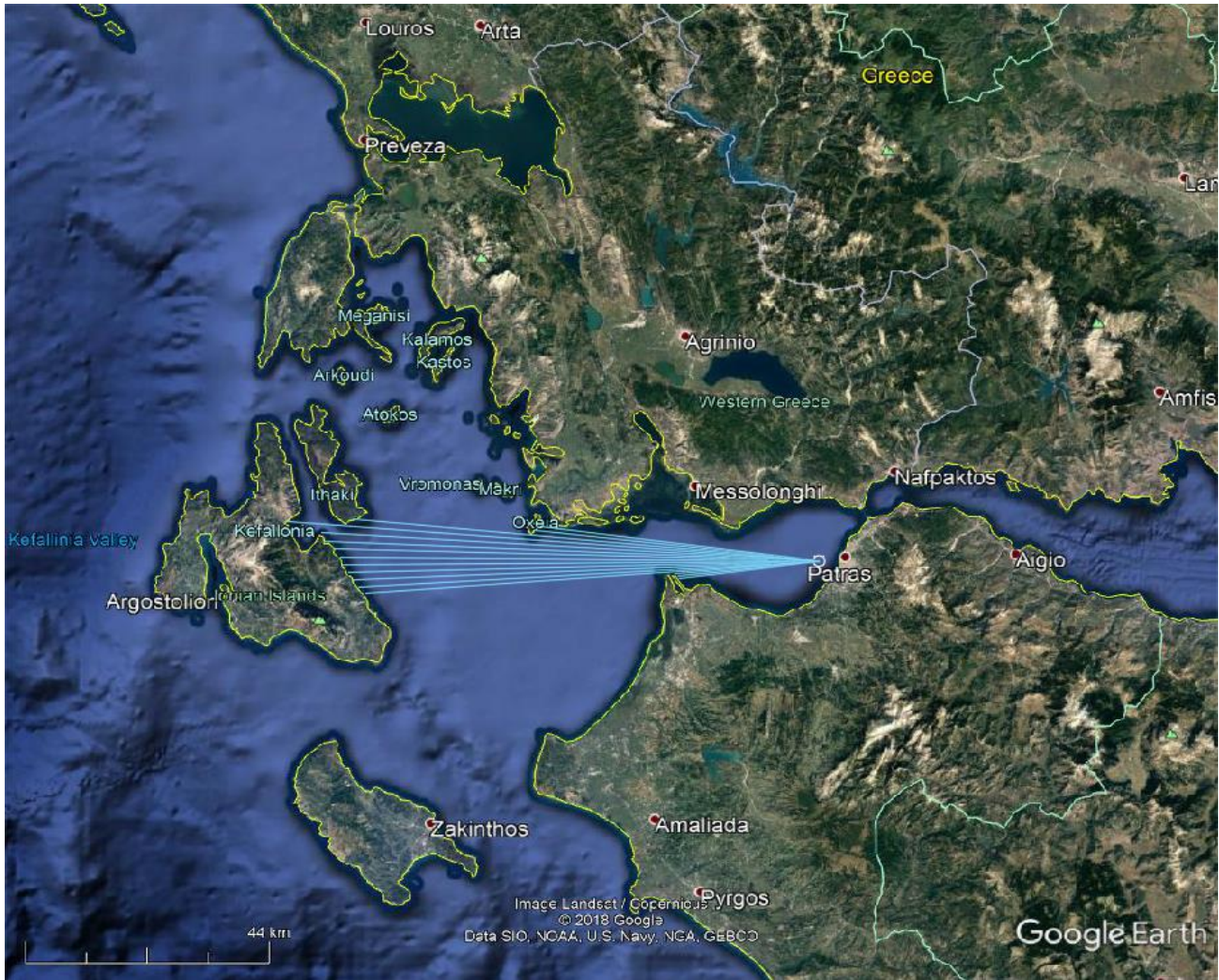
$F_\psi [m]$	88135.1					
	Beaufort					
	5	6	7	8	9	10
$H_s [m]$	1.28	1.76	2.29	2.89	3.55	4.28
$T_s [s]$	4.63	5.31	5.95	6.60	7.20	7.82
$t_{min} [h]$	8.79	7.67	6.84	6.17	5.65	5.21

Εφαρμογή κατά τη μέθοδο CERC



$F [m]$	84769.2					
	Beaufort					
	5	6	7	8	9	10
$H_s [m]$	1.61	2.07	2.56	3.09	3.64	4.24
$T_s [s]$	5.88	6.40	6.89	7.34	7.77	8.17
$t_{min} [h]$	7.79	7.17	6.67	6.26	5.93	5.64

Εφαρμογή κατά τη μέθοδο ACES

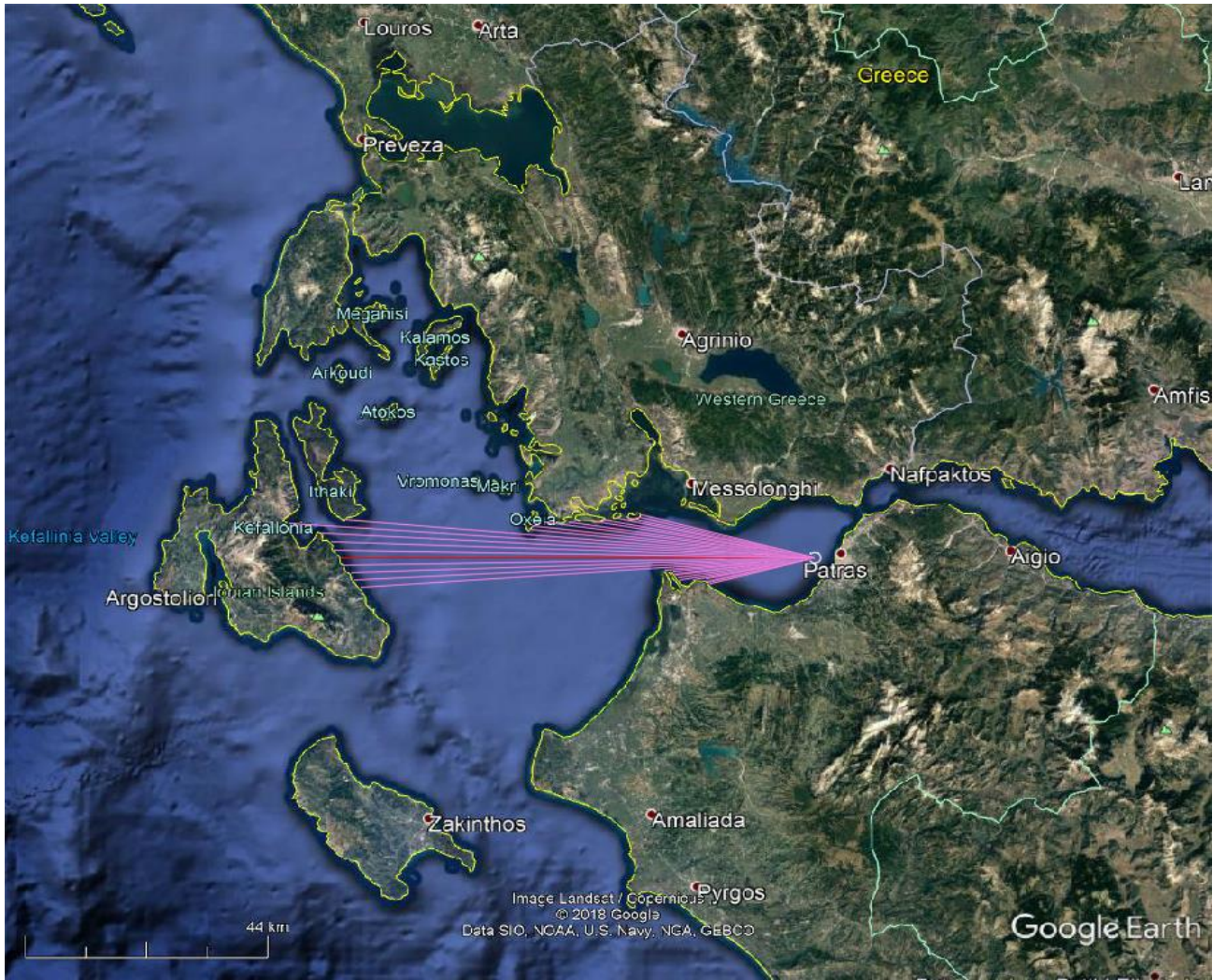


	-7.5°	-6.5°	-5.5°	-4.5°	-3.5°	-2.5°	-1.5°	-0.5°	0.5°	1.5°	2.5°	3.5°	4.5°	5.5°	6.5°	7.5°
	25041.6	25256.4	25699.1	80711.1	81741.7	82606.4	83600.9	84510.6	84984.7	85957.1	87861.5	88513.5	94754.4	83104.9	50973.0	49886.0
	85.97	86.35	87.06	144.10	144.96	145.67	146.46	147.18	147.54	148.27	149.68	150.13	154.64	145.91	117.61	116.43

$\theta_i, F_i [m], F_\varphi^{0.28} \cdot (\cos \varphi)^{0.44}$

$F_\varphi [m]$	94754.4					
	Beaufort					
	5	6	7	8	9	10
$H_s [m]$	1.59	2.05	2.54	3.07	3.61	4.20
$T_s [s]$	5.04	5.64	6.19	6.73	7.23	7.73
$t_{min} [h]$	10.06	9.01	8.20	7.54	7.02	6.57

Εφαρμογή κατά τη μέθοδο CEM



-15°	19335.5	θ_i	$F_i [m]$	5°	84385.7
-14°	19569.3	-4°	81187.5	6°	51127.9
-13°	19688.4	-3°	82213.4	7°	50767.7
-12°	19815.0	-2°	82725.6	8°	48565.8
-11°	21979.9	-1°	83891.8	9°	44299.6
-10°	24514.7	0	84537.2	10°	40265.4
-9°	24701.8	1°	85718.6	11°	38485.9
-8°	24895.5	2°	86184.8	12°	36056.7
-7°	25097.6	3°	87851.0	13°	33925.7
-6°	25430.3	4°	93829.7	14°	32425.8
-5°	26643.6			15°	32124.2

$F_{eff} [m]$

48781.98

Beaufort

$H_s [m]$

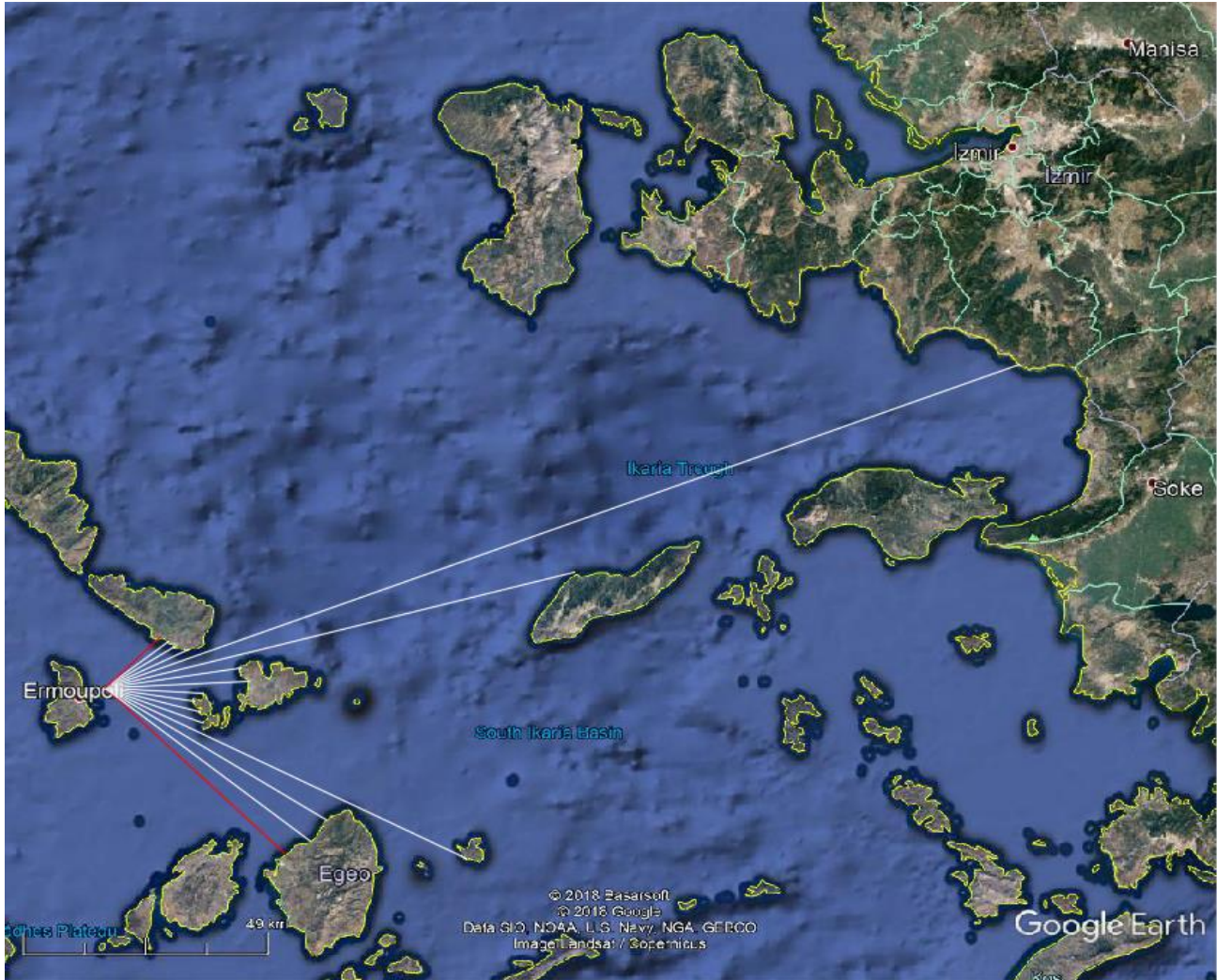
$T_s [s]$

$t_{min} [h]$

	5	6	7	8	9	10
$H_s [m]$	1.21	1.61	2.07	2.59	3.16	3.80
$T_s [s]$	4.47	4.92	5.34	5.76	6.15	6.54
$t_{min} [h]$	6.22	5.71	5.31	4.98	4.71	4.47

5.4.2 Περιοχή Λιμένα Ερμούπολης

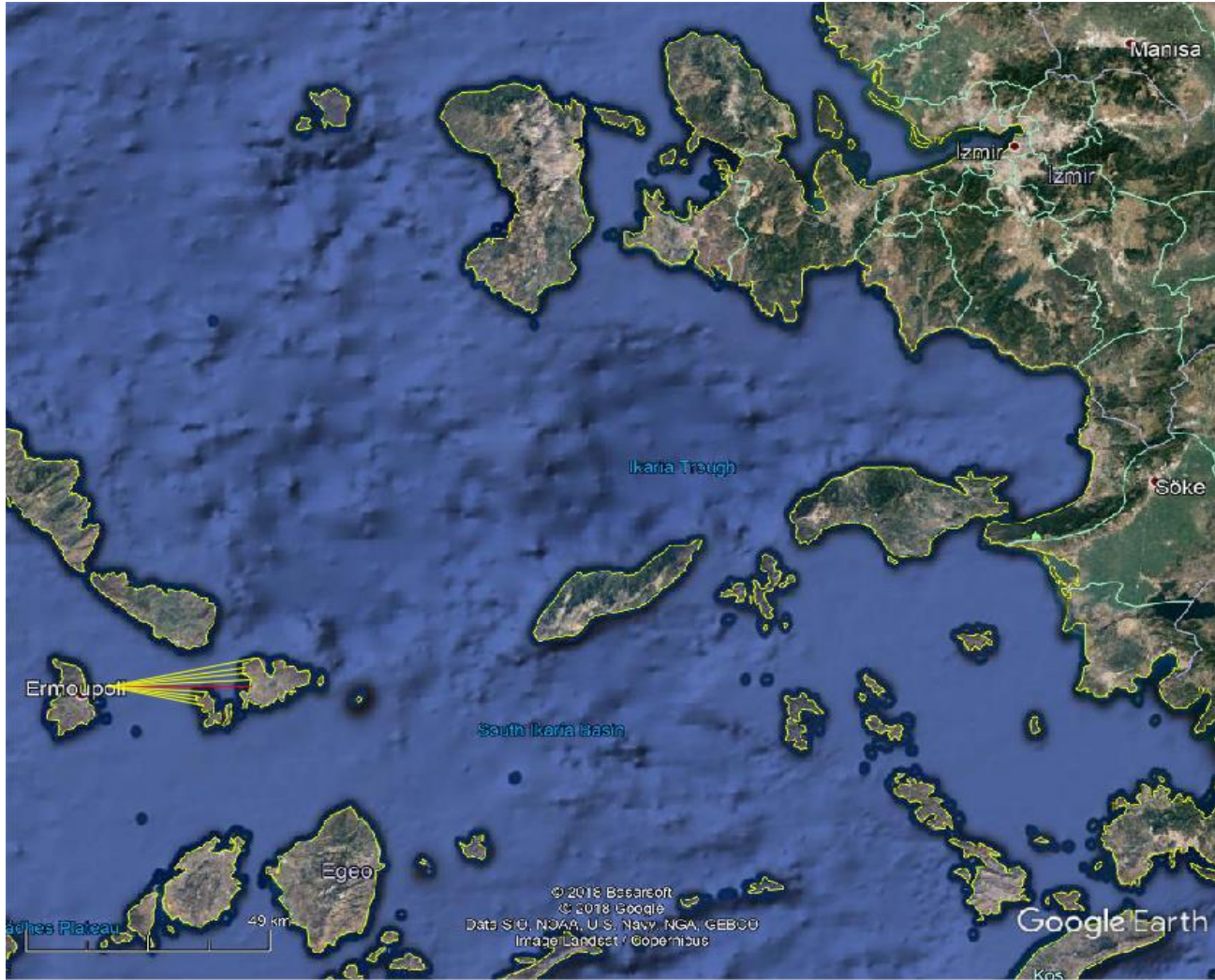
Εφαρμογή κατά τις μεθόδους SMB – Wilson



θ_i	-45°	-39°	-33°	-27°	-21°	-15°	-9°	-3°	3°	9°	15°	21°	27°	33°	39°	45°
$F_i [m]$	15487.6	16026.5	16404.7	18474.1	193629.1	96139.8	27092.1	28451.3	19430.7	17761.8	19415.4	20577.4	80234.9	51917.0	52004.1	50304.1

$F_{eff} [m]$	41298.7											
	Beaufort											
$H_s [m]$	5		6		7		8		9		10	
	SMB	Wilson	SMB	Wilson	SMB	Wilson	SMB	Wilson	SMB	Wilson	SMB	Wilson
$T_s [s]$	1.28	1.23	1.74	1.69	2.26	2.18	2.83	2.73	3.44	3.29	4.11	3.91
$t_{min} [h]$	4.49	4.13	5.22	4.71	5.90	5.23	6.57	5.73	7.19	6.18	7.81	6.62
	4.75	5.05	4.13	4.50	3.68	4.08	3.33	3.74	3.05	3.23	2.81	3.23

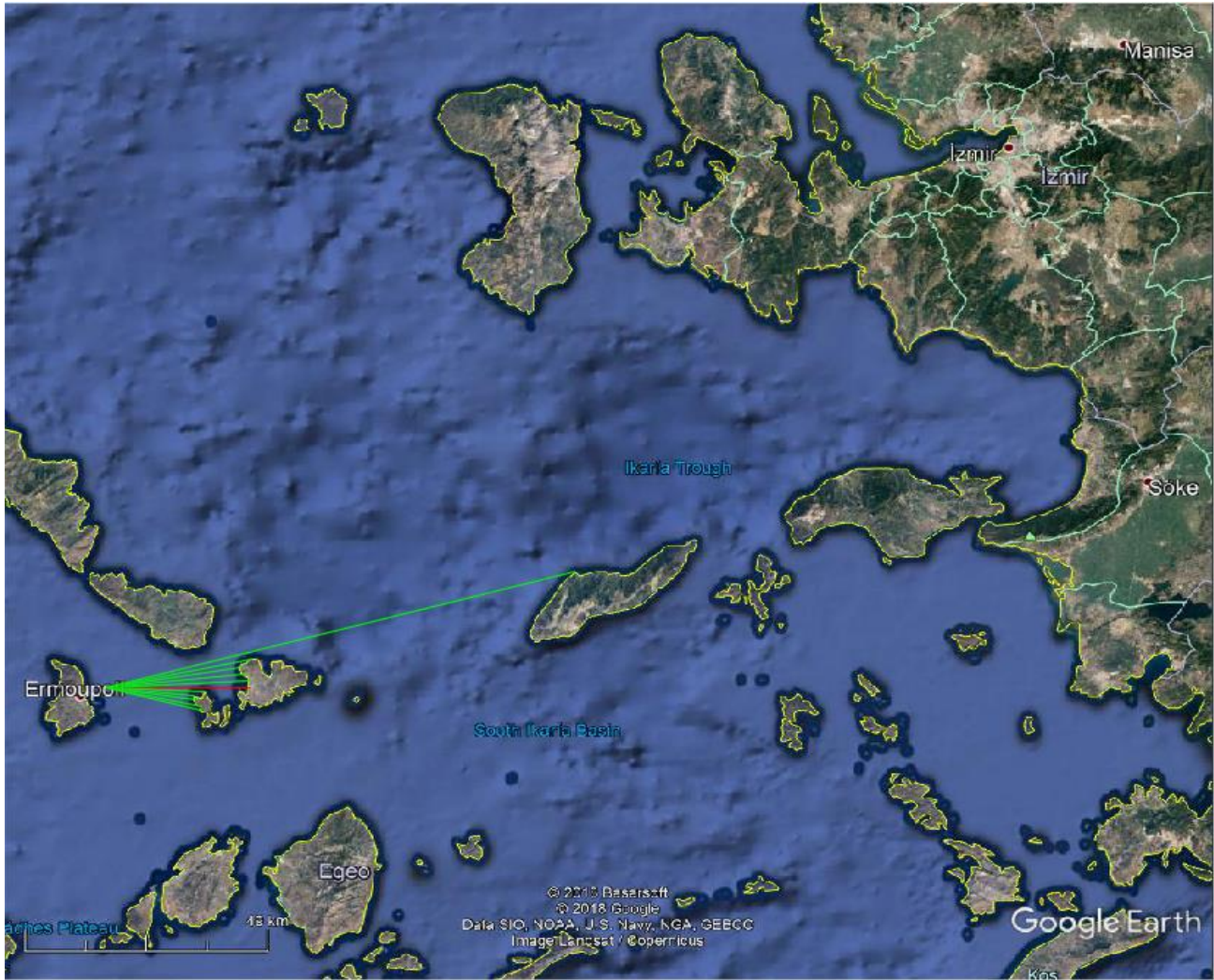
Εφαρμογή κατά τη μέθοδο JONSWAP



θ_i	-12°	-9°	-6°	-3°	0	3°	6°	9°	12°
$F_i [m]$	29438.6	27159.4	27464.5	28340.9	28386.2	19507.3	17560.7	17819.2	19352.3

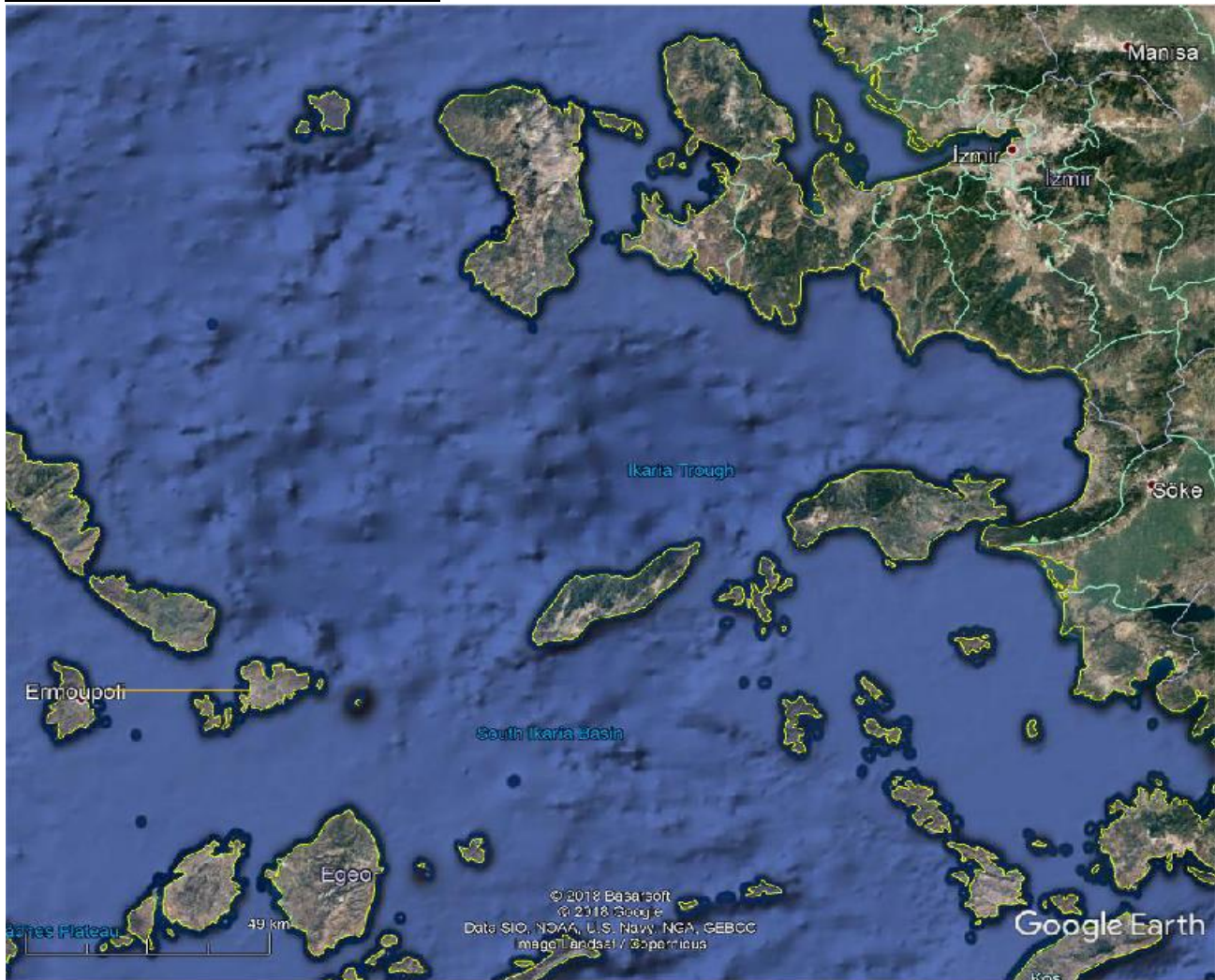
$F_{eff} [m]$	23892.1					
	Beaufort					
	5	6	7	8	9	10
$H_s [m]$	0.85	1.10	1.36	1.64	1.93	2.25
$T_s [s]$	3.97	4.32	4.64	4.94	5.22	5.48
$t_{min} [h]$	3.35	3.08	2.87	2.69	2.55	2.42

Εφαρμογή κατά τη μέθοδο Donelan



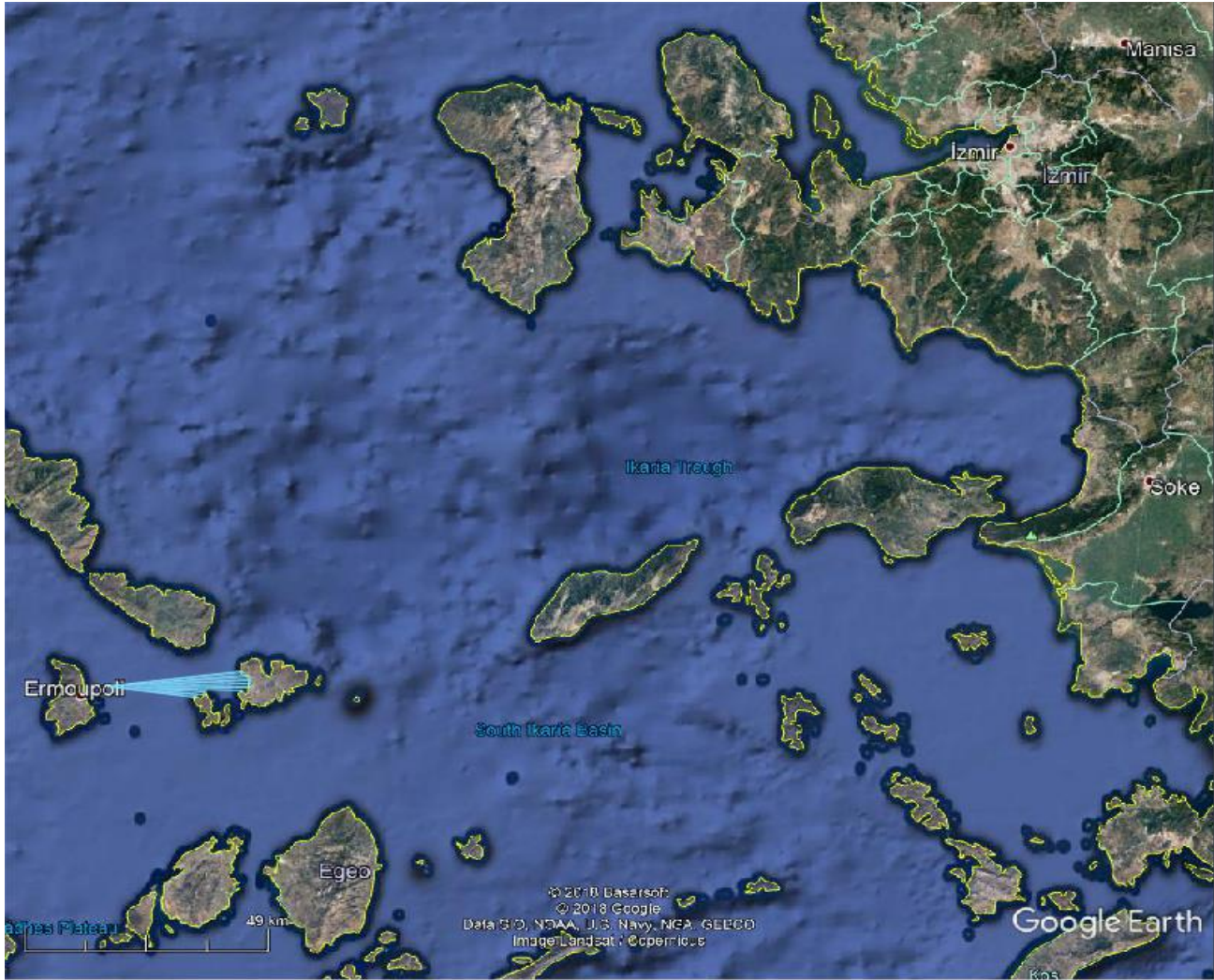
θ_i	-15°	-12°	-9°	-6°	-3°	0	3°	6°	9°	12°	15°
$F_i [m]$	96107.0	29317.9	27065.8	27384.9	28424.7	28294.1	19417.3	17475.5	17718.2	19244.3	19322.8
$\cos\theta \cdot F_\psi^{0.426}$	128.1	78.2	76.4	77.3	78.8	78.8	67.0	63.8	63.7	65.4	64.7

$F_\psi [m]$	96107.0					
	Beaufort					
	5	6	7	8	9	10
$H_s [m]$	1.27	1.74	2.27	2.87	3.52	4.24
$T_s [s]$	4.64	5.32	5.96	6.61	7.22	7.83
$t_{min} [h]$	9.57	8.35	7.44	6.72	6.15	5.67

Εφαρμογή κατά τη μέθοδο CERC

$F [m]$	28282.8					
	Beaufort					
	5	6	7	8	9	10
$H_s [m]$	0.93	1.19	1.48	1.79	2.10	2.45
$T_s [s]$	4.09	4.46	4.79	5.11	5.41	5.69
$t_{min} [h]$	3.75	3.45	3.21	3.01	2.85	2.71

Εφαρμογή κατά τη μέθοδο ACES

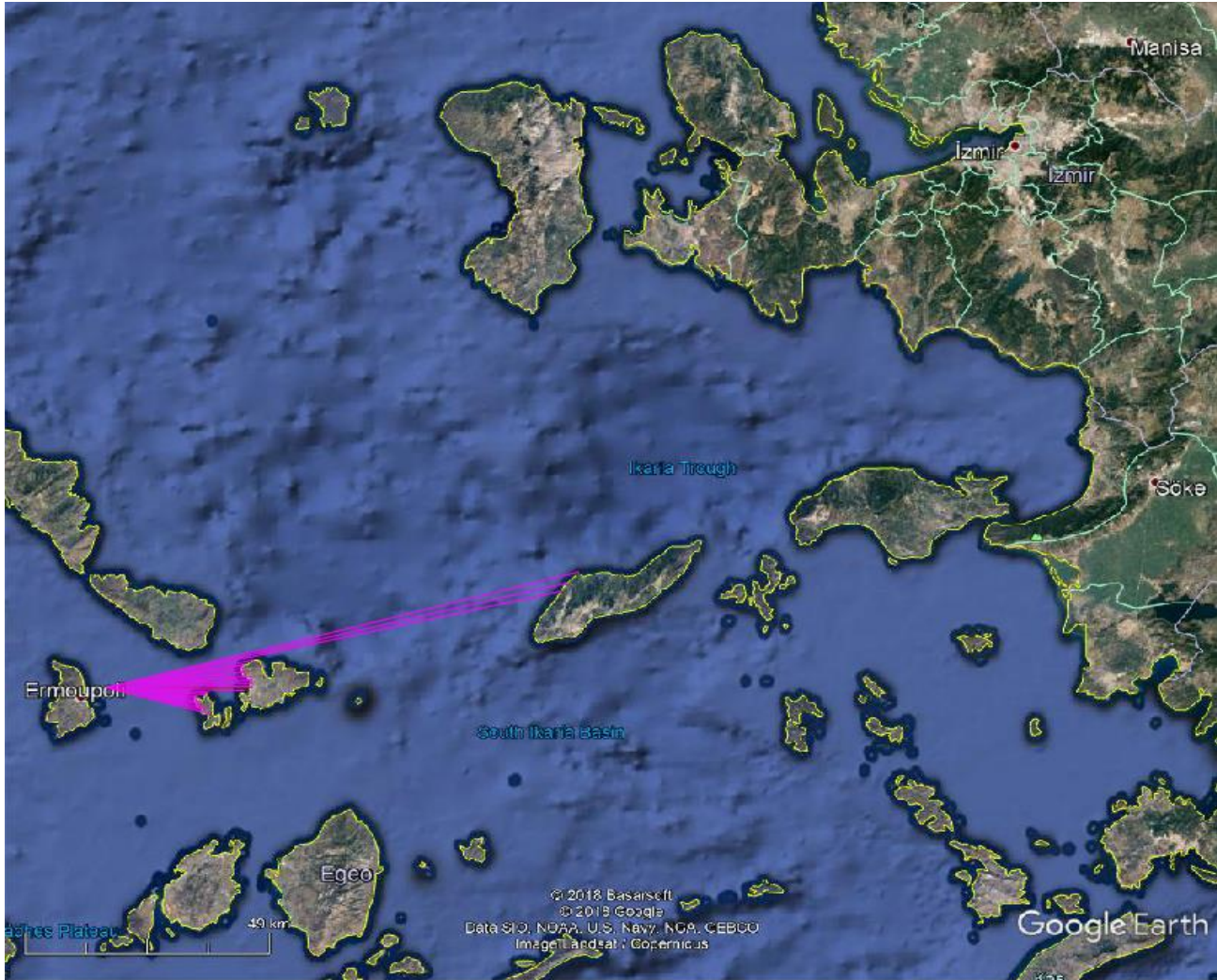


	-7.5°	-6.5°	-5.5°	-4.5°	-3.5°	-2.5°	-1.5°	-0.5°	0.5°	1.5°	2.5°	3.5°	4.5°	5.5°	6.5°	7.5°
	17474.9	17421.5	17714.7	19287.6	19314.3	19453.4	26607.4	28191.2	29312.5	29343.2	29360.5	28386.5	28198.2	27596.6	27043.1	26995.1
	73.39	73.33	73.91	76.76	76.84	77.10	88.50	90.79	92.36	92.40	92.41	91.02	90.72	89.83	88.99	88.86

$\theta_i, F_i [m], F_\varphi^{0.28} \cdot (\cos \varphi)^{0.44}$

$F_\varphi [m]$	29360.5					
	Beaufort					
	5	6	7	8	9	10
$H_s [m]$	0.89	1.14	1.41	1.71	2.01	2.34
$T_s [s]$	3.63	4.06	4.46	4.85	5.21	5.57
$t_{min} [h]$	4.33	3.87	3.53	3.24	3.02	2.83

Εφαρμογή κατά τη μέθοδο CEM



-15°	92920.3	θ_i	$F_i [m]$	5°	17684.1
-14°	93484.9	-4°	28530.0	6°	17529.9
-13°	91778.9	-3°	28499.5	7°	17591.0
-12°	29316.5	-2°	28477.8	8°	17657.8
-11°	27477.6	-1°	28464.8	9°	17838.8
-10°	27230.8	0	28350.8	10°	18072.7
-9°	27140.0	1°	26834.6	11°	18391.2
-8°	27122.7	2°	19903.8	12°	19345.3
-7°	27166.7	3°	16456.5	13°	19287.3
-6°	27549.0	4°	19408.2	14°	19211.7
-5°	28155.8			15°	20942.8

$F_{eff} [m]$

29929.7

$H_s [m]$

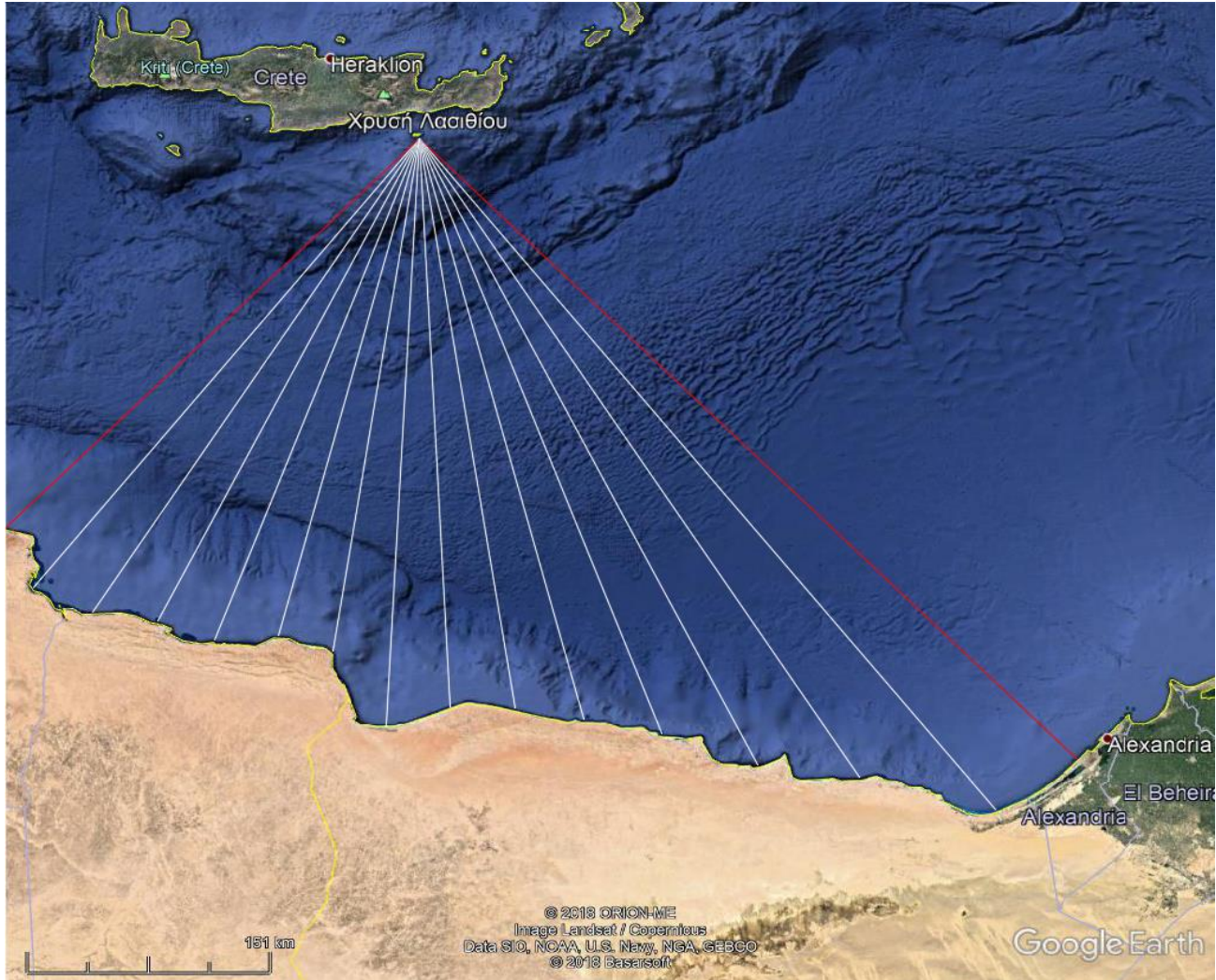
$T_s [s]$

$t_{min} [h]$

Beaufort					
5	6	7	8	9	10
0.95	1.26	1.62	2.03	2.47	2.98
3.80	4.18	4.54	4.89	5.23	5.56
4.49	4.12	3.83	3.59	3.40	3.23

5.4.3 Περιοχή Χρυσής Λασιθίου

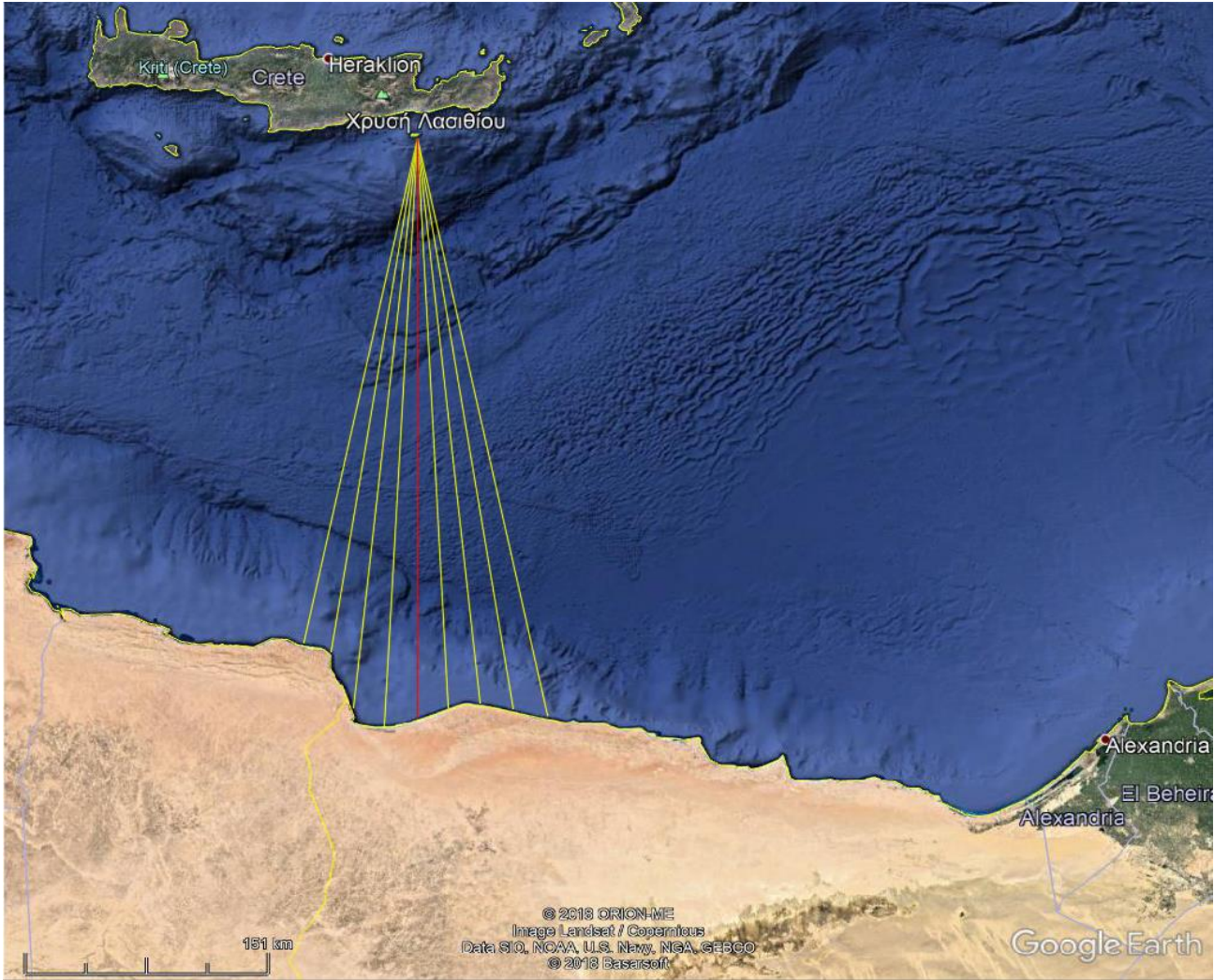
Εφαρμογή κατά τις μεθόδους SMB – Wilson



θ_i	-45°	-39°	-33°	-27°	-21°	-15°	-9°	-3°	3°	9°	15°	21°	27°	33°	39°	45°
$F_i [m]$	351293	371705	360298	349281	345760	332457	356346	377269	365276	380770	398051	421091	475470	523054	563320	566439

$F_{eff} [m]$	359815											
	Beaufort											
	5		6		7		8		9		10	
$H_s [m]$	SMB	Wilson	SMB	Wilson	SMB	Wilson	SMB	Wilson	SMB	Wilson	SMB	Wilson
$T_s [s]$	2.56	2.33	3.73	3.42	5.03	4.67	6.50	6.09	8.04	7.61	9.75	9.28
$t_{min} [h]$	6.48	6.36	7.76	7.51	8.99	8.57	10.19	9.60	11.31	10.55	12.43	11.47
	27.03	24.55	23.01	21.86	20.21	19.82	18.08	18.16	16.45	15.71	15.11	15.71

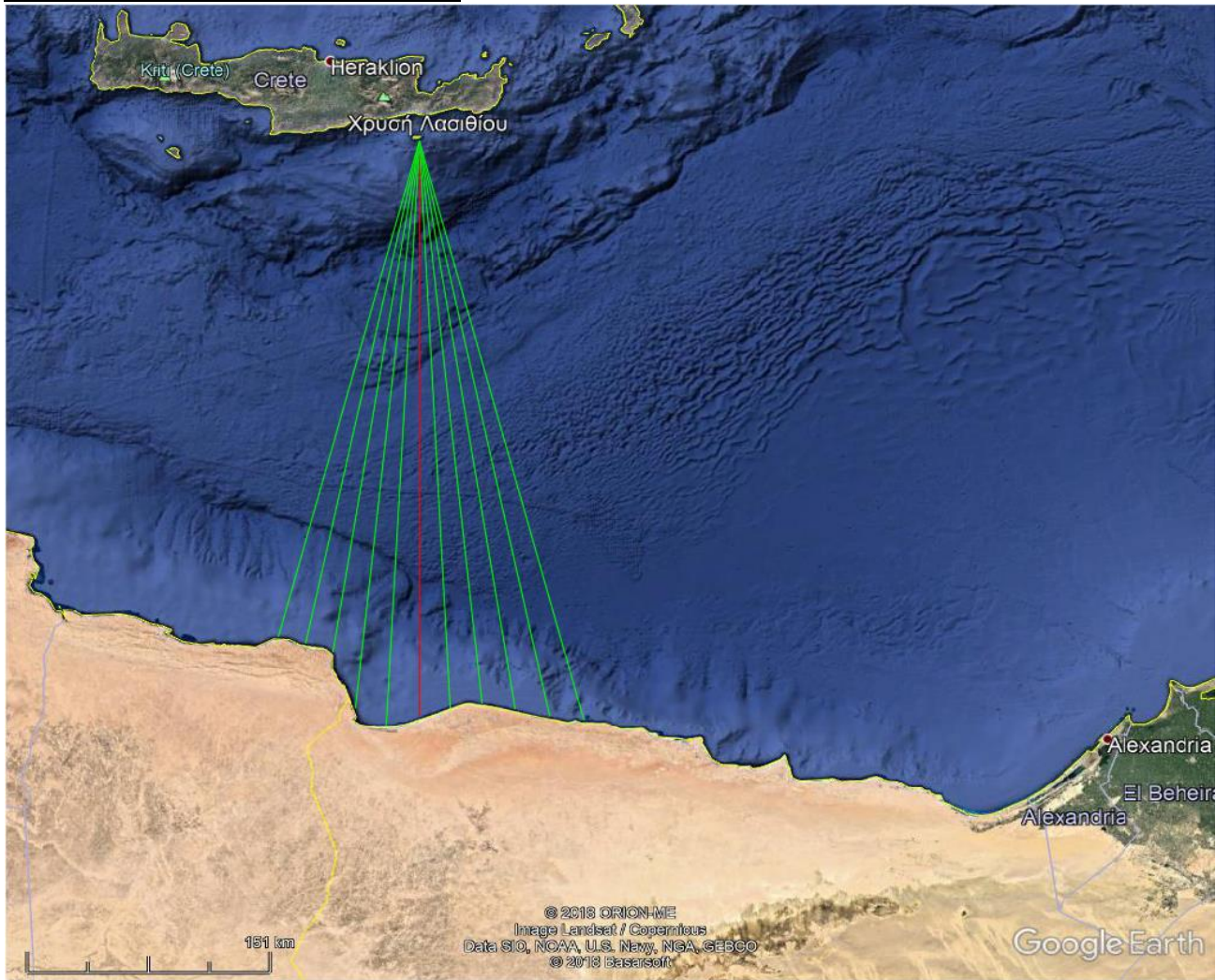
Εφαρμογή κατά τη μέθοδο JONSWAP



θ_i	-12°	-9°	-6°	-3°	0	3°	6°	9°	12°
$F_i [m]$	333521	356346	379562	377269	369822	365276	371328	380770	387974

$F_{eff} [m]$	369096					
	Beaufort					
	5	6	7	8	9	10
$H_s [m]$	3.35	4.31	5.34	6.46	7.60	8.85
$T_s [s]$	9.89	10.75	11.54	12.30	12.99	13.66
$t_{min} [h]$	20.78	19.11	17.80	16.70	15.82	15.04

Εφαρμογή κατά τη μέθοδο Donelan



θ_i	-15°	-12°	-9°	-6°	-3°	0	3°	6°	9°	12°	15°
$F_i [m]$	398051	387974	380770	371328	365276	369822	377269	379562	356346	333521	332457
$\cos\theta \cdot F_\psi^{0.426}$	234.7	235.1	235.5	234.6	233.9	235.5	237.2	236.8	228.9	220.4	217.4

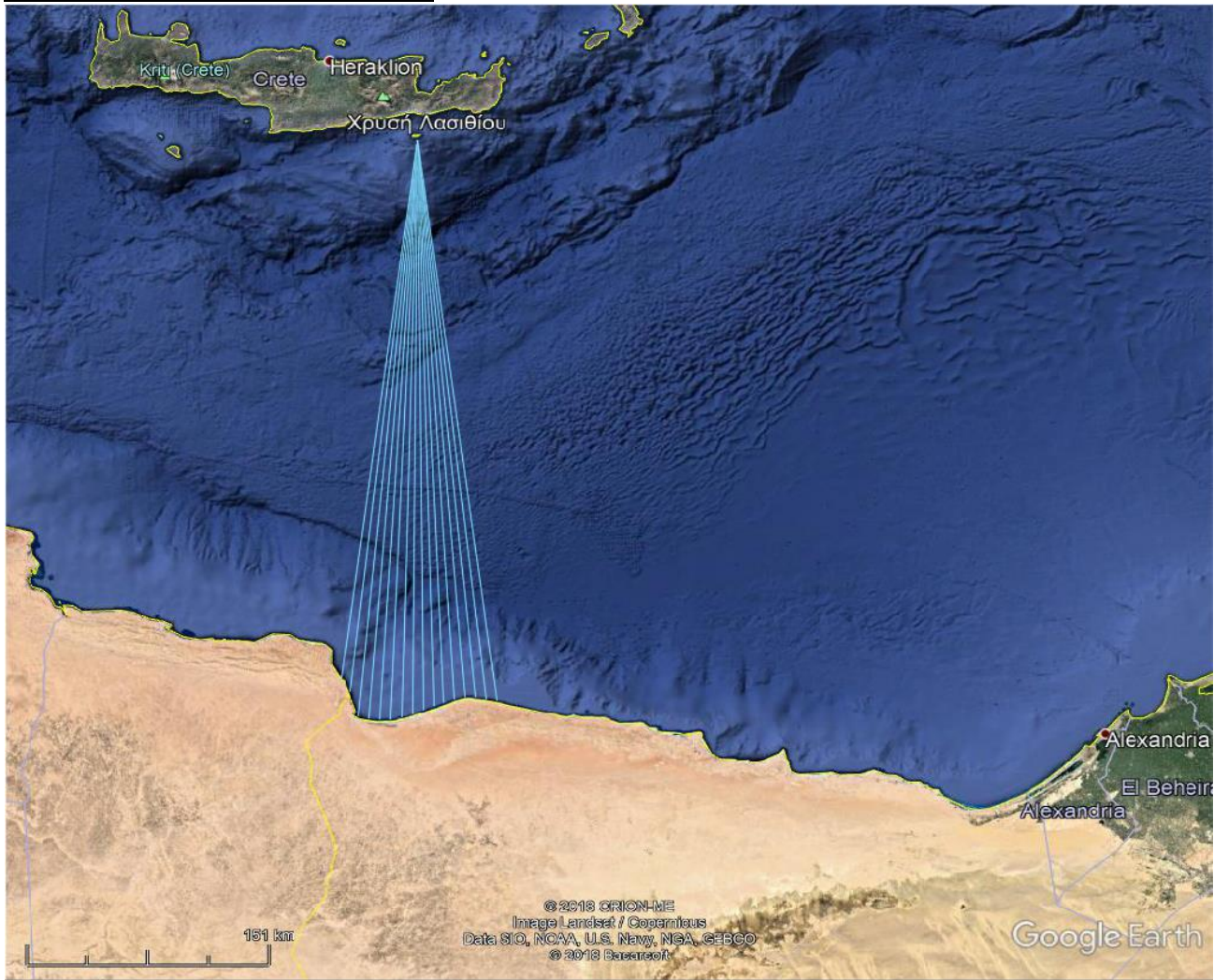
$F_\psi [m]$	377269					
	Beaufort					
	5	6	7	8	9	10
$H_s [m]$	2.23	3.05	3.97	5.03	6.16	7.43
$T_s [s]$	6.47	7.41	8.32	9.21	10.07	10.92
$t_{min} [h]$	26.94	23.51	20.96	18.91	17.31	15.96

Εφαρμογή κατά τη μέθοδο CERC



$F [m]$	369822					
	Beaufort					
	5	6	7	8	9	10
$H_s [m]$	3.36	4.32	5.34	6.46	7.61	8.85
$T_s [s]$	9.56	10.41	11.20	11.94	12.63	13.29
$t_{min} [h]$	20.81	19.13	17.82	16.73	15.84	15.06

Εφαρμογή κατά τη μέθοδο ACES

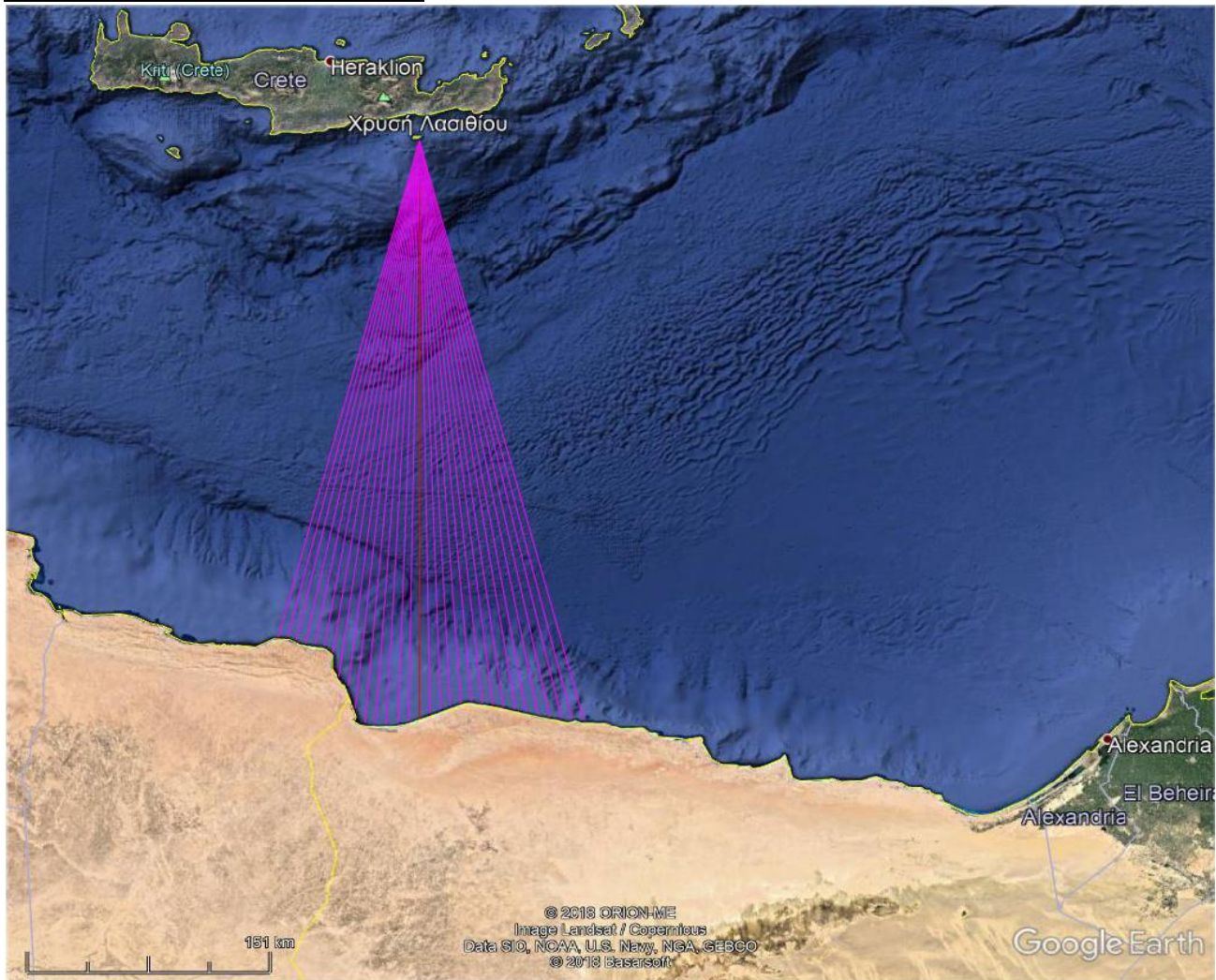


-7.5°	-6.5°	-5.5°	-4.5°	-3.5°	-2.5°	-1.5°	-0.5°	0.5°	1.5°	2.5°	3.5°	4.5°	5.5°	6.5°	7.5°
375958	372884	369913	367839	366422	365123	366239	368508	370681	372995	375826	377740	379232	379657	379255	378592
283.15	282.30	281.45	280.88	280.49	280.13	280.55	281.34	282.07	282.82	283.71	284.27	284.67	284.69	284.41	284.02

$\theta_i, F_i [m], F_\varphi^{0.28} \cdot (\cos \varphi)^{0.44}$

$F_\varphi [m]$	379657					
	Beaufort					
	5	6	7	8	9	10
$H_s [m]$	3.19	4.10	5.08	6.14	7.23	8.41
$T_s [s]$	7.44	8.31	9.13	9.93	10.67	11.40
$t_{min} [h]$	27.34	24.47	22.28	20.49	19.07	17.84

Εφαρμογή κατά τη μέθοδο CEM



-15°	332457	θ_i	$F_i [m]$	5°	368756
-14°	333715	-4°	378376	6°	371328
-13°	333777	-3°	377269	7°	374463
-12°	333521	-2°	374391	8°	377449
-11°	335607	-1°	371638	9°	380770
-10°	349656	0	369822	10°	382873
-9°	356346	1°	367188	11°	386421
-8°	370948	2°	365923	12°	387974
-7°	378974	3°	365276	13°	389592
-6°	379562	4°	367115	14°	392560
-5°	378757			15°	398051

$F_{eff} [m]$

368728

$H_s [m]$

$T_s [s]$

$t_{min} [h]$

Beaufort						
	5	6	7	8	9	10
$H_s [m]$	3.32	4.43	5.68	7.12	8.68	10.45
$T_s [s]$	8.77	9.65	10.48	11.30	12.07	12.84
$t_{min} [h]$	24.13	22.15	20.60	19.31	18.26	17.35

5.5 Εφαρμογή MIKE21|sw

Περιγραφή διαδικασίας ψηφιοποίησης βυθομετρικών χαρτών

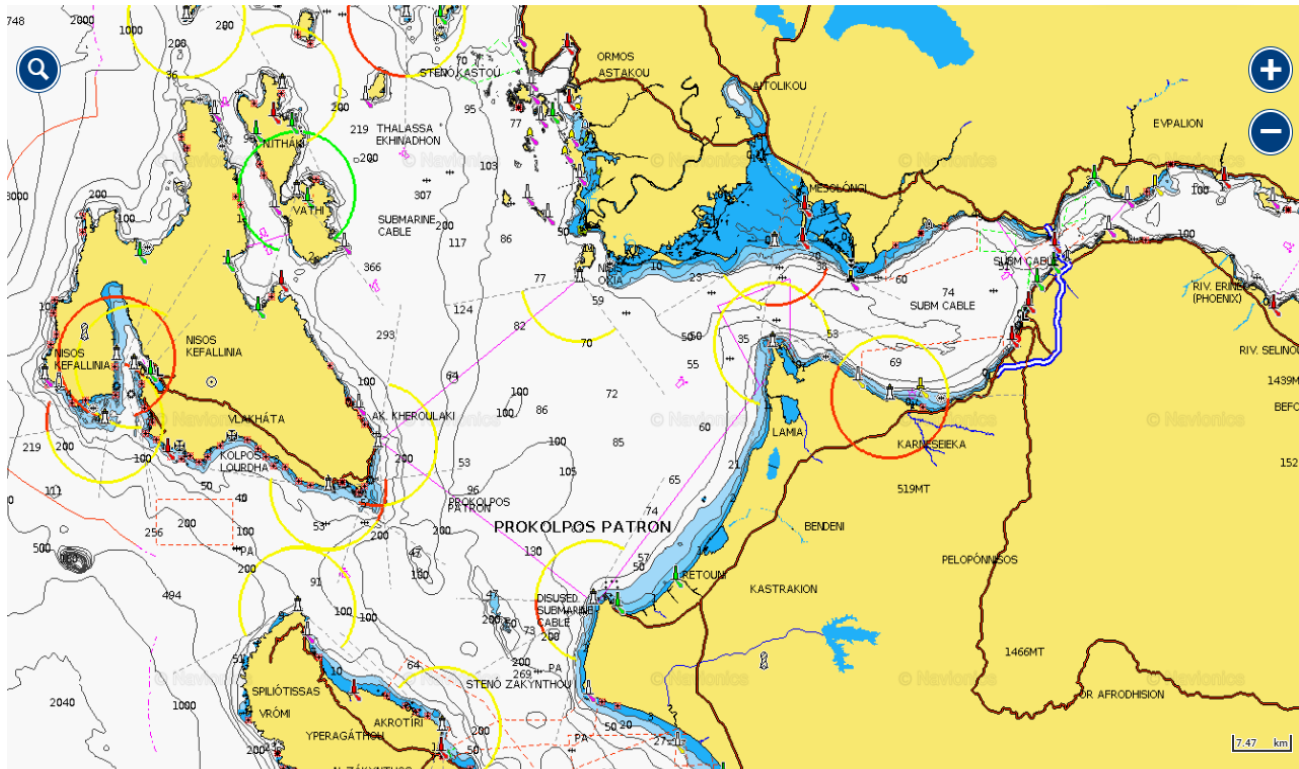
Για την εφαρμογή του μοντέλου προσομοίωσης MIKE21|sw είναι απαραίτητη η χρήση τοπογραφικών και βυθομετρικών δεδομένων, τα οποία, πολλές φορές, δεν βρίσκονται ελεύθερα σε διαθεσιμότητα για τον μελετητή. Για αυτό το λόγο, δημιουργείται η ανάγκη παραγωγής δεδομένων, τα οποία θα περιγράφουν την κατά περίπτωση περιοχή μελέτης. Μια αλληλουχία διαδικασιών, η οποία εξυπηρετεί αυτόν τον σκοπό, παρατίθεται παρακάτω:

- 1) Εύρεση της βυθομετρικής αποτύπωσης της περιοχής μελέτης με χρήση κατάλληλου μέσου (ηλεκτρονικά διαγράμματα πλοήγησης Navionics).
- 2) Απόφαση για την κατάλληλη μεγέθυνση, ώστε να αποδίδεται η επιθυμητή λεπτομέρεια στη βυθομετρία του στιγμιότυπου.
- 3) Λήψη πολλαπλών στιγμιότυπων επί του συνόλου της περιοχής μελέτης, διατηρώντας σταθερή την κλίμακα, με χρήση κατάλληλης εφαρμογής (Snipping Tool).
- 4) Απόδοση των στιγμιότυπων σε κατάλληλο σχεδιαστικό πρόγραμμα (CAD).
- 5) Αποτύπωση ολόκληρης της περιοχής συνθέτοντας τα μεμονωμένα στιγμιότυπα που έχουν ληφθεί σε μια ενιαία εικόνα (μορφή ψηφιδωτού).
- 6) Μετατροπή της αποτύπωσης σε κλίμακα 1:1 με τη βοήθεια της κλίμακας του υπομνήματος.
- 7) Χάραξη των ακτογραμμών και των ισοβαθών ακολουθώντας τις αντίστοιχες του βυθομετρικού χάρτη.
- 8) Ορισμός της τιμής κάθε ισοβαθούς ψηφιακά, χρησιμοποιώντας τις ενδείξεις του χάρτη.
- 9) Διαχωρισμός των στοιχείων των ακτογραμμών και της βυθομετρίας σε διαφορετικά αρχεία.
!!! Σε περίπτωση που η περιοχή μελέτης διαμορφώνεται από πολλαπλά και ανεξάρτητα μεταξύ τους χερσαία στοιχεία, κάθε στοιχείο θα πρέπει να απομονώνεται σε ξεχωριστό αρχείο.
- 10) Εξαγωγή των δεδομένων των αρχείων σε μορφή συντεταγμένων και κατάλληλη μορφοποίηση αυτών με χρήση κατάλληλων εργαλείων (Dfx2Xyz, NotePad, Excel), ώστε να γίνει δυνατό να χρησιμοποιηθούν στο μοντέλο προσομοίωσης MIKE21|sw.

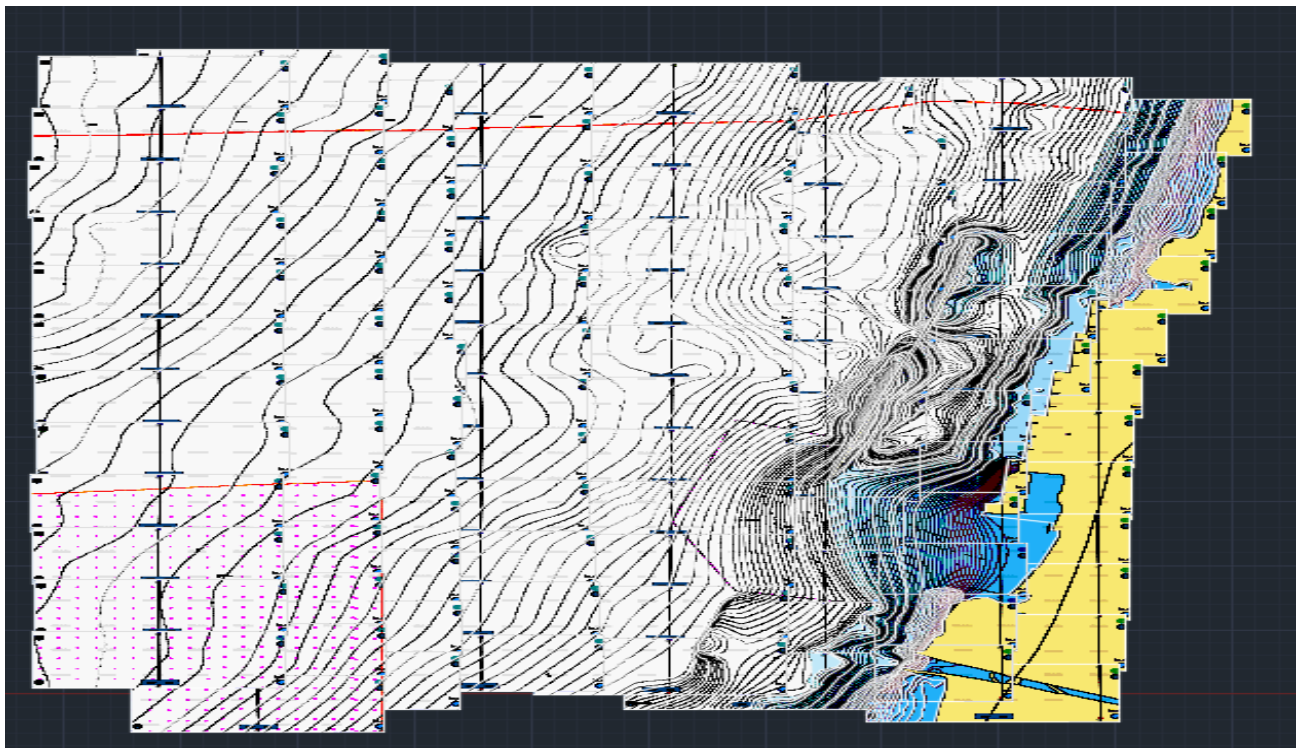
Επισημαίνεται πως οι προτάσεις για την χρήση συγκεκριμένων εργαλείων γίνεται συμβουλευτικά ως προς τον αναγνώστη. Είναι σαφές, πως η εξαγωγή τοπογραφικών και βυθομετρικών δεδομένων σε μορφή συντεταγμένων μπορεί να πραγματοποιηθεί με διάφορους τρόπους.

Στη συνέχεια, παρατίθενται ενδεικτικά τα πιο χαρακτηριστικά σημεία της διαδικασίας μέχρι και την εξαγωγή αποτελεσμάτων για κάθε ένα από τα τρία ορισμένα γεωμετρικά πεδία.

5.5.1 Περιοχή Λιμένα Πατρών



Εικόνα 5.10 Στιγμιότυπο ηλεκτρονικού διαγράμματος πλοήγησης Navionics του Πατραϊκού κόλπου.



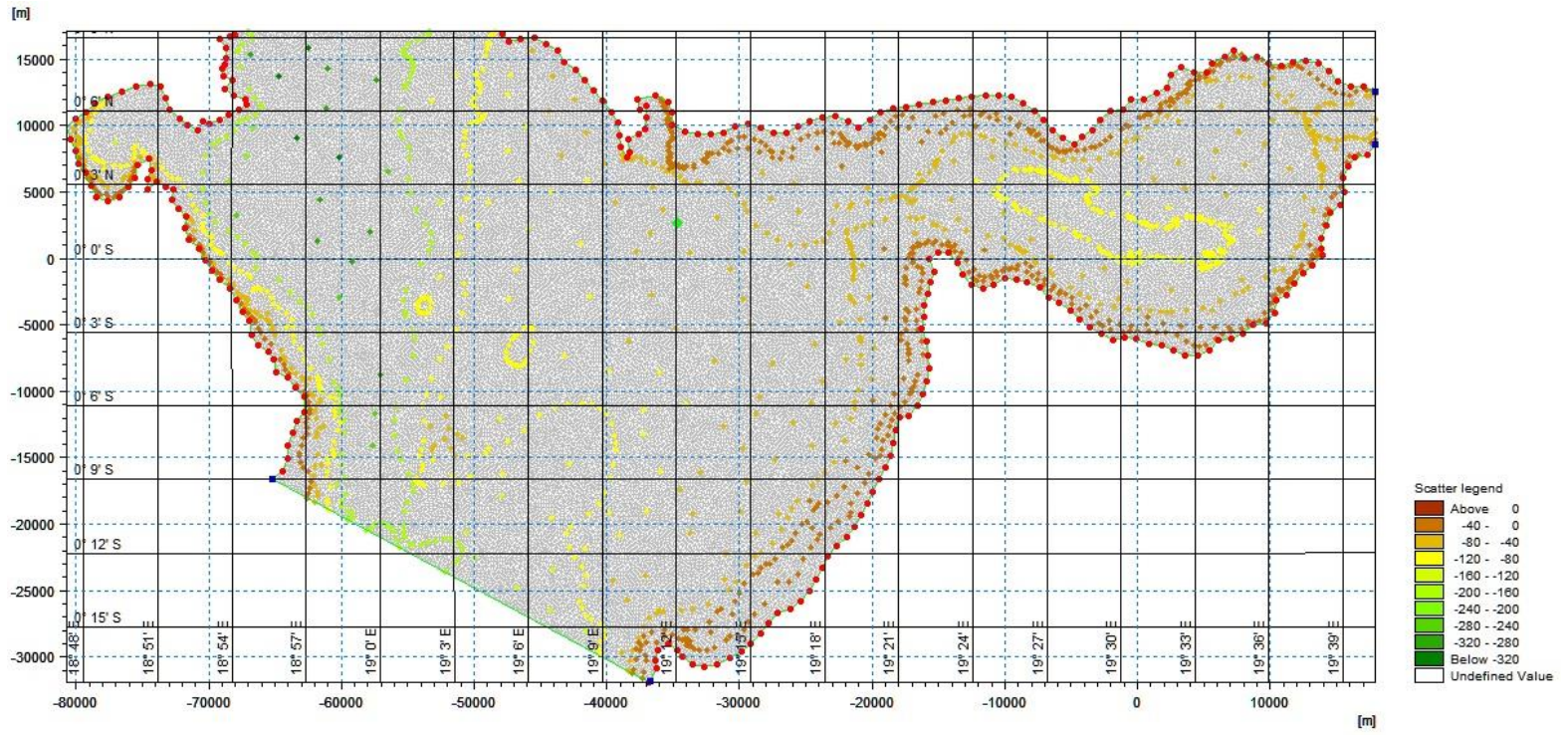
Εικόνα 5.11 Απόδοση συλλογής στιγμιότυπων σε σχεδιαστικό πρόγραμμα CAD (μορφή ψηφιδωτού) στον Πατραϊκό κόλπο.



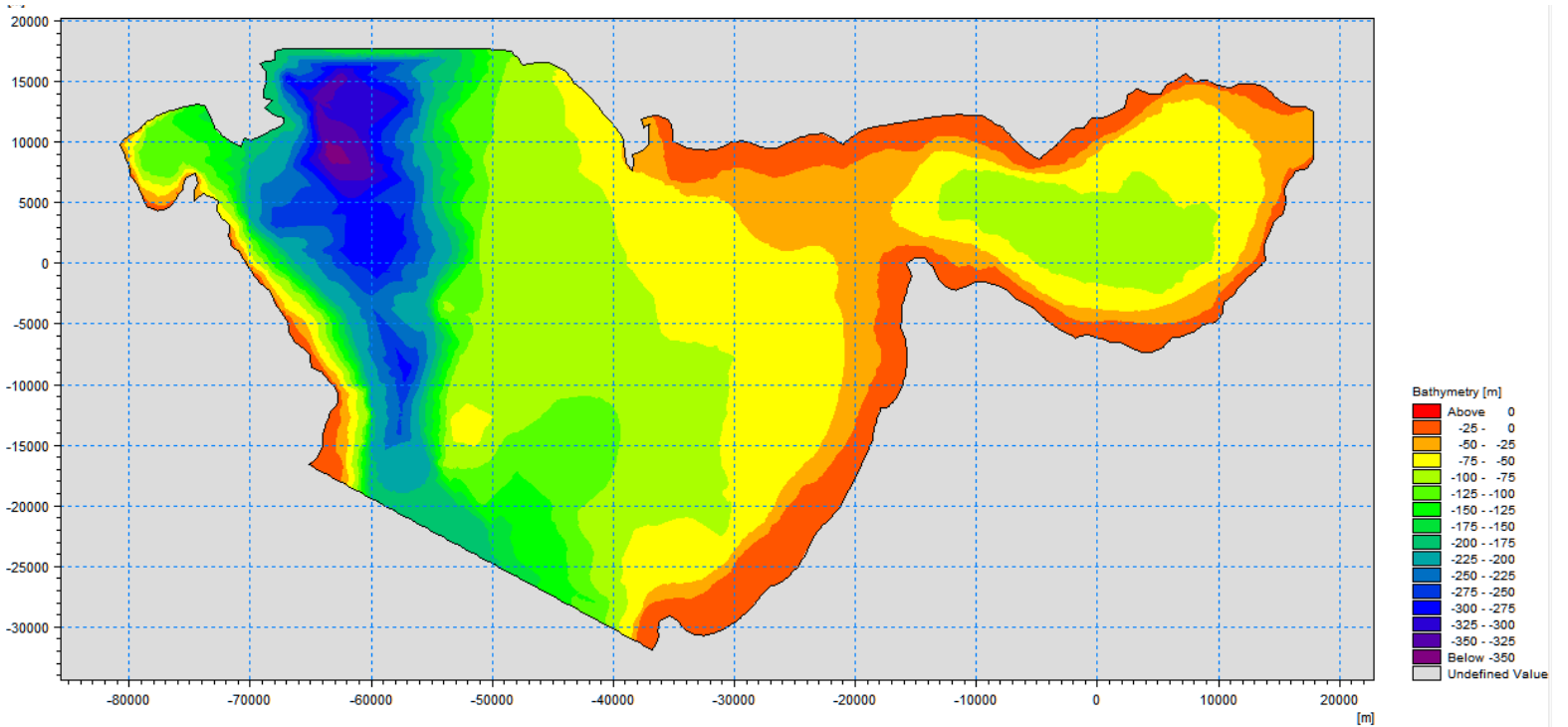
Εικόνα 5.12 Τελικό αποτέλεσμα χάραξης των ακτογραμμών του Πατραϊκού κόλπου.



Εικόνα 5.13 Τελικό αποτέλεσμα χάραξης της βυθομετρίας του Πατραϊκού κόλπου.



Εικόνα 5.14 Αρχική μορφή ψηφιοποίησης της βυθομετρίας του Πατραϊκού κόλπου.



Εικόνα 5.15 Τελική μορφή ψηφιοποίησης της βυθομετρίας του Πατραϊκού κόλπου.

Από την **Εικόνα 5.10** έως την **Εικόνα 5.15** παρουσιάζονται τα πιο χαρακτηριστικά βήματα της διαδικασίας της ψηφιοποίησης του Πατραϊκού κόλπου, όπως αυτά περιγράφονται αναλυτικά στην αρχή του **Κεφαλαίου 5.5**.

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του αριθμητικού μοντέλου ΜΙΚΕ21|sw για την περιοχή του Πατραϊκού κόλπου, με σημείο ενδιαφέροντος τον Λιμένα Πατρών. Από την **Εικόνα 5.16** έως την **Εικόνα 5.19** φαίνονται στιγμιότυπα του κυματικού κλίματος, ανά χαρακτηριστικά χρονικά βήματα, σε ολόκληρο το πεδίο της προσομοίωσης, όπου διακρίνονται:

- με βέλη, η διεύθυνση διάδοσης των κυματισμών.
- με χρήση χρωματικής παλέτας, τα ύψη κύματος, οι τιμές των οποίων αναγράφονται στο υπόμνημα αλλά και επί του πεδίου.
- το χρονικό σημείο κατά το οποίο εξελίσσεται η προσομοίωση.
- η έκταση του πεδίου προσομοίωσης και η κλίμακα σχεδιασμού.

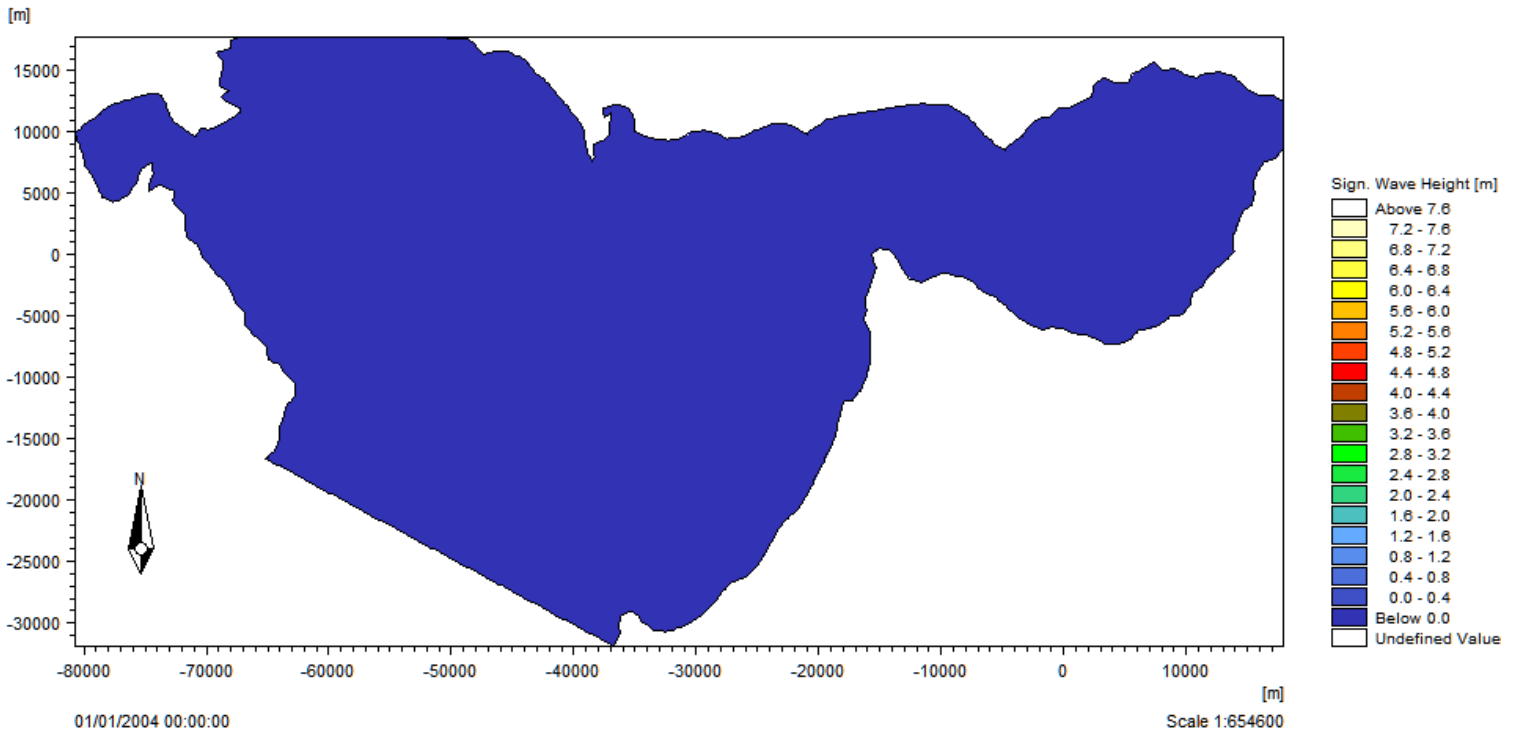
Στο **Σχήμα 5.1** παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που αφορούν τα χαρακτηριστικά ύψη κύματος που παρατηρούνται στο σημείο ενδιαφέροντος από το οποίο εφαρμόστηκαν επίσης οι εμπειρικές μέθοδοι, για κάθε μονάδα της κλίμακας Beaufort.

Η διάρκεια πνοής του ανέμου ορίστηκε με τέτοιο τρόπο ώστε να είναι εφικτή η πλήρης ανάπτυξη των κυματισμών, κάτι το οποίο φαίνεται συγκρίνοντας την **Εικόνα 5.18** με την **Εικόνα 5.19**, όπως επίσης και με την παρατήρηση της σταθεροποίησης των διαγραμμάτων στο **Σχήμα 5.1** και στο **Σχήμα 5.2**.

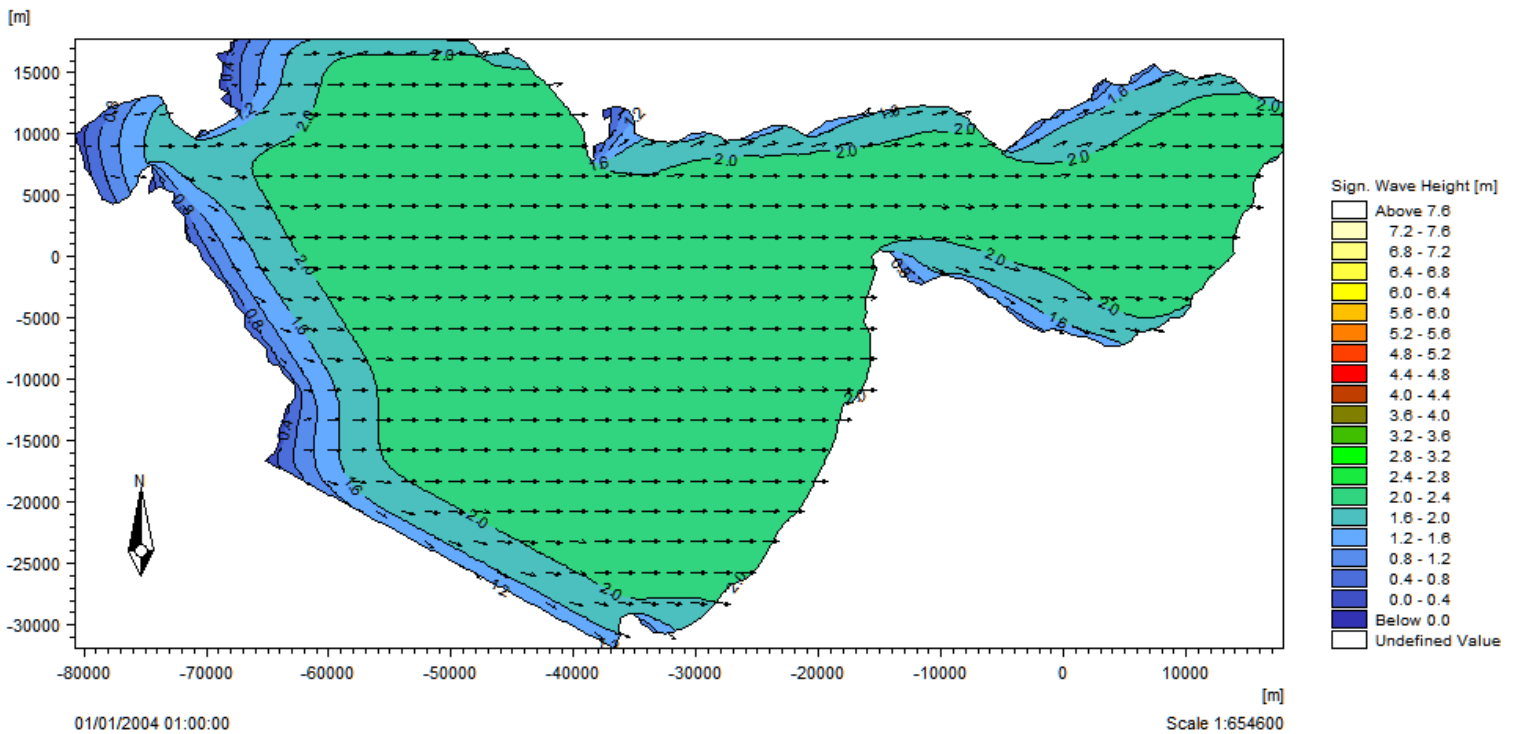
Στο **Σχήμα 5.2** παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που αφορούν τις χαρακτηριστικές περιόδους κορυφής που παρατηρούνται στο σημείο ενδιαφέροντος, για κάθε μονάδα της κλίμακας Beaufort. Χαρακτηριστικές είναι οι διακυμάνσεις που παρατηρούνται στις τιμές, έως και την οριστική σταθεροποίησή τους.

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα του πεδίου με αυτά του σημείου ενδιαφέροντος, ενδεικτικά στα 10 Beaufort, φαίνεται πως η μέγιστη τιμή του χαρακτηριστικού ύψους κύματος στο πεδίο είναι προσεγγιστικά στα 7.5 m (**Εικόνα 5.19**), ενώ στο σημείο ενδιαφέροντος στα 6.6 m (**Σχήμα 5.1**). Κάτι τέτοιο υποδεικνύει πως κατά την διάδοση των κυματισμών από τα δυτικά μέχρι το σημείο ενδιαφέροντος υπάρχουν στοιχεία τα οποία συντελούν στην μείωση της ενέργειας που φέρουν οι κυματισμοί αυτοί, παρόλο που το πεδίο είναι συνεχές. Τα φαινόμενα της περίθλασης, της διάθλασης και τα χερσαία όρια που συναντώνται στο πεδίο είναι υπεύθυνα για αυτή τη μείωση. Η γεωμετρία του πεδίου, δηλαδή, δεν λειτουργεί ευεργετικά ως προς την ανάπτυξη των κυματισμών προς το σημείο ενδιαφέροντος, καθώς αυτό βρίσκεται στο πιο ανατολικό τμήμα του στενού του Πατραϊκού κόλπου.

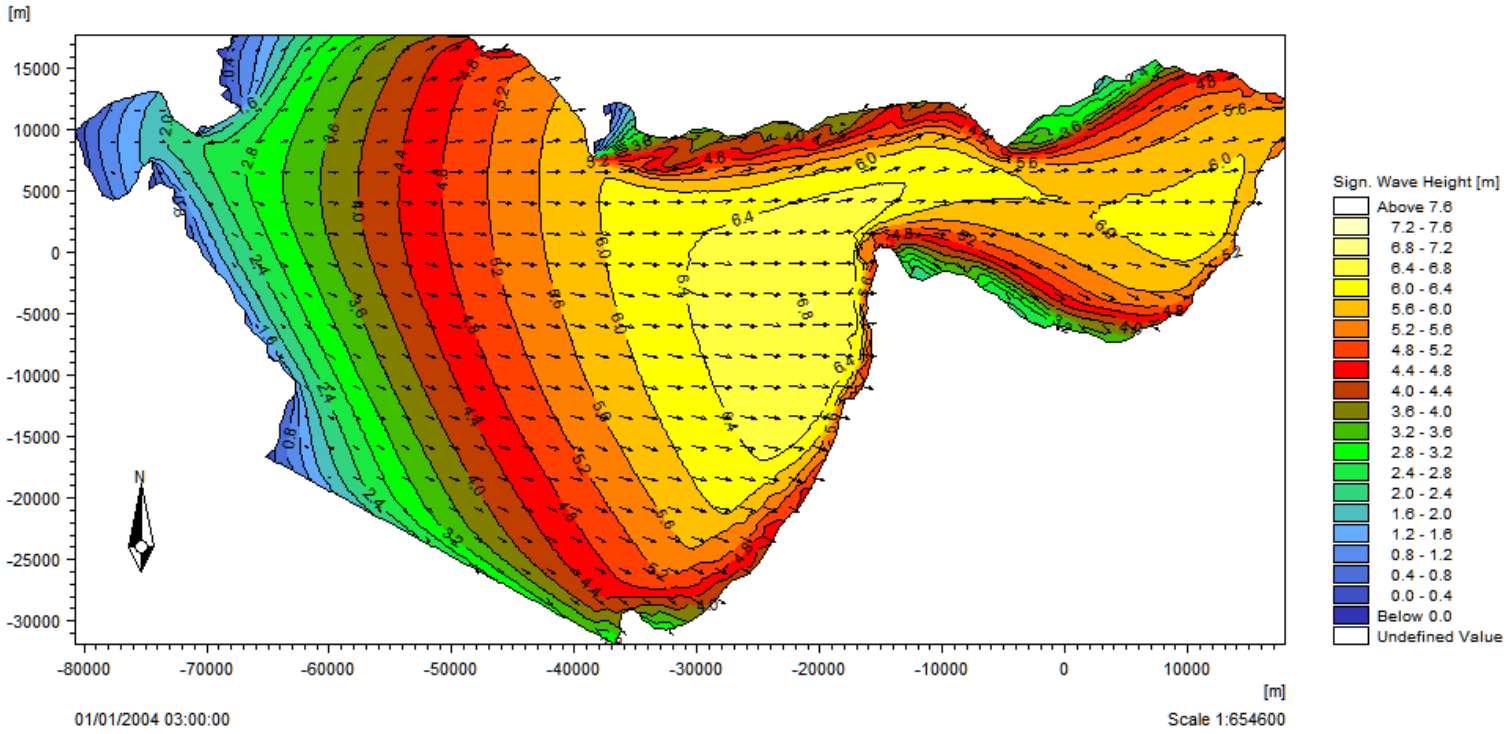
Επιπλέον, παρατηρείται χαρακτηριστικά πως για ανώτερες τιμές της ταχύτητας του ανέμου μειώνεται δραστικά ο χρόνος που απαιτείται ώστε να δημιουργηθεί ένας πλήρως ανεπτυγμένος κυματισμός, όπως και ο χρόνος που απαιτείται για να μπορέσει να αναπτυχθεί, αρχικά, ένα ανεμογενές κύμα (**Σχήμα 5.1**, **Σχήμα 5.2**).



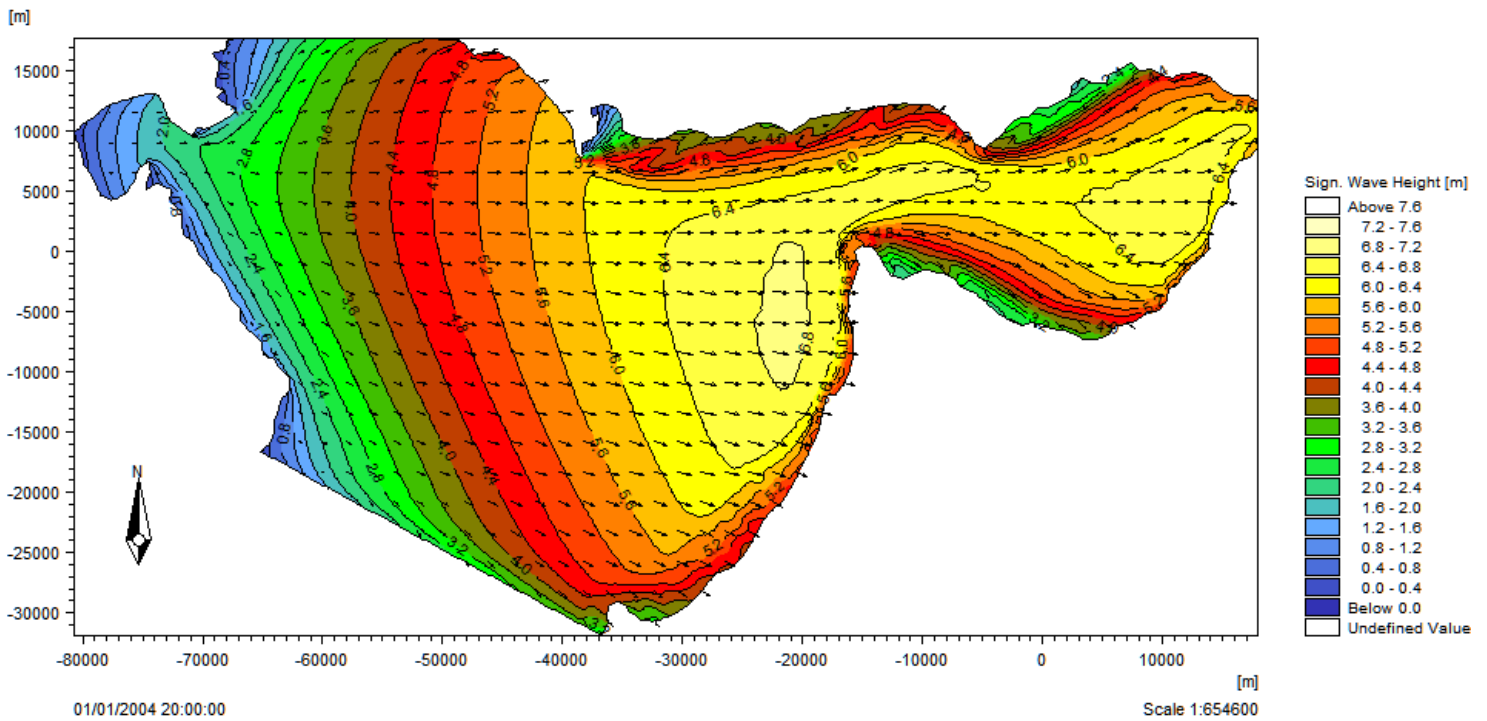
Εικόνα 5.16 Εκκίνηση προσομοίωσης για τον Πατραϊκό κόλπο σε συνθήκες ηρεμίας.



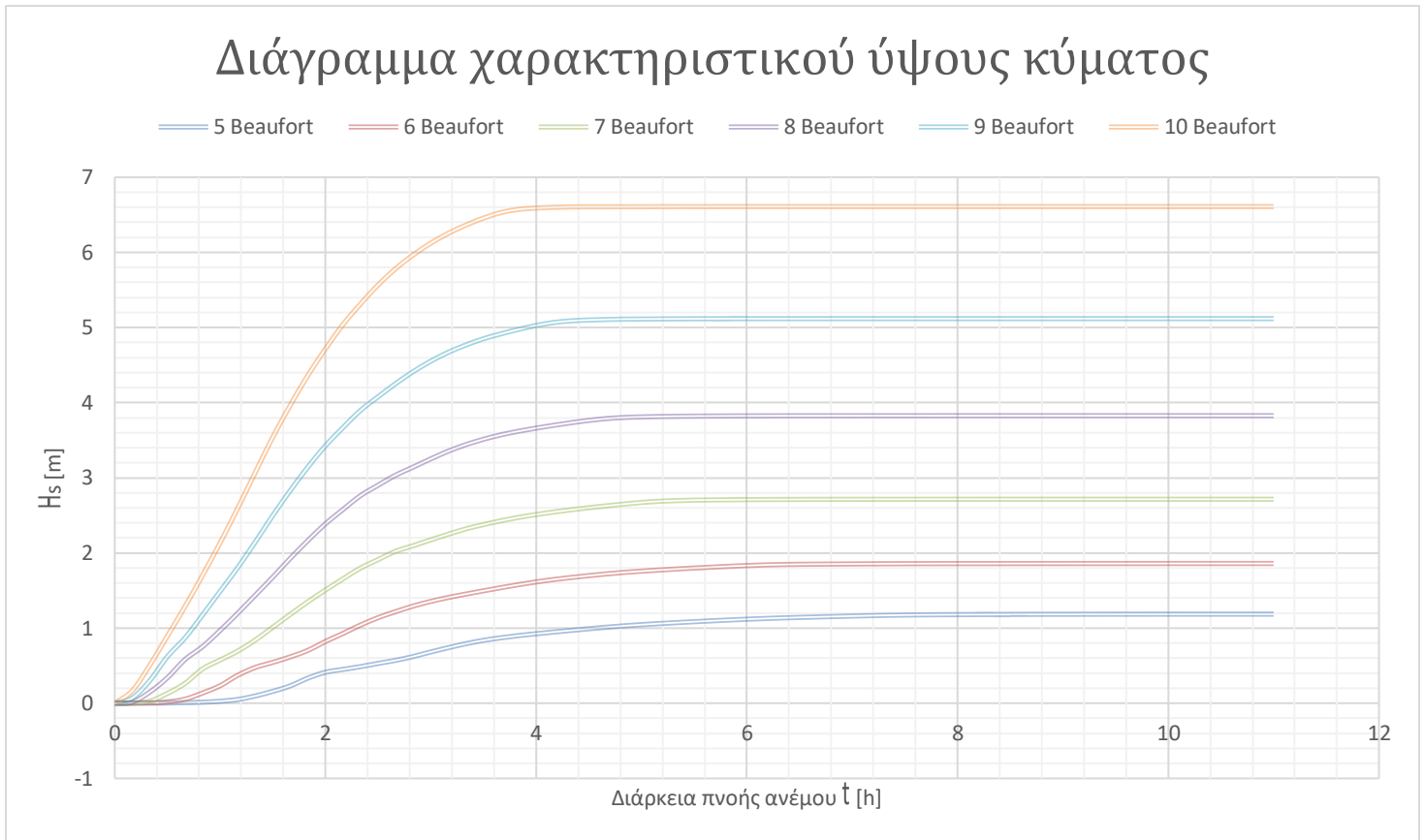
Εικόνα 5.17 Κυματικό κλίμα στον Πατραϊκό κόλπο με σημείο ενδιαφέροντος την περιοχή του λιμένα της Πάτρας για δυτικό άνεμο στα 10 Beaufort διάρκειας 1 ώρας.



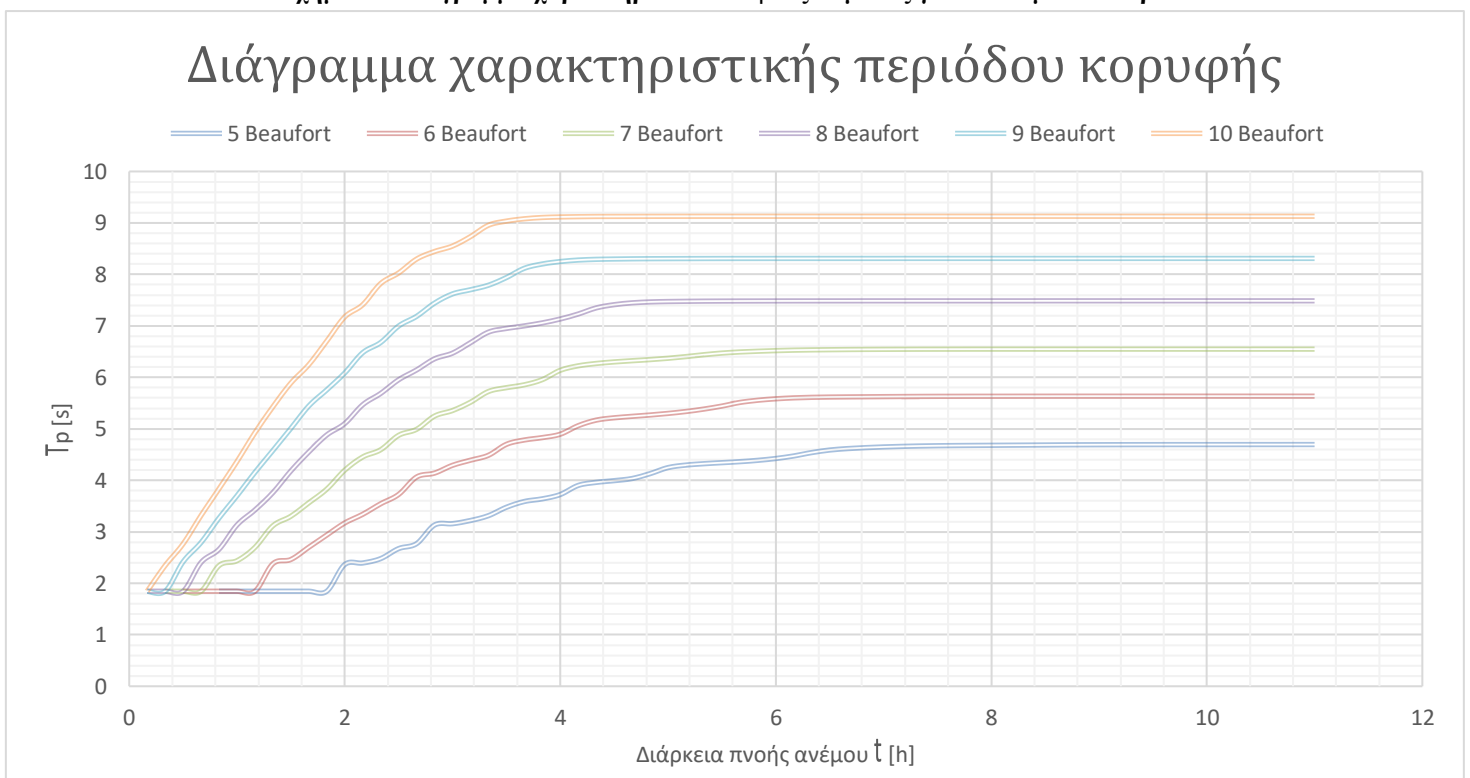
Εικόνα 5.18 Κυματικό κλίμα στον Πατραϊκό κόλπο με σημείο ενδιαφέροντος την περιοχή του λιμένα της Πάτρας για δυτικό άνεμο στα 10 Beaufort διάρκειας 3 ωρών.



Εικόνα 5.19 Κυματικό κλίμα στον Πατραϊκό κόλπο με σημείο ενδιαφέροντος την περιοχή του λιμένα της Πάτρας για δυτικό άνεμο στα 10 Beaufort διάρκειας 20 ωρών.

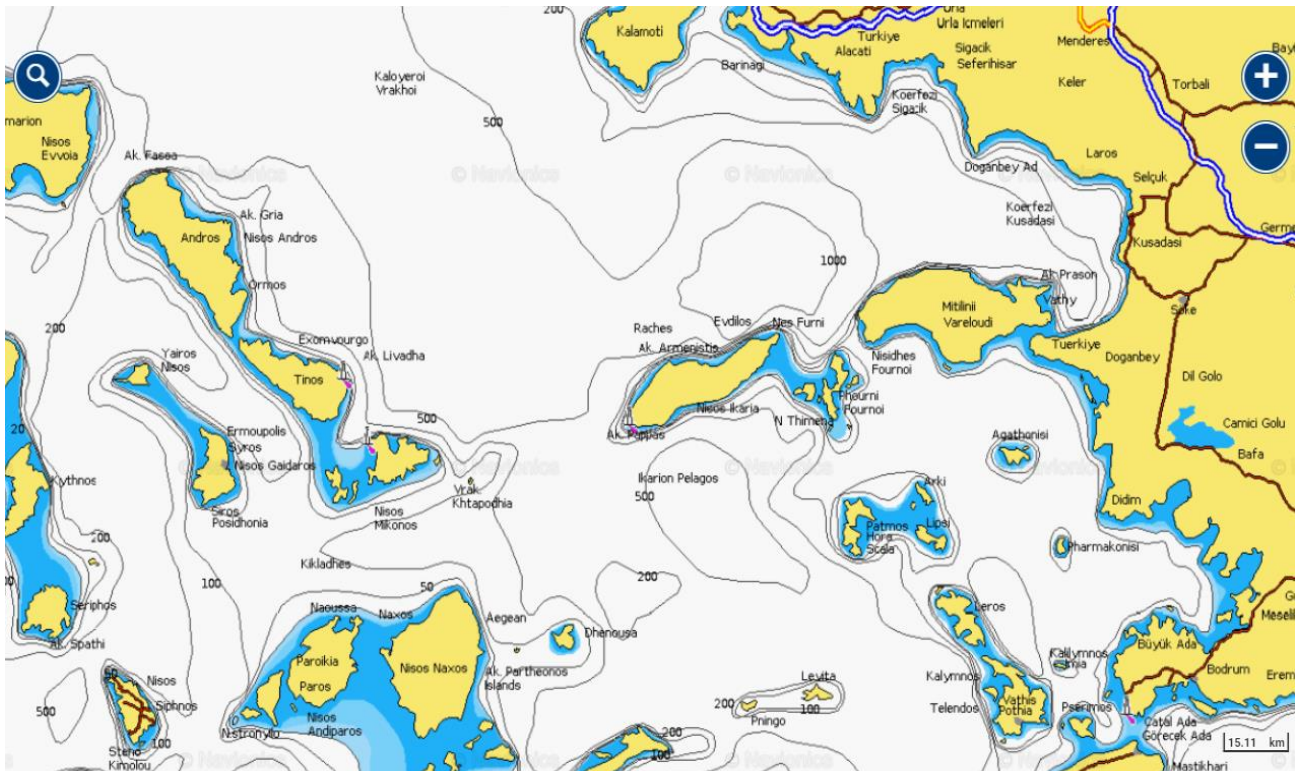


Σχήμα 5.1 Διάγραμμα χαρακτηριστικού ύψους κύματος για τον Λιμένα Πατρών.

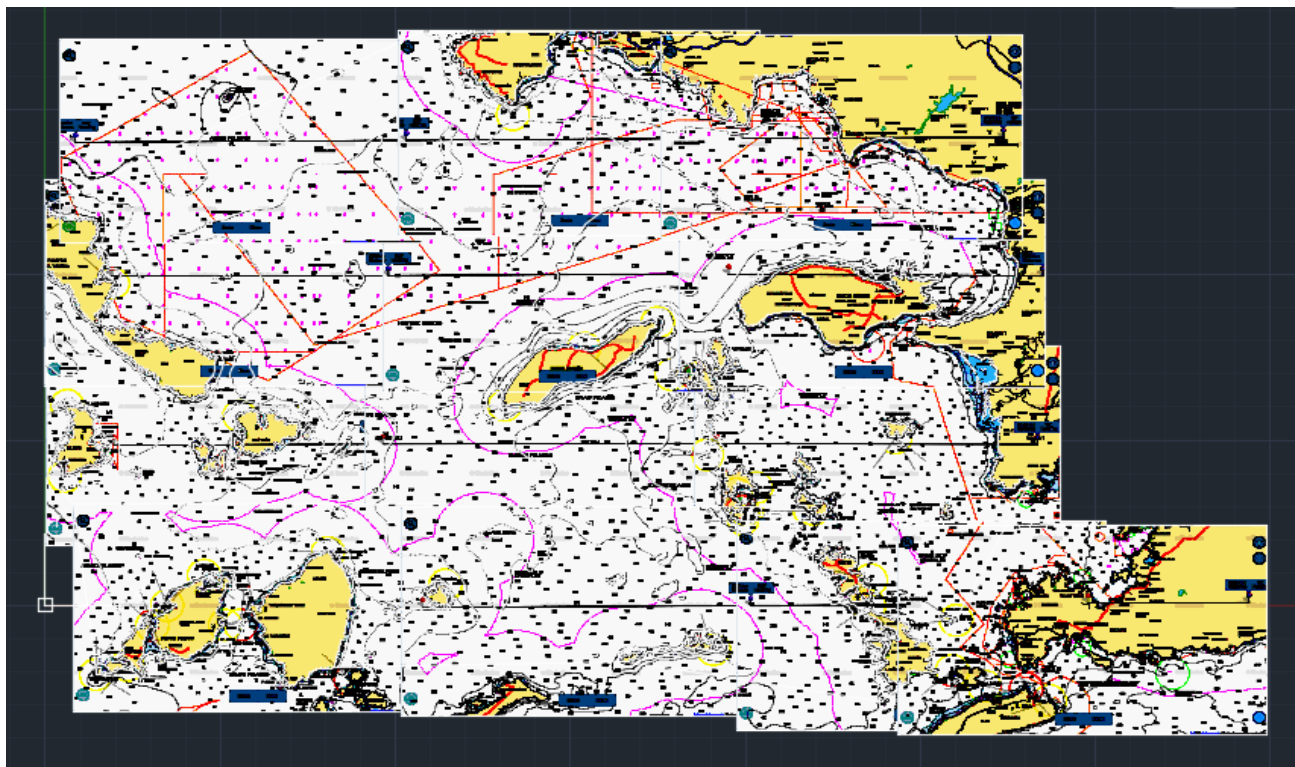


Σχήμα 5.2 Διάγραμμα περιόδου κορυφής για τον Λιμένα Πατρών.

5.5.2 Περιοχή Λιμένα Ερμούπολης



Εικόνα 5.20 Στιγμιότυπο ηλεκτρονικού διαγράμματος πλοήγησης Navionics του Αιγαίου πελάγους.



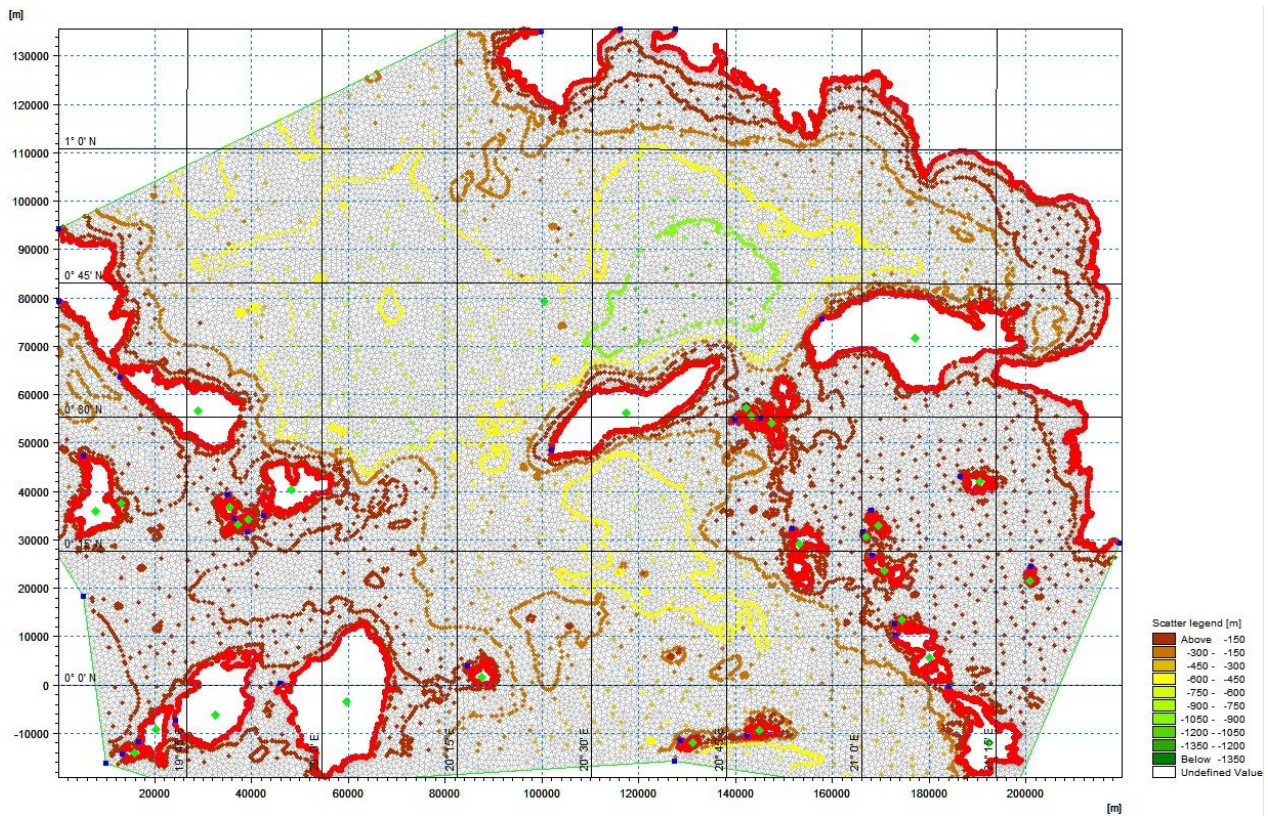
Εικόνα 5.21 Απόδοση συλλογής στιγμιότυπων σε σχεδιαστικό πρόγραμμα CAD (μορφή ψηφιδωτού) στο Αιγαίο πέλαγος.



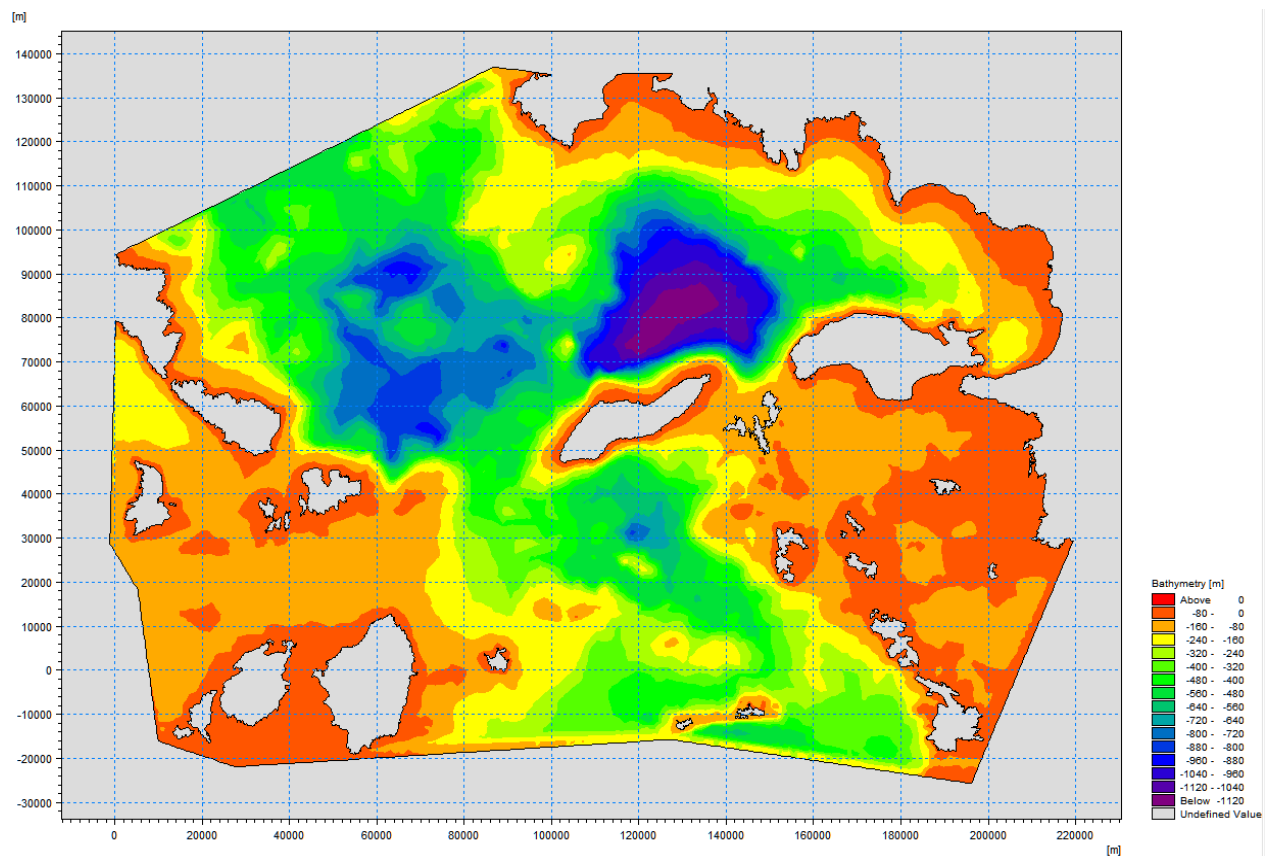
Εικόνα 5.22 Τελικό αποτέλεσμα χάραξης των ακτογραμμών του Αιγαίου πελάγους.



Εικόνα 5.23 Τελικό αποτέλεσμα χάραξης της βυθομετρίας του Αιγαίου πελάγους.



Εικόνα 5.24 Αρχική μορφή ψηφιοποίησης της βυθομετρίας του Αιγαίου πελάγους.



Εικόνα 5.25 Τελική μορφή ψηφιοποίησης της βυθομετρίας του Αιγαίου πελάγους.

Από την **Εικόνα 5.20** έως την **Εικόνα 5.25** παρουσιάζονται τα πιο χαρακτηριστικά βήματα της διαδικασίας της ψηφιοποίησης του Αιγαίου πελάγους, όπως αυτά περιγράφονται αναλυτικά στην αρχή του **Κεφαλαίου 5.5**.

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του αριθμητικού μοντέλου ΜΙΚΕ21|sw για την περιοχή του Αιγαίου πελάγους, με σημείο ενδιαφέροντος τον Λιμένα της Ερμούπολης Σύρου. Από την **Εικόνα 5.26** έως την **Εικόνα 5.29** φαίνονται στιγμιότυπα του κυματικού κλίματος, ανά χαρακτηριστικά χρονικά βήματα, σε ολόκληρο το πεδίο της προσομοίωσης, όπου διακρίνονται:

- με βέλη, η διεύθυνση διάδοσης των κυματισμών.
- με χρήση χρωματικής παλέτας, τα ύψη κύματος, οι τιμές των οποίων αναγράφονται στο υπόμνημα αλλά και επί του πεδίου.
- το χρονικό σημείο κατά το οποίο εξελίσσεται η προσομοίωση.
- η έκταση του πεδίου προσομοίωσης και η κλίμακα σχεδιασμού.

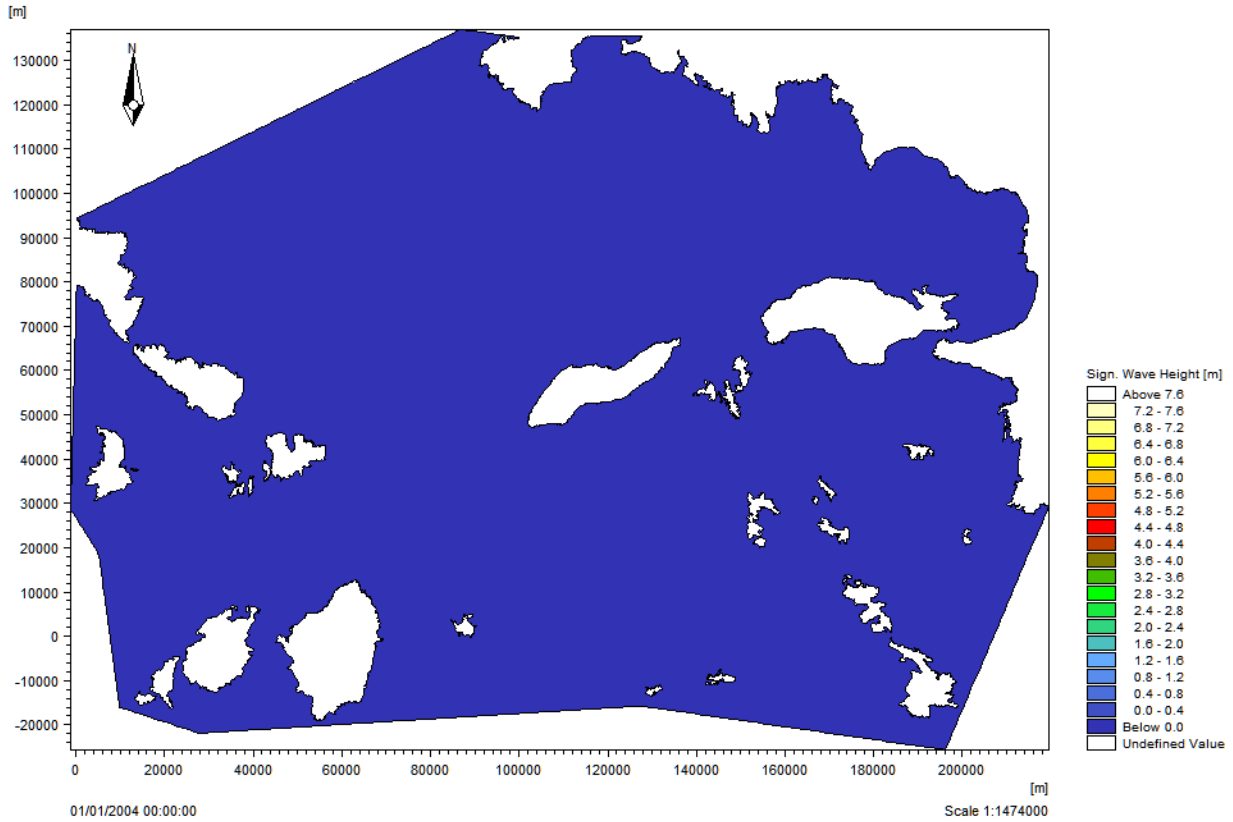
Στο **Σχήμα 5.3** παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που αφορούν τα χαρακτηριστικά ύψη κύματος που παρατηρούνται στο σημείο ενδιαφέροντος από το οποίο εφαρμόστηκαν επίσης οι εμπειρικές μέθοδοι, για κάθε μονάδα της κλίμακας Beaufort.

Η διάρκεια πνοής του ανέμου ορίστηκε με τέτοιο τρόπο ώστε να είναι εφικτή η πλήρης ανάπτυξη των κυματισμών, κάτι το οποίο φαίνεται συγκρίνοντας την **Εικόνα 5.28** με την **Εικόνα 5.29**, όπως επίσης και με την παρατήρηση της σταθεροποίησης των διαγραμμάτων στο **Σχήμα 5.3** και στο **Σχήμα 5.4**.

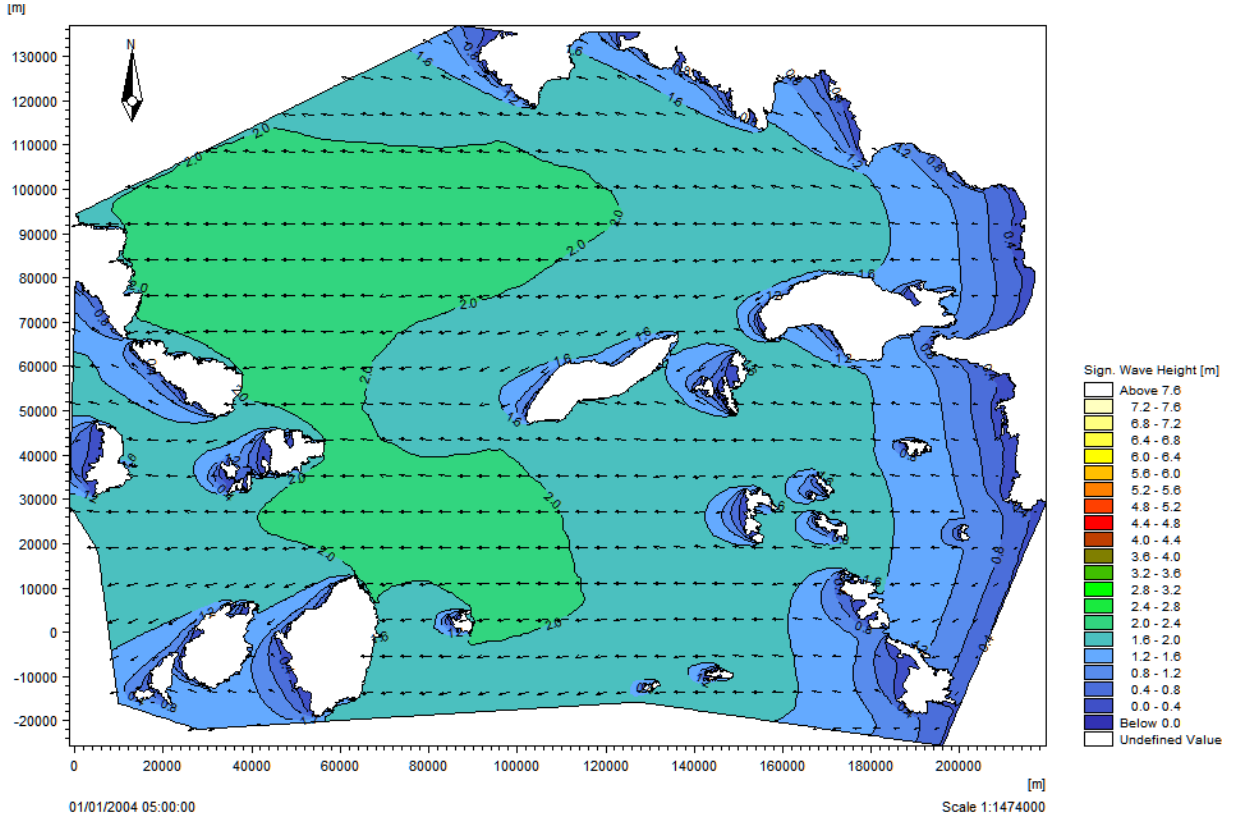
Στο **Σχήμα 5.4** παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που αφορούν τις χαρακτηριστικές περιόδους κορυφής που παρατηρούνται στο σημείο ενδιαφέροντος, για κάθε μονάδα της κλίμακας Beaufort. Χαρακτηριστικές είναι οι διακυμάνσεις που παρατηρούνται στις τιμές, έως και την οριστική σταθεροποίησή τους.

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα του πεδίου με αυτά του σημείου ενδιαφέροντος, ενδεικτικά στα 6 Beaufort, φαίνεται πως η μέγιστη τιμή του χαρακτηριστικού ύψους κύματος στο πεδίο είναι προσεγγιστικά στα 3.0 m (**Εικόνα 5.29**), ενώ στο σημείο ενδιαφέροντος στα 2.2 m (**Σχήμα 5.3**). Είναι προφανές πως η γεωμετρία του πεδίου, δεν λειτουργεί ευεργετικά ως προς την ανάπτυξη των κυματισμών προς το σημείο ενδιαφέροντος, καθώς αυτό βρίσκεται εν μέσω του νησιωτικού συμπλέγματος των Κυκλάδων.

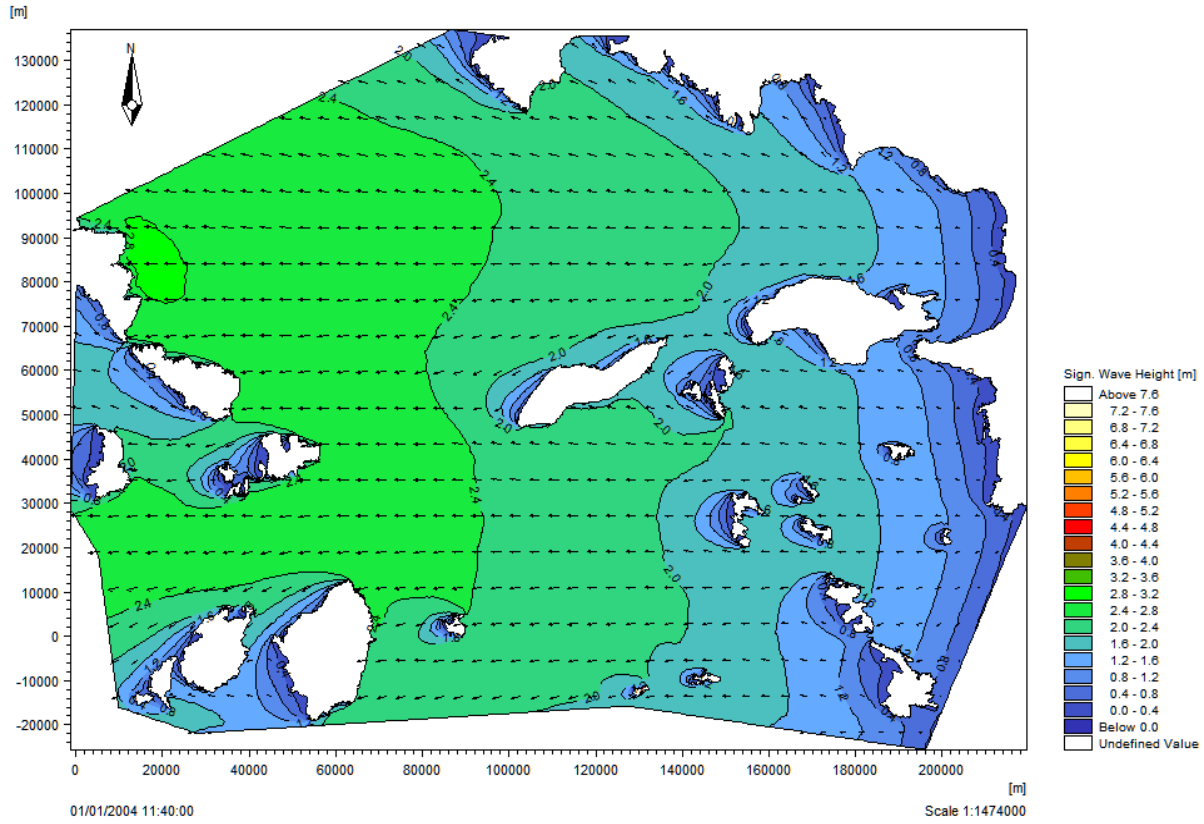
Επιπλέον, παρατηρείται χαρακτηριστικά πως για ανώτερες τιμές της ταχύτητας του ανέμου μειώνεται δραστικά ο χρόνος που απαιτείται ώστε να δημιουργηθεί ένας πλήρως ανεπτυγμένος κυματισμός, όπως και ο χρόνος που απαιτείται για να μπορέσει να αναπτυχθεί, αρχικά, ένα ανεμογενές κύμα (**Σχήμα 5.3**, **Σχήμα 5.4**).



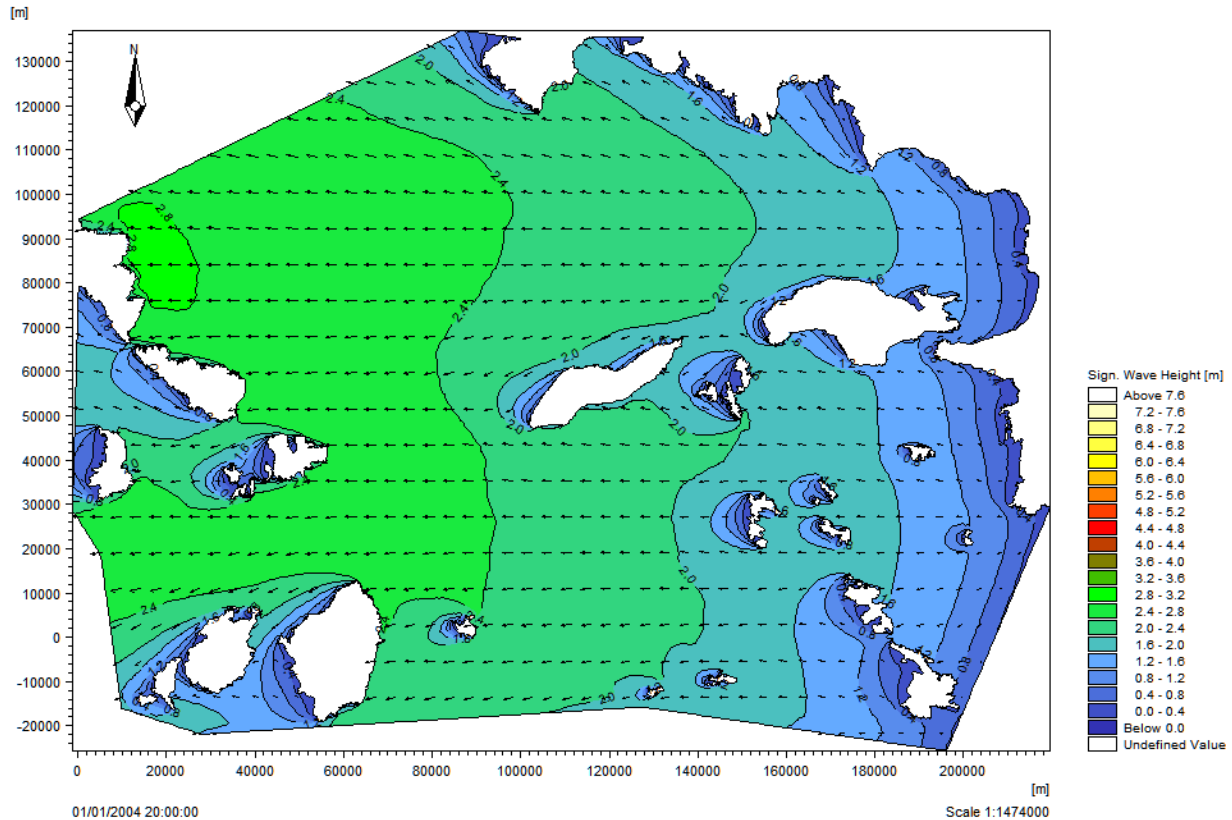
Εικόνα 5.26 Εκκίνηση προσομοίωσης για την Ερμούπολη Σύρου σε συνθήκες ηρεμίας.



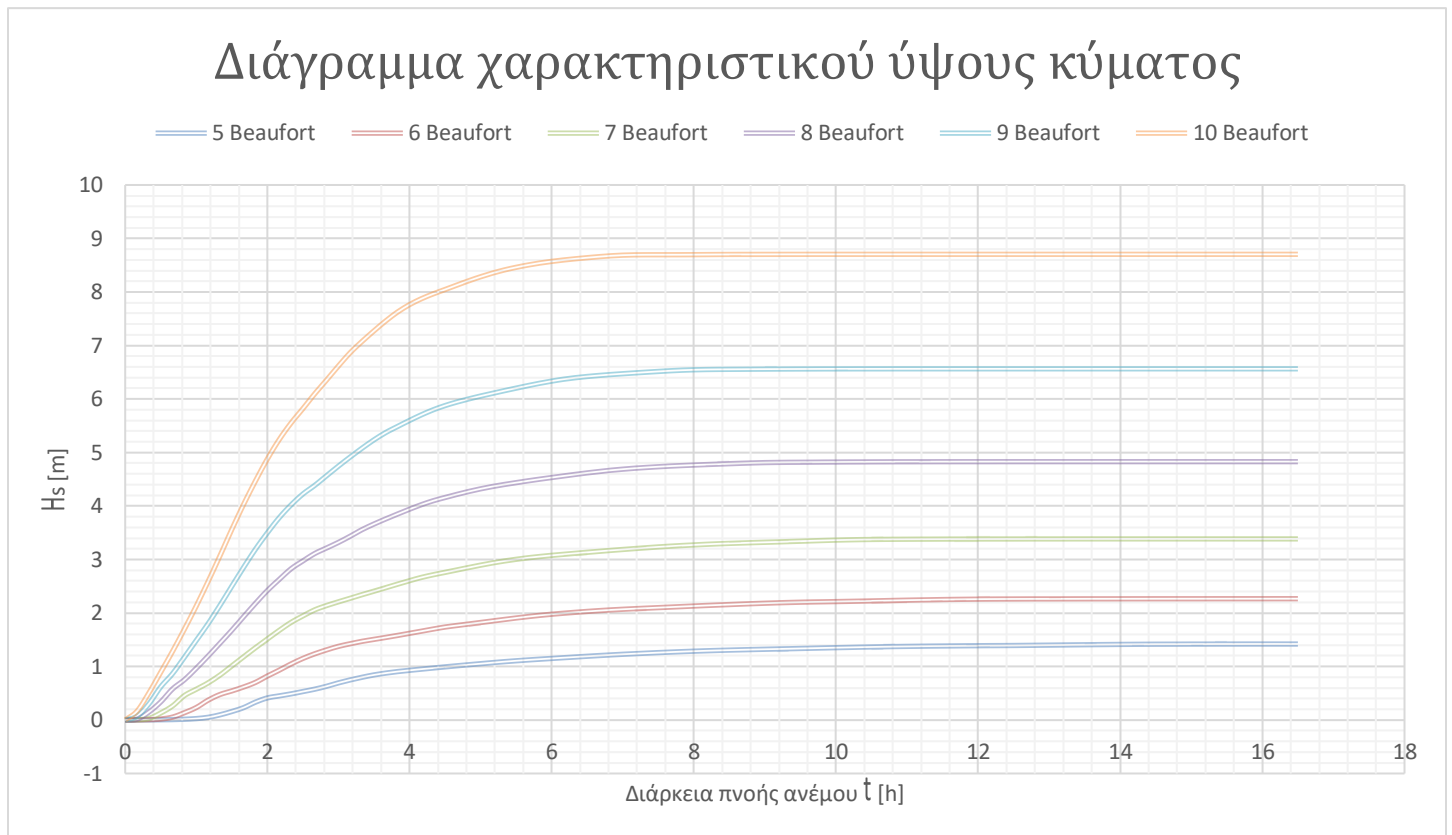
Εικόνα 5.27 Κυματικό κλίμα στο Αιγαίο πέλαγος με σημείο ενδιαφέροντος την περιοχή του λιμένα της Ερμούπολης για ανατολικό άνεμο στα 6 Beaufort διάρκειας 5 ωρών.



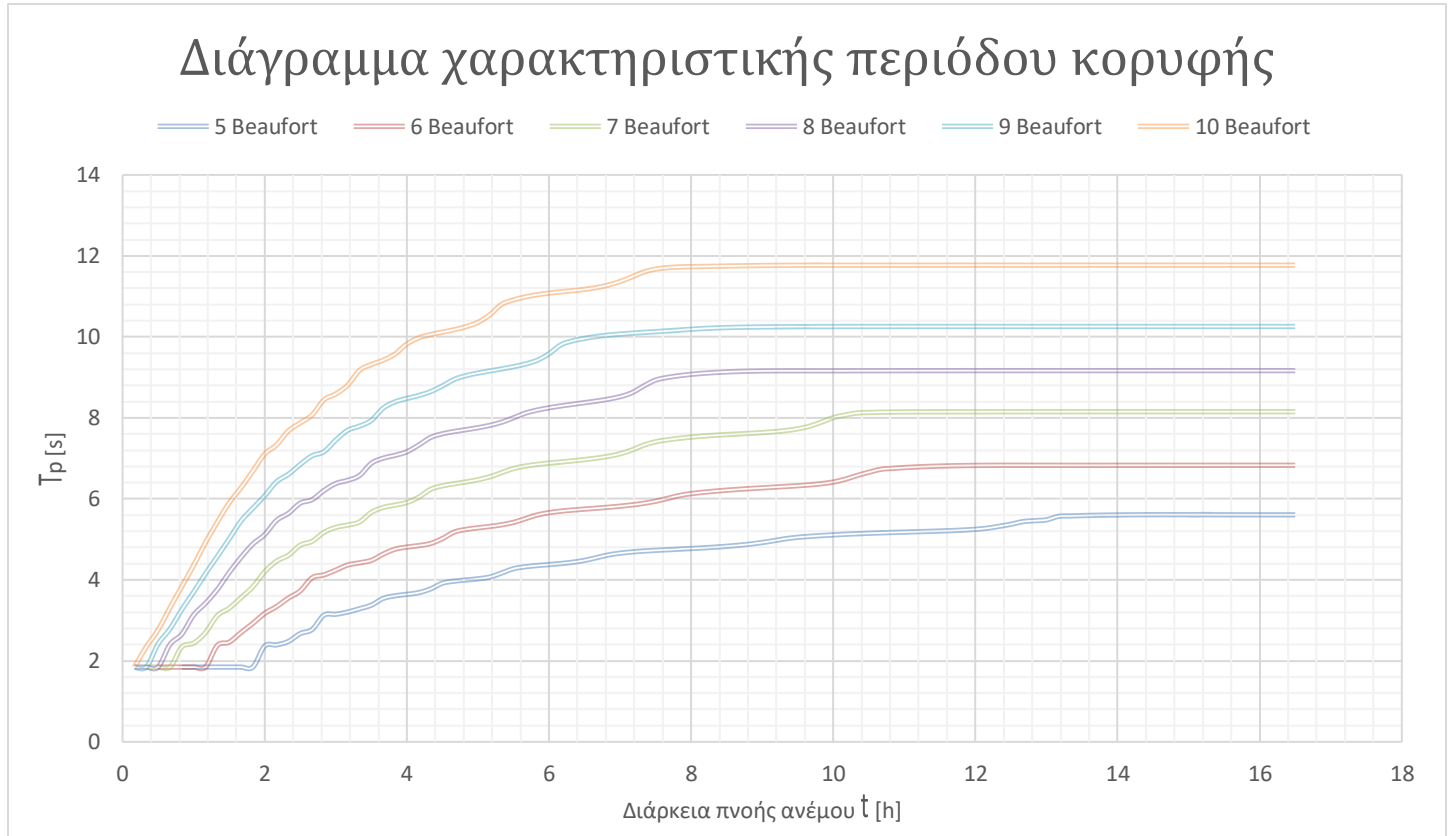
Εικόνα 5.28 Κυματικό κλίμα στο Αιγαίο πέλαγος με σημείο ενδιαφέροντος την περιοχή του λιμένα της Ερμούπολης για ανατολικό άνεμο στα 6 Beaufort διάρκειας 12 ωρών.



Εικόνα 5.29 Κυματικό κλίμα στο Αιγαίο πέλαγος με σημείο ενδιαφέροντος την περιοχή του λιμένα της Ερμούπολης για ανατολικό άνεμο στα 6 Beaufort διάρκειας 20 ωρών.



Σχήμα 5.3 Διάγραμμα χαρακτηριστικού ύψους κύματος για τον Λιμένα Ερμούπολης.



Σχήμα 5.4 Διάγραμμα περιόδου κορυφής για τον Λιμένα Ερμούπολης.

5.5.3 Περιοχή Χρυσής Λασιθίου



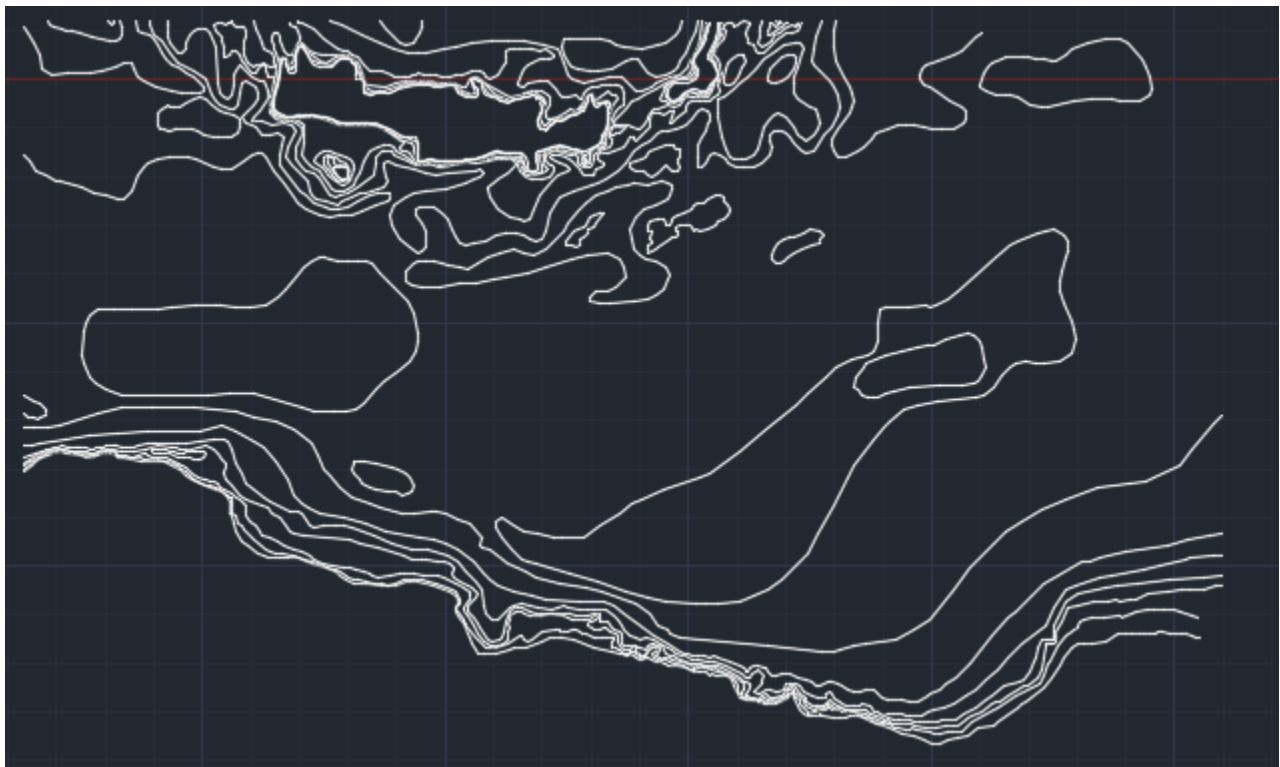
Εικόνα 5.30 Στιγμιότυπο ηλεκτρονικού διαγράμματος πλοήγησης Navionics του Λιβυκού πελάγους.



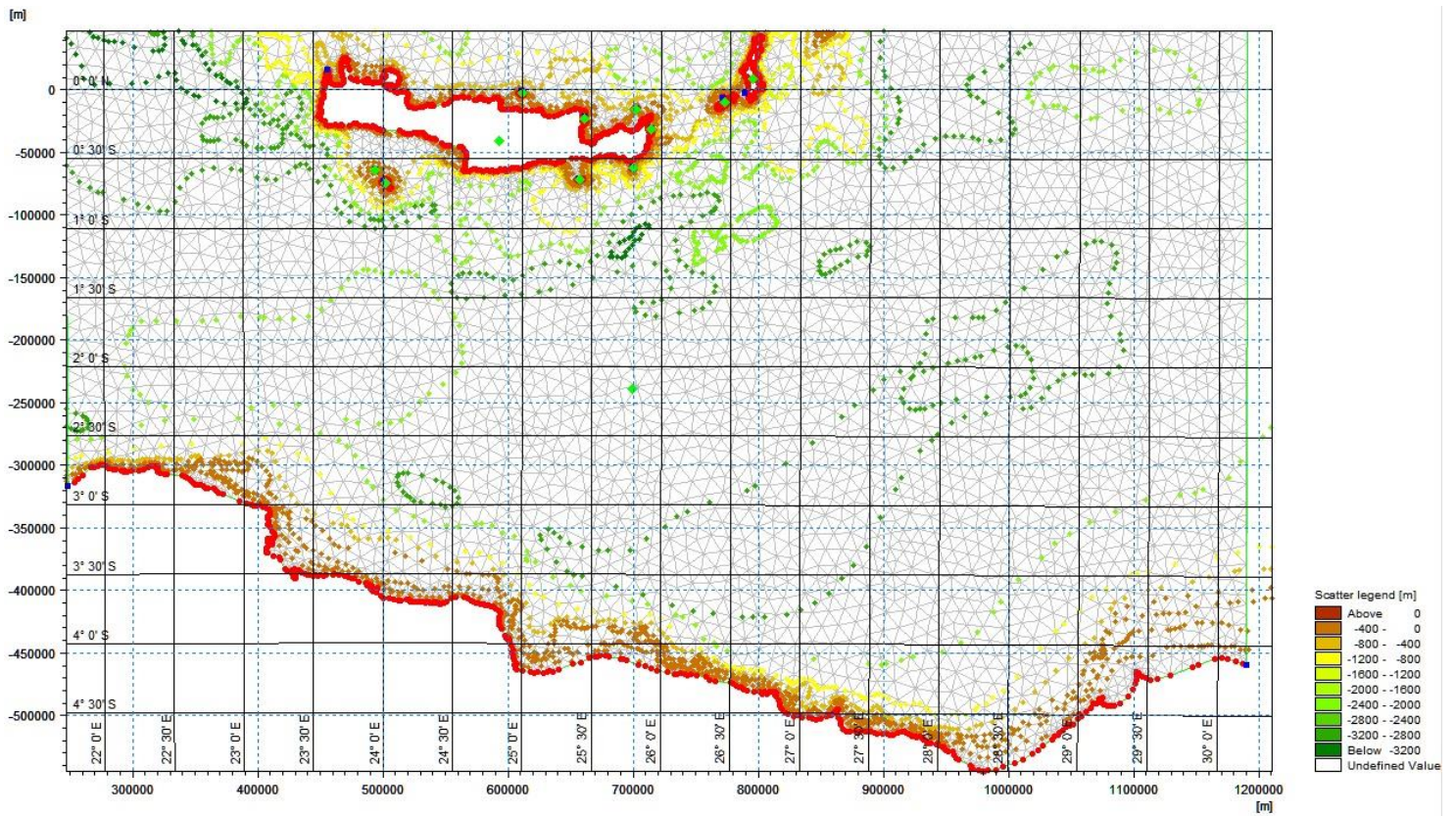
Εικόνα 5.31 Απόδοση συλλογής στιγμιότυπων σε σχεδιαστικό πρόγραμμα CAD (μορφή ψηφιδωτού) στο Λιβυκό πέλαγος.



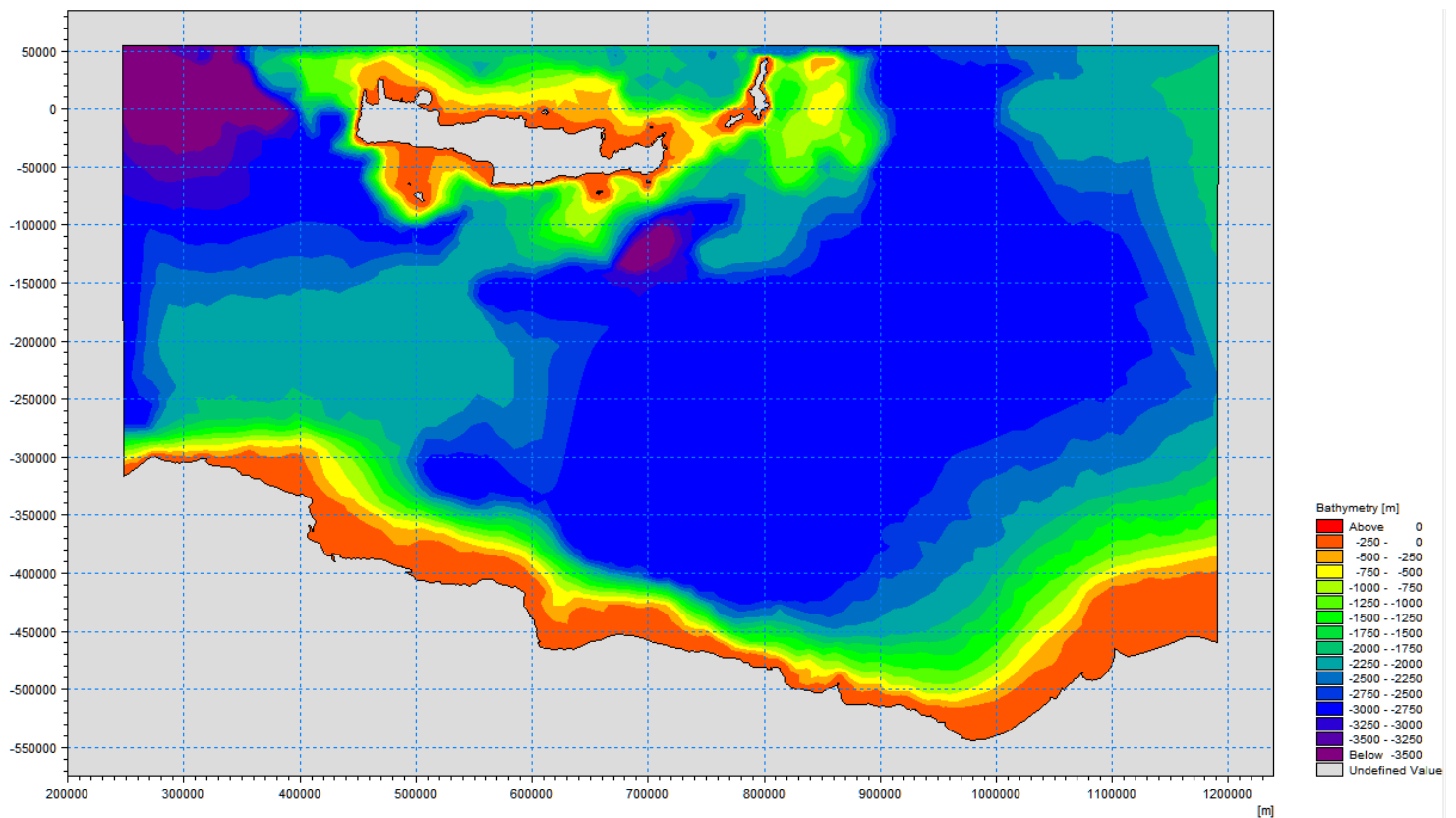
Εικόνα 5.32 Τελικό αποτέλεσμα χάραξης ακτογραμμών του Λιβυκού πελάγους.



Εικόνα 5.33 Τελικό αποτέλεσμα χάραξης της βυθομετρίας του Λιβυκού πελάγους.



Εικόνα 5.34 Αρχική μορφή ψηφιοποίησης της βυθομετρίας του Λιβυκού πελάγους.



Εικόνα 5.35 Τελική μορφή ψηφιοποίησης της βυθομετρίας του Λιβυκού πελάγους.

Από την **Εικόνα 5.30** έως την **Εικόνα 5.35** παρουσιάζονται τα πιο χαρακτηριστικά βήματα της διαδικασίας της ψηφιοποίησης του Λιβυκού πελάγους, όπως αυτά περιγράφονται αναλυτικά στην αρχή του **Κεφαλαίου 5.5**.

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του αριθμητικού μοντέλου ΜΙΚΕ21|sw για την περιοχή του Λιβυκού πελάγους, με σημείο ενδιαφέροντος τη νησίδα της Χρυσής Λασιθίου. Από την **Εικόνα 5.36** έως την **Εικόνα 5.39** φαίνονται στιγμιότυπα του κυματικού κλίματος, ανά χαρακτηριστικά χρονικά βήματα, σε ολόκληρο το πεδίο της προσομοίωσης, όπου διακρίνονται:

- με βέλη, η διεύθυνση διάδοσης των κυματισμών.
- με χρήση χρωματικής παλέτας, τα ύψη κύματος, οι τιμές των οποίων αναγράφονται στο υπόμνημα αλλά και επί του πεδίου.
- το χρονικό σημείο κατά το οποίο εξελίσσεται η προσομοίωση.
- η έκταση του πεδίου προσομοίωσης και η κλίμακα σχεδιασμού.

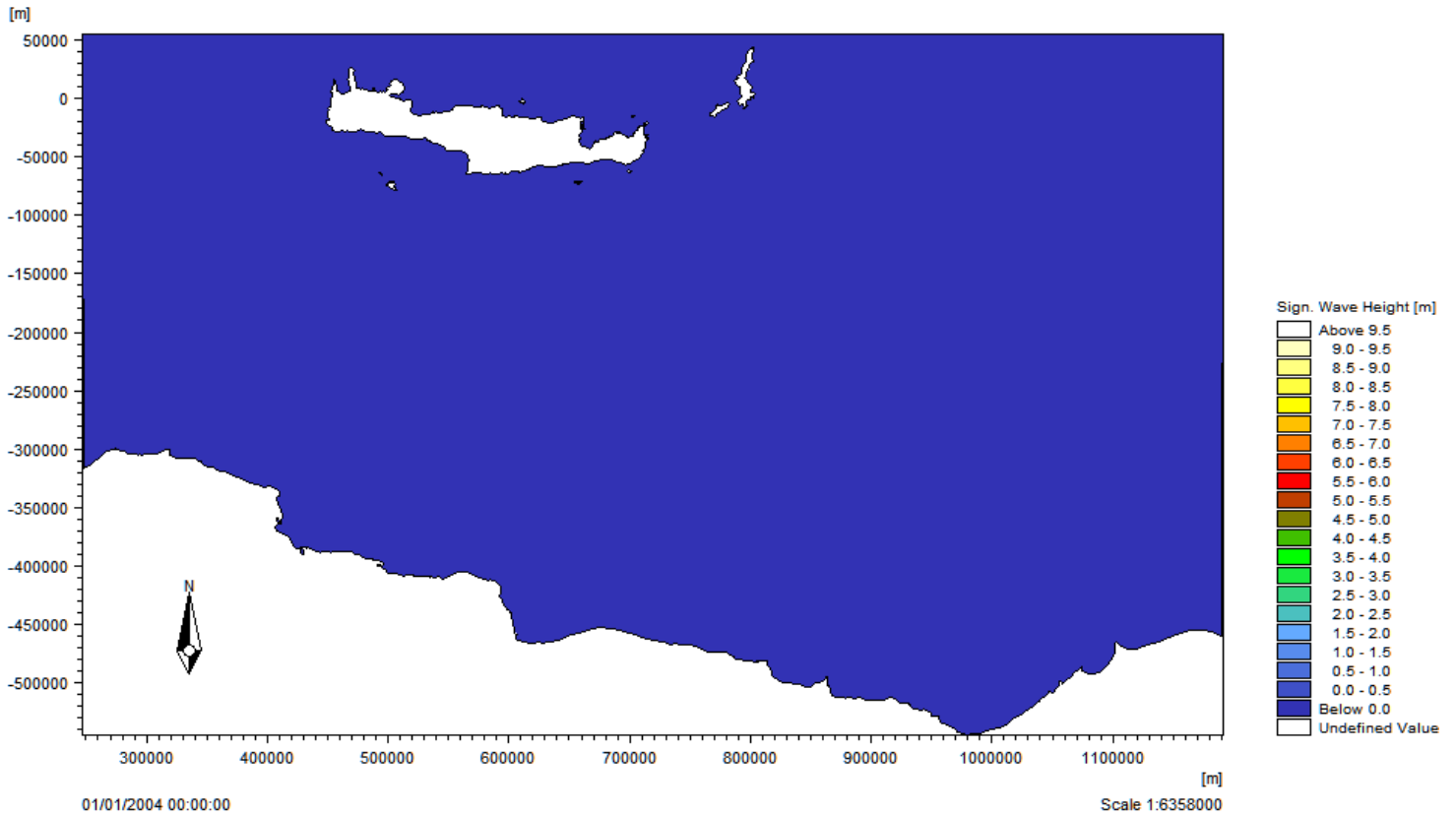
Στο **Σχήμα 5.5** παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που αφορούν τα χαρακτηριστικά ύψη κύματος που παρατηρούνται στο σημείο ενδιαφέροντος από το οποίο εφαρμόστηκαν επίσης οι εμπειρικές μέθοδοι, για κάθε μονάδα της κλίμακας Beaufort.

Η διάρκεια πνοής του ανέμου ορίστηκε με τέτοιο τρόπο ώστε να είναι εφικτή η πλήρης ανάπτυξη των κυματισμών, κάτι το οποίο φαίνεται συγκρίνοντας την **Εικόνα 5.38** με την **Εικόνα 5.39**, όπως επίσης και με την παρατήρηση της σταθεροποίησης των διαγραμμάτων στο **Σχήμα 5.5** και στο **Σχήμα 5.6**.

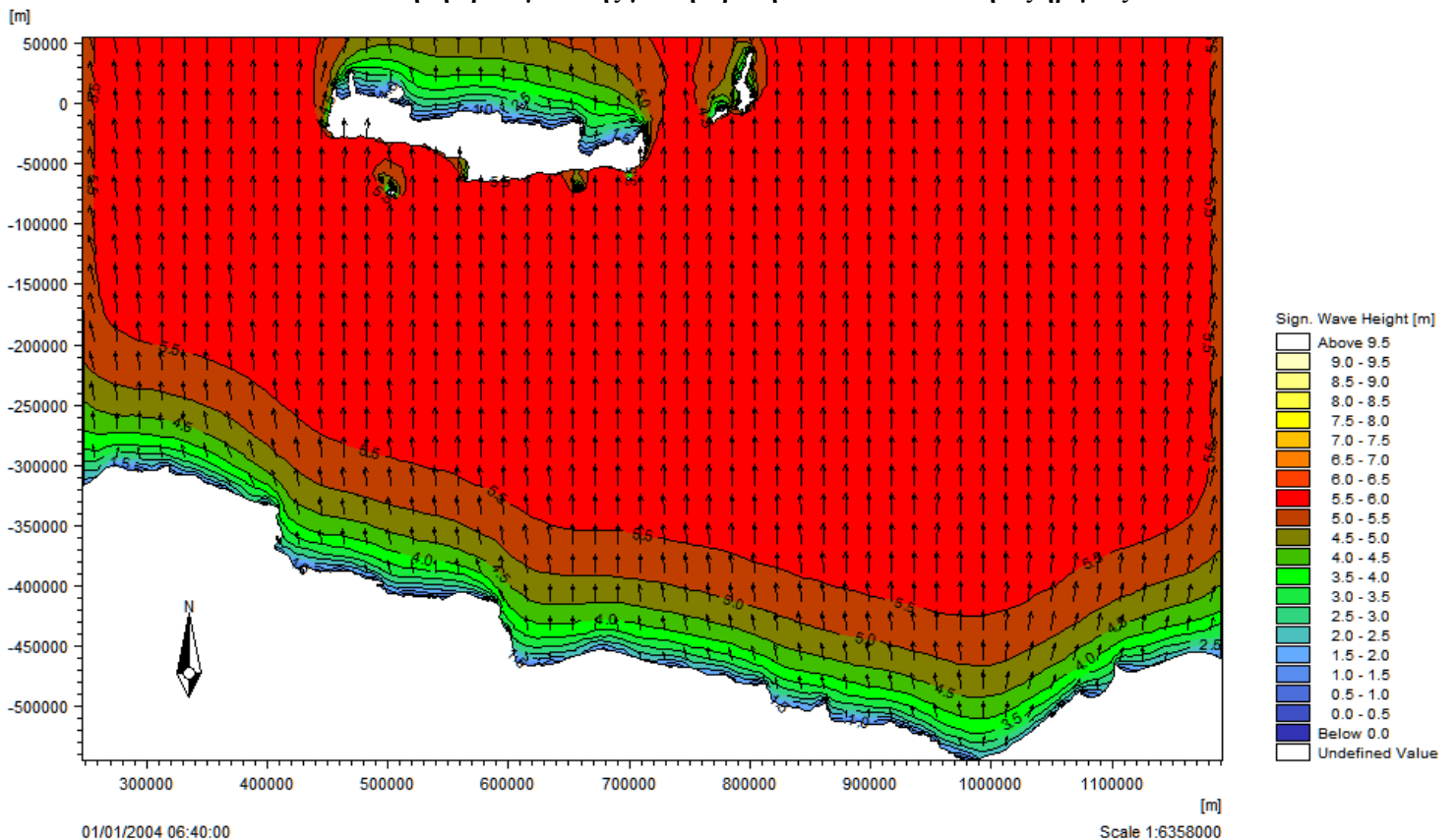
Στο **Σχήμα 5.6** παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που αφορούν τις χαρακτηριστικές περιόδους κορυφής που παρατηρούνται στο σημείο ενδιαφέροντος, για κάθε μονάδα της κλίμακας Beaufort. Χαρακτηριστικές είναι οι διακυμάνσεις που παρατηρούνται στις τιμές, έως και την οριστική σταθεροποίησή τους.

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα του πεδίου με αυτά του σημείου ενδιαφέροντος, ενδεικτικά στα 8 Beaufort, φαίνεται πως η μέγιστη τιμή του χαρακτηριστικού ύψους κύματος στο πεδίο είναι προσεγγιστικά στα 7.0 m (**Εικόνα 5.39**), ενώ στο σημείο ενδιαφέροντος στα 6.8 m (**Σχήμα 5.5**). Είναι προφανές πως η γεωμετρία του πεδίου, λειτουργεί ευεργετικά ως προς την ανάπτυξη των κυματισμών προς το σημείο ενδιαφέροντος, καθώς αυτό βρίσκεται με ανοιχτό μέτωπο νότια προς το Λιβυκό πέλαγος.

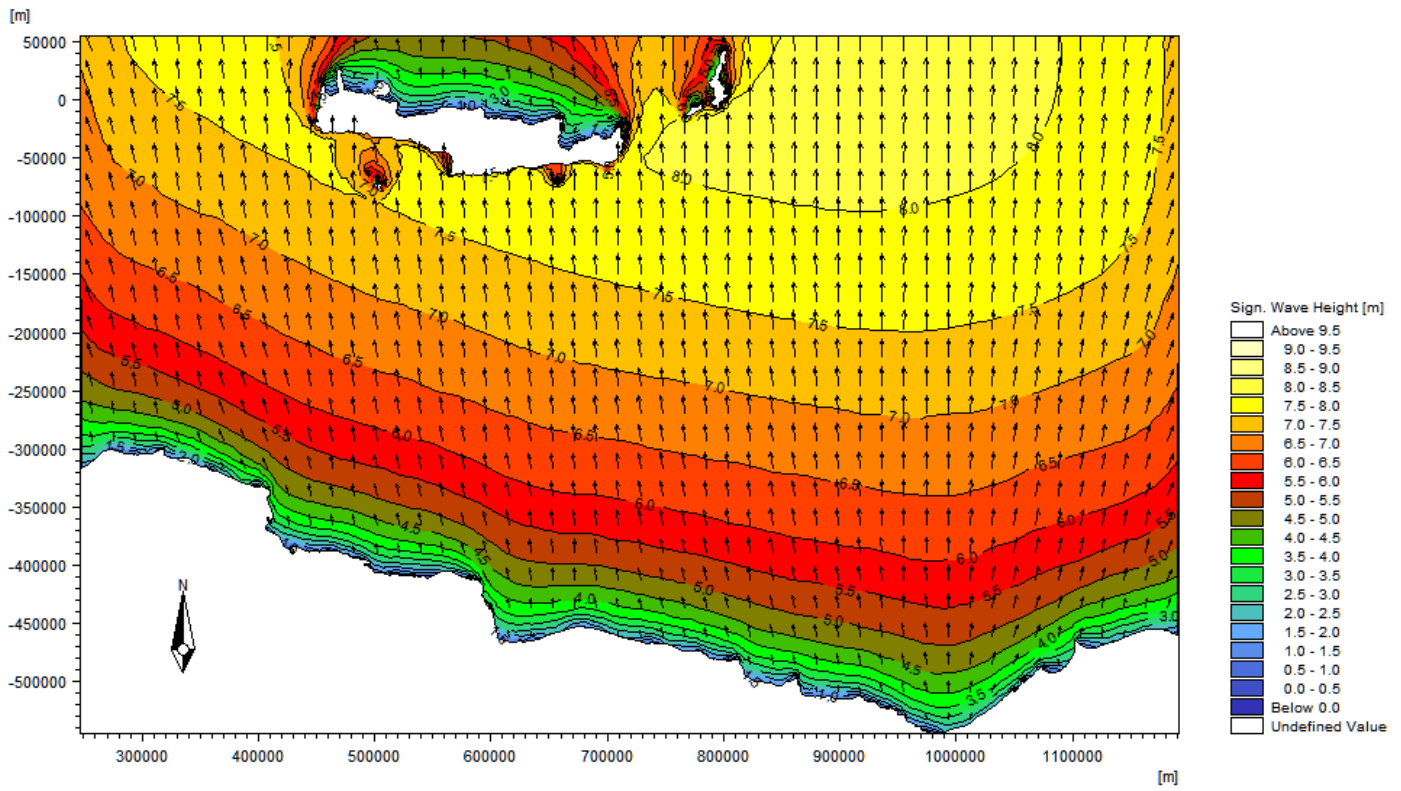
Επιπλέον, παρατηρείται χαρακτηριστικά πως για ανώτερες τιμές της ταχύτητας του ανέμου μειώνεται δραστικά ο χρόνος που απαιτείται ώστε να δημιουργηθεί ένας πλήρως ανεπτυγμένος κυματισμός, όπως και ο χρόνος που απαιτείται για να μπορέσει να αναπτυχθεί, αρχικά, ένα ανεμογενές κύμα (**Σχήμα 5.5**, **Σχήμα 5.6**).



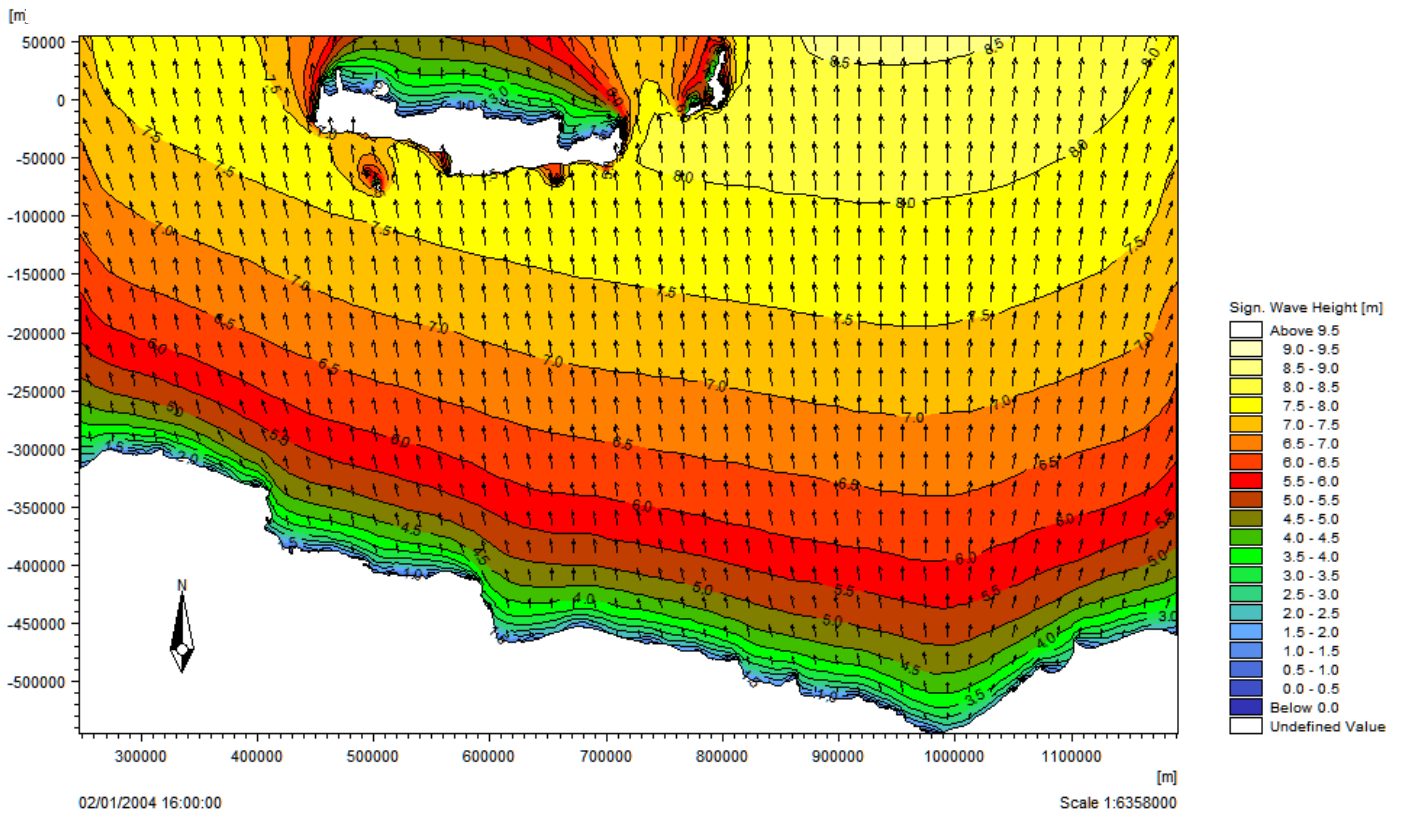
Εικόνα 5.36 Εκκίνηση προσομοίωσης για τη Χρυσή Λασιθίου σε συνθήκες ηρεμίας.



Εικόνα 5.37 Κυματικό κλίμα στο Λιβυκό πέλαγος με σημείο ενδιαφέροντος την περιοχή της Χρυσής Λασιθίου για νότιο άνεμο στα 8 Beaufort διάρκειας 6 ωρών και 40 λεπτών.

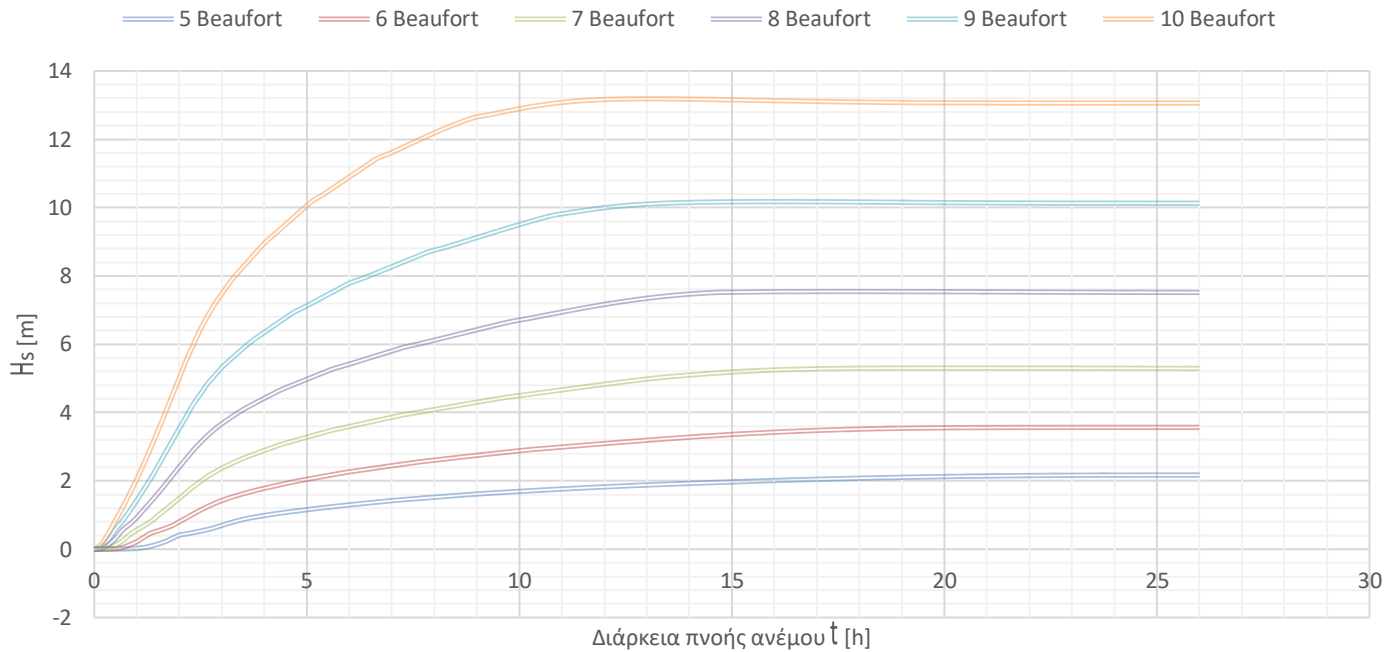


Εικόνα 5.38 Κυματικό κλίμα στο Λιβικό πέλαγος με σημείο ενδιαφέροντος την περιοχή της Χρυσής Λασιθίου για νότιο άνεμο στα 8 Beaufort διάρκειας 15 ωρών.



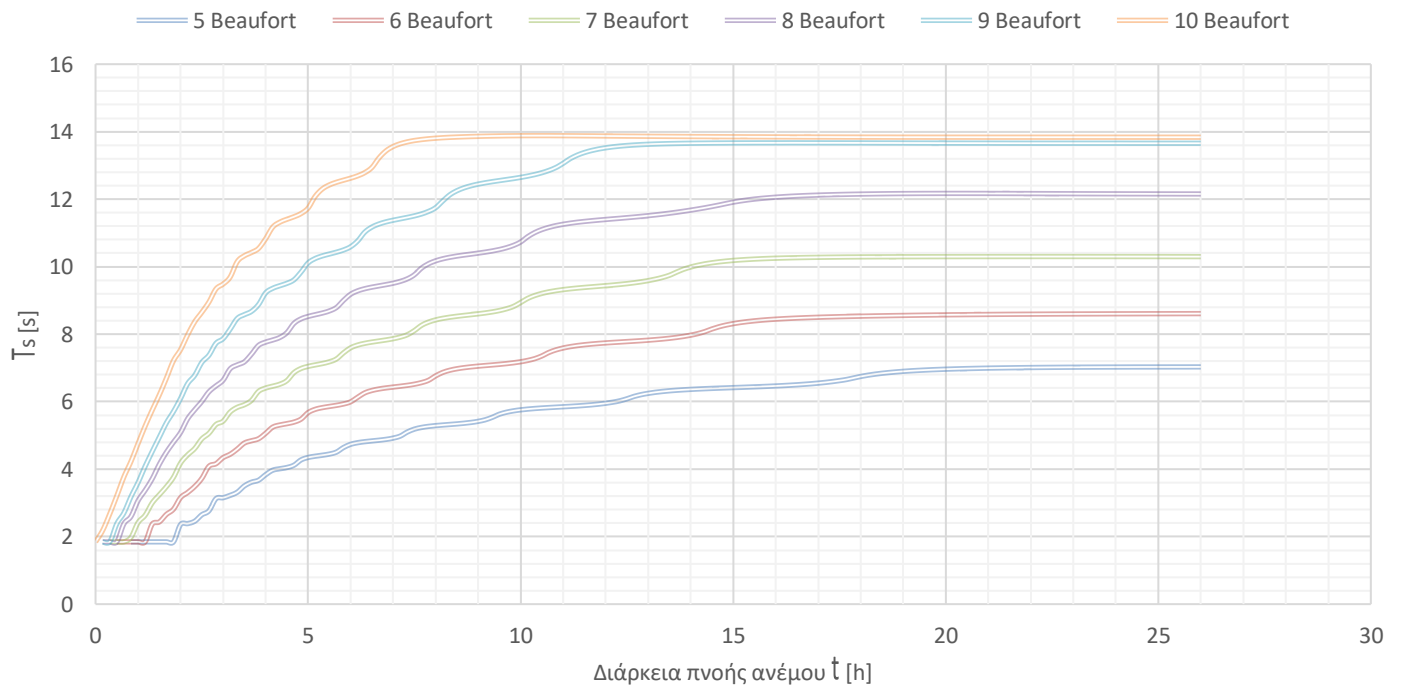
Εικόνα 5.39 Κυματικό κλίμα στο Λιβικό πέλαγος με σημείο ενδιαφέροντος την περιοχή της Χρυσής Λασιθίου για νότιο άνεμο στα 8 Beaufort διάρκειας 40 ωρών.

Διάγραμμα χαρακτηριστικού ύψους κύματος



Σχήμα 5.5 Διάγραμμα χαρακτηριστικού ύψους κύματος για τη Χρυσή Λασιθίου.

Διάγραμμα χαρακτηριστικής περιόδου κορυφής



Σχήμα 5.6 Διάγραμμα περιόδου κορυφής για τη Χρυσή Λασιθίου.

5.6 Σύγκριση εξισώσεων και μοντέλου MIKE21|sw

Ένας από τους βασικούς στόχους της παρούσας ΔΕ είναι να συγκριθούν τα αποτελέσματα των μαθηματικών εξισώσεων των εμπειρικών μεθόδων με αυτά της αριθμητικής προσομοίωσης του μοντέλου MIKE21|sw. Σημαντικότερη σύγκριση κρίνεται αυτή του χαρακτηριστικού ύψους κύματος, καθώς με αυτόν τον τρόπο είναι δυνατόν να προκύψει ένας βαθμός αξιοπιστίας των αποτελεσμάτων των σχετικών μεταξύ τους εφαρμογών. Κατ' επέκταση, δύναται να προκύψουν συμπεράσματα όσον αφορά την χρήση της κατάλληλης εμπειρικής μεθόδου, ανάλογα με τις επικρατούσες γεωμορφολογικές συνθήκες.

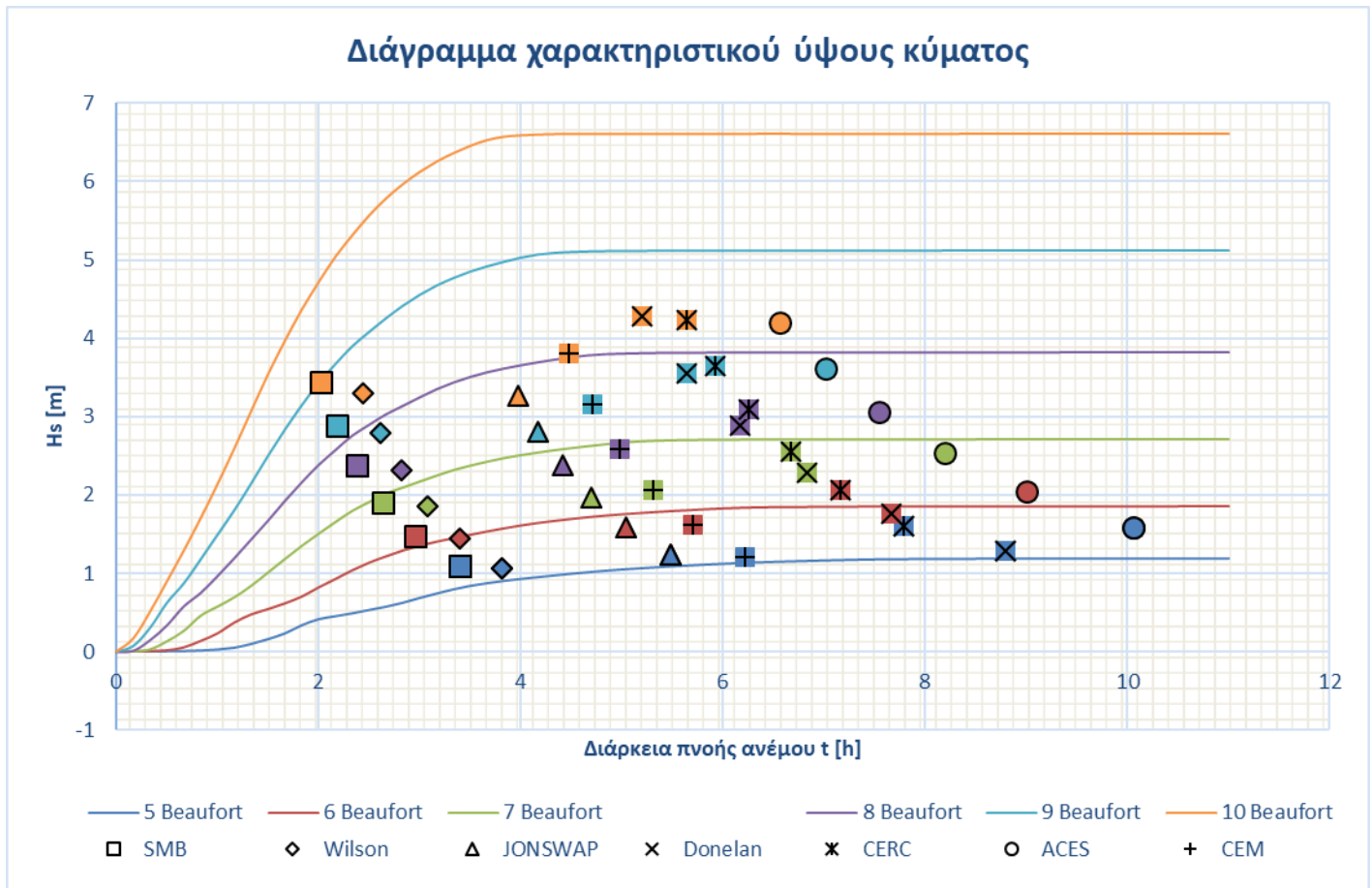
Στη συνέχεια, παρατίθενται για κάθε περιοχή μελέτης, και αντίστοιχα για κάθε διακριτό γεωμετρικό πεδίο, τα συγκεντρωτικά διαγράμματα του χαρακτηριστικού ύψους κύματος σε σχέση με την διάρκεια πνοής του ανέμου. Σκοπός είναι να επισημανθούν οι όποιες ομοιότητες ή αποκλίσεις υπάρχουν μεταξύ των ίδιων των εμπειρικών μεθόδων, αλλά και μεταξύ των μεθόδων και του μοντέλου προσομοίωσης του MIKE21|sw.

Οι συνεχείς γραμμές των διαγραμμάτων αντιπροσωπεύουν τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων του MIKE21|sw για κάθε τιμή της κλίμακας Beaufort. Τα διακριτικά σημεία αντιστοιχούν στα αποτελέσματα των εμπειρικών μεθόδων, όπως αναγράφονται στη λεζάντα, ακολουθώντας τους χρωματισμούς των τιμών της κλίμακας Beaufort.

Τα σημεία που αντιστοιχούν στα αποτελέσματα των μεθόδων, έχουν προκύψει με βάση την τιμή της οριακής διάρκειας πνοής ανέμου και την τιμή του χαρακτηριστικού ύψους κύματος, όπως αυτά υπολογίζονται ανά μέθοδο (**Κεφάλαιο 3**). Για διάρκειες πνοής ανέμου μεγαλύτερες της οριακής, υπό σταθερό ανάπτυγμα πελάγους, τα αποτελέσματα δεν διαφοροποιούνται.

Συνίσταται προσοχή, στο γεγονός ότι τα σενάρια που προσομοιώνονται στο αριθμητικό μοντέλο MIKE21|sw δεν αποτελούν προϊόν ρεαλιστικών συνθηκών. Τα μεγέθη που έχουν προκύψει δεν είναι αυτά που συναντώνται σε πραγματικά φαινόμενα. Πρόκειται για εφαρμογή ακραίων μεγεθών, αναφορικά με την διάρκεια πνοής ανέμου υπό σταθερή ταχύτητα σε ολόκληρο το πεδίο. Όμως, είναι πολύ χρήσιμο, προς χάριν της σύγκρισης, να αποτυπωθούν, ώστε να δημιουργηθούν οι δυναμικές σχέσεις μεταξύ του μοντέλου και των μαθηματικών εξισώσεων.

5.6.1 Περιοχή Λιμένα Πατρών



Σχήμα 5.7 Συγκεντρωτικό διάγραμμα χαρακτηριστικού ύψους κύματος για την περιοχή του Λιμένα Πατρών.

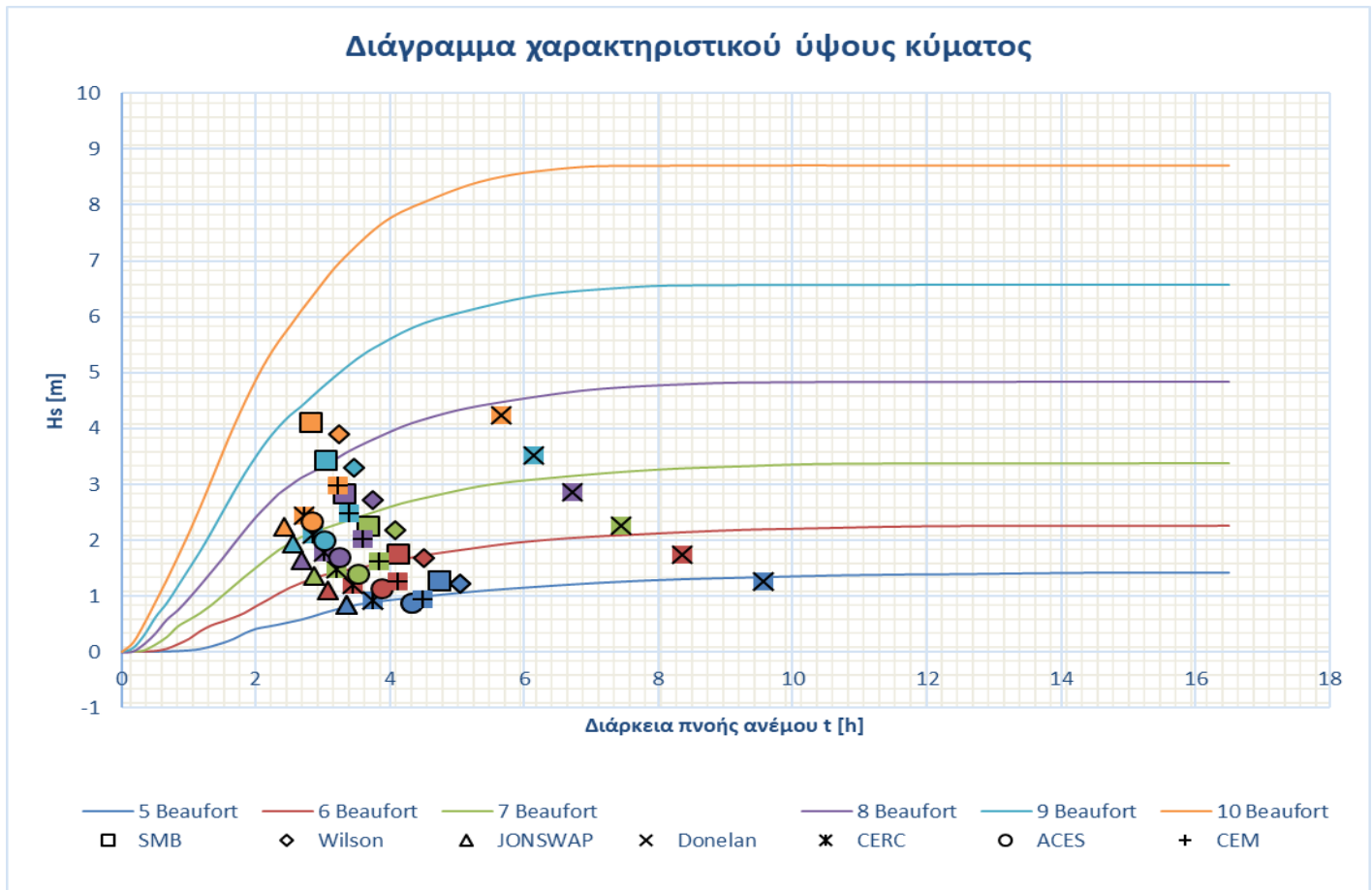
Η περιοχή του Λιμένα Πατρών, δηλαδή ο Πατραϊκός κόλπος, έχει επιλεχθεί στην παρούσα ΔΕ ως μια χαρακτηριστική περιοχή περιορισμένου-στενού αναπτύγματος πελάγους (Restricted-Narrow Fetch).

Στο **Σχήμα 5.7** φαίνονται τα αποτελέσματα της εφαρμογής των μαθηματικών εξισώσεων των εμπειρικών μεθόδων με διακριτικά σημεία και της προσομοίωσης του αριθμητικού μοντέλου MIKE21|sw με συνεχείς γραμμές, ακολουθώντας την ίδια χρωματική συσχέτιση ανά τιμή της κλίμακας Beaufort.

Κατά την σύγκριση των αποτελεσμάτων γίνεται εμφανές πως όσο περισσότερο αυξάνεται η τιμή της ταχύτητας του ανέμου, τόσο περισσότερο αποκλίνουν οι τιμές του χαρακτηριστικού ύψους κύματος μεταξύ μοντέλου και μαθηματικών εξισώσεων. Ωστόσο, οι τιμές του ύψους κύματος μεταξύ των μεθόδων παρουσιάζουν πιο ομαλές διαφοροποιήσεις.

Επιγραμματικά, τα αποτελέσματα των μεθόδων SMB, Wilson και ACES έχουν μεγάλη απόκλιση ως προς την οριακή διάρκεια πνοής ανέμου, η μέθοδος JONSWAP δίνει τα χαμηλότερα ύψη κύματος, ενώ οι μέθοδοι CERC και Donelan φαίνεται να δίνουν τα αποτελέσματα με τις μικρότερες αποκλίσεις.

5.6.2 Περιοχή Λιμένα Ερμούπολης



Σχήμα 5.8 Συγκεντρωτικό διάγραμμα χαρακτηριστικού ύψους κύματος για την περιοχή του Λιμένα Ερμούπολης.

Η περιοχή του Λιμένα Ερμούπολης, δηλαδή το νησιώτικο σύμπλεγμα των Κυκλάδων, έχει επιλεγεί στην παρούσα ΔΕ ως μια χαρακτηριστική περιοχή σύνθετου αναπτύγματος πελάγους (Restricted-Wide Fetch).

Στο **Σχήμα 5.8** φαίνονται τα αποτελέσματα της εφαρμογής των μαθηματικών εξισώσεων των εμπειρικών μεθόδων με διακριτικά σημεία και της προσομοίωσης του αριθμητικού μοντέλου MIKE21|sw με συνεχείς γραμμές, ακολουθώντας την ίδια χρωματική συσχέτιση ανά τιμή της κλίμακας Beaufort.

Κατά την σύγκριση των αποτελεσμάτων γίνεται εμφανές πως όσο περισσότερο αυξάνεται η τιμή της ταχύτητας του ανέμου, τόσο περισσότερο αποκλίνουν οι τιμές του χαρακτηριστικού ύψους κύματος μεταξύ μοντέλου και μαθηματικών εξισώσεων, με τις διαφορές να είναι ιδιαίτερος σημαντικές. Στο το ίδιο μοτίβο κυμαίνονται και οι τιμές του ύψους κύματος μεταξύ των μεθόδων.

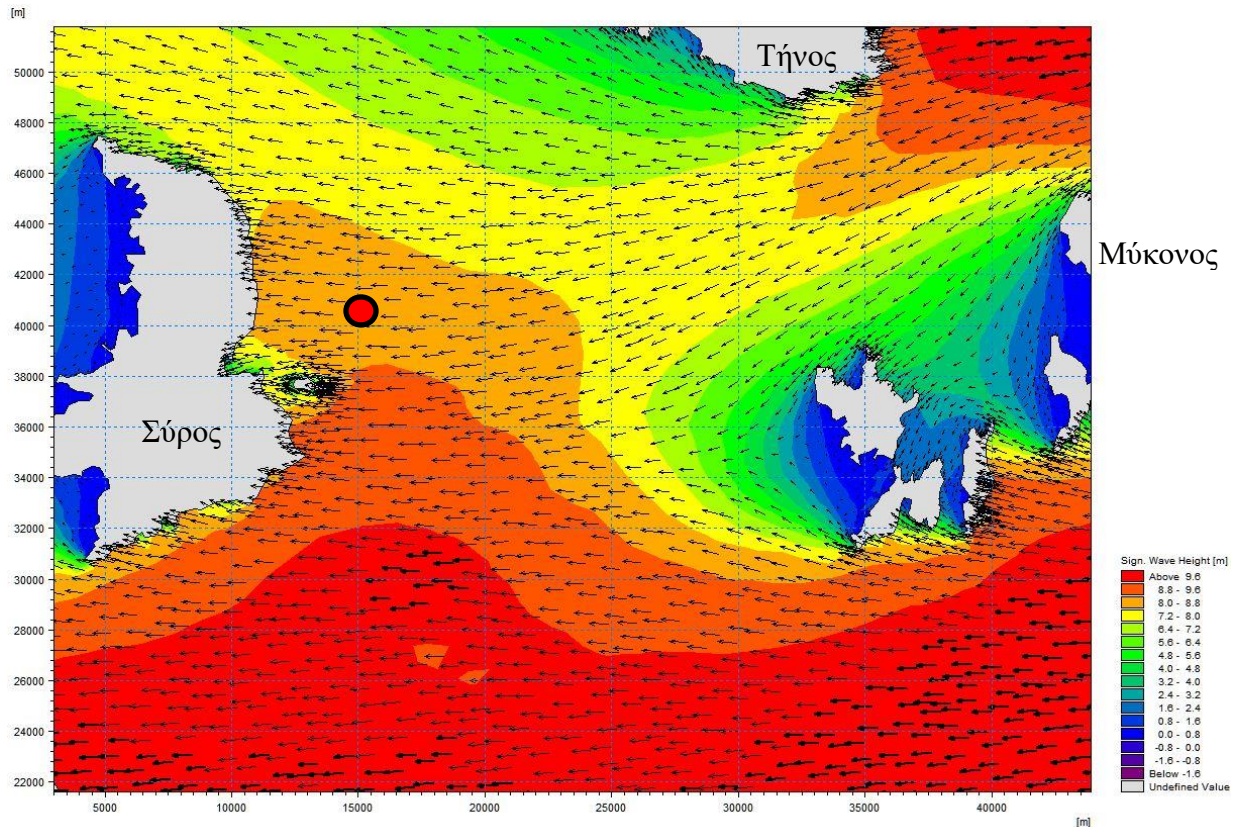
Πιο συγκεκριμένα, τα αποτελέσματα όλων των μεθόδων πλην της Donelan έχουν μεγάλες αποκλίσεις ως προς όλα τα χαρακτηριστικά μεγέθη περιγραφής κυματικού κλίματος.

Σε αυτό το σημείο είναι σημαντικό να επισημανθεί μια σημαντική παρατήρηση, με βάση την οποία γίνεται πιο κατανοητό το γεγονός ότι οι αποκλίσεις μεταξύ των εμπειρικών μεθόδων και του μοντέλου προσομοίωσης είναι μεγάλες.

Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα για την εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με την καταλληλότητα της χρήσης των εμπειρικών μεθόδων φαίνεται παρακάτω (**Εικόνα 6.1**). Πρόκειται για ένα στιγμιότυπο της προσομοίωσης κυματογένεσης στην περιοχή του Λιμένα Ερμούπολης, για ανατολικό άνεμο, σταθερό σε όλο το πεδίο της προσομοίωσης, με διάρκεια πνοής 20 ωρών στα 10 Beaufort.

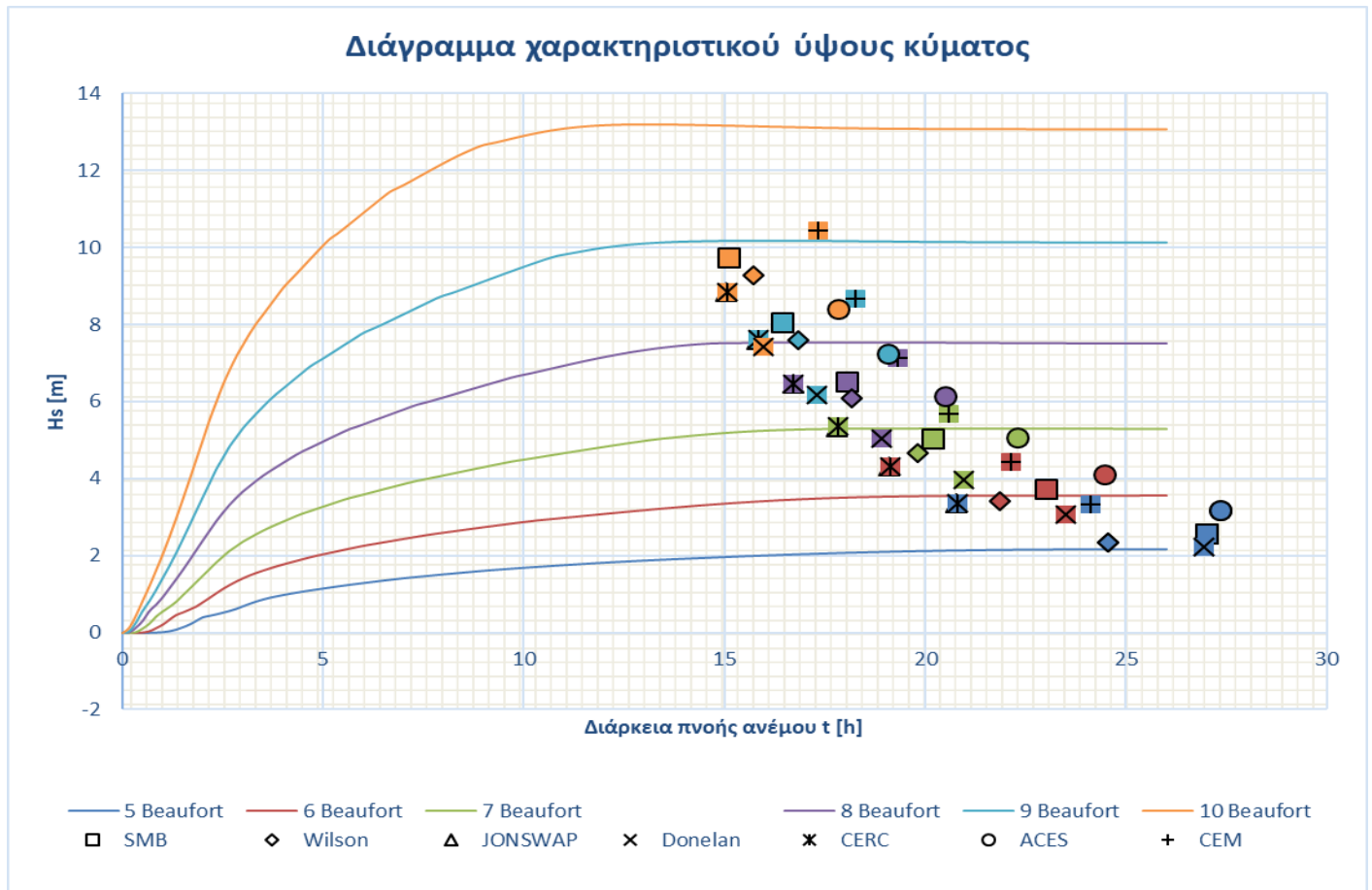
Στο σημείο ενδιαφέροντος, δηλαδή ανοιχτά του Λιμένα Ερμούπολης, προσπίπτει κυματική ενέργεια από δύο διαφορετικές κατευθύνσεις. Η πρώτη αφορά την απευθείας διάδοση των κυματισμών από βορειοανατολικά, δηλαδή από το στένωμα μεταξύ των νήσων της Τήνου και της Μυκόνου. Η άλλη από νοτιοανατολικά, κάτω από την νήσο της Μυκόνου, όπου η διεύθυνση διάδοσης των κυματισμών μετασχηματίζεται λόγω του φαινομένου της περίθλασης, μεταφέροντας σημαντικά ποσά ενέργειας προς το σημείο ενδιαφέροντος.

Αντιθέτως, στις εφαρμογές των εμπειρικών μεθόδων, το ανάπτυγμα πελάγους στο συγκεκριμένο σενάριο, το οποίο ισοδυναμεί με το σύστημα εισροής ενέργειας στο σημείο ενδιαφέροντος, δεν εισάγει σχεδόν καθόλου την περιοχή κάτω από τη νήσο της Μυκόνου (στους υπολογισμούς λαμβάνεται υπόψη μόνο μια ακτίνα ανάπτυγματος και μόνο για τις μεθόδους SMB – Wilson). Ακόμα, ο τρόπος με τον οποίο θεωρείται το ανάπτυγμα πελάγους στις εμπειρικές μεθόδους, αδυνατεί να εισάγει φαινόμενα κυματικής διάδοσης, όπως αυτό της περίθλασης.



Εικόνα 5.40 Στιγμιότυπο της προσομοίωσης κυματογένεσης στην περιοχή του Λιμένα Ερμούπολης.

5.6.3 Περιοχή Χρυσής Λασιθίου



Σχήμα 5.9 Συγκεντρωτικό διάγραμμα χαρακτηριστικού ύψους κύματος για την περιοχή της Χρυσής Λασιθίου.

Η περιοχή της Χρυσής Λασιθίου, δηλαδή το Λιβυκό πέλαγος, έχει επιλεγεί στην παρούσα ΔΕ ως μια χαρακτηριστική περιοχή ανοιχτής θάλασσας (Open Sea).

Στο **Σχήμα 5.9** φαίνονται τα αποτελέσματα της εφαρμογής των μαθηματικών εξισώσεων των εμπειρικών μεθόδων με διακριτικά σημεία και της προσομοίωσης του αριθμητικού μοντέλου MIKE21|sw με συνεχείς γραμμές, ακολουθώντας την ίδια χρωματική συσχέτιση ανά τιμή της κλίμακας Beaufort.

Κατά την σύγκριση των αποτελεσμάτων γίνεται εμφανές πως κατά την αύξηση της τιμής της ταχύτητας του ανέμου, οι αποκλίσεις των χαρακτηριστικών μεγεθών του κύματος δεν είναι τόσο σημαντικές όσο στις προηγούμενες περιοχές (Restricted-Narrow Fetch, Restricted-Wide Fetch).

Αναλυτικότερα, τα αποτελέσματα των μεθόδων JONSWAP και CERC συμπίπτουν και μαζί με τις μεθόδους Wilson, SMB και ACES φαίνεται πως έχουν παρόμοιες τάσεις αν και τα ύψη κύματος παρουσιάζουν αποκλίσεις. Η μέθοδος CEM, διαφοροποιείται σημαντικά από τις υπόλοιπες και αποδίδει με περισσότερη ακρίβεια τα χαρακτηριστικά μεγέθη του κύματος, συγκριτικά με τις καμπύλες του MIKE21|sw.

6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

6.1 Σύνοψη Αποτελεσμάτων

Παρακάτω παρατίθενται σε μορφή πινάκων τα αποτελέσματα όλων των εφαρμογών για κάθε περιοχή ξεχωριστά, για κάθε τιμή της κλίμακας Beaufort, με σκοπό να είναι εύκολη η πρόσβασή τους από τον αναγνώστη. Επίσης, καθίσταται δυνατή μια άμεση σύγκριση των αποτελεσμάτων μεταξύ των μαθηματικών εξισώσεων των εμπειρικών μεθόδων και του αριθμητικού μοντέλου προσομοίωσης MIKE21|sw.

Σε κάθε πίνακα επισημαίνεται η τιμή της ελάχιστης απόκλισης μεταξύ των εμπειρικών μεθόδων και του μοντέλου προσομοίωσης. Με πράσινη επισήμανση φαίνεται η απόκλιση του χαρακτηριστικού ύψους κύματος H_s , ενώ με κίτρινη επισήμανση η απόκλιση της περιόδου κορυφής T_p .

Η παρουσίαση των αποτελεσμάτων για κάθε περιοχή ξεχωριστά εξυπηρετεί στην εξαγωγή συμπερασμάτων με βάση το εκάστοτε γεωμετρικό πεδίο, όπως έχει οριστεί στην παρούσα ΔΕ, έτσι ώστε να είναι δυνατή η αξιολόγηση των μεθόδων ανάλογα με τα αποτελέσματα που αποδίδουν ανά σενάριο.

Συνοπτικά, υπενθυμίζεται πως η περιοχή του Λιμένα Πατρών επιλέχθηκε ως χαρακτηριστική για περιορισμένο-στενό ανάπτυγμα πελάγους (Restricted-Narrow Fetch), η περιοχή του Λιμένα Ερμούπολης ως χαρακτηριστική για περιορισμένο-ευρύ ανάπτυγμα πελάγους (Restricted-Wide Fetch) και η Χρυσή Λασιθίου ως χαρακτηριστική περιοχή ανοιχτής θάλασσας (Open Sea).

6.1.1 Περιοχή Λιμένα Πατρών

Πίνακας 6.1 Σύνοψη αποτελεσμάτων για την περιοχή του Λιμένα Πατρών στα 5 Beaufort.

5bf			MIKE21/sw		Αποκλίσεις	
	H _s (m)	T _p (s)	H _s (m)	T _p (s)		
<i>SMB</i>	1.084	4.120	1.187	4.696	-0.102	-0.576
<i>Wilson</i>	1.067	3.764			-0.120	-0.932
<i>JONSWAP</i>	1.235	5.081			0.049	0.385
<i>Donelan</i>	1.284	4.629			0.097	-0.067
<i>CERC</i>	1.606	5.878			0.420	1.181
<i>ACES</i>	1.592	5.045			0.406	0.348
<i>CEM</i>	1.209	4.467			0.023	-0.229

Πίνακας 6.2 Σύνοψη αποτελεσμάτων για την περιοχή του Λιμένα Πατρών στα 6 Beaufort.

6bf			MIKE21/sw		Αποκλίσεις	
	H _s (m)	T _p (s)	H _s (m)	T _p (s)		
<i>SMB</i>	1.471	4.766	1.860	5.635	-0.389	-0.869
<i>Wilson</i>	1.449	4.271			-0.411	-1.364
<i>JONSWAP</i>	1.590	5.527			-0.270	-0.109
<i>Donelan</i>	1.756	5.305			-0.105	-0.330
<i>CERC</i>	2.067	6.404			0.207	0.769
<i>ACES</i>	2.049	5.637			0.189	0.002
<i>CEM</i>	1.612	4.917			-0.248	-0.718

Πίνακας 6.3 Σύνοψη αποτελεσμάτων για την περιοχή του Λιμένα Πατρών στα 7 Beaufort.

7bf			MIKE21/sw		Αποκλίσεις	
	H _s (m)	T _p (s)	H _s (m)	T _p (s)		
<i>SMB</i>	1.897	5.373	2.715	6.549	-0.818	-1.175
<i>Wilson</i>	1.861	4.731			-0.854	-1.818
<i>JONSWAP</i>	1.967	5.933			-0.748	-0.615
<i>Donelan</i>	2.286	5.952			-0.429	-0.597
<i>CERC</i>	2.558	6.885			-0.157	0.336
<i>ACES</i>	2.536	6.191			-0.179	-0.358
<i>CEM</i>	2.067	5.341			-0.648	-1.208

Πίνακας 6.4 Σύνοψη αποτελεσμάτων για την περιοχή του Λιμένα Πατρών στα 8 Beaufort.

8bf			MIKE21/sw		Αποκλίσεις	
	H _s (m)	T _p (s)	H _s (m)	T _p (s)		
<i>SMB</i>	2.375	5.968	3.827	7.487	-1.452	-1.519
<i>Wilson</i>	2.315	5.166			-1.512	-2.320
<i>JONSWAP</i>	2.379	6.321			-1.448	-1.165
<i>Donelan</i>	2.894	6.595			-0.933	-0.892
<i>CERC</i>	3.094	7.345			-0.733	-0.142
<i>ACES</i>	3.066	6.731			-0.761	-0.756
<i>CEM</i>	2.590	5.758			-1.237	-1.728

Πίνακας 6.5 Σύνοψη αποτελεσμάτων για την περιοχή του Λιμένα Πατρών στα 9 Beaufort.

9bf			MIKE21/sw		Αποκλίσεις	
	H _s (m)	T _p (s)	H _s (m)	T _p (s)		
<i>SMB</i>	2.881	6.524	5.118	8.310	-2.238	-1.786
<i>Wilson</i>	2.783	5.562			-2.335	-2.748
<i>JONSWAP</i>	2.802	6.676			-2.316	-1.634
<i>Donelan</i>	3.545	7.205			-1.573	-1.106
<i>CERC</i>	3.644	7.765			-1.474	-0.545
<i>ACES</i>	3.612	7.234			-1.507	-1.077
<i>CEM</i>	3.157	6.151			-1.961	-2.159

Πίνακας 6.6 Σύνοψη αποτελεσμάτων για την περιοχή του Λιμένα Πατρών στα 10 Beaufort.

10bf			MIKE21/sw		Αποκλίσεις	
	H _s (m)	T _p (s)	H _s (m)	T _p (s)		
<i>SMB</i>	3.440	7.078	6.609	9.130	-3.169	-2.052
<i>Wilson</i>	3.291	5.945			-3.318	-3.185
<i>JONSWAP</i>	3.259	7.021			-3.350	-2.109
<i>Donelan</i>	4.276	7.818			-2.333	-1.312
<i>CERC</i>	4.239	8.175			-2.371	-0.955
<i>ACES</i>	4.201	7.731			-2.408	-1.398
<i>CEM</i>	3.801	6.544			-2.808	-2.586

6.1.2 Περιοχή Λιμένα Ερμούπολης

Πίνακας 6.7 Σύνοψη αποτελεσμάτων για την περιοχή του Λιμένα Ερμούπολης στα 5 Beaufort.

5bf			MIKE21/sw		Αποκλίσεις	
	H _s	T _p	H _s	T _p		
<i>SMB</i>	1.279	4.494	1.421	5.605	-0.142	-1.111
<i>Wilson</i>	1.231	4.127			-0.190	-1.478
<i>JONSWAP</i>	0.853	3.969			-0.568	-1.636
<i>Donelan</i>	1.273	4.638			-0.148	-0.967
<i>CERC</i>	0.928	4.091			-0.493	-1.514
<i>ACES</i>	0.886	3.634			-0.535	-1.971
<i>CEM</i>	0.947	3.796			-0.474	-1.809

Πίνακας 6.8 Σύνοψη αποτελεσμάτων για την περιοχή του Λιμένα Ερμούπολης στα 6 Beaufort.

6bf			MIKE21/sw		Αποκλίσεις	
	H _s	T _p	H _s	T _p		
<i>SMB</i>	1.744	5.221	2.268	6.830	-0.523	-1.609
<i>Wilson</i>	1.688	4.705			-0.580	-2.124
<i>JONSWAP</i>	1.098	4.317			-1.170	-2.512
<i>Donelan</i>	1.741	5.316			-0.527	-1.514
<i>CERC</i>	1.194	4.458			-1.073	-2.372
<i>ACES</i>	1.141	4.060			-1.127	-2.769
<i>CEM</i>	1.263	4.178			-1.005	-2.652

Πίνακας 6.9 Σύνοψη αποτελεσμάτων για την περιοχή του Λιμένα Ερμούπολης στα 7 Beaufort.

7bf			MIKE21/sw		Αποκλίσεις	
	H _s	T _p	H _s	T _p		
<i>SMB</i>	2.256	5.903	3.385	8.152	-1.129	-2.250
<i>Wilson</i>	2.183	5.231			-1.203	-2.921
<i>JONSWAP</i>	1.358	4.635			-2.027	-3.517
<i>Donelan</i>	2.267	5.964			-1.118	-2.189
<i>CERC</i>	1.478	4.793			-1.908	-3.359
<i>ACES</i>	1.411	4.459			-1.974	-3.693
<i>CEM</i>	1.619	4.538			-1.766	-3.614

Πίνακας 6.10 Σύνοψη αποτελεσμάτων για την περιοχή του Λιμένα Ερμούπολης στα 8 Beaufort.

8bf			MIKE21/sw		Αποκλίσεις	
	H _s	T _p	H _s	T _p		
<i>SMB</i>	2.831	6.570	4.829	9.166	-1.998	-2.596
<i>Wilson</i>	2.728	5.730			-2.100	-3.437
<i>JONSWAP</i>	1.642	4.938			-3.186	-4.228
<i>Donelan</i>	2.870	6.608			-1.959	-2.558
<i>CERC</i>	1.787	5.113			-3.042	-4.054
<i>ACES</i>	1.707	4.848			-3.122	-4.318
<i>CEM</i>	2.029	4.893			-2.800	-4.273

Πίνακας 6.11 Σύνοψη αποτελεσμάτων για την περιοχή του Λιμένα Ερμούπολης στα 9 Beaufort.

9bf			MIKE21/sw		Αποκλίσεις	
	H _s	T _p	H _s	T _p		
<i>SMB</i>	3.437	7.194	6.564	10.257	-3.127	-3.062
<i>Wilson</i>	3.293	6.183			-3.271	-4.074
<i>JONSWAP</i>	1.935	5.215			-4.629	-5.041
<i>Donelan</i>	3.516	7.219			-3.048	-3.038
<i>CERC</i>	2.105	5.405			-4.459	-4.851
<i>ACES</i>	2.011	5.210			-4.553	-5.046
<i>CEM</i>	2.473	5.227			-4.091	-5.030

Πίνακας 6.12 Σύνοψη αποτελεσμάτων για την περιοχή του Λιμένα Ερμούπολης στα 10 Beaufort.

10bf			MIKE21/sw		Αποκλίσεις	
	H _s (m)	T _p (s)	H _s (m)	T _p (s)		
<i>SMB</i>	4.108	7.814	8.704	11.771	-4.596	-3.956
<i>Wilson</i>	3.907	6.621			-4.797	-5.149
<i>JONSWAP</i>	2.250	5.485			-6.454	-6.286
<i>Donelan</i>	4.241	7.833			-4.464	-3.937
<i>CERC</i>	2.448	5.691			-6.256	-6.080
<i>ACES</i>	2.339	5.569			-6.365	-6.202
<i>CEM</i>	2.978	5.561			-5.727	-6.210

6.1.3 Περιοχή Χρυσής Λασιθίου

Πίνακας 6.13 Σύνοψη αποτελεσμάτων για την περιοχή της Χρυσής Λασιθίου στα 5 Beaufort.

5bf			MIKE21/sw		Αποκλίσεις	
	H _s	T _p	H _s	T _p		
<i>SMB</i>	2.563	6.476	2.171	7.034	0.392	-0.558
<i>Wilson</i>	2.327	6.363			0.156	-0.671
<i>JONSWAP</i>	3.352	9.885			1.181	2.851
<i>Donelan</i>	2.231	6.468			0.060	-0.566
<i>CERC</i>	3.355	9.557			1.184	2.523
<i>ACES</i>	3.187	7.441			1.016	0.406
<i>CEM</i>	3.325	8.767			1.154	1.733

Πίνακας 6.14 Σύνοψη αποτελεσμάτων για την περιοχή της Χρυσής Λασιθίου στα 6 Beaufort.

6bf			MIKE21/sw		Αποκλίσεις	
	H _s	T _p	H _s	T _p		
<i>SMB</i>	3.730	7.764	3.559	8.605	0.171	-0.841
<i>Wilson</i>	3.419	7.508			-0.140	-1.097
<i>JONSWAP</i>	4.314	10.753			0.755	2.148
<i>Donelan</i>	3.051	7.412			-0.508	-1.193
<i>CERC</i>	4.318	10.413			0.759	1.808
<i>ACES</i>	4.102	8.314			0.543	-0.291
<i>CEM</i>	4.433	9.650			0.874	1.045

Πίνακας 6.15 Σύνοψη αποτελεσμάτων για την περιοχή της Χρυσής Λασιθίου στα 7 Beaufort.

7bf			MIKE21/sw		Αποκλίσεις	
	H _s	T _p	H _s	T _p		
<i>SMB</i>	5.030	8.986	5.284	10.294	-0.254	-1.308
<i>Wilson</i>	4.665	8.573			-0.619	-1.721
<i>JONSWAP</i>	5.338	11.544			0.054	1.250
<i>Donelan</i>	3.973	8.316			-1.311	-1.979
<i>CERC</i>	5.343	11.195			0.059	0.901
<i>ACES</i>	5.076	9.131			-0.208	-1.163
<i>CEM</i>	5.682	10.482			0.398	0.187

Πίνακας 6.16 Σύνοψη αποτελεσμάτων για την περιοχή της Χρυσής Λασιθίου στα 8 Beaufort.

8bf			MIKE21/sw		Αποκλίσεις	
	H _s	T _p	H _s	T _p		
<i>SMB</i>	6.495	10.187	7.516	12.153	-1.021	-1.965
<i>Wilson</i>	6.091	9.601			-1.425	-2.552
<i>JONSWAP</i>	6.455	12.299			-1.060	0.146
<i>Donelan</i>	5.028	9.215			-2.487	-2.938
<i>CERC</i>	6.462	11.942			-1.054	-0.210
<i>ACES</i>	6.138	9.928			-1.378	-2.225
<i>CEM</i>	7.121	11.301			-0.395	-0.852

Πίνακας 6.17 Σύνοψη αποτελεσμάτων για την περιοχή της Χρυσής Λασιθίου στα 9 Beaufort.

9bf			MIKE21/sw		Αποκλίσεις	
	H _s	T _p	H _s	T _p		
<i>SMB</i>	8.040	11.312	10.128	13.657	-2.089	-2.345
<i>Wilson</i>	7.606	10.546			-2.522	-3.112
<i>JONSWAP</i>	7.604	12.989			-2.525	-0.669
<i>Donelan</i>	6.160	10.066			-3.968	-3.591
<i>CERC</i>	7.611	12.626			-2.517	-1.031
<i>ACES</i>	7.230	10.669			-2.899	-2.988
<i>CEM</i>	8.679	12.072			-1.449	-1.586

Πίνακας 6.18 Σύνοψη αποτελεσμάτων για την περιοχή της Χρυσής Λασιθίου στα 10 Beaufort.

10bf			MIKE21/sw		Αποκλίσεις	
	H _s	T _p	H _s	T _p		
<i>SMB</i>	9.747	12.429	13.062	13.836	-3.315	-1.407
<i>Wilson</i>	9.285	11.468			-3.777	-2.369
<i>JONSWAP</i>	8.845	13.660			-4.217	-0.176
<i>Donelan</i>	7.431	10.923			-5.631	-2.913
<i>CERC</i>	8.854	13.292			-4.208	-0.544
<i>ACES</i>	8.410	11.403			-4.652	-2.433
<i>CEM</i>	10.451	12.843			-2.611	-0.993

6.1.4 Ανάλυση σύνοψης αποτελεσμάτων

Μέσω των συγκρίσεων των αποτελεσμάτων των εμπειρικών μεθόδων και του αριθμητικού μοντέλου προσομοίωσης MIKE21|sw, έγινε εφαρμογή ενός συστήματος βαθμονόμησης των μεθόδων. Για κάθε μονάδα της κλίμακας Beaufort, ανά γεωμετρικό πεδίο (Restricted-Narrow Fetch – Restricted-Wide Fetch – Open Sea), αποδόθηκε στη μέθοδο με την μικρότερη απόκλιση από τα αποτελέσματα του μοντέλου MIKE21|sw μια μονάδα αξιολόγησης. Μέσω αθροιστικής διαδικασίας, προέκυψαν οι αντιστοιχίες που φαίνονται στον παρακάτω πίνακα (**Πίνακας 6.19**).

Πίνακας 6.19 Απόδοση εμπειρικών μεθόδων σε σχέση με το μοντέλο προσομοίωσης ανά γεωμετρικό πεδίο.

Εμπειρικές Μέθοδοι	Restricted-Narrow Fetch		Restricted-Wide Fetch		Open Sea	
	H_s	T_p	H_s	T_p	H_s	T_p
SMB	-	-	2	-	-	-
Wilson	-	-	-	-	1	-
JONSWAP	-	-	-	-	1	3
Donelan	2	1	4	6	1	-
CERC	3	4	-	-	-	-
ACES	-	1	-	-	-	2
CEM	1	-	-	-	3	1

Όπως προκύπτει από τα αποτελέσματα της σύγκρισης με το αριθμητικό μοντέλο προσομοίωσης MIKE21|sw, σε συνθήκες περιορισμένου-στενού αναπτύγματος πελάγους (Restricted-Narrow Fetch) προκρίνεται η μέθοδος CERC για τον υπολογισμό του χαρακτηριστικού ύψους κύματος H_s και για την περίοδο κορυφής T_p . Σε συνθήκες περιορισμένου-ευρέος αναπτύγματος πελάγους (Restricted-Wide Fetch) προκρίνεται η χρήση της μεθόδου Donelan, η οποία εισάγει την έννοια της επικρατέστερης διεύθυνσης διάδοσης κύματος και δεν λειτουργεί με την χρήση του ενεργού αναπτύγματος πελάγους. Σε συνθήκες ανοιχτής θάλασσας (Open Sea) προκρίνεται για τον υπολογισμό του χαρακτηριστικού ύψους κύματος η μέθοδος CEM και για την περίοδο κορυφής η μέθοδος JONSWAP.

Ωστόσο, παρατηρείται πως κάθε μέθοδος έχει τουλάχιστον μια επικράτηση σε σύγκριση με τις άλλες, όσον αφορά τις αποκλίσεις από το μοντέλο MIKE21|sw. Όμως η ανάδειξη της επικρατέστερης μεθόδου, ανά μονάδα της κλίμακας Beaufort, ανά σενάριο, κρίνεται ως μη λειτουργική.

6.2 Συνολικά Συμπεράσματα

Βασικός σκοπός της παρούσας ΔΕ ήταν να αναδειχθούν και να αξιολογηθούν οι διαφορές μεταξύ των αποτελεσμάτων των μαθηματικών εξισώσεων των εμπειρικών μεθόδων και του αριθμητικού μοντέλου προσομοίωσης MIKE21|sw για τον υπολογισμό των χαρακτηριστικών μεγεθών ενός κυματικού κλίματος. Εξίσου ουσιαστικός σκοπός της παρούσας ΔΕ ήταν να αναδειχθεί η σημασία της επιλογής της καταλληλότερης εμπειρικής μεθόδου ανά γεωμετρικό πεδίο, εφόσον ο μελετητής δεν διαθέτει πιο αξιόπιστο μέσο για τον υπολογισμό των χαρακτηριστικών μεγεθών του κυματικού κλίματος σε μια ακτομηχανική μελέτη.

Με βάση την ανάλυση των αποτελεσμάτων και την εμπειρία που προέκυψε από την εκπόνηση της έρευνας προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

- Αρχικά, είναι σημαντικός ο προσδιορισμός του πεδίου ως **α)** περιορισμένο-στενό (Restricted-Narrow Fetch), **β)** περιορισμένο-εury (Restricted-Wide Fetch) ή **γ)** ανοιχτής θάλασσας (Open Sea), ο οποίος παίζει καθοριστικό ρόλο στην εξαγωγή αξιόπιστων αποτελεσμάτων.
- Ως πιο κατάλληλη μέθοδος προτείνεται για κάθε πεδίο:
 - Restricted-Narrow Fetch → Μέθοδος CERC
 - Restricted-Wide Fetch → Μέθοδος Donelan
 - Open Sea → Μέθοδος CEM
- Ως πιο συντηρητικές μέθοδοι, δηλαδή μέθοδοι που αποδίδουν τα μεγαλύτερα ύψη κύματος, προκρίνονται σε κατάταξη για κάθε πεδίο:
 - Restricted-Narrow Fetch → ^{1.Μέθοδος CERC}
^{2.Μέθοδος ACES}
 - Restricted-Wide Fetch → ^{1.Μέθοδος Donelan}
^{2.Μέθοδος SMB}
 - Open Sea → ^{1.Μέθοδος CEM}
^{2.Μέθοδος JONSWAP}
- Ως λιγότερο συντηρητική μέθοδος προκρίνεται για κάθε πεδίο:
 - Restricted-Narrow Fetch → Μέθοδος Wilson
 - Restricted-Wide Fetch → Μέθοδος JONSWAP
 - Open Sea → Μέθοδος Donelan
- Γίνεται εμφανές πως δεν προκρίνεται ως καταλληλότερη οποιαδήποτε μέθοδος χωρίς τον διαχωρισμό σε διακριτά πεδία, κάτι που δικαιολογεί την μη επικράτηση κάποιας μεθόδου σε καθολική εφαρμογή.
- Οι εμπειρικές μέθοδοι δεν υπολογίζουν την συνεισφορά φαινομένων κυματικής διάδοσης, όπως η περιθλαση γύρω από νήσους, στην εισρέουσα κυματική ενέργεια κάτι που οδηγεί σε υποεκτίμηση του ύψους κύματος.
- Οι υπολογισμοί σε Fetch-Limited συνθήκες με την χρήση των εμπειρικών μεθόδων πλησιάζουν να αποδίδουν τα μέγιστα κυματικά χαρακτηριστικά.
- Για ακτομηχανικές μελέτες και μελέτες κυματικής διαταραχής, που το ζητούμενο είναι το μέσο κυματικό κλίμα ενός χρονικού εύρους, δεν είναι κατάλληλοι οι πίνακες της EMY για την μέση ετήσια συχνότητα πνοής καθώς δεν προσφέρουν την πληροφορία της πραγματικής διάρκειας πνοής του ανέμου, παρά μόνο την ετήσια συχνότητα εμφάνισής του. Αυτή η πληροφορία, συνεπώς, δεν είναι κατάλληλη για να αποφανθεί ο μελετητής αν επικρατούν Fetch-Limited ή Duration-Limited συνθήκες. Η διάρκεια πνοής του ανέμου αποτελεί κρίσιμο μέγεθος στους υπολογισμούς των χαρακτηριστικών μεγεθών ενός κυματικού κλίματος και ένας τρόπος να ληφθεί ως πληροφορία είναι από καταγραφές φαινομένων.
- Τα μοντέλα αριθμητικής προσομοίωσης υπερτερούν ως προς την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων, αλλά απαιτούν σημαντικά περισσότερους υπολογιστικούς πόρους και χρόνους και συνεπώς κόστη εφαρμογής.

6.3 Περαιτέρω Έρευνα

Με γνώμονα την βελτιστοποίηση της αξιοπιστίας των αποτελεσμάτων, έγινε μια προσπάθεια να εισαχθούν στις διαδικασίες σύγκρισης, μεταξύ των μαθηματικών εξισώσεων των εμπειρικών μεθόδων και της αριθμητικής προσομοίωσης του μοντέλου MIKE21|sw, αποτελέσματα προερχόμενα από συστήματα βάσης δεδομένων (Database Systems), όπως αυτά του Ελληνικού Κέντρου Θαλασσίων Ερευνών (ΕΛ.ΚΕ.Θ.Ε.) ή του Ευρωπαϊκού Προγράμματος Copernicus.

Τα δεδομένα που εξήχθησαν δεν ήταν δυνατό να χρησιμοποιηθούν και να συνεισφέρουν στην έρευνα, καθώς, μέχρι την παρούσα στιγμή, όσα βρίσκονται διαθέσιμα, είτε δεν καθιστούν επαρκές μέγεθος για στατιστική ανάλυση, είτε δεν προσφέρουν την ακρίβεια που απαιτείται για τα σημεία ενδιαφέροντος της παρούσας ΔΕ. Η σύνδεση μεταξύ των ανεμολογικών και των κυματολογικών δεδομένων αποτελεί νέο πεδίο έρευνας, ώστε να μπορέσει να γίνει δυνατή η σύγκριση μεταξύ των καταγραφών από βάσεις δεδομένων και των αποτελεσμάτων των εμπειρικών μεθόδων και των μοντέλων προσομοίωσης.

Καθώς η τεχνολογία των βάσεων δεδομένων εξελίσσεται, είναι σαφές πως σε μελλοντικές έρευνες θα παίξει καθοριστικό ρόλο στην βελτίωση της αξιοπιστίας των αποτελεσμάτων που αφορούν ακτομηχανικές μελέτες και μελέτες κυματικής διαταραχής.

Σημαντική, θεωρείται επίσης, η εφαρμογή αντίστοιχων πειραμάτων και συγκρίσεων με αυτά της παρούσας ΔΕ σε διαφορετικές περιοχές με αντίστοιχη χαρακτηριστική γεωμετρία, έτσι ώστε να θωρακιστεί η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων, όπως αυτά έχουν προκύψει.

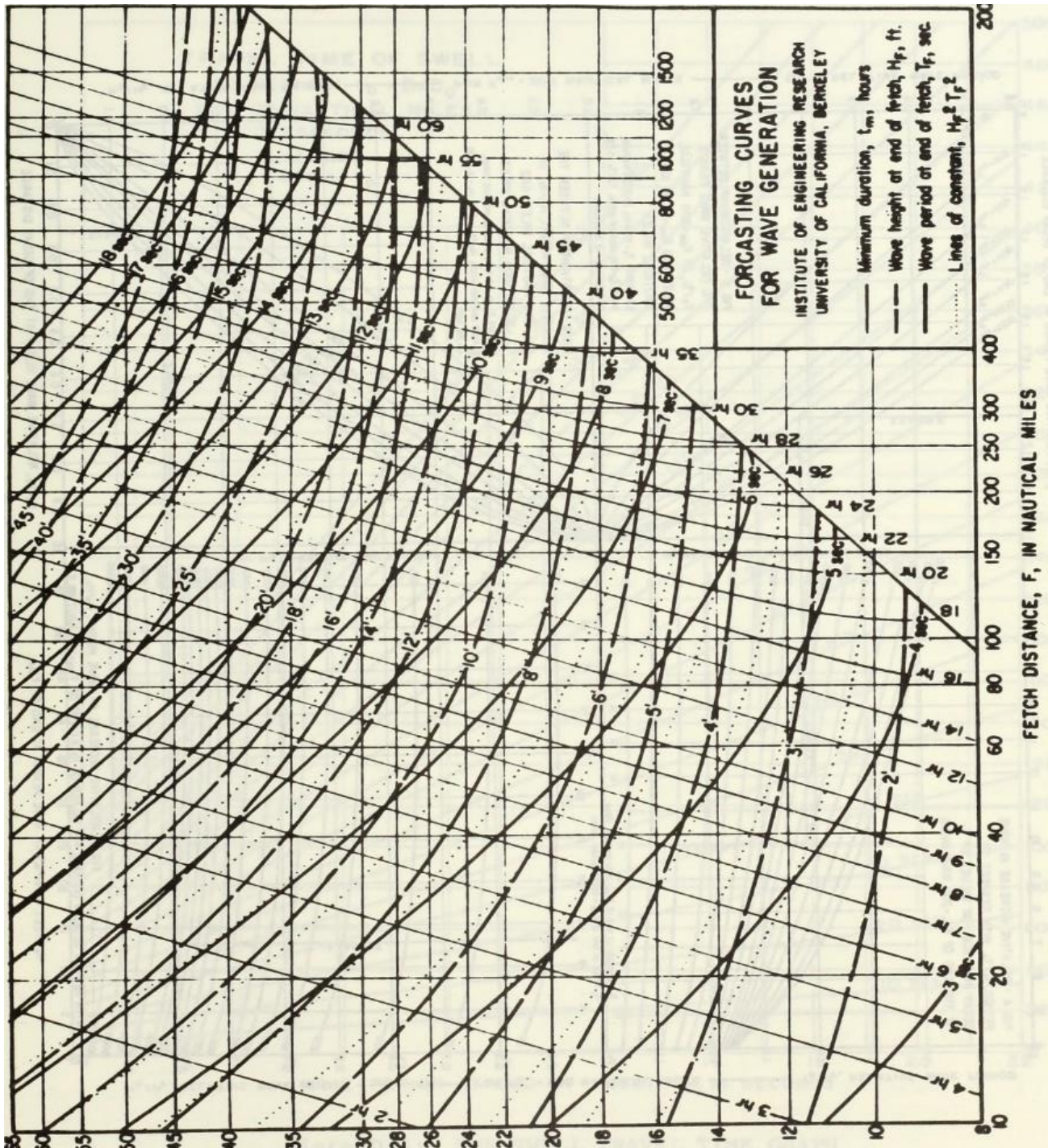
Χρήσιμα συμπεράσματα αναμένεται να προκύψουν και από την σχετική εφαρμογή των μεθόδων σε συνθήκες περιορισμένης διάρκειας πνοής ανέμου (Duration-Limited).

7 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

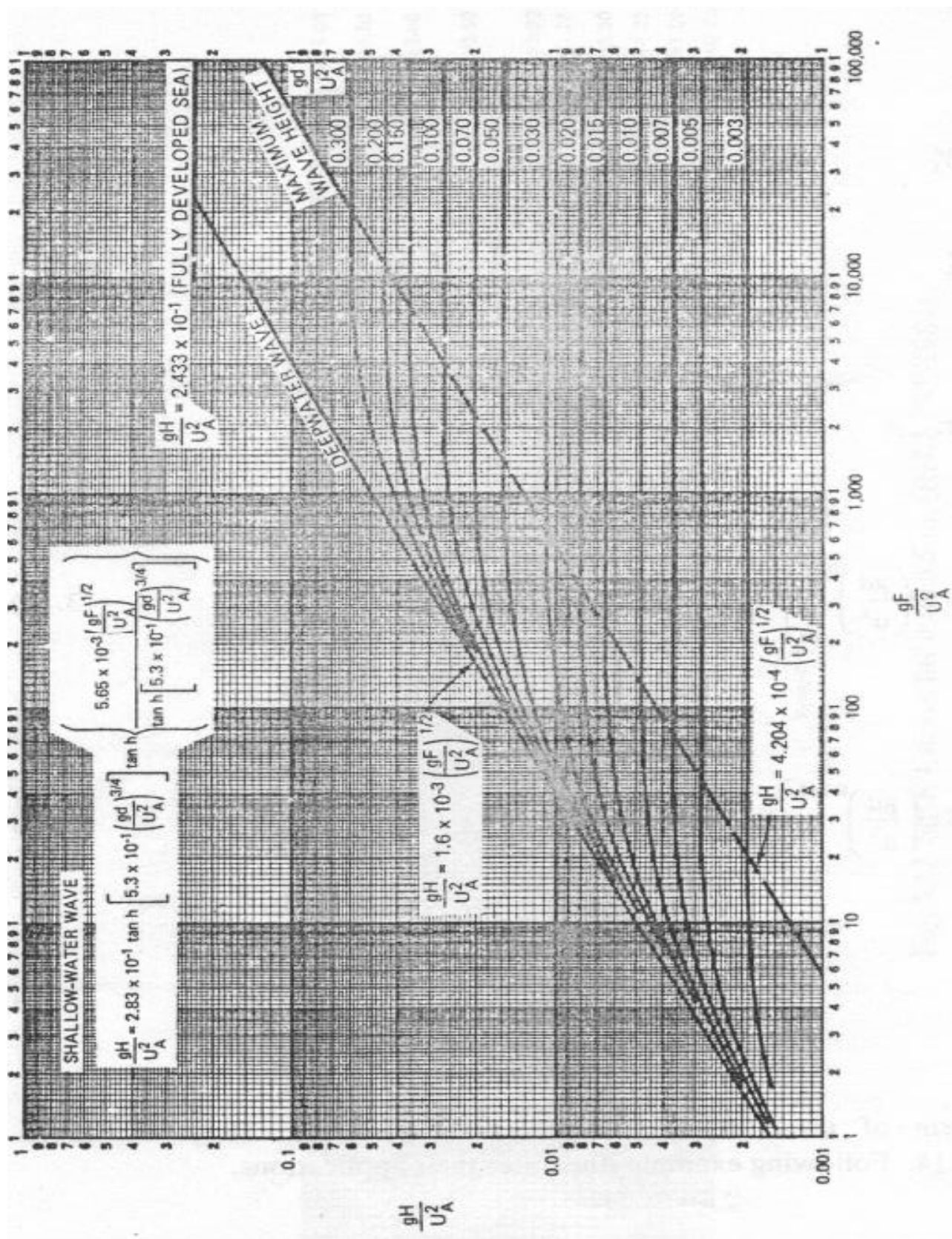
- Bishop, C. T., & Donelan, M. A. (1989). Wave prediction models. Στο *Applications in coastal engineering* (Τόμ. 49, σσ. 75-105). Elsevier Oceanography Series.
- Bretschneider, C. L. (1964). *Generation of waves by wind State of the art*. National Engineering Science Company.
- Carter, D. J. (1982). *Prediction of wave height and period for a constant wind velocity using the JONSWAP results*. Institute of Oceanographic Sciences. Pergamon Press Ltd.
- CEM. (2008). *Coastal Engineering Manual*. Coastal Engineering Research Center, Department of the U.S. Army. Corps of Engineers.
- Goda, Y. (1985). *Random seas and design of maritime structures*. University of Tokyo Press.
- Goda, Y. (2003). *Revisiting Wilson's formulas for simplified wind-wave prediction*. Journal of Waterway. ASCE.
- Leenknecht, D. A., Szuwalski, A., & Sherlock, A. R. (1992). *Automated Coastal Engineering System*. Coastal Engineering Research Center, Department of the US Army. Corps of the Engineers.
- Newland, D. E. (1993). *An introduction to random vibrations, spectral and wavelet analysis*. Longman Scientific & Technical.
- Saville, T. J. (1954). *The effect of fetch width on wave generation*. Beach Erosion Board, Department of the US Army. Corps of Engineers.
- Smith, J. M. (1991). *Wind-wave generation on restricted fetches*. Coastal Engineering Research Center, Department of the US Army. Corps of Engineers.
- SPM. (1984). *Shore Protection Manual vol.1*. Coastal Engineering Research Center, Department of the US Army. Corps of Engineers.
- Vincent, C. L. (1984). *Deepwater wind wave growth with fetch and duration*. Coastal Engineering Research Center, Department of the US Army. Corps of Engineers.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

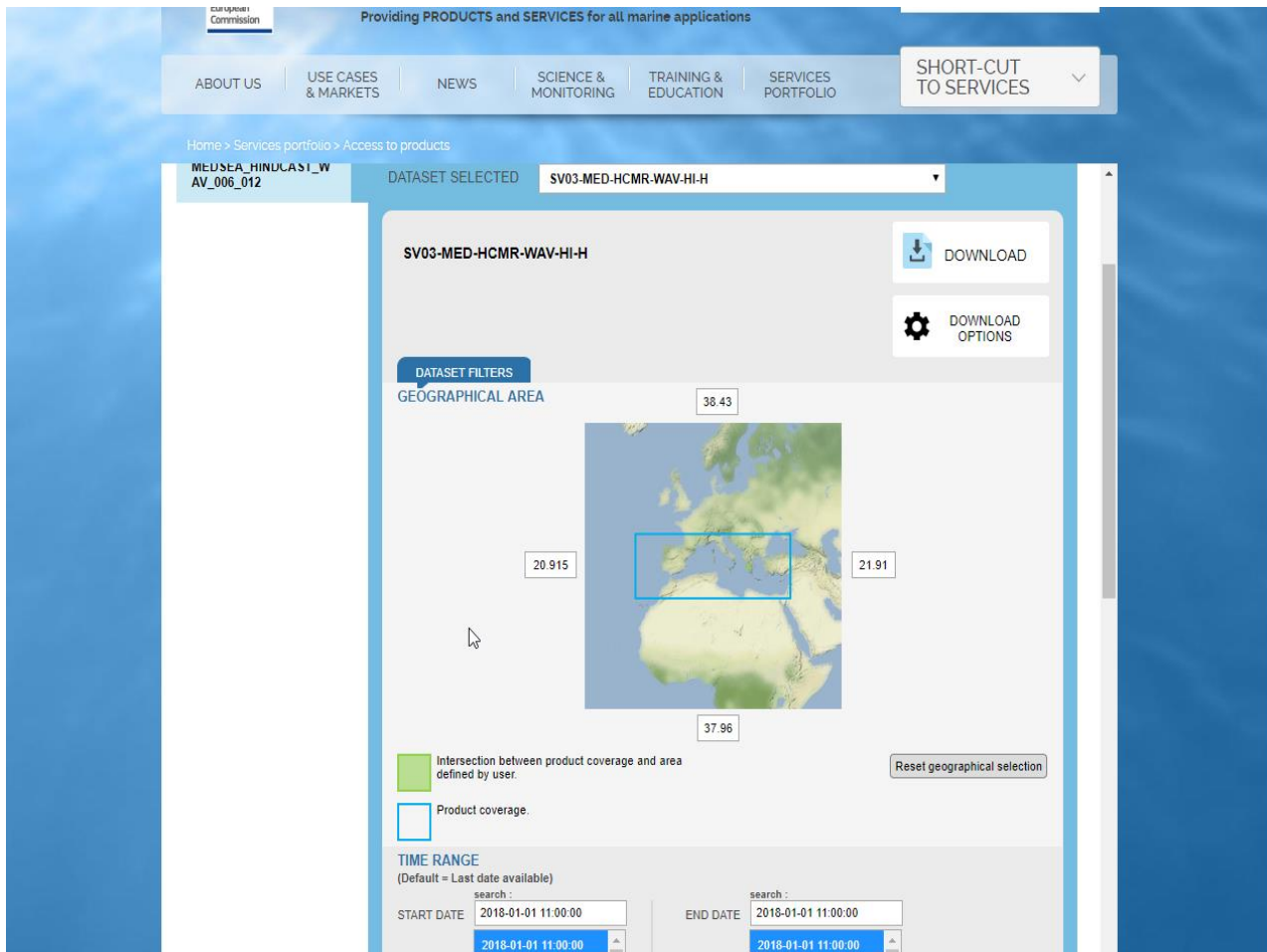
Παράρτημα 1. Νομογράφημα Bretschneider σε διαφορετική διάταξη (Bretschneider, 1964)



Παράρτημα 2. Νομογράφημα JONSWAP κατά το Shore Protection Manual (1984)



Παράρτημα 3. Πλατφόρμα βάσης δεδομένων του Ευρωπαϊκού Προγράμματος Copernicus



Η άντληση δεδομένων από το σύστημα Copernicus δεν ήταν δυνατό να συμβάλει στην παρούσα έρευνα.

Επιγραμματικά, για την περιοχή του Λιμένα της Ερμούπολης, λήφθηκαν δεδομένα που αφορούν τα ύψη και την διεύθυνση διάδοσης των κυματισμών για το διάστημα από τον Ιανουάριο του 2006 έως τον Ιανουάριο του 2017. Έπειτα από την κατάλληλη επεξεργασία, απομονώθηκαν τα αποτελέσματα που υπάγονταν σε ανατολικό άνεμο, με σκοπό την σύγκριση με τα εφαρμοσμένα σενάρια της έρευνας. Διαπιστώθηκε πως η σύγκριση δεν οδηγεί σε αξιόπιστα συμπεράσματα, καθώς χωρίς τις καταγραφές των αντίστοιχων ανεμολογικών φαινομένων, σε διάρκεια και ένταση, οι πληροφορίες που εξάγονται δεν απαντούν κατά αντιστοιχία στα αποτελέσματα των εμπειρικών μεθόδων και του μοντέλου προσομοίωσης.

Παράρτημα 4. Πλατφόρμα βάσης δεδομένων του ΕΛ.ΚΕ.Θ.Ε. (Σύστημα Ποσειδών)

Ναυσιπλοΐας

Πρόγνωση Θαλάσσιας Στάθμης

Πρόγνωση Κυκλοφορίας

Πρόγνωση Οικοσυστήματος

Περιγραφή προγνωστικών μοντέλων

Οι υπηρεσίες του ΠΟΣΕΙΔΩΝΑ

Διασπορά πετρελαιοκηλίδων

Βάση Δεδομένων

FerryBox

Προηγούμενες Προγνώσεις

Υψίσυχη τηλεμετρία

Οι προγνώσεις του ΠΟΣΕΙΔΩΝΑ στο κινητό σας

Links

EuroGoos

MonGOOS

CMEMS


CMEMS Insitu

EuroArgo


GreekArgo

EMSO ERIC


HIMIOFOTS




Πληροφορίες σχετικά με τους σταθμούς σε γεωγραφική απεικόνιση




Δεδομένα τελευταίας μετάδοσης




Το Μηχανισμό Χρηματοδότησης του Ευρωπαϊκού Οικονομικού Χώρου - EFTA & το ΥΠ.ΕΘ.Ο.



Ο Καιρός του Ποσειδώνα τώρα και σε Android



Επισκεφτείτε το θαλάσσιο κόσμο της Μεσογείου



The screenshot shows the Poseidon System web interface. At the top, there's a navigation bar with the 'Poseidon System' logo and some icons. Below it is a large satellite map of the Mediterranean region with several colored dots (cyan and yellow) indicating station locations. At the bottom of the map, there's a timeline slider with markers for 2000, 2005, 2010, 2015, and 2017. The interface also includes a sidebar on the left with various service links and a right sidebar with logos for 'grants', 'Android', and 'Cretaquarium'.

Η άντληση δεδομένων από το Σύστημα Ποσειδών του ΕΛ.ΚΕ.Θ.Ε. δεν ήταν δυνατό να συμβάλει στην παρούσα έρευνα, καθώς παρατηρείται έλλειψη δεδομένων στα σημεία ενδιαφέροντος που εξετάζονται.