



## **ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

**ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ-ΔΙΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟ  
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ  
«ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ»**

**Υπολογισμός από κοινού πιθανότητας  
ύψους-περιόδου κυματισμών με βάση  
ανεμολογικά δεδομένα.**

Μεταπτυχιακή εργασία

**Μπονάρης Βασίλειος**

**Επιβλέπων:** Κωνσταντίνος Δ. Μέμος, Ομότιμος Καθηγητής ΕΜΠ

**Δ.Π.Μ.Σ.**

**«ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΚΑΙ  
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ  
ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ»**

Αθήνα, Οκτώβριος 2017



## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία εκπονήθηκε κατά τη διάρκεια του ακαδημαϊκού έτους 2016-2017 στα πλαίσια του Διατμηματικού-Διεπιστημονικού Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών <<Επιστήμη και Τεχνολογία Υδατικών Πόρων>>. Εντάσσεται στη γενικότερη έρευνα σχετικά με τον προσδιορισμό της μακροχρόνιας από κοινού κατανομής του ύψους και της περιόδου κύματος στα αβαθή ύδατα.

Αρχική μου επιθυμία είναι να ευχαριστήσω όλους τους ανθρώπους που με την στήριξη τους συνέβαλλαν στην ολοκλήρωση της.

Καταρχάς, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Κωνσταντίνο Μέμο για τη άψογη συμπεριφορά του όλον αυτόν τον καιρό , για την προσανατολισμένη και άριστη καθοδήγηση του καθώς και για την πολύ καλή του διάθεση να προσφέρει τη βοήθεια του στην αντιμετώπιση οποιουδήποτε προβλήματος προέκυπτε κατά τη εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Επίσης, θερμές ευχαριστίες αποδίδω στην υποψήφια διδάκτωρ Δήμητρα Μαλλιούρη, η οποία συνέβαλλε τα μέγιστα για την πραγματοποίηση της παρούσας εργασίας και στεκόταν πάντα δίπλα μου σε οποιαδήποτε απορία είχα και γενικά δημιουργούσε ένα πολύ ευχάριστο περιβάλλον καθ' όλη τη διάρκεια της συνεργασίας μας. Με τις υποδείξεις της με βοήθησε πολύ να εμβαθύνω τη μελέτη μου και να δώσω έμφαση σε σημαντικά ερευνητικά ζητήματα όσο αφορά τον επιστημονικό κλάδο της θεωρίας των θαλάσσιων κυμάτων.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου για τη συνεχή στήριξη που μου παρέιχε καθ' όλη των προπτυχιακών και των μεταπτυχιακών σπουδών , αλλά και για τη στήριξη και την αγάπη που μου παρέχει γενικά στη ζωή μου.



## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ.....	i
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ.....	iii
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ.....	vii
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ .....	xi
ΠΕΡΙΛΗΨΗ .....	xvii
ABSTRACT.....	xix
Extended Summary.....	xxi
1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	1
1.1 Αντικείμενο της εργασίας .....	1
1.2 Πρωτότυπα σημεία.....	3
1.3 Διάρθρωση της εργασίας.....	4
2.ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ ΚΑΙ ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ .....	5
2.1 Βασικές παράμετροι κυματισμών .....	6
2.1.1 Στατιστικός προσδιορισμός βασικών παραμέτρων .....	7
2.1.2 Υπολογισμός της μέσης περιόδου $T_m$ μέσω του φάσματος Jonswap .....	9
2.2 Πρόγνωση κυματισμών.....	10
2.2.1 Μέθοδος CEM.....	12
2.2.2 Μέθοδος SMB .....	13
2.2.2 Μέθοδος JONSWAP .....	14
2.3 Διάδοση κυματισμών .....	16
2.3.1 Βαθεία ύδατα .....	16
2.3.2 Αβαθή ύδατα.....	17
2.3.3 Μετασχηματισμοί στην παράκτια ζώνη .....	17
2.4 Κατανομές πιθανότητας τυχαίων μεταβλητών .....	22
2.4.1 Συνάρτηση κατανομής τυχαίας μεταβλητής .....	23
2.4.2 Διακριτή τυχαία μεταβλητή.....	23
2.4.3 Τυχαία συνεχής μεταβλητή .....	24
2.4.4 Περιθώρια κατανομή και κατανομή δεσμευμένης πιθανότητας .....	25
2.5 Εκτίμηση μακροχρόνιου κυματικού κλίματος μέσω θεωρητικών πιθανοτικών μοντέλων	26
2.5.1 Ιστορική ανασκόπηση .....	26

2.5.2 Μοντέλα κατανομών μιας μεταβλητής.....	30
2.5.3 Μοντέλο δεσμευμένης πιθανότητας.....	32
<b>3. ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΗΣ ΘΑΣΟΥ</b>	<b>35</b>
3.1 Υπολογισμός αναπτυγμάτων πελάγους κάθε κύριας διεύθυνσης.....	36
3.2 Υπολογισμός χαρακτηριστικών μεγεθών στα βαθειά ύδατα .....	39
3.2.1 Υπολογισμός χαρακτηριστικού ύψους $H_s$ και μέσης περιόδου $T_m$ .....	39
3.2.2 Έλεγχος κλίσης του κυματισμού στα βαθειά .....	39
3.3 Δημιουργία πινάκων από κοινού συχνοτήτων με βάση τα ανεμολογικά δεδομένα .....	44
3.3.1 Ανεμολογικά δεδομένα της Λήμνου .....	45
3.3.1.1 Δημιουργία πινάκων άνισου πλάτους.....	46
3.3.1.2 Δημιουργία πινάκων σταθερού πλάτους .....	51
3.3.2 Συνδυασμένα ανεμολογικά δεδομένα Λήμνου-Αλεξανδρούπολης .....	57
3.3.3 Συνδυασμένα ανεμολογικά δεδομένα Λήμνου-Αλεξανδρούπολης-Καβάλας .....	61
3.4 Δεδομένα από πραγματικές μετρήσεις.....	64
3.5 Αβαθή ύδατα .....	68
3.6 Μοντέλο δεσμευμένης πιθανότητας.....	73
3.6.1 Περιγραφή του μοντέλου.....	73
3.6.2 Μακροχρόνιες κατανομές πυκνότητας πιθανότητας χαρακτηριστικού ύψους κύματος και μέσης περιόδου.....	73
3.6.3 Μακροχρόνια από κοινού κατανομή του χαρακτηριστικού ύψους και της μέσης περιόδου.....	80
3.7 Μακροχρόνια από κοινού κατανομή του χαρακτηριστικού ύψους κύματος και της περιόδου συσχετίζοντας τις παραμέτρους $\alpha$ $\beta$ της λογαριθμοκανονικής κατανομής με το χαρακτηριστικό ύψος κύματος .....	81
<b>4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΗΣ ΘΑΣΟΥ</b> .....	<b>83</b>
4.1 Αποτελέσματα για τα βαθειά νερά χωρίς την εφαρμογή του μοντέλου .....	84
4.2 Αποτελέσματα για τα βαθειά νερά έπειτα από εφαρμογή του μοντέλου δεσμευμένης πιθανότητας.....	87
4.3 Αποτελέσματα μετά την εφαρμογή του μοντέλου δεσμευμένης πιθανότητας με συσχετισμένες παραμέτρους της λογαριθμοκανονικής κατανομής ως προς το χαρακτηριστικό ύψος κύματος για τα βαθειά ύδατα .....	107
4.4 Αποτελέσματα για το βάθος $d=7.5$ m έπειτα από την εφαρμογή του μοντέλου δεσμευμένης πιθανότητας.....	114

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ .....	125
5.1 Βασικά συμπεράσματα.....	125
5.2 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.....	127
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕ ΑΝΑΦΟΡΕΣ .....	129
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....	133





## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

<b>Εικόνα 2.1</b> Τυπική χρονοσειρά όπου απεικονίζεται η ανύψωση της μέσης στάθμης της ελεύθερης επιφάνειας συναρτήσει του χρόνου $\eta(t)$ .....	7
<b>Εικόνα 2.2</b> Κυματική καταγραφή όπου τα κύματα προσδιορίζονται με τη μέθοδο καθοδικού μηδενισμού (Αριστερά) και ανοδικού μηδενισμού (δεξιά).....	8
<b>Εικόνα 2.3</b> Τυπικό φάσμα ενέργειας συναρτήσει της συχνότητας $S(f)$ .....	10
<b>Εικόνα 2.4</b> Χαρακτηριστικά κύματος στην ανοιχτή θάλασσα-μοντέλο SMB.....	14
<b>Εικόνα 2.5</b> Ρήχωση κυματισμού.....	18
<b>Εικόνα 2.6</b> Διάθλαση κυμάτων.....	20
<b>Εικόνα 3.1</b> Η περιοχή της Θάσου και το σημείο στο οποίο εφαρμόζεται η μεθοδολογία.....	36
<b>Εικόνα 3.2</b> Αναπτύγματα πελάγους γύρω από το σημείο μελέτης.....	37
<b>Εικόνα 3.3</b> Επίδραση του πυθμένα στη μεταβολή ύψους κύματος, του μήκους κύματος και της ταχύτητάς του, λόγω ρήχωσης.....	69
<b>Εικόνα 3.4</b> Προσαρμογή κατανομών Lognormal και Weibull στο ιστόγραμμα περιθωρίων συχνότητας εμφάνισης του χαρακτηριστικού ύψους κύματος $H_s$ που προέκυψε από τα ανεμολογικά δεδομένα της Λήμνου για βαθιά νερά.....	74
<b>Εικόνα 3.5</b> Προσαρμογή κατανομών Lognormal και Weibull στο ιστόγραμμα περιθωρίων συχνότητας εμφάνισης του χαρακτηριστικού ύψους κύματος $H_s$ που προέκυψε από τα συνδυασμένα ανεμολογικά δεδομένα των περιοχών Λήμνος-Αλεξανδρούπολη για βαθιά νερά.....	75
<b>Εικόνα 3.6</b> Προσαρμογή κατανομών Lognormal και Weibull στο ιστόγραμμα περιθωρίων συχνότητας εμφάνισης του χαρακτηριστικού ύψους κύματος $H_s$ που προέκυψε από τα συνδυασμένα ανεμολογικά δεδομένα των περιοχών Λήμνος-Αλεξανδρούπολη-Καβάλα για βαθιά νερά.....	75
<b>Εικόνα 3.7</b> Προσαρμογή της κατανομής Weibull στο ιστόγραμμα περιθωρίων συχνότητας εμφάνισης του χαρακτηριστικού ύψους κύματος $H_s$ που προέκυψε από τις μετρήσεις του Ατλαντα για βαθιά ύδατα.....	76
<b>Εικόνα 3.8</b> Προσαρμογή κατανομής Weibull στο ιστόγραμμα περιθωρίων συχνότητας εμφάνισης του χαρακτηριστικού ύψους κύματος $H_s$ που προέκυψε από ανεμολογικά δεδομένα για βάθος $d=7.5m$ .....	76

**Εικόνα 3.9** Προσαρμογή λογαριθμικής κατανομής στο ιστόγραμμα συχνοτήτων εμφάνισης της δεσμευμένης μέσης περιόδου  $T_m|H_s$  που προέκυψε από τα ανεμολογικά δεδομένα της Λήμνου, για  $H_s=0.625\text{m}$  για βαθειά ύδατα.....77

**Εικόνα 3.10** Προσαρμογή λογαριθμικής κατανομής στο ιστόγραμμα συχνοτήτων εμφάνισης της δεσμευμένης μέσης περιόδου  $T_m|H_s$  που προέκυψε από τα συνδυασμένα ανεμολογικά των περιοχών Λήμνος-Αλεξανδρούπολη, για  $H_s=0.625\text{m}$  για βαθειά ύδατα .....78

**Εικόνα 3.11** Προσαρμογή λογαριθμικής κατανομής στο ιστόγραμμα συχνοτήτων εμφάνισης της δεσμευμένης μέσης περιόδου  $T_m|H_s$  που προέκυψε από τα συνδυασμένα ανεμολογικά των περιοχών Λήμνος-Αλεξανδρούπολη-Καβάλα για  $H_s=0.625\text{m}$  για βαθειά ύδατα .....78

**Εικόνα 3.12** Προσαρμογή λογαριθμικής κατανομής στο ιστόγραμμα συχνοτήτων εμφάνισης της δεσμευμένης μέσης περιόδου  $T_m|H_s$  που προέκυψε από τις μετρήσεις του Άτλαντα για  $H_s=0.625\text{m}$  για βαθειά ύδατα.....79

**Εικόνα 3.13** Προσαρμογή λογαριθμικής κατανομής στο ιστόγραμμα συχνοτήτων εμφάνισης της δεσμευμένης μέσης περιόδου  $T_m|H_s$  που προέκυψε από ανεμολογικά δεδομένα, για  $H_s=0.625\text{m}$  και βάθος  $d=7.5\text{m}$ .....79

**Εικόνα 4.1** Από κοινού κατανομές των  $H_s, T_m$  για τα βαθειά ύδατα χωρίς την εφαρμογή μοντέλου: (α) Καμπύλες ίσης πυκνότητας που προέκυψαν από τα ανεμολογικά δεδομένα της Λήμνου, (β) Καμπύλες ίσης πυκνότητας που προέκυψαν από τα συνδυασμένα ανεμολογικά δεδομένα των περιοχών Λίμνου-Αλεξανδρούπολη, (γ) Καμπύλες ίσης πυκνότητας που προέκυψαν από τα συνδυασμένα ανεμολογικά δεδομένα των περιοχών Λήμνου-Αλεξανδρούπολη- Καβάλα, (δ) Καμπύλες ίσης πυκνότητας που προέκυψαν από μετρήσεις του Άτλα.....85

**Εικόνα 4.2** Από κοινού κατανομές των  $H_s, T_m$  για τα βαθειά ύδατα που προέκυψαν από τα ανεμολογικά δεδομένα της Λήμνου: (α)Καμπύλες ίσης πυκνότητας με εφαρμογή μοντέλου δεσμευμένης πιθανότητας (Conditional model) με λογαριθμική κατανομή για  $T_m|H_s$  και κατανομή Weibull για το  $H_s$  (β) Καμπύλες ίσης πυκνότητας με εφαρμογή μοντέλου δεσμευμένης πιθανότητας (Conditional model) με λογαριθμική κατανομή για  $T_m|H_s$  και  $H_s$ ....91

**Εικόνα 4.3** Από κοινού κατανομές των  $H_s, T_m$  για τα βαθειά ύδατα που προέκυψαν από τα συνδυασμένα ανεμολογικά δεδομένα των περιοχών Λήμνος-Αλεξανδρούπολη: (α)Καμπύλες ίσης πυκνότητας με εφαρμογή μοντέλου δεσμευμένης πιθανότητας(Conditional model) με λογαριθμική κατανομή για  $T_m|H_s$  και κατανομή Weibull για το  $H_s$  (β) Καμπύλες ίσης πυκνότητας με εφαρμογή μοντέλου δεσμευμένης πιθανότητας(Conditional model) με λογαριθμική κατανομή για  $T_m|H_s$  και  $H_s$ .....95

**Εικόνα 4.4** Από κοινού κατανομές των  $H_s, T_m$  για τα βαθειά ύδατα που προέκυψαν από τα συνδυασμένα ανεμολογικά δεδομένα των περιοχών Λήμνος-Αλεξανδρούπολη-Καβάλα:

(α) Καμπύλες ίσης πυκνότητας με εφαρμογή μοντέλου δεσμευμένης πιθανότητας(Conditional model) με λογαριθμική κατανομή για  $T_m|H_s$  και κατανομή Weibull για το  $H_s$  (β) Καμπύλες ίσης πυκνότητας με εφαρμογή μοντέλου δεσμευμένης πιθανότητας(Conditional model) με λογαριθμική κατανομή για  $T_m|H_s$  και  $H_s$ .....98

**Εικόνα 4.5** Από κοινού κατανομές των  $H_s$ ,  $T_m$  για τα βαθιά ύδατα που προέκυψαν από τις μετρήσεις του Άτλαντα: (α)Καμπύλες ίσης πυκνότητας με εφαρμογή μοντέλου δεσμευμένης πιθανότητας(Conditional model) με λογαριθμική κατανομή για  $T_m|H_s$  και κατανομή Weibull για το  $H_s$  (β) Καμπύλες ίσης πυκνότητας με εφαρμογή μοντέλου δεσμευμένης πιθανότητας(Conditional model) με λογαριθμική κατανομή για  $T_m|H_s$  και  $H_s$ .....102

**Εικόνα 4.6** Συσχέτιση της παραμέτρου  $\alpha$  της λογαριθμοκανονικής κατανομής με το χαρακτηριστικό ύψος κύματος με τη βοήθεια της κλασματικής συνάρτησης, για τα βαθιά ύδατα.....108

**Εικόνα 4.7** Συσχέτιση της παραμέτρου  $\beta$  της λογαριθμοκανονικής κατανομής με το χαρακτηριστικό ύψος κύματος με τη βοήθεια της εκθετικής συνάρτησης για τα βαθιά ύδατα.....109

**Εικόνα 4.8** Καμπύλες ίσης πυκνότητας για τα ζεύγη τιμών  $H_s$ ,  $T_m$  για βαθιά ύδατα που προέκυψαν από τα συνδυασμένα ανεμολογικά των περιοχών Λήμνος-Αλεξανδρούπολη-Καβάλα (α) Καμπύλες ίσης πυκνότητας με εφαρμογή μοντέλου δεσμευμένης πιθανότητας (Conditional model) με λογαριθμική κατανομή για  $T_m/H_s$  και κατανομή Weibull για το  $H_s$  (β) Καμπύλες ίσης πυκνότητας με εφαρμογή μοντέλου δεσμευμένης πιθανότητας(Conditional model) με λογαριθμική κατανομή για  $T_m/H_s$  και  $H_s$ , σχετίζοντας τις παραμέτρους της λογαριθμικής κατανομής με το ύψος χαρακτηριστικό  $H_s$  .....113

**Εικόνα 4.9** Από κοινού κατανομή πυκνότητας πιθανότητας των  $H_s$ ,  $T_m$  για το βάθος  $d = 7.5 m$  (α)Καμπύλες ίσης πυκνότητας με εφαρμογή μοντέλου δεσμευμένης πιθανότητας(Conditional model) με λογαριθμική κατανομή για  $T_m/H_s$  και κατανομή Weibull για το  $H_s$  (β) Καμπύλες ίσης πυκνότητας με εφαρμογή μοντέλου δεσμευμένης πιθανότητας(Conditional model) με λογαριθμική κατανομή για  $T_m/H_s$  και  $H_s$ .....118

**Εικόνα 4.10** Συσχέτιση της παραμέτρου  $\alpha$  της λογαριθμοκανονικής κατανομής με το χαρακτηριστικό ύψος κύματος με τη βοήθεια της κλασματικής συνάρτησης, για το βάθος.....119

**Εικόνα 4.11** Συσχέτιση της παραμέτρου  $\beta$  της λογαριθμοκανονικής κατανομής με το χαρακτηριστικό ύψος κύματος με τη βοήθεια της εκθετικής συνάρτησης για το βάθος  $d = 7.5 m$ .....120

**Εικόνα 4.12** Καμπύλες ίσης πυκνότητας για τα ζεύγη τιμών  $H_s$ ,  $T_m$  για το βάθος  $d = 7.5 m$  (α)Καμπύλες ίσης πυκνότητας με εφαρμογή μοντέλου δεσμευμένης πιθανότητας(Conditional model) με λογαριθμική κατανομή για  $T_m/H_s$  και κατανομή Weibull για το  $H_s$  (β) Καμπύλες ίσης πυκνότητας με εφαρμογή μοντέλου δεσμευμένης πιθανότητας(Conditional model) με

λογαριθμική κατανομή για  $T_m/H_s$  και  $H_s$ , σχετίζοντας τις παραμέτρους της λογαριθμικής κατανομής με το ύψος χαρακτηριστικό  $H_s$ .....123

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

<b>Πίνακας 3.1</b> Τιμές των αναπτυγμάτων πελάγους σε κάθε κύρια διεύθυνση.....	40
<b>Πίνακας 3.2</b> Υπολογισμος βασικών παραμέτρων κυματισμού με Νότια προέλευση.....	42
<b>Πίνακας 3.3</b> Υπολογισμος βασικών παραμέτρων κυματισμού με Νότιοδυτική προέλευση.....	42
<b>Πίνακας 3.4</b> Υπολογισμος βασικών παραμέτρων κυματισμού με Δυτική προέλευση.....	43
<b>Πίνακας 3.5</b> Υπολογισμος βασικών παραμέτρων κυματισμού με Νότιοανατολική προέλευση.....	43
<b>Πίνακας 3.6</b> Υπολογισμος βασικών παραμέτρων κυματισμού με Ανατολική προέλευση.....	44
<b>Πίνακας 3.7</b> Υπολογισμος βασικών παραμέτρων κυματισμού με Βόρεια προέλευση.....	44
<b>Πίνακας 3.8</b> Υπολογισμος βασικών παραμέτρων κυματισμού με Βόρειοανατολική προέλευση.....	45
<b>Πίνακας 3.9</b> Υπολογισμος βασικών παραμέτρων κυματισμού με Βόρειοανατολική προέλευση.....	45
<b>Πίνακας 3.10</b> Ανεμολογικά δεδομένα της Λήμνου όπως προέκυψαν από την EMY.....	47
<b>Πίνακας 3.11</b> Από κοινού συχνότητες εμφάνισης του χαρακτηριστικού ύψους και της μέσης περιόδου διαμορφωμένα σε πίνακα κλάσεων άνισου πλάτους για κυματισμούς Νότιας προέλευσης.....	50
<b>Πίνακας 3.12</b> Από κοινού συχνότητες εμφάνισης του χαρακτηριστικού ύψους και της μέσης περιόδου διαμορφωμένα σε πίνακα κλάσεων άνισου πλάτους για κυματισμούς Νοτιοδυτικής προέλευσης.....	50
<b>Πίνακας 3.13</b> Από κοινού συχνότητες εμφάνισης του χαρακτηριστικού ύψους και της μέσης περιόδου διαμορφωμένα σε πίνακα κλάσεων άνισου πλάτους για κυματισμούς Δυτικής προέλευσης.....	51
<b>Πίνακας 3.14</b> Από κοινού συχνότητες εμφάνισης του χαρακτηριστικού ύψους και της μέσης περιόδου διαμορφωμένα σε πίνακα κλάσεων άνισου πλάτους για κυματισμούς Νοτιοανατολικής προέλευσης.....	51
<b>Πίνακας 3.15</b> Από κοινού συχνότητες εμφάνισης του χαρακτηριστικού ύψους και της μέσης περιόδου διαμορφωμένα σε πίνακα κλάσεων άνισου πλάτους για κυματισμούς Ανατολικής προέλευσης.....	52

<b>Πίνακας 3.16</b> Από κοινού συχνότητες εμφάνισης του χαρακτηριστικού ύψους και της μέσης περιόδου διαμορφωμένα σε πίνακα κλάσεων άνισου πλάτους για κυματισμούς Βόρειας προέλευσης.....	52
<b>Πίνακας 3.17</b> Από κοινού συχνότητες εμφάνισης του χαρακτηριστικού ύψους και της μέσης περιόδου διαμορφωμένα σε πίνακα κλάσεων άνισου πλάτους για κυματισμούς Βορειοανατολικής προέλευσης.....	53
<b>Πίνακας 3.18</b> Από κοινού συχνότητες εμφάνισης του χαρακτηριστικού ύψους και της μέσης περιόδου διαμορφωμένα σε πίνακα κλάσεων άνισου πλάτους για κυματισμούς Βορειοδυτικής προέλευσης.....	53
<b>Πίνακας 3.19</b> Από κοινού συχνότητες εμφάνισης των κεντρικών τιμών των κλάσεων σταθερού πλάτους του χαρακτηριστικού ύψους κύματος $H_s$ και της μέσης περιόδου για κυματισμούς με Νότια προέλευση.....	55
<b>Πίνακας 3.20</b> Από κοινού συχνότητες εμφάνισης των κεντρικών τιμών των κλάσεων σταθερού πλάτους του χαρακτηριστικού ύψους κύματος $H_s$ και της μέσης περιόδου για κυματισμούς με Δυτική προέλευση.....	56
<b>Πίνακας 3.21</b> Από κοινού συχνότητες εμφάνισης των κεντρικών τιμών των κλάσεων σταθερού πλάτους του χαρακτηριστικού ύψους κύματος $H_s$ και της μέσης περιόδου $T_m$ , βασισμένες στα ανεμολογικά δεδομένα της Λήμνου για τα βαθιά ύδατα και για την τοποθεσία M4 (40.5N, 25°E) Νοτιοανατολικά της Θάσου.....	57
<b>Πίνακας 3.22</b> Από κοινού πυκνότητες πιθανότητας των κεντρικών τιμών των κλάσεων σταθερού πλάτους του χαρακτηριστικού ύψους κύματος $H_s$ και της μέσης περιόδου $T_m$ , βασισμένες στα ανεμολογικά δεδομένα της Λήμνου χωρίς την εφαρμογή κάποιου θεωρητικού μοντέλου για τα βαθιά ύδατα και για την τοποθεσία M4 (40.5°N, 25°E) Νοτιοανατολικά της Θάσου .....	58
<b>Πίνακας 3.23</b> Συνδυασμένα ανεμολογικά δεδομένα Λήμνου-Αλεξανδρούπολης.....	59
<b>Πίνακας 3.24</b> Από κοινού συχνότητες εμφάνισης των κεντρικών τιμών των κλάσεων σταθερού πλάτους του χαρακτηριστικού ύψους κύματος $H_s$ και της μέσης περιόδου $T_m$ , βασισμένες στα ανεμολογικά δεδομένα της Λήμνου-Αλεξανδρούπολης για τα βαθιά ύδατα και για την τοποθεσία M4 (40.5N, 25°E) Νοτιοανατολικά της Θάσου.....	61
<b>Πίνακας 3.25</b> Από κοινού πυκνότητες πιθανότητας των κεντρικών τιμών των κλάσεων σταθερού πλάτους του χαρακτηριστικού ύψους κύματος $H_s$ και της μέσης περιόδου $T_m$ , βασισμένες στα συνδυασμένα ανεμολογικά δεδομένα της Λήμνου-Αλεξανδρούπολης χωρίς την εφαρμογή κάποιου θεωρητικού μοντέλου για τα βαθιά ύδατα και για την τοποθεσία M4 (40.5°N, 25°E) Νοτιοανατολικά της Θάσου .....	62

<b>Πίνακας 3.26</b> Συνδυασμένα ανεμολογικά δεδομένα Λήμνου-Αλεξανδρούπολης-Καβάλας.....	63
<b>Πίνακας 3.27</b> Από κοινού συχνότητες εμφάνισης των κεντρικών τιμών των κλάσεων σταθερού πλάτους του χαρακτηριστικού ύψους κύματος $H_s$ και της μέσης περιόδου $T_m$ , βασισμένες στα ανεμολογικά δεδομένα της Λήμνου-Αλεξανδρούπολης-Καβάλας για τα βαθιά ύδατα και για την τοποθεσία M4 (40.5N, 25°E) Νοτιοανατολικά της Θάσου.....	64
<b>Πίνακας 3.28</b> Από κοινού πυκνότητες πιθανότητας των κεντρικών τιμών των κλάσεων σταθερού πλάτους του χαρακτηριστικού ύψους κύματος $H_s$ και της μέσης περιόδου $T_m$ , βασισμένες στα συνδυασμένα ανεμολογικά δεδομένα της Λήμνου-Αλεξανδρούπολης-Καβάλας χωρίς την εφαρμογή κάποιου θεωρητικού μοντέλου για τα βαθιά ύδατα και για την τοποθεσία M4 (40.5°N, 25°E) Νοτιοανατολικά της Θάσου .....	65
<b>Πίνακας 3.29</b> Από κοινού συχνότητες εμφάνισης του χαρακτηριστικού ύψους κύματος $H_s$ και της περιόδου αιχμής $T_p$ , ως προς τον συνολικό αριθμό των παρατηρήσεων επτά ετών (μακροχρόνιες),για τα βαθιά ύδατα και για την τοποθεσία (40.5N,25E) νοτιοανατολικά της Θάσου.....	67
<b>Πίνακας 3.30</b> 2Από κοινού συχνότητες εμφάνισης των κεντρικών τιμών των κλάσεων σταθερού πλάτους του χαρακτηριστικού ύψους κύματος $H_s$ και της μέσης περιόδου $T_m$ , ως προς τον συνολικό αριθμό των παρατηρήσεων επτά ετών (μακροχρόνιες),για τα βαθιά ύδατα και για την τοποθεσία (40.5N,25E) νοτιοανατολικά της Θάσου.....	69
<b>Πίνακας 3.31</b> Από κοινού πυκνότητες πιθανότητας των κεντρικών τιμών των κλάσεων σταθερού πλάτους του χαρακτηριστικού ύψους κύματος $H_s$ και της μέσης περιόδου $T_m$ ως προς τον συνολικό αριθμό των παρατηρήσεων επτά ετών (μακροχρόνιες),για τα βαθιά ύδατα και για την τοποθεσία (40.5N,25E) νοτιοανατολικά της Θάσου.....	70
<b>Πίνακας 3.32</b> Από κοινού συχνότητες εμφάνισης των κεντρικών τιμών των κλάσεων σταθερού πλάτους του χαρακτηριστικού ύψους κύματος $H_s$ και της μέσης περιόδου $T_m$ , για το βάθος $d=7.5$ m .....	73
<b>Πίνακας 3.33</b> Από κοινού πυκνότητες πιθανότητας εμφάνισης των κεντρικών τιμών των κλάσεων σταθερού πλάτους του χαρακτηριστικού ύψους κύματος $H_s$ και της μέσης περιόδου $T_m$ , για το βάθος $d=7.5$ m.....	74
<b>Πίνακας 4.1</b> Σφάλματα μεταξύ των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από τα ανεμολογικά δεδομένα και της μετρήσεις του Άτλα, χωρίς την εφαρμογή θεωρητικού πιθανοτικού μοντέλου.....	89
<b>Πίνακας 4.2</b> Μακροχρόνια από κοινού πυκνότητα πιθανότητας του χαρακτηριστικού ύψους κύματος $H_s$ και της μέσης περιόδου $T_m$ με εφαρμογή του μοντέλου δεσμευμένης πιθανότητας στον πίνακα κλάσεων σταθερού πλάτους που κατασκευάστηκε βασισμένος στα ανεμολογικά	

δεδομένα της Λήμνου, θεωρώντας κατανομή Weibull για το  $H_s$  (περιθώρια) και λογαριθμική κατανομή για την  $T_m|H_s$  στα βαθιά ύδατα.....91

**Πίνακας 4.3** Μακροχρόνια από κοινού πυκνότητα πιθανότητας του χαρακτηριστικού ύψους κύματος  $H_s$  και της μέσης περιόδου  $T_m$  με εφαρμογή του μοντέλου δεσμευμένης πιθανότητας στον πίνακα κλάσεων σταθερού πλάτους που κατασκευάστηκε βάσιμένος στα ανεμολογικά δεδομένα της Λήμνου, θεωρώντας λογαριθμοκανονική κατανομή για το  $H_s$  (περιθώρια) για την  $T_m|H_s$  στα βαθιά ύδατα.....92

**Πίνακας 4.4** Μακροχρόνια από κοινού πυκνότητα πιθανότητας του χαρακτηριστικού ύψους κύματος  $H_s$  και της μέσης περιόδου  $T_m$  με εφαρμογή του μοντέλου δεσμευμένης πιθανότητας στον πίνακα κλάσεων σταθερού πλάτους που κατασκευάστηκε βάσιμένος στα ανεμολογικά δεδομένα της Λήμνου-Αλεξανδρούπολης, θεωρώντας κατανομή Weibull για το  $H_s$  (περιθώρια) και λογαριθμική κατανομή για την  $T_m|H_s$  στα βαθιά ύδατα.....95

**Πίνακας 4.5** Μακροχρόνια από κοινού πυκνότητα πιθανότητας του χαρακτηριστικού ύψους κύματος  $H_s$  και της μέσης περιόδου  $T_m$  με εφαρμογή του μοντέλου δεσμευμένης πιθανότητας στον πίνακα κλάσεων σταθερού πλάτους που κατασκευάστηκε βάσιμένος στα ανεμολογικά δεδομένα της Λήμνου-Αλεξανδρούπολης, θεωρώντας λογαριθμοκανονική κατανομή για το  $H_s$  (περιθώρια) για την  $T_m|H_s$  στα βαθιά ύδατα.....96

**Πίνακας 4.6** Μακροχρόνια από κοινού πυκνότητα πιθανότητας του χαρακτηριστικού ύψους κύματος  $H_s$  και της μέσης περιόδου  $T_m$  με εφαρμογή του μοντέλου δεσμευμένης πιθανότητας στον πίνακα κλάσεων σταθερού πλάτους που κατασκευάστηκε βάσιμένος στα ανεμολογικά δεδομένα της Λήμνου-Αλεξανδρούπολης-Καβάλας, θεωρώντας κατανομή Weibull για το  $H_s$  (περιθώρια) και λογαριθμική κατανομή για την  $T_m|H_s$  στα βαθιά ύδατα.....98

**Πίνακας 4.7** Μακροχρόνια από κοινού πυκνότητα πιθανότητας του χαρακτηριστικού ύψους κύματος  $H_s$  και της μέσης περιόδου  $T_m$  με εφαρμογή του μοντέλου δεσμευμένης πιθανότητας στον πίνακα κλάσεων σταθερού πλάτους που κατασκευάστηκε βάσιμένος στα ανεμολογικά δεδομένα της Λήμνου-Αλεξανδρούπολης, θεωρώντας λογαριθμοκανονική κατανομή για το  $H_s$  (περιθώρια) για την  $T_m|H_s$  στα βαθιά ύδατα.....99

**Πίνακας 4.8** Μακροχρόνια από κοινού πυκνότητα πιθανότητας του χαρακτηριστικού ύψους κύματος  $H_s$ , και της μέσης περιόδου  $T_m$  με εφαρμογή του μοντέλου δεσμευμένης πιθανότητας στον πίνακα κλάσεων σταθερού πλάτους του Wind and Wave Mediterranean Atlas, θεωρώντας κατανομή Weibull για το  $H_s$  (περιθώρια) και λογαριθμική κατανομή για την  $T_m|H_s$  στα βαθιά ύδατα.....102

**Πίνακας 4.9** Μακροχρόνια από κοινού πυκνότητα πιθανότητας του χαρακτηριστικού ύψους κύματος  $H_s$  και της μέσης περιόδου  $T_m$  με εφαρμογή του μοντέλου δεσμευμένης πιθανότητας



στον πίνακα κλάσεων σταθερού πλάτους του Wind and Wave Mediterranean Atlas, θεωρώντας λογαριθμοκανονική κατανομή για το  $H_s$  (περιθώρια) για την  $T_m|H_s$  στα βαθιά ύδατα.....103

**Πίνακας 4.10** Σφάλματα μεταξύ των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από τα ανεμολογικά δεδομένα και της μετρήσεις του Άτλα, έπειτα από την εφαρμογή του μοντέλου δεσμευμένης πιθανότητας.....106

**Πίνακας 4.11** Μακροχρόνια από κοινού πυκνότητα πιθανότητας του χαρακτηριστικού ύψους κύματος  $H_s$  και της μέσης περιόδου  $T_m$  με εφαρμογή του μοντέλου δεσμευμένης πιθανότητας στον πίνακα κλάσεων σταθερού πλάτους που κατασκευάστηκε βάσιμένος στα ανεμολογικά δεδομένα της Λήμνου-Αλεξανδούπολης-Καβάλας, θεωρώντας κατανομή Weibull για το  $H_s$  (περιθώρια) και λογαριθμική κατανομή για την  $T_m|H_s$  και συσχετίζοντας τις παραμέτρους  $\alpha, \beta$  της λογαριθμοκανονικής κατανομής με το χαρακτηριστικό ύψος  $H_s$  στα βαθιά ύδατα.....113

**Πίνακας 4.12** Μακροχρόνια από κοινού πυκνότητα πιθανότητας του χαρακτηριστικού ύψους κύματος  $H_s$  και της μέσης περιόδου  $T_m$  με εφαρμογή του μοντέλου δεσμευμένης πιθανότητας στον πίνακα κλάσεων σταθερού πλάτους που κατασκευάστηκε βάσιμένος στα ανεμολογικά δεδομένα της Λήμνου-Αλεξανδούπολης-Καβάλας, θεωρώντας λογαριθμοκανονική κατανομή για το  $H_s$  (περιθώρια) για την  $T_m|H_s$ , και συσχετίζοντας τις παραμέτρους  $\alpha, \beta$  της λογαριθμοκανονικής κατανομής με το χαρακτηριστικό ύψος  $H_s$  στα βαθιά ύδατα.....114

**Πίνακας 4.13** Μακροχρόνια από κοινού πυκνότητα πιθανότητας του χαρακτηριστικού ύψους κύματος  $H_s$  και της μέσης περιόδου  $T_m$  με εφαρμογή του μοντέλου δεσμευμένης πιθανότητας θεωρώντας κατανομή Weibull για το  $H_s$  (περιθώρια) και λογαριθμική κατανομή για την  $T_m|H_s$ , στο βάθος  $d = 7.5m$ .....118

**Πίνακας 4.14** Μακροχρόνια από κοινού πυκνότητα πιθανότητας του χαρακτηριστικού ύψους κύματος  $H_s$  και της μέσης περιόδου  $T_m$  με εφαρμογή του μοντέλου δεσμευμένης πιθανότητας θεωρώντας λογαριθμοκανονική κατανομή για το  $H_s$  (περιθώρια) για την  $T_m|H_s$ , στο βάθος  $d = 7.5m$ .....119

**Πίνακας 4.15** Μακροχρόνια από κοινού πυκνότητα πιθανότητας του χαρακτηριστικού ύψους κύματος  $H_s$  και της μέσης περιόδου  $T_m$  με εφαρμογή του μοντέλου δεσμευμένης πιθανότητας θεωρώντας κατανομή Weibull για το  $H_s$  (περιθώρια) και λογαριθμική κατανομή για την  $T_m/H_s$ , και συσχετίζοντας τις παραμέτρους  $\alpha, \beta$  της λογαριθμοκανονικής κατανομής με το χαρακτηριστικό ύψος  $H_s$  στο βάθος  $d = 7.5m$ .....123

**Πίνακας 4.16** Μακροχρόνια από κοινού πυκνότητα πιθανότητας του χαρακτηριστικού ύψους κύματος  $H_s$  και της μέσης περιόδου  $T_m$  με εφαρμογή του μοντέλου δεσμευμένης πιθανότητας θεωρώντας λογαριθμοκανονική κατανομή για το  $H_s$  (περιθώρια) για την  $T_m/H_s$ , και συσχετίζοντας τις παραμέτρους  $\alpha, \beta$  της λογαριθμοκανονικής κατανομής με το χαρακτηριστικό ύψος  $H_s$  στο βάθος  $d = 7.5m$ .....124



## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα τελευταία χρόνια γίνεται ολοένα και πιο αποδεκτό ότι οι κυματικές φορτίσεις επί των παράκτιων κατασκευών διαμορφώνονται όχι μόνο υπό την επίδραση του ύψους κύματος, αλλά και από την περίοδο των κυματισμών. Η εξέταση του ρόλου της περιόδου στην περιγραφή του κυματικού κλίματος βρίσκεται ακόμα σε στάδιο έρευνας, ωστόσο προβλέπεται να ενσωματωθεί στο προσεχές μέλλον στα κριτήρια σχεδιασμού των λιμενικών και παράκτιων έργων μαζί με το ύψος κύματος. Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει βασικό σκοπό την περιγραφή του κυματικού κλίματος, μέσα από τον υπολογισμό της μακροπρόθεσμης από κοινού πιθανότητας του ύψους κύματος και της περιόδου κύματος, όταν οι από κοινού συχνότητες εμφάνισης τους βασίζονται στα ανεμολογικά δεδομένα μιας περιοχής.

Προτείνεται λοιπόν, μια μεθοδολογία στην οποία οι βασικοί παράμετροι ενός κυματισμού που είναι το χαρακτηριστικό του ύψος και η μέση περίοδος του υπολογίζονται από τις εξισώσεις του μοντέλου πρόγνωσης κυματισμών του CEM (Coastal Engineering Manual). Μέσω των εξισώσεων αυτών το χαρακτηριστικό ύψος και η μέση περίοδος υπολογίζονται συναρτήσει του αναπτύγματος πελάγους και της ταχύτητας του ανέμου. Συνεπώς, οι από κοινού σχετικές συχνότητες εμφάνισης των παραμέτρων αυτών (δηλαδή του χαρακτηριστικού ύψους και της μέσης περιόδου), θεωρείται ότι ταυτίζονται με τις συχνότητες των ανέμων από τους οποίους παράγονται. Στη συνέχεια για τον υπολογισμό της μακροχρόνιας από κοινού πιθανότητας των δυο μεγεθών προτείνεται η χρήση του θεωρητικού μοντέλου δεσμευμένης πιθανότητας. Στο πλαίσιο της εφαρμογής τους, η λογαριθμοκανονική κατανομή και η κατανομή Weibull προσαρμόζονται στις περιθώριες συχνότητες του χαρακτηριστικού ύψους κύματος, ενώ στις συχνότητες εμφάνισης της μέσης περιόδου κύματος προσαρμόζεται η λογαριθμοκανονική κατανομή. Το μοντέλο αξιολογείται υπολογίζοντας το σφάλμα του, που εκφράζεται με την ευκλείδειο απόσταση των θεωρητικών τιμών πιθανότητας του από τις αρχικές σχετικές συχνότητες που προέκυψαν βασισμένες σε ανεμολογικά δεδομένα. Κατόπιν πραγματοποιείται σύγκριση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από την εφαρμογή του θεωρητικού μοντέλου στους πίνακες από κοινού συχνοτήτων βάσει των ανεμολογικών δεδομένων, με τα αποτελέσματα της εφαρμογής του μοντέλου σε πίνακα από κοινού συχνοτήτων που βασίστηκε σε πραγματικές μετρήσεις πεδίου. Η σύγκριση έγινε με σκοπό την αξιολόγηση της προτεινόμενης μεθοδολογίας.

Εν συνεχεία, πραγματοποιήθηκε διόδευση των κυματισμών σε ένα βάθος των ενδιάμεσων υδάτων, σε μια φανταστική θέση ενός έργου προστασίας της παράκτιας ζώνης, όπου υπολογίστηκαν και πάλι οι από κοινού κατανομές του χαρακτηριστικού ύψους και της μέσης περιόδου. Κατά την είσοδο των κυματισμών εντός της παράκτιας ζώνης, λαμβάνονται υπόψη ο μετασχηματισμός της ρήχωσης και της διάθλασης.

Η παραπάνω προτεινόμενη μεθοδολογία εφαρμόζεται στη θαλάσσια περιοχή της Θάσου, όπου υπήρχαν διαθέσιμες μετρήσεις και έτσι μπορούσε να γίνει σύγκριση τους, με τα αποτελέσματα

της. Σκοπός της μεθοδολογίας είναι να συμβάλλει στη μελέτη του κυματικού κλίματος με τον υπολογισμό των από κοινού κατανομών του ύψους και της περιόδου κύματος, μέσω ενός καθαρά υπολογιστικού τρόπου, χωρίς την ανάγκη διεξαγωγής μετρήσεων πεδίου, η οποία αποτελεί μια ιδιαίτερος χρονοβόρα αλλά και υψηλού κόστους διαδικασία.

## ABSTRACT

It has become increasingly accepted that wave loads on coastal structures are shaped not only by the effect of wave height but also by the wave period. The examination of the role of the wave period in the description of the wave climate is still under investigation, but it is anticipated that this parameter will be incorporated in the near future along with wave height into the design criteria of coastal structures. The main object of this work is to describe the wave climate by estimating the long-term joint probability of wave height and period, when their joint frequencies of occurrence are based on the wind data.

Therefore, a methodology is proposed in which the significant wave height and the mean wave period are calculated by the CEM (Coastal Engineering Manual) equations. Through these equations, the two wave parameters are calculated as a function of the fetch length and the wind velocity. Consequently, the joint frequencies of occurrence of these parameters (i.e., the characteristic height and the mean period) are considered to be equal to the corresponding wind frequencies of occurrence from which the waves are generated. Then, for the estimation of the long-term joint probability of the two parameters, it is proposed to use the theoretical Conditional model. For the application of this theoretical model, the Lognormal and Weibull distribution are fitted to the marginal frequencies of the significant wave height, whereas lognormal distribution has been fitted to the frequencies of the mean wave period. The model is evaluated by calculating its error, expressed by the Euclidean distance between the theoretical distributions the initial relative frequencies based on wind data. Then the results of the application of the theoretical model to the joint frequency tables based on the wind data, are compared with the results of the application of the model to a joint frequency table based on real field measurements. The comparison was made in order to evaluate the proposed methodology.

Afterwards, the methodology is applied to a specific depth  $d$  into the coastal zone, where a supposed coastal structure is located. For the entrance of waves into the coastal zone, the transformations of shoaling and refraction are taken into account.

The proposed methodology is applied to the marine area of Thasos, where real measurements are available, so that they can be compared with the results of the project's methodology. The purpose of the methodology is to contribute to the study of the wave climate by calculating the joint distribution of wave height and period, through a computational way, without the need for field measurements, which is a time-consuming and costly process.



## Extended Summary

### 1. Introduction

In the probabilistic design of coastal structures it is common that the wave climate is described by the characteristic wave height without including the effect of the wave period. However, in recent years it is accepted that the wave period plays an important role, because the failure of a marine construction can be influenced by this parameter. For this reason, more and more researchers make efforts to examine the joint likelihood of the significant height and the wave mean period. Consequently, the probability density of these parameters is determined jointly, and their short- and long-term joint distribution is attributed. In this paper we will deal only with the long-term study.

For the statistical approach to wave climate, univariate and bivariate theoretical distribution models have been used. The main reasons why theoretical models have been fit to the data instead of using data directly are the following: It is preferable to fit a theoretical model because it may represent better some conditions of lower probability level that for some reason are not included in the sample. Also it allows extrapolation of the data to lower levels of probability corresponding to longer periods than the one of the measurements. Furthermore, it may be more convenient to have theoretical models combined with other models in any further computational procedure (Lucas and Guedes Soares, 2015).

In the past, several investigators have studied these theoretical models. Concerning the long-term univariate probability distribution models of the two design parameters (wave height and wave period) separately, the significant wave height appears to follow lognormal distribution (Ward et al., 1977) or Weibull distribution (Houmb and Overvik, 1976) in deep waters as well as in the coastal zone. Lognormal distributions adapt more effectively to the entire range of significant wave heights. On the other hand Weibull distribution is more representative for the upper tail of the histogram, but the agreement is rather poor for small significant wave heights (Ochi, 1978). Regarding the characteristic wave period (e.g., the average period  $T_m$  or the peak period  $T_p$ ), lognormal distribution seems more appropriate (Ochi, 1978).

For the long-term joint distribution of wave height and wave period (bivariate models), the conditional probability model has been applied for  $H_s$  and  $T_p$  by Haver (1985). Lucas and Guedes Soares (2015) applied the same model for the average period  $T_m$  instead of  $T_p$ . Also Athanassoulis et al. (1994) introduced the Plackett model, that requires given marginals for  $H_s$  and  $T_m$  and takes into account the correlations between the two variables. Finally, an important approach to their joint return period has been made by Yue and Wang (2004) and later, Galiatsatou and Prinos (2007) applied the joint return period to the Dutch Coast data.

In the present study, all significant heights and mean periods were calculated numerically by the CEM wave prediction method, as a function of Fetch length and wind velocity, and not by actual measurements. The main reason of this different approach was the necessity to know the initial wave direction in the deep waters so than when the waves were transported into the coastal zone, the transformation of the refraction could be taken into account. Their joint frequencies have been identified with the frequencies of the respective winds from which the waves originated, and have been extracted from the data of the national meteorological service.

For the calculation of the joint probability densities on a long-term scale, the Conditional model was applied to the joint frequency tables. The Weibull and Lognormal distributions were adjusted to the marginal frequencies of the characteristic height, while only the Lognormal distribution was adapted to the frequencies of the mean wave periods. In addition to the joint-frequency tables of the significant wave height and the mean period constructed based on the wind data, the Conditional probability model was also adapted to real field measurement tables, and then the results were compared.

## 2. Theoretical background

### 2.1 CEM method for the prediction of wave parameters

The CEM method (U.S. Army, 2006) is one of the most widespread models for the short-term description of marine conditions. The basic assumption of the model is that the significant wave corresponds approximately to the natural wave. The wave height characteristics ( $H_s$ ) and the period ( $T_p$ ) of the wave are calculated as functions of the wind velocity (U), the Fetch length and the wind duration ( $t_d$ ).

The minimum wind-time duration to achieve Fetch limited conditions is calculated from the following equation:

$$t_{min} = 77.23 * \frac{X^{0.67}}{U^{0.34} * g^{0.33}} \quad (2.1)$$

where U is the wind speed 10 meters above sea level and is measured in m / s.

Where fetch limited conditions are concerned, the characteristic wave height is calculated from the equation:

$$\frac{g * H_s}{u_*^2} = 4.13 * 10^{-2} * \left( \frac{g * X}{u_*^2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.2)$$

The term  $u_*$  called friction speed is measured in m / s and is calculated from the equation

$$u_* = U * (C_D)^{\frac{1}{2}} \quad (2.3)$$



and the factor  $C_D$ :

$$C_D = 0.001 * (1.1 + 0.035 * U) \quad (2.4)$$

The equation from which we calculate peak period is given below:

$$\frac{g * T_p}{u_*} = 0.751 * \left( \frac{g * X}{u_*} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (2.5)$$

$$\frac{T_m}{T_p} = 0.7303 + 0.04936 * \gamma - 0.006556 * \gamma^2 + 0.0003610 * \gamma^3$$

Parameter  $\gamma$  is called a peak coefficient and can be determined by the following relationships:

$$\gamma = 5, \text{ εάν } \frac{T_p}{\sqrt{H_s}} \leq 3.6 \quad (2.6)$$

$$\gamma = \exp\left(5.75 - \frac{1.15 * T_p}{\sqrt{H_s}}\right), \text{ εάν } 3.6 \leq \frac{T_p}{\sqrt{H_s}} \leq 5 \quad (2.7)$$

$$\gamma = 1, \text{ εάν } 5 \leq \frac{T_p}{\sqrt{H_s}} \quad (2.8)$$

In cases where it is impossible to calculate the parameter  $\gamma$  from the above relations we take into account an average value  $\gamma = 3.3$ . As a result, the relation that correlate the mean period  $T_m$  to the peak period  $T_p$  is:

$$T_m = 0.83 * T_p \quad (2.9)$$

## 2.2. Univariate models

### 2.2.1 Lognormal distribution

The probability density function  $f_L(x; \vec{\theta}_L)$  corresponds to the Lognormal distribution is given by the following relation:

$$f_L(x; \vec{\theta}_L) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\beta x} \exp\left\{-\frac{[\ln(x)-a]^2}{2\beta^2}\right\}, \quad x > 0 \quad (2.10)$$

While the distribution function or otherwise a cumulative distribution function is given as:

$$F_L(x; \vec{\theta}_L) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \operatorname{erf}\left[\frac{\ln(x)-a}{\sqrt{2}\beta}\right] \quad (2.11)$$

The term  $\vec{\theta}_L = (a, \beta) \in \mathbf{R} \times \mathbf{R}^+$  represents the parameters of the logarithmic distribution, where  $a$  is called the location parameter and the  $\beta$ , scale parameter.

### 2.2.2. Weibull distribution

The probability density function  $f_W(x; \vec{\theta}_W)$  corresponds to the Weibull distribution is given by the following relation:

$$f_W(x; \vec{\theta}_W) = \frac{\beta^*}{\alpha^*} \left( \frac{x-\gamma}{\alpha^*} \right)^{\beta^*-1} e^{-\left( \frac{x-\gamma}{\alpha^*} \right)^{\beta^*}}, \quad x \geq \gamma \quad (2.12)$$

In our case where  $\gamma = 0$  we have:

$$f_W(x; \vec{\theta}_W) = \frac{\beta^*}{\alpha^*} \left( \frac{x}{\alpha^*} \right)^{\beta^*-1} e^{-\left( \frac{x}{\alpha^*} \right)^{\beta^*}}, \quad x \geq 0 \quad (2.13)$$

While the distribution function or otherwise a cumulative distribution function is given by the relation:

$$F_W(x; \vec{\theta}_W) = 1 - e^{-\left( \frac{x}{\alpha^*} \right)^{\beta^*}}, \quad x \geq 0 \quad (2.14)$$

The term  $\vec{\theta}_W = (a^*, \beta^*)$  expresses the distribution parameters, where  $\beta^*$  is called the shape parameter and the  $\alpha^*$  parameter parameter.

### 2.2.3 Estimation of parameters of a univariate model

The calculation of the Lognormal and Weibull parameters distributions  $\vec{\theta}_1 = \vec{\theta}_L$  and  $\vec{\theta}_2 = \vec{\theta}_W$ , was performed by using the maximal likelihood method, according to Athanassoulis et al.

(1994). The log-likelihood function for the sample  $\vec{x}_i$ , with respect to the set of parameters  $\vec{\theta}_i$  is:

$$l_i^{N_i}(\vec{x}_i; \vec{\theta}_i) = \ln \left[ \prod_{n=1}^{N_i} f_i(x_i^{(n)}; \vec{\theta}_i) \right], \quad i = 1, 2, \dots \quad (2.15)$$

Where  $\vec{x}_i = (x_i^{(1)}, x_i^{(2)}, \dots, x_i^{(N_i)})$   $i = 1, 2$  is the corresponding univariate marginal or conditional sample, consisting of  $N_i$  univariate observations. The parameters  $\vec{\theta}_i$  that are called also ML estimators can be found by maximizing the log likelihood function.

**Lognormal:** Maximizing the above logarithmic probability function gives us that the set of parameters  $\vec{\theta}_1 = \vec{\theta}_L = (a, \beta)$  is derived from the equations:

$$\text{Position parameter } a: \quad \alpha = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \ln(x^{(n)}) \quad (2.16)$$

$$\text{Scale parameter } b: \quad \beta = \left\{ \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N [\ln(x^{(n)}) - a]^2 \right\}^{1/2} \quad (2.17)$$

**Weibull:** Similarly for Weibull distribution, the set of parameters  $\vec{\theta}_2 = \vec{\theta}_W = (a^*, \beta^*)$  is calculated by the following equations:

$$\text{Position parameter } a^*: -\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \ln(x^{(n)} - \gamma) + \frac{\sum_{n=1}^N [x^{(n)} - \gamma]^{\beta^*} \ln(x^{(n)} - \gamma)}{\sum_{n=1}^N [x^{(n)} - \gamma]^{\beta^*}} = \frac{1}{\beta^*} \quad (2.18)$$

$$\text{Scale parameter } b^*: \alpha^* = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N [x^{(n)} - \gamma]^{\beta^*} \quad (2.19)$$

The  $x^{(n)}$  in both distributions are the elements of the sample of values a variable consisting of  $N$  observations. The  $\gamma$  that appears in the weibull distribution is a threshold with a predetermined fixed value, which in the present work is considered to be equal to zero

### 2.3 Conditional modelling

The joint distribution of the significant height  $H_s$  and the mean wave period  $T_m$  is based on the total probability theory, which models a probability density function for the significant wave height and probability density functions for the mean period conditional on the significant wave height,) so as to calculate the joint probability density function of the two sizes as shown in the following equation:

$$f(H_s, T_m) = f(H_s) \times f(T_m/H_s) \quad (2.20).$$

Where:  $f(H_s, T_m)$  is the joint probability density function of  $H_s$  and  $T_m$ ,

$f(H_s)$  is the marginal distribution of  $H_s$

and  $f(T_m/H_s)$  is the conditional distribution of the mean zero-crossing period  $T_m$ .

### 2.4 Goodness of fit

In order to assess the suitability of goodness of fit in the data, the Euclidean distance  $D^2$ , which is the deviation or otherwise the error between the theoretical distributions and the empirical distribution resulting from the data, is used. It essentially measures the distance between the theoretical probability and the probability resulting from the empirical model. The Euclidean distance is defined by the following equation:

$$D^2 = \sum_{j=1}^J (p_j - \pi_j)^2, \quad j = 1, 2, \dots, J \quad (2.21)$$

The term  $p_j$  is the probability that has been derived from the statistical model, while the term  $\pi_j = \frac{v_j}{N}$  is the theoretical probability (in this case  $p_j$  and  $\pi_j$  are the joint probability values)..

Although the above error estimation method is not a standardized statistical method, the Euclidean distance provides some reliable information about the suitability of different theoretical distributions.

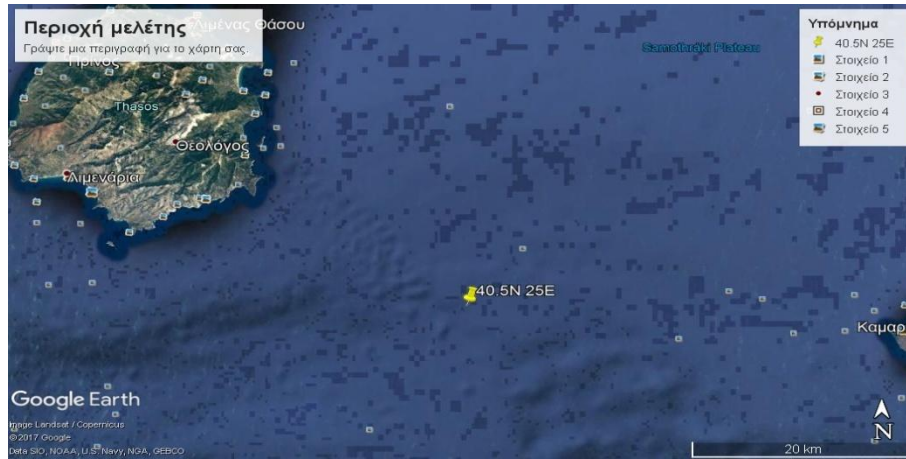
### **3. Methodology proposed for the design in the region of Thasos**

The proposed methodology was decided to be applied to the Aegean sea in the deep waters of Southeast of Thassos (40.5N, 25E). This point was transferred to the Autocad program where a map of Greece was simulated, and at this we designed rays (with a 5-degree interval) in order to calculate the fetch length for each main wind direction.

Then, by using the equations of the CEM wave prediction method, the parameters  $H_s$  and  $T_p$  were calculated for each direction and each wind velocity. These equations correlate these parameters  $(H_s, T_p)$  with the wind direction and velocity. By using JONSWAP equation the peak period  $T_p$  was converted to mean wave period  $T_m$ . It was therefore considered that the joint frequencies of occurrence of significant wave height  $H_s$  and mean wave period  $T_m$  in deep waters resulting from the wave prediction equations, was the same as the frequencies of occurrence of the wind whose characteristics (velocity and main direction) were introduced as parameters in these equations.

Then, after the construction of a total table for all winds with the  $H_s, T_m$  and their joint frequencies of occurrence based on wind data, the Conditional model is applied on this table. The lognormal and Weibull distributions are fitted to the estimated data of characteristic wave height and the lognormal distribution is fitted to the estimated data of the average wave period. Also, the associated error is calculated from equation (2.19) in order to estimate the goodness of fit. Then the same model with the same combination of distributions is applied to actual measurements, given in table form with the  $H_s, T_m$  and their joint occurrence frequencies of occurrence, and comparing the results for both cases.

Afterwards the long-term distributions were also calculated in the intermediate waters, namely at the depth of 7.5m. In the shallow waters were transferred only the waves whose frequencies were calculated based on the wind data. For the flow of waves in intermediate waters, we took into account the transformation of rupture and refraction. Choosing the depth of 7.5 m was not accidental, but it was checked that no ripple is ruptured due to rupture at this depth. As for the conditional model, Weibull and Lognormal distributions are fitted to the marginal frequencies of  $H_s$  and Lognormal is fitted to the marginal frequencies of  $T_m$ , exactly the same as in the case of deep waters.



**Figure 3.1:** The area of Thasos and the point where the methodology is applied



**Figure 3.2** Fetch lengths around the study point

**Table 3.1** Long-term joint frequencies of occurrence of  $(H_s, T_m)$  for deep waters at the region of Thasos with stable steps  $DH_s=0.25\text{m}$  and  $DT_m=0.5\text{s}$  based on Wind data of Limnos

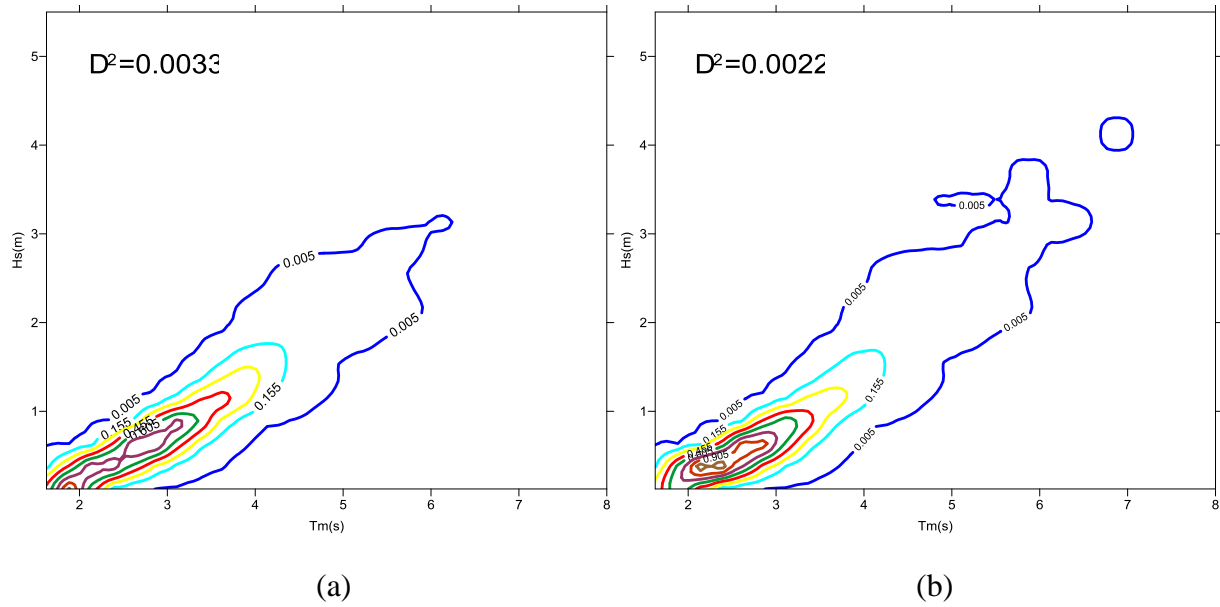
Κλάσεις περιόδου $T_m$	Κεντρικές Τιμές	Κλάσεις Ύψους κύματος $H_s$														Total			
		0-0.25	0.25-0.5	0.5-0.75	0.75-1	1-1.25	1.25-1.5	1.5-1.75	1.75-2	2-2.25	2.25-2.5	2.5-2.75	2.75-3	3-3.25	3.25-3.5		3.5-3.75	3.75-4	4-4.25
		0.125	0.375	0.625	0.875	1.125	1.375	1.625	1.875	2.125	2.375	2.625	2.875	3.125	3.375		3.625	3.875	4.125
1.5-1.75	1.625	24	14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	38
1.75-2	1.875	40	33	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	73
2-2.25	2.125	25	49	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	77
2.25-2.5	2.375	4	76	42	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	122
2.5-2.75	2.625	0	52	51	11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	114
2.75-3	2.875	0	17	67	54	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	138
3-3.25	3.125	0	7	31	50	10	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	99
3.25-3.5	3.375	0	0	10	34	35	12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	91
3.5-3.75	3.625	0	0	6	23	23	12	5	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	70
3.75-4	3.875	0	0	1	6	8	19	15	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	50
4-4.25	4.125	0	0	0	0	6	21	14	3	4	0	0	0	0	0	0	0	0	48
4.25-4.5	4.375	0	0	0	0	9	11	2	5	2	2	1	0	0	0	0	0	0	32
4.5-4.75	4.625	0	0	0	0	0	0	3	5	2	1	3	0	0	0	0	0	0	14
4.75-5	4.875	0	0	0	0	0	0	2	7	2	2	1	0	0	1	0	0	0	15
5-5.25	5.125	0	0	0	0	0	0	0	0	4	1	0	0	0	0	0	0	0	5
5.25-5.5	5.375	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	2	0	0	0	0	0	4
5.5-5.75	5.625	0	0	0	0	0	0	0	0	2	1	2	2	0	0	0	0	0	7
5.75-6	5.875	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	4
6-6.25	6.125	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1
6.25-6.5	6.375	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1
6.5-6.75	6.625	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6.75-7	6.875	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
Total		93	248	211	178	91	76	41	22	16	8	8	5	3	2	1	0	1	1004

**Table 3.2** Long-term joint frequencies of occurrence of  $(H_s, T_m)$  for deep waters at the region of Thasos with stable steps  $DH_s=0.25\text{m}$  and  $DT_m=0.5\text{s}$  based on real measurements of Electronic Wind and Wave Mediterranean Atlas

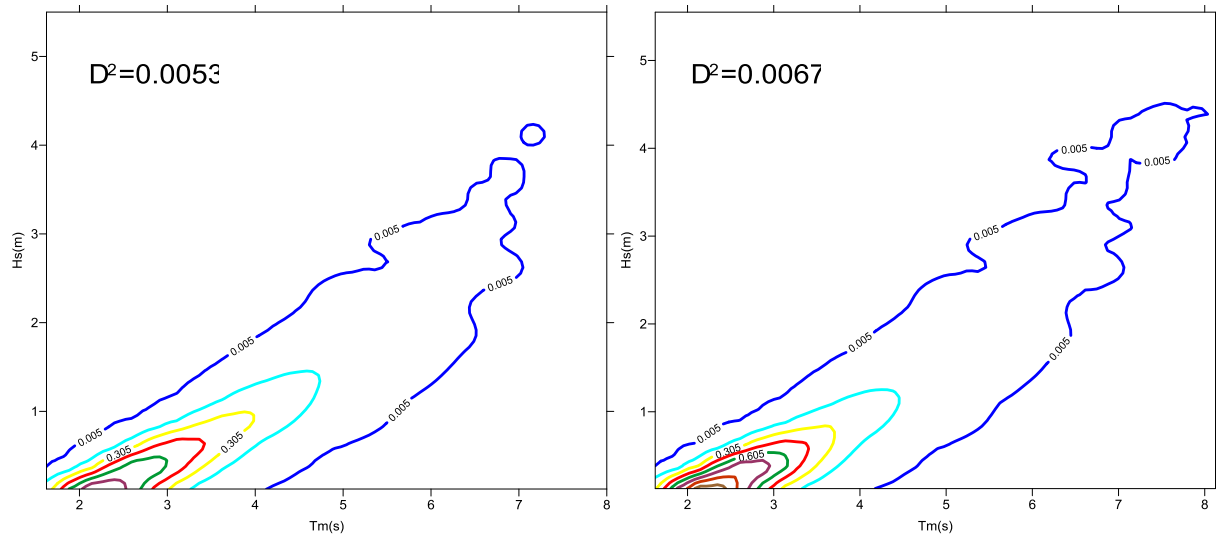
Κλάσεις περιόδου $T_m$	Κεντρικές τιμές	Κλάσεις Ύψους κύματος $H_s$														Total			
		0-0.25	0.25-0.5	0.5-0.75	0.75-1	1-1.25	1.25-1.5	1.5-1.75	1.75-2	2-2.25	2.25-2.5	2.5-2.75	2.75-3	3-3.25	3.25-3.5		3.5-3.75	3.75-4	4-4.25
		0.125	0.375	0.625	0.875	1.125	1.375	1.625	1.875	2.125	2.375	2.625	2.875	3.125	3.375		3.625	3.875	4.125
1.5-1.75	1.625	21	3	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	25
1.75-2	1.875	27	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	30
2-2.25	2.125	37	10	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	48
2.25-2.5	2.375	23	9	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	33
2.5-2.75	2.625	40	25	12	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	79
2.75-3	2.875	52	33	15	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	101
3-3.25	3.125	0	25	16	10	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	52
3.25-3.5	3.375	0	27	21	13	4	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	66
3.5-3.75	3.625	0	0	23	14	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	42
3.75-4	3.875	0	0	14	12	11	5	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	43
4-4.25	4.125	0	0	0	11	12	6	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	31
4.25-4.5	4.375	0	0	0	13	9	8	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	34
4.5-4.75	4.625	0	0	0	7	8	8	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	27
4.75-5	4.875	0	0	0	0	5	8	7	4	1	0	0	0	0	0	0	0	0	25
5-5.25	5.125	0	0	0	0	3	2	5	6	1	4	0	0	0	0	0	0	0	21
5.25-5.5	5.375	0	0	0	0	0	3	2	2	2	2	0	1	0	0	0	0	0	12
5.5-5.75	5.625	0	0	0	0	0	1	2	0	1	2	0	0	0	0	0	0	0	6
5.75-6	5.875	0	0	0	0	0	1	1	2	0	2	1	2	1	0	0	0	0	10
6-6.25	6.125	0	0	0	0	0	0	1	2	1	1	2	1	0	0	0	0	0	8
6.25-6.5	6.375	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	2	0	0	1	0	4
6.5-6.75	6.625	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	5
6.75-7.00	6.875	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	1	0	3
7.00-7.25	7.125	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	2
Total		200	135	104	83	58	43	28	17	6	12	6	5	5	1	1	2	1	707

## 4. Results and discussion

### 4.1 Deep Waters



**Figure 4.1** Contour plots of joint density distributions of ( $H_s$ ,  $T_m$ ) for deep waters, based on Wind Data of Limnos after applying the Conditional model with the above combinations (a) Weibull distribution to the marginal frequencies of  $H_s$  and Lognormal distribution to the frequencies of  $T_m/H_s$  (b) Lognormal distribution to the marginal frequencies of  $H_s$  and to the frequencies of  $T_m/H_s$



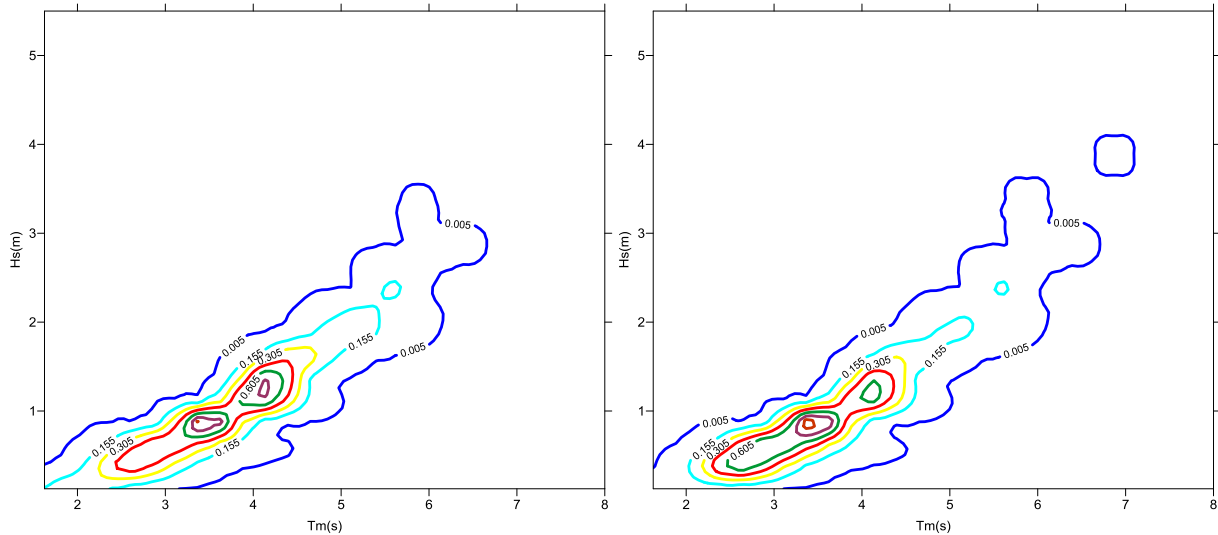
**Figure 4.2** Contour plots of joint density distributions of ( $H_s$ ,  $T_m$ ) for deep waters, based on real measurements after applying the Conditional model with the above combinations (a) Weibull distribution to the marginal frequencies of  $H_s$  and Lognormal distribution to the frequencies of  $T_m/H_s$  (b) Lognormal distribution to the marginal frequencies of  $H_s$  and to the frequencies of  $T_m/H_s$

From the figures 4.1 (a) (b) where the joint frequencies of occurrence of  $H_s$  and  $T_m$  are based on Winds Data, it is shown that Lognormal distribution is fitted better to  $H_s$  and  $T_m/H_s$  respectively, than Weibull distribution to  $H_s$  and Lognormal to  $T_m/H_s$ . (the Euclidean distance  $D^2$  is 0.0033 and 0.0019 respectively). On the other hand in figures 4.2(a) (b), where the joint frequencies of  $H_s$  and  $T_m$  are extracted from real measurements from Wind and Wave Mediterranean Atlas, Conditional Model with fitting of Weibull distribution to  $H_s$  and Lognormal distribution to  $T_m/H_s$  seems more appropriate (the Euclidean distance  $D^2$  is 0.0053 and 0.0067 respectively).

Concerning the comparison between the figures 4.1 (a) and 4.2 (b) it is observed that in figure 4.1 (a) the maximum significant wave height that corresponds to the density value  $0.005 \text{ m}^{-1}\text{s}^{-1}$  is lower than the corresponding of figure 4.2 (a), while the maximum significant wave period for the figures 4.1 (b) and 4.2 (b) is almost similar (greater than 4 m). This fact implies that Conditional model with Weibull distribution for  $H_s$  and Lognormal for  $T_m/H_s$  underestimates the value of  $H_s$  in the case of joint frequencies based on Wind data. Regarding the average wave periods, we generally notice higher values of the average wave period in the case of real measurements, suggesting the existence of swell waves.



## 4.2 Intermediate Waters



**Figure 4.3** Contour plots of joint density distributions of ( $H_s$ ,  $T_m$ ) for deep waters, based on real measurements after applying the Conditional model with the above combinations (a) Weibull distribution to the marginal frequencies of  $H_s$  and Lognormal distribution to the frequencies of  $T_m/H_s$  (b) Lognormal distribution to the marginal frequencies of  $H_s$  and to the frequencies of  $T_m/H_s$

From Figures 4.3 (a) (b) corresponding to the depth  $d=7.5$  m we observe similarities between the results of the two cases of the Conditional model, ie logarithmic distribution for  $H_s$  and  $T_m/H_s$ , and Weibull distribution for  $H_s$  and logarithmic for  $T_m/H_s$ . This is also reflected by their similar Euclidean distance: 0.0053 and 0.0055 respectively. It is also observed that the application of the Weibull distribution to  $H_s$  model does not underestimate the maximum significant wave height corresponding to the specified density of  $0.005m^{-1}s^{-1}$ , to the extent that it is underestimated in the cases of deep waters. More specifically, based on the two figures for the minimum density of  $0.005m^{-1}s^{-1}$  in figure 4.3 (a) corresponds to a maximum significant wave height of 3.56 m, whereas in figure 4.3 (b) the maximum significant wave height is 4.1m. The maximum mean wave periods are: 6.7 s and 7.1 s respectively.

## 5. Conclusions

The main conclusion of this project is that the estimation of the joint probability density function of the significant height and the average wave period based on the wind data, although based on numerical model equations for the calculation of these parameters, can be a reliable methodology for depicting the wave climate. This can be ascertained for the following reasons.

First and foremost, the  $H_s$  and  $T_m$  derived from equations of CEM that have been configured to relate only to wind generated waves, as opposed to field measurements in which there is no separation of wind generated and swell waves.

Secondly, it was shown above by the proposed methodology that the maximum value of significant wave is similar to the maximum value of significant wave based on real measurements. So concerning the <safety>, we can conclude that the proposed methodology provides the same safety as real measurements.

An additional very important element, which relates to the comparison of results based on wind data and actual measurements, is the fact that the wind data refer to a measurement period of about 40 years, while the field observations relate to a period of time observations, of 7 years. This makes the long-term study of the wave climate more reliable, as it gives a more objective picture of the prevailing conditions.

Moreover, the proposed methodology provides the opportunity to take into account the refraction of waves as they travel into the coastal zone, since we know their initial direction.

It is also worth to mention that the main advantage of the proposed methodology is its easy application, in contrast with the conduct of actual field measurements at a point in the sea which requires too much available time and can face a number of difficulties.

## References

- Athanassoulis, G.A., E.K. Skarsoulis, and K.A. Belibassakis., 1994. Bivariate distributions with given marginals with an application to wave climate description, *Appl. Ocean Res.*, 16, 1–17
- Galiatsatou, P. and P. Prinos, 2007. Bivariate models for extremes of significant wave height and period. An application to the Dutch coast, *Proc. 2nd IMA International Conference on Flood Risk Assessment*, University of Plymouth, UK.
- Haver, S., 1985. Wave climate off northern Norway, *Appl. Ocean Res.* 7 (2), 85-92
- Houmb, O.G. and T. Overvik., 1976. Parameterization of wave spectra and longterm joint distribution of wave height and period, *Proc. behavior of offshore structures*
- Lucas C. and C. Guedes Soares, 2015. *Bivariate distributions of significant wave height and mean wave period of combined sea states*, *Ocean Engineering* 106, 341-353
- Ochi, M.K., 1978. On long-term statistics for ocean and coastal waves, *Proceedings of the 16th Conference on Coastal Engineering*, 2, 59-75
- U.S. Army, 2006. Coastal Engineering Manual. Chapter II-2, Meteorology and Wave Climate. Washington, DC: Engineer Manual 1110-2-1100, U.S. Army Corps of Engineers
- Ward, E.G., D.J. Evans, and J.A. Pomba., 1977. Extreme wave heights along the Atlantic coast of the United States. in: *Proc. Offshore Tech. Conference*, OTC 2846
- Yue, S. and C.Y. Wang., 2004. A comparison of two bivariate extreme value distributions, *Stochastic Environmental Research* 18, 61-66



# 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

## 1.1 Αντικείμενο της εργασίας

Βασικός σκοπός της κατασκευής των παράκτιων κατασκευών είναι η προστασία της ακτογραμμής από τους θαλάσσιους κυματισμούς. Για την εκπλήρωση αυτού του στόχου και τη σωστή λειτουργία τους απαιτείται η γνώση του κυματικού κλίματος και της πιθανότητας εμφάνισης των ακραίων γεγονότων. Το κυματικό κλίμα χωρίζεται σε βραχυχρόνιο κυματικό κλίμα ( short term) και σε μακροχρόνιο κυματικό κλίμα (long term). Η βραχυπρόθεσμη περιγραφή του κυματικού κλίματος επιτυγχάνεται με τον προσδιορισμό της θαλάσσιας διαταραχής από την πνοή ενός ανέμου σε συγκεκριμένο χρονικό διάστημα μερικών ωρών (καταιγίδα), συναρτήσει των χαρακτηριστικών του ανέμου, ενώ η μακροπρόθεσμη περιγραφή του επιτυγχάνεται με τον προσδιορισμό των θαλάσσιων διαταραχών στην περιοχή, για το σύνολο των εμφανιζόμενων ανέμων σε ευρέα χρονικά διαστήματα (διάστημα ετών). Ουσιαστικά η μακροχρόνια περιγραφή βασίζεται σε ένα υποσύνολο βραχυπρόθεσμων περιγραφών και αποσκοπεί στον προσδιορισμό ακραίων τιμών.

Μέχρι σήμερα βασική παράμετρος περιγραφής του κυματικού κλίματος είναι ένα αντιπροσωπευτικό ύψος κύματος και ως επί το πλείστον το χαρακτηριστικό  $H_s$ . Με βάση δηλαδή την πιθανότητα υπέρβασης του ακραίου χαρακτηριστικού ύψους κύματος πραγματοποιείται ο σχεδιασμός μιας παράκτιας κατασκευής. Σε βραχυπρόθεσμη χρονική διάρκεια η πιο διαδεδομένη πιθανοτική κατανομή πρόβλεψης του ύψους κύματος στα βαθιά ύδατα, είναι η κατανομή Rayleigh στην οποία υπολογίζεται η πυκνότητα πιθανότητας του ύψους κύματος η οποία εάν ολοκληρωθεί δίνει άθροισμα τη μονάδα.

Το αντιπροσωπευτικά ύψη υπολογίζονται από χρονοσειρές έπειτα από εξέταση <<στο πεδίο του χρόνου>> ή στο <<πεδίο των συχνοτήτων>>, οι οποίες βασίζονται σε δεδομένα που έχουν προκύψει από επί τόπου μετρήσεις σε σημεία στα βαθιά ύδατα όπου η επίδραση του πυθμένα είναι αμελητέα. Τέτοιες μετρήσεις γίνονται είτε με επιπλέοντα όργανα (waveriders) είτε με αισθητήρια πίεσης, που τοποθετούνται κάτω από τη επιφάνεια της θάλασσας, ή ακόμη με ηλεκτρόδια που διαπερνούν τη θαλάσσια επιφάνεια. Ωστόσο λόγω του ότι δεν είναι πάντα κατάλληλες οι συνθήκες για την πραγματοποίηση μετρήσεων στο πεδίο, έχουν αναπτυχθεί μέθοδοι πρόγνωσης των χαρακτηριστικών μεγεθών που βασίζονται σε ανεμολογικά δεδομένα τα οποία συλλέγονται συνήθως με αρκετή αξιοπιστία από την αρμόδια μετεωρολογική υπηρεσία. Τα ύψη αυτά που υπολογίζονται, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, αφορούν τα βαθιά ύδατα. Καθώς τα κύματα ταξιδεύουν προς την ακτή υφίστανται μια σειρά από μετασχηματισμούς, οι κυριότεροι από τους οποίους οφείλονται στη ρήγωση, στη διάθλαση, στην περίθλαση, στην ανάκλαση από τον κεκλιμένο πυθμένα, και στη θραύση των κυμάτων. Οι μεταβολές αυτές των

υψών μπορούν να προσδιορισθούν με αρκετή ακρίβεια σύμφωνα με τις μεθόδους της θαλάσσιας υδραυλικής (Μέμος, 2008)

Η επιστημονική κοινότητα τα τελευταία χρόνια έχει αποφανθεί ότι όταν η περιγραφή του κυματικού κλίματος γίνεται μόνο από το αντιπροσωπευτικό ύψος του κυματισμού, τότε χάνεται η πολύτιμη πληροφορία της περιόδου του κυματισμού. Αυτό διότι η αστοχία μιας θαλάσσιας κατασκευής μπορεί να επηρεαστεί από την παράμετρο της περιόδου του κύματος ανάλογα με τη γεωμετρία της κατασκευής. Για το λόγο αυτό πραγματοποιούνται ολοένα και περισσότερες ερευνητικές προσπάθειες ώστε να εξετασθεί η από κοινού πιθανότητα εμφάνισης του ζεύγους ύψος-περίοδος κύματος. Για το σκοπό αυτό προσδιορίζεται η από κοινού συνάρτηση της πυκνότητας πιθανότητας των μεγεθών αυτών και αποδίδεται η βραχυπρόθεσμη και η μακροπρόθεσμη από κοινού κατανομή τους.

Σε μακροχρόνια κλίμακα σημαντικές προσπάθειες περιγραφής του κυματικού κλίματος λαμβάνοντας υπόψη και την παράμετρο της περιόδου, έχουν πραγματοποιηθεί από τους Athanassoulis et al. (1994) και, πιο πρόσφατα, από τους Lucas and Guedes Soares (2015) που έχουν περιγράψει το μακροχρόνιο κυματικό κλίμα προσαρμόζοντας θεωρητικά μοντέλα σε δεδομένα μετρήσεων στα βαθιά ύδατα. Αργότερα οι Papanikolaou et al. (2016) υπολόγισαν την από κοινού κατανομή του χαρακτηριστικού ύψους κύματος και της μέσης περιόδου και στα βαθιά και στα αβαθή ύδατα, βασιζόμενοι σε δεδομένα μετρήσεων στην περιοχή βορειοανατολικά της Μυκόνου. Η διόδευση των κυματισμών στα ενδιάμεσα νερά στην ερευνητική προσπάθεια της Papanikolaou et. al, (2016) πραγματοποιήθηκε λαμβάνοντας υπόψη τη διαδικασία της ρήξης.

Η παρούσα εργασία λοιπόν, έχει ως βασικό αντικείμενο τον υπολογισμό της από κοινού μακροχρόνιας πυκνότητας πιθανότητας του χαρακτηριστικού ύψους και της μέσης περιόδου στα βαθιά ύδατα, αλλά και εντός της παράκτιας ζώνης έπειτα από τους μετασχηματισμούς της ρήξης αλλά και της διάθλασης. Τα δύο χαρακτηριστικά μεγέθη υπολογίστηκαν από κατάλληλη μέθοδο πρόβλεψης κυματισμών, αντί μετρήσεων θεωρώντας ως αρχική σχετική συχνότητα εμφάνισής τους, την αντίστοιχη συχνότητα του ανέμου από τον οποίον παράγονται. Στη συνέχεια γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων αυτής της μεθόδου με τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τον υπολογισμό της από κοινού πυκνότητας πιθανότητας του χαρακτηριστικού ύψους και της μέσης περιόδου, όταν τα τελευταία έχουν προκύψει από στατιστική επεξεργασία μετρήσεων πεδίου και έχουν δοθεί σε μορφή πίνακα  $H_s - T_p$  με τις από κοινού συχνότητες εμφάνισης τους.

Η περιοχή στην οποία αναφέρεται η παρούσα διπλωματική εργασία, είναι στα βαθιά ύδατα νότια της Θάσου. Ο λόγος της επιλογής της συγκεκριμένης θέσης ήταν ότι υπήρχαν διαθέσιμες μετρήσεις των θαλάσσιων καταστάσεων από τον ηλεκτρονικό Άτλαντα Ανέμου και Κύματος της Μεσογείου (Wind and Wave electronics Atlas) οι οποίες αφορούσαν μία χρονική περίοδο 7 ετών. Αυτό καθιστούσε εφικτή τη σύγκριση μεταξύ των αποτελεσμάτων που προέκυπταν από τις μετρήσεις και των πινάκων που προέκυψαν με βάση τα ανεμολογικά δεδομένα. Τα

ανεμολογικά δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν ήταν της Λήμνου της Αλεξανδρούπολης και της Καβάλας καθώς θεωρήθηκε ότι οι κυματισμοί (ανάλογα με την κατεύθυνσή τους) προήλθαν από τα σημεία γένεσης που επικρατούν οι άνεμοι των παραπάνω τριών περιοχών

## 1.2 Πρωτότυπα σημεία

Στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία πραγματοποιήθηκε ο υπολογισμός των από κοινού μακροπρόθεσμων κατανομών του χαρακτηριστικού ύψους κύματος και της μέσης περιόδου στα βαθιά ύδατα και στη συνέχεια με κατάλληλη διόδευση εντός της παράκτιας ζώνης. Αν και έχουν πραγματοποιηθεί ορισμένες εφαρμογές σε συγκεκριμένες θαλάσσιες περιοχές όπως προαναφέρθηκε, από τους Athanassoulis et al. (1994), Lucas και Guedes Soares(2015) και Papanikolaou et.al (2016) οι εφαρμογές αυτές βασίστηκαν σε πραγματικές μετρήσεις πεδίου, από τις οποίες με στατιστική επεξεργασία υπολογίστηκαν τα ζεύγη χαρακτηριστικού ύψους ( $H_s$ ) –μέσης περιόδου ( $T_m$ ) με τις συχνότητες της από κοινού εμφάνισής τους. Πάνω στους έτοιμους αυτούς πίνακες στηρίχθηκαν οι έρευνες αυτές και εξήχθησαν τα αποτελέσματα. Αντίθετα, στην εργασία αυτή, ο υπολογισμός των  $H_s$  και  $T_m$  (η μέση περίοδος εξετάστηκε), έγινε μέσα από τις εξισώσεις που εφαρμόζονται από τη μέθοδο πρόγνωσης κυματισμού του CEM, η οποία υπολογίζει τα μεγέθη με βασικό άξονα το ανάπτυγμα του πελάγους και την ταχύτητα του ανέμου. Οι συχνότητες της από κοινού εμφάνισής των ζευγών  $H_s - T_m$  θεωρήθηκε ότι ταυτίζονται με τις συχνότητες εμφάνισής των αντίστοιχων ανέμων (κάθε άνεμος προσδιορίζεται από την ταχύτητα και την προέλευσή του) που αποτέλεσαν τη γενεσιουργό αιτία των κυματισμών με τα συγκεκριμένα χαρακτηριστικά ( $H_s, T_m$ ). Με τον τρόπο αυτό δημιουργήθηκαν αντίστοιχοι πίνακες με τα ζεύγη  $H_s - T_m$  και τις από κοινού συχνότητες εμφάνισής τους, και με βάση αυτούς τους πίνακες εφαρμόστηκε η μεθοδολογία για την εξαγωγή αποτελεσμάτων.

Επιπλέον στις προηγούμενες εφαρμογές των Athanassoulis et al. (1994), Lucas και Guedes Soares (2015) και Papanikolaou et.al (2016), η αποτύπωση των από κοινού κατανομών στο βάθος του έργου, βασίστηκε στην παραδοχή ότι οι κυματισμοί έχουν πρόσπτωση κάθετη στην ακτογραμμή, συνεπώς ο μόνος μετασχηματισμός που θεωρήθηκε ότι μεταβάλλει το χαρακτηριστικό ύψος κύματος είναι η ρήγωση. Αντίθετα στην παρούσα εργασία λήφθηκε υπόψη και η διεύθυνση των κυματισμών, (αφού ήταν γνωστές και οι διευθύνσεις των ανέμων από τους οποίους παράγονται οι κυματισμοί). Με τον τρόπο αυτό το ύψος κύματος υπέστη μεταβολή και λόγω του μετασχηματισμού της διάθλασης, γεγονός που προσεγγίζει περισσότερο την πραγματικότητα και δίνει τη δυνατότητα για μια πιο άμεση αξιοποίηση των σχετικών αποτελεσμάτων στο σχεδιασμό.

### 1.3 Διάρθρωση της εργασίας

Στο 2<sup>ο</sup> κεφάλαιο παρουσιάζεται το θεωρητικό υπόβαθρο στο οποίο βασίστηκε η διπλωματική εργασία. Αρχικά ορίζεται ο τρόπος με τον οποίο υπολογίζονται οι βασικές παράμετροι στην εξέταση <<στο πεδίο του χρόνου>> και <<στο πεδίο των συχνοτήτων>>. Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι κυριότερες μέθοδοι πρόγνωσης των κυματισμών παραθέτοντας μία σύντομη ιστορική αναδρομή και αναλύοντας τις τρεις πιο διαδεδομένες μεθόδους. Στην επόμενη υποενότητα περιγράφεται η διάδοση των κυματισμών, από τα βαθιά ύδατα προς την παράκτια ζώνη, ενώ παρακάτω ορίζονται η έννοια της συνάρτησης κατανομής και της πυκνότητας πιθανότητας κάνοντας διάκριση ανάμεσα στις τυχαίες διακριτές και στις τυχαίες συνεχείς μεταβλητές. Εν συνεχεία αναπτύσσονται οι κατανομές Lognormal και Weibull και ο τρόπος εκτίμησης των παραμέτρων τους, και τέλος περιγράφεται το μοντέλο δεσμευμένης πιθανότητας κάνοντας μια ιστορική αναδρομή στα μοντέλα κατανομών μίας μεταβλητής (univariate distribution models) και δύο μεταβλητών (bivariate distribution models) και παραθέτοντας τη σχέση υπολογισμού του σφάλματος του μοντέλου, που εκφράζεται με την Ευκλείδεια απόσταση.

Στο 3<sup>ο</sup> κεφάλαιο περιγράφεται η μεθοδολογία που εφαρμόστηκε στην περιοχή στα βαθιά ύδατα Νοτιοανατολικά της Θάσου. Αρχικά παρουσιάζονται τα αναπτύγματα πελάγους, όπως αυτά σχεδιάστηκαν και υπολογίστηκαν, και έπειτα παρατίθενται οι πίνακες με τους υπολογισμούς του χαρακτηριστικού ύψους και της μέσης περιόδου σύμφωνα με τις εξισώσεις του CEM. Στη συνέχεια αναλύεται η κατασκευή των πινάκων (με κλάσεις σταθερού εύρους) από κοινού συχνοτήτων εμφάνισης του  $H_s, T_m$  που βασίστηκε σε συχνότητες ανεμολογικών δεδομένων. Τέλος γίνεται η προσαρμογή της κατανομής Weibull και Lognormal στις περιθώριες συχνότητες του χαρακτηριστικού ύψους  $H_s$  και της μέσης περιόδου  $T_m/H_s$  τόσο στα βαθιά όσο και στο βάθος των 7.5 m.

Στο 4<sup>ο</sup> κεφάλαιο παρουσιάζονται όλα τα αποτελέσματα της εργασίας από την εφαρμογή του μοντέλου δεσμευμένης πιθανότητας σε μορφή πινάκων, αλλά και η διαγραμματική τους απεικόνιση σε μορφή καμπυλών ίσης από κοινού πυκνότητας πιθανότητας των  $H_s, T_m$ , για τα βαθιά ύδατα και για το βάθος των 7.5 m. Επίσης, πραγματοποιείται κατάλληλος σχολιασμός αλλά και σύγκριση της μεθοδολογίας που βασίζεται στα ανεμολογικά δεδομένα με τη μεθοδολογία που βασίζεται σε πραγματικές μετρήσεις.

Στο 5<sup>ο</sup> κεφάλαιο συγκεντρώνονται τα βασικά συμπεράσματα που προέκυψαν από την εφαρμογή της προτεινόμενης μεθοδολογίας, και προτείνονται ορισμένα θέματα και βελτιώσεις για περαιτέρω μελλοντική έρευνα.

Στο παράρτημα, τέλος παρουσιάζονται οι κώδικες γραμμένοι σε προγραμματιστικό περιβάλλον Matlab, που χρησιμοποιήθηκαν για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων.



## 2.ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ ΚΑΙ ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ

Η θάλασσα είναι ένα υγρό μέσο που βρίσκεται διαρκώς σε κατάσταση διαταραχής οι κινήσεις των οποίων παρουσιάζουν περιοδικότητα καθώς «ταξιδεύουν» από μία περιοχή σε κάποια άλλη. Η διαταραχή της θαλάσσιας μάζας οφείλεται σε κάποιο γενεσιουργό αίτιο που δύναται να προέρχεται από εσωτερικές ή εξωτερικές δυνάμεις. Εσωτερικές δυνάμεις είναι για παράδειγμα η διαφορά θερμοκρασίας ή η διαφορά πυκνότητας λόγω αλατότητας των θαλάσσιων μαζών. Εξωτερικές δυνάμεις είναι η κίνηση ενός πλοίου, οι σεισμικές δονήσεις (τσουνάμια), οι γρήγορες μεταβολές της ατμοσφαιρικής πίεσης, η έλξη της σελήνης που δημιουργεί την αστρονομική παλίρροια (1). Σημαντικό και με μεγάλη συχνότητα εξωτερικό γενεσιουργό αίτιο της διαταραχής είναι η επίδραση του ανέμου στην ελεύθερη επιφάνεια της θάλασσας. Εκτός από τις γενεσιουργές δυνάμεις υπάρχουν και οι δυνάμεις επαναφοράς, οι οποίες τείνουν να αποκαταστήσουν την ισορροπία των υγρών μορίων. Τέτοιες δυνάμεις είναι η δύναμη Coriolis (λόγω περιστροφής της γης) και η επιφανειακή τάση. Η κυριότερη επαναφέρουσα δύναμη είναι η έλξη της βαρύτητας της γης.

Η μεγάλη κινητικότητα των υδάτινων σωματιδίων, σε συνδυασμό με τη ταυτόχρονη δράση των δυνάμεων εκτροπής των σωματιδίων της θαλάσσιας μάζας από τη θέση ηρεμίας τους (γενεσιουργές δυνάμεις) και των δυνάμεων επαναφοράς των σωματιδίων στις αρχικές θέσεις τους (επαναφέρουσες δυνάμεις), προκαλούν κάτω από ορισμένες συνθήκες τη δημιουργία κινήσεων ταλάντωσης στα σωματίδια. Η συνισταμένη διαταραχή της θαλάσσιας μάζας από τις ταλαντώσεις των σωματιδίων οδηγεί στο θαλάσσιο κυματισμό.

Τα θαλάσσια κύματα υπάγονται στα λεγόμενα επιφανειακά κύματα, τα οποία δημιουργούνται στη διαχωριστική επιφάνεια δύο ρευστών, του νερού και του αέρα. Οι θαλάσσιοι κυματισμοί που συναντώνται συνηθέστερα στη φύση είναι οι ανεμογενείς κυματισμοί και είναι αυτοί οι οποίοι λαμβάνονται υπόψη κατά το σχεδιασμό των παράκτιων κατασκευών. Η γενεσιουργός δύναμη προέρχεται από τον άνεμο και η επαναφέρουσα δύναμη από τη βαρύτητα. Το μέγεθος των ανεμογενών κυματισμών εξαρτάται από την ένταση του ανέμου, τη διάρκεια πνοής και το ανάπτυγμα του κυματισμού. Το ύψος τους είναι συνήθως μικρότερο από 3m, αλλά μπορεί να υπερβεί και τα 6m υπό την επίδραση σφοδρών ανέμων. Η περίοδος των ανεμογενών κυμάτων έχει κυριαρχούσες τιμές από 1s έως 15s.

Η ευστάθεια των παράκτιων και λιμενικών έργων επηρεάζεται από την παρουσία των ανεμογενών κυματισμών που επιδρούν στην κατασκευή. Για το λόγο αυτό κατά την επιλογή της θέσης της κατασκευής θα πρέπει όσο το δυνατόν να αποφεύγονται οι μεγάλες κυματικές φορτίσεις. Επιπλέον τα μεγάλα ποσά ενέργειας που διαδίδονται από την ανοιχτή θάλασσα προς την ακτογραμμή μέσω των ανεμογενών κυματισμών τους, αποτελούν σημαντικό παράγοντα στη διαμόρφωση των ακτών (π.χ διάβρωση ακτών) και στην ισορροπία του οικοσυστήματος στην παράκτια ζώνη. Η μελέτη δηλαδή των κυματισμών αυτών έχει τεράστια σημασία από περιβαλλοντικής αλλά και κοινωνικής και οικονομικής άποψης. Ένα λάθος στη μελέτη τους

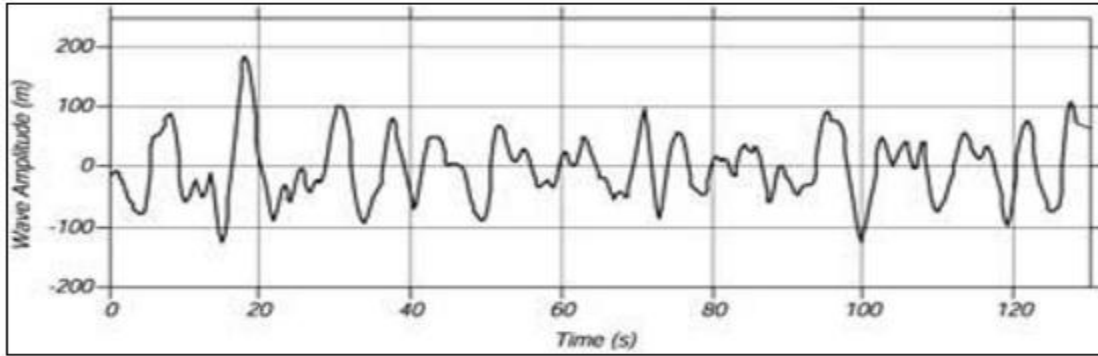
,όπως η υποεκτίμηση του ύψους κύματος σχεδιασμού, μπορεί να επιφέρει καταστροφές σε παράκτιες περιοχές όπου κατοικούν άνθρωποι και υπάρχουν ιδιωτικές περιουσίες, με το κόστος της αποκατάστασης του να φτάνει υψηλά επίπεδα.

Τα ανεμογενή κύματα μπορεί να συνυπάρχουν και με κύματα των οποίων η γένεση δεν οφείλεται σε καιρικά φαινόμενα στο χρόνο που παρατηρούνται αυτά, αλλά σε άνεμο που έπνεε σε προηγούμενο χρόνο, ενίοτε και ημέρες πριν, ή σε άλλη περιοχή. Τα κύματα αυτά ονομάζονται αποθάλασσα, ρεστία ή σάλος (swell) και δεν έχουν σχέση με τον επικρατούντα άνεμο στη περιοχή του παρατηρητή τόσο κατά διεύθυνση όσο και κατά ένταση. Έχουν συνήθως μεγάλες περιόδους και μικρά ύψη διότι έχουν χάσει μεγάλο μέρος της ενέργειας τους κατά τη διάδοσή τους. Τα κύματα αυτά λόγω του ότι δεν αντιπροσωπεύουν το κυματικό κλίμα της περιοχής θα πρέπει να διαχωρίζονται από τα ανεμογενή κατά τη μελέτη των παράκτιων έργων και να αντιμετωπίζονται ξεχωριστά με διαφορετικό τρόπο.

## 2.1 Βασικές παράμετροι κυματισμών

Στη φύση, οι κυματισμοί που δημιουργούνται από την επίδραση του ανέμου στην επιφάνεια της θάλασσας δεν είναι μονοχρωματικοί. Η κίνηση της επιφάνειας της θάλασσας δεν είναι μία απλή αρμονική ταλάντωση συναρτήσεως του χρόνου αλλά μια τυχαία διαδικασία. Θεωρείται ότι ένας φυσικός κυματισμός μπορεί να προσεγγισθεί από μια απειροσειρά απλών αρμονικών κυμάτων με διαφορετικές περιόδους. Τα επιμέρους κύματα έχουν χαρακτηριστικά που εμφανίζονται κατά στοχαστικό τρόπο, δηλαδή σπάνια μπορούν να υπάρξουν δύο όμοιες κινήσεις συναρτήσεως του χρόνου. Τα βασικά μεγέθη (ύψος, περίοδος) των κυμάτων ακολουθούν συγκεκριμένους πιθανολογικούς νόμους κατανομής.

Ως χρονοσειρά ορίζεται η καταγραφή της ανύψωσης  $\eta$  της μέσης στάθμης της ελεύθερης επιφάνειας συναρτήσεως του χρόνου  $t$ . Μια τέτοια τυχαία καταγραφή απεικονίζεται στο παρακάτω σχήμα.



**Εικόνα 2.1** Χρονοσειρά όπου απεικονίζεται η ανύψωση της μέσης στάθμης της ελεύθερης επιφάνειας συναρτήσεως του χρόνου  $\eta(t)$

Τα βασικότερα χαρακτηριστικά μεγέθη ενός κυματισμού είναι το ύψος και η περίοδος του και μπορούν να υπολογιστούν από μια χρονοσειρά. Τα ύψη κύματος διακρίνονται σε πραγματικά και στατιστικά. Πραγματικά είναι το μέγιστο  $H_{max}$  και το ελάχιστο ύψος  $H_{min}$  που παρατηρούνται σε μια κυματική καταγραφή, ενώ στατιστικά είναι το μέσο ύψος  $H_m$  που προκύπτει ως ο μέσος όρος των διαφορών  $H_i$  της καταγραφής και το χαρακτηριστικό ύψος  $H_s$  που ορίζεται ως το μέσο ύψος των υψηλότερων 33% του συνόλου των μετρημένων υψών  $H_i$ . Η έννοια του χαρακτηριστικού ύψους μπορεί να γενικευτεί αν οριστεί ως το μέσο ύψος των υψηλότερων  $1/n$  του συνόλου των κυμάτων με το  $n$  να παίρνει τιμές από 3 έως 20. Το χαρακτηριστικό ύψος που υπολογίζεται με αυτόν τον τρόπο συμβολίζεται ως  $H_{1/n}$ .

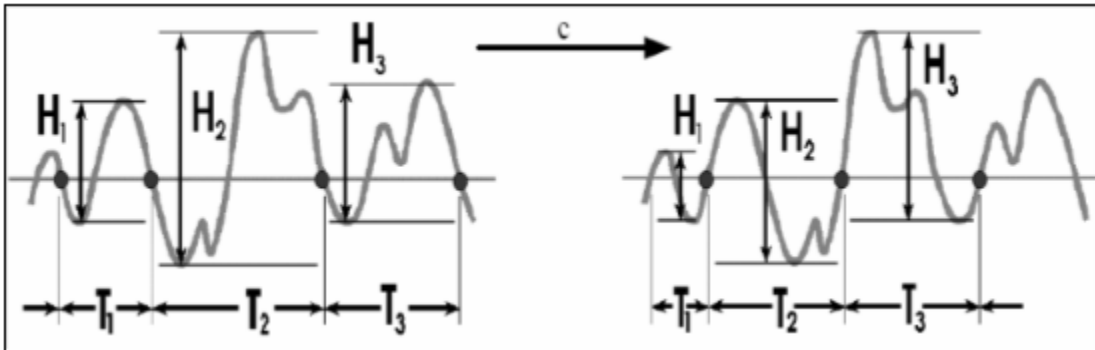
Από τις περιόδους, συνηθέστερα χρησιμοποιούνται η περίοδος κορυφής του κυματισμού που συμβολίζεται με  $T_p$  και ορίζεται ως το αντίστροφο της συχνότητας αιχμής  $f_p$ , η μέση στατιστική περίοδος  $T_m$  και η χαρακτηριστική περίοδος  $T_s$ , που ορίζεται ως η μέση περίοδος των υψηλότερων 33% του συνόλου των κυμάτων. Η μέση μετρούμενη περίοδος συμβολίζεται με  $T_z$  και ορίζεται ως το μέσο χρονικό διάστημα μεταξύ δύο διαδοχικών μηδενισμών της ελεύθερης επιφάνειας της θάλασσας στη φάση ανόδου (mean zero up-crossing period) ή στη φάση καθόδου (mean zero down-crossing period).

### 2.1.1 Στατιστικός προσδιορισμός βασικών παραμέτρων

Η ανάλυση των κυματισμών όπως αυτά καταγράφονται σε ένα ορισμένο σημείο συναρτήσεως του χρόνου ονομάζεται εξέταση <<στην περιοχή του χρόνου>>(time domain).

Αν υποθέσουμε λοιπόν ότι μια καταιγίδα παριστάνεται από μια χρονοσειρά της ελεύθερης επιφάνειας, τα επιμέρους διαδοχικά κύματα προσδιορίζονται με τη <<μέθοδο του ανοδικού μηδενισμού>> ή τη <<μέθοδο καθοδικού μηδενισμού>> της μέσης στάθμης τη ελεύθερης επιφάνειας όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα (Εικόνα 2.2). Η μετάβαση της ελεύθερης

επιφάνειας της θάλασσας από τη μέση στάθμη ηρεμίας προς τα κάτω είναι γνωστή ως κάτω μηδενισμός, ενώ η αντίστροφη μετάβαση προς τα πάνω λέγεται άνω μηδενισμός. Σύμφωνα με τη σύσταση της PIANC (Permanent International Association of Navigation Congresses) χρησιμοποιείται η μέθοδος του κάτω μηδενισμού (PIANC 1986). Η περίοδος κύματος  $T_i$  ορίζεται ως το χρονικό διάστημα μεταξύ δύο διαδοχικών μηδενισμών, ενώ το αντίστοιχο ύψος  $H_i$  ορίζεται ως η κατακόρυφη απόσταση μεταξύ των ακραίων τιμών της εκτροπής στο διάστημα  $i$ .



**Εικόνα 2.2** Κυματική καταγραφή όπου τα κύματα προσδιορίζονται με τη μέθοδο καθοδικού μηδενισμού (Αριστερά) και ανοδικού μηδενισμού (δεξιά)

Τα  $N$  επιμέρους κύματα  $H_i$  ( $i=1$  έως  $N$ ) τοποθετούνται σε φθίνουσα σειρά ορίζοντας  $H_1 = H_{max}$  και  $H_N = H_{min}$ . Τα στατιστικά μεγέθη που περιγράφηκαν παραπάνω υπολογίζονται από τις παρακάτω σχέσεις.

$$\text{Μέσο στατιστικό ύψος: } H_m = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N H_i \quad (2.1)$$

$$\text{Χαρακτηριστικό ύψος: } H_s = H_{\frac{1}{3}} = \frac{3}{N} \sum_{i=1}^{N/3} H_i \quad (2.2)$$

$$\text{Μέση στατιστική περίοδος: } T_m = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N T_i \quad (2.3)$$

$$\text{Χαρακτηριστική περίοδος } T_s = T_{\frac{1}{3}} = \frac{3}{N} \sum_{i=1}^{N/3} T_i \quad (2.4)$$

Στο πλαίσιο της εξέτασης των κυματισμών στην <<περιοχή του χρόνου>> ο προσδιορισμός των διάφορων υψών κύματος  $H$  μπορεί να πραγματοποιηθεί και με τη μέθοδο RMS ή αλλιώς

μέθοδος τετραγωνικής ρίζας στην οποία βασικό ρόλο παίζουν οι απομακρύνσεις  $\eta(t)$  της θαλάσσιας επιφάνειας από τη στάθμη ηρεμίας. Η μέθοδος αυτή έχει αναπτυχθεί από τους Lonquet-Higgings and Cartwright (1956) με βασική παραδοχή ότι τα ύψη κύματος ακολουθούν κατανομή Rayleigh. Λόγω του ότι δεν χρησιμοποιήθηκε στην εργασία μας η συγκεκριμένη μέθοδος κρίθηκε σκόπιμο να αναφερθεί ονομαστικά και να μην αναπτυχθεί περαιτέρω.

### 2.1.2 Υπολογισμός της μέσης περιόδου $T_m$ μέσω του φάσματος Jonswap

Η περιγραφή μιας θαλάσσιας διαταραχής μπορεί να γίνει μέσα από μια σειρά αρμονικών ταλαντώσεων με διαφορετικές συχνότητες. Η διερεύνηση αυτή της ανάλυσης των κυματισμών σε συνάρτηση με τις συχνότητες ονομάζεται <<εξέταση στο πεδίο συχνοτήτων>> (frequency domain) όπως προαναφέρθηκε.

Από την περιοχή του χρόνου δηλαδή, μεταβαίνουμε στην περιοχή των συχνοτήτων με τη βοήθεια του μετασχηματισμού Fourier. Πιο συγκεκριμένα τα δεδομένα που προκύπτουν από τις χρονοσειρές επεξεργάζονται και μετατρέπονται στο φάσμα  $S(f)$  που απεικονίζει την κατανομή ενέργειας ως προς τη συχνότητα  $f$  κάθε κύματος. Με αυτόν τον τρόπο το κυματικό πεδίο αναπαριστάται από μονοχρωματικά κύματα με διαφορετικές συχνότητες, ύψη και κατευθύνσεις.

Για κάθε φάσμα  $S(f)$  ισχύει ο τύπος:

$$\int_0^{\infty} S(f) df = \bar{E}/\rho g \quad (2.5)$$

όπου:

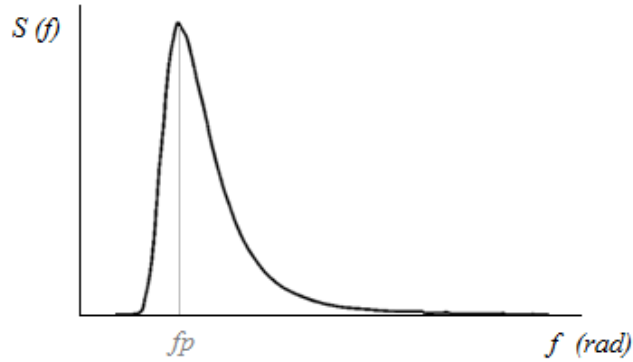
$\rho$  είναι η πυκνότητα του νερού

$g=9.81 \text{ m/s}^2$  είναι η επιτάχυνση της βαρύτητας

$\bar{E}$  είναι η ειδική ενέργεια του κυματισμού που υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\bar{E} = \rho g H_s^2 / 16 \quad (2.6)$$

Στο παρακάτω σχήμα απεικονίζεται ένα τυπικό φάσμα όπου η συχνότητα αιχμής  $f_p$  αντιστοιχεί σε μία περίοδο αιχμής  $T_p = 1/f_p$



**Εικόνα 2.3** Τυπικό φάσμα ενέργειας συναρτήσει της συχνότητας  $S(f)$

Στην παρούσα εργασία για τον υπολογισμό της μέσης περιόδου  $T_m$  χρησιμοποιήθηκε η παρακάτω σχέση που προκύπτει από το φάσμα του JONSWAP (Hasselmann et. al 1973) και συνδέει τη μέση περίοδο  $T_m$  με την περίοδο αιχμής  $T_p$ :

$$\frac{T_m}{T_p} = 0.7303 + 0.04936 * \gamma - 0.006556 * \gamma^2 + 0.0003610 * \gamma^3 \quad (2.7)$$

Η παράμετρος  $\gamma$  ονομάζεται συντελεστής κορυφής και μπορεί να προσδιοριστεί από τις ακόλουθες σχέσεις:

$$\gamma = 5, \text{ εάν } \frac{T_p}{\sqrt{H_s}} \leq 3.6 \quad (2.8)$$

$$\gamma = \exp\left(5.75 - \frac{1.15 * T_p}{\sqrt{H_s}}\right), \text{ εάν } 3.6 \leq \frac{T_p}{\sqrt{H_s}} \leq 5 \quad (2.9)$$

$$\gamma = 1, \text{ εάν } 5 \leq \frac{T_p}{\sqrt{H_s}} \quad (2.10)$$

Στις παραπάνω εξισώσεις 2.8, 2.9, 2.10 οι μονάδες μέτρησης για το χαρακτηριστικό ύψος και την μέση περίοδο είναι m και s αντίστοιχα. Στις περιπτώσεις όπου καθίσταται αδύνατος ο υπολογισμός της παραμέτρου  $\gamma$  από τις παραπάνω σχέσεις λαμβάνουμε υπόψη μία μέση τιμή  $\gamma=3.3$ . Συνεπώς, στην περίπτωση αυτή, η σχέση που συνδέει την μέση περίοδο  $T_m$  με την περίοδο αιχμής  $T_p$  είναι:

$$T_m = 0.83 * T_p \quad (2.11)$$

## 2.2 Πρόγνωση κυματισμών

Η γνώση των χαρακτηριστικών των κυματισμών είναι το σημαντικότερο θέμα σε οποιαδήποτε μελέτη για την προστασία μιας παράκτιας ζώνης. Είναι πολύ βασική η χρήση των

χαρακτηριστικών αυτών σε μακροχρόνια κλίμακα (longterm wave data) ώστε να καλύπτεται η πιθανότητα εμφάνισης ενός ακραίου χαρακτηριστικού στη διάρκεια ζωής του υπό σχεδιασμό έργου. Ωστόσο σε πολλές περιοχές η καταγραφή των κυματισμών ώστε να εξαχθούν αποτελέσματα που να καλύπτουν ικανοποιητικό αριθμό ετών δεν είναι διαθέσιμη, καθώς είναι δύσκολο να διεξαχθούν επί τόπου μετρήσεις ειδικά κατά τη διάρκεια ακραίων συνθηκών. Αυτό μπορεί να συμβεί για διάφορους λόγους είτε οικονομικούς, είτε για αστάθμητους παράγοντες, όπως η εμφάνιση ενός πλοίου κοντά στο όργανο που μπορεί να δημιουργήσει κύμα το οποίο θα καταγραφεί, αλλά δεν θα είναι εν γένει ανεμογενές.

Κατά τη διάρκεια των τελευταίων δεκαετιών έχουν αναπτυχθεί αρκετά αριθμητικά μοντέλα για την πρόγνωση κυματισμών θεωρώντας την εξεταζόμενη περιοχή ως ένα πλέγμα, και επιλύοντας την εξίσωση ισοζυγίου ενέργειας σε όλα τα σημεία του πλέγματος πάνω από το νερό όπου λαμβάνει χώρα ενεργή παραγωγή κύματος. Τέτοια μοντέλα έχουν αναπτυχθεί από τους BOOIJ (1999), KAZEMINEHZAD (2007), MOEINI και ETEMAD-SHAHIDI (2007). Τα μοντέλα αυτά απαιτούν πλήρη γνώση της βαθυμετρίας, αλλά και των ωκεανογραφικών και μετεωρολογικών δεδομένων. Σε πολλές περιοχές, τα δεδομένα αυτά δεν είναι διαθέσιμα και εκτός αυτού τα αριθμητικά μοντέλα είναι ταυτοχρόνως δύσκολα ως προς την επίλυση τους και έχουν αρκετά υψηλό κόστος. Επιπλέον, μόνο για πρώτες εκτιμήσεις των παραμέτρων τα μοντέλα αυτά δεν υποστηρίζονται οικονομικά και για αυτό η διεξαγωγή τους δεν πραγματοποιείται. Έτσι στις περιπτώσεις αυτές οι επιστήμονες τείνουν να χρησιμοποιούν πιο απλοποιημένες μεθόδους πρόγνωσης κυματισμών, οι οποίες βασίζονται στην συσχέτιση των φυσικών συνθηκών (ταχύτητα ανέμου, ενεργό ανάπτυγμα πελάγους και διάρκεια πνοής του ανέμου). Οι μέθοδοι αυτές είναι αρκετά ακριβείς, τουλάχιστον σε προκαταρκτικό στάδιο και για απλούστερες περιπτώσεις πρόγνωσης κυματισμών στα βαθειά ύδατα.

Αρκετές απλοποιημένες μέθοδοι για την πρόγνωση κυματισμών έχουν αναπτυχθεί από διάφορους επιστήμονες τις τελευταίες δεκαετίες όπως η μέθοδος SMB (BRETSCHENEIDER, 1970), WILSON (1965) η οποία προτείνεται στο σχεδιασμό λιμένων στην Ιαπωνία (Ocadij 2002), JONSWAP (HASSELMAN et. al, 1973), DONELAN (1980), SPM (U.S Army, 1984) η οποία έχει αντικατασταθεί προσφάτως από τη μέθοδο CEM (U.S Army, 2006).

Κάποιες από τις παραπάνω μεθόδους έχουν εξετασθεί μόνο σε συνθήκες με περιορισμένο ανάπτυγμα πελάγους (Fetch limited), δηλαδή σε συνθήκες όπου θεωρούμε ότι η ενέργεια του κύματος περιορίζεται από το μέγεθος της περιοχής, όπου παράγονται τα κύματα με την ύπαρξη στερεών ορίων κατά μήκος του αναπτύγματος πελάγους. Οι μέθοδοι DONELAN, SMB και JONSWAP έχουν εφαρμοσθεί και αξιολογηθεί στην περιοχή της λίμνης του Ontario ( BISHOP, 1983). Από την αξιολόγηση προέκυψε ότι η μέθοδος DONELAN (1980) δίνει ελαφρώς μεγαλύτερη ακρίβεια από τις άλλες δυο, ενώ μέθοδος του CEM (U.S Army, 2006) που επίσης εξετάσθηκε στην ίδια περιοχή οδήγησε σε υπερεκτίμηση του ύψους κύματος συγκριτικά με τις προηγούμενες μεθόδους.

Παρακάτω θα αναπτυχθούν λεπτομερέστερα οι συνηθέστερες μέθοδοι πρόγνωσης κυματισμών, η μέθοδος CEM, SMB και JONSWAP. Η πρώτη είναι τελικά αυτή που χρησιμοποιήθηκε στη παρούσα εργασία για την πρόγνωση κυματισμών

### 2.2.1 Μέθοδος CEM

Η μέθοδος του CEM (U.S Army,2006) αποτελεί ένα από τα πλέον διαδεδομένα μοντέλα για την βραχυχρόνια περιγραφή της κατάστασης της θαλάσσιας διαταραχής. Η βασική παραδοχή του μοντέλου είναι ότι το χαρακτηριστικό κύμα αντιστοιχεί προσεγγιστικά στο φυσικό κύμα. Το χαρακτηριστικό ύψος ( $H_s$ ) και η περίοδος ( $T_p$ ) του κύματος υπολογίζονται σαν μονοσήμαντες συναρτήσεις της ταχύτητας του ανέμου ( $U$ ), του αναπτύγματος πελάγους (Fetch) και της διάρκειας πνοής του ανέμου ( $t_d$ ).

Για τον υπολογισμό του αναπτύγματος πελάγους σε κάθε διεύθυνση σχεδιάζουμε από το σημείο ενδιαφέροντος ακτίνες ανά  $5^\circ$  μεταξύ τους μέχρι κάθε ευθεία να έρθει σε επαφή με στερεό όριο. Το ανάπτυγμα πελάγους της κάθε διεύθυνσης προκύπτει ως ο αριθμητικός μέσος όρος των ακτινών που βρίσκονται  $\pm 45^\circ$  της κύριας εξεταζόμενης διεύθυνσης. Ο μέσος όρος δηλαδή 19 ακτινών συνολικά, μια η κεντρική στην κύρια διεύθυνση και 9 εκατέρωθεν της.

Η ελάχιστη διάρκεια πνοής του ανέμου ώστε να επιτευχθούν συνθήκες περιορισμένου αναπτύγματος πελάγους (Fetch limited) υπολογίζεται από τον ακόλουθη σχέση:

$$t_{min} = 77.23 * \frac{X^{0.67}}{U^{0.34} * g^{0.33}} \quad (2.12)$$

όπου  $U$  είναι η ταχύτητα του ανέμου 10 μέτρα πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας και μετριέται σε m/s.

Στις περιπτώσεις όπου έχουμε περιορισμό αναπτύγματος πελάγους ( fetch limited conditions) το χαρακτηριστικό ύψος κύματος υπολογίζεται από τη εξίσωση:

$$\frac{g * H_s}{u_*^2} = 4.13 * 10^{-2} * \left( \frac{g * X}{u_*^2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.13)$$

Ο όρος  $u_*$  ονομάζεται ταχύτητα τριβής μετριέται σε m/s και υπολογίζεται από τη σχέση:

$$u_* = U * (C_D)^{\frac{1}{2}} \quad (2.14)$$

και ο συντελεστής  $C_D$ :

$$C_D = 0.001 * (1.1 + 0.035 * U) \quad (2.15)$$

Η εξίσωση από την οποία προκύπτει η περίοδος αιχμής είναι:



$$\frac{g^*T_p}{u_*} = 0.751 * \left(\frac{g^*X}{u_*}\right)^{\frac{1}{3}} \quad (2.16)$$

Στην περίπτωση που η διάρκεια πνοής του ανέμου είναι περιορισμένη (duration limited συνθήκες), υπολογίζεται το ισοδύναμο ανάπτυγμα πελάγους από την παρακάτω εξίσωση:

$$\frac{g^*X}{u_*^2} = 5.23 * 10^{-3} * \left(\frac{g^*t}{u_*}\right)^{\frac{3}{2}} \quad (2.17)$$

Ο χρόνος  $t$  είναι η διάρκεια πνοής του ανέμου και το ισοδύναμο ανάπτυγμα πελάγους  $X$  που υπολογίζεται παραπάνω αντικαθίσταται στις σχέσεις (2.13) (2.16) από όπου στη συνέχεια προκύπτει το χαρακτηριστικό ύψος  $H_s$  και η περίοδος αιχμής  $T_p$  σε συνθήκες με περιορισμένη διάρκεια πνοής του ανέμου.

## 2.2.2 Μέθοδος SMB

Ένα άλλο πολύ διαδεδομένο μοντέλο πρόγνωσης κυματισμών είναι η μέθοδος SMB. Για τον καθορισμό του αναπτύγματος πελάγους στη μέθοδο αυτή όπως και στη μέθοδο του CEM που περιγράφηκε προηγουμένως σχεδιάζονται ακτίνες με διάστημα 5 μοιρών μεταξύ τους σε εύρος  $\pm 45$  από την κύρια διεύθυνση κάθε ανέμου (μία ακτίνα της κύριας διεύθυνσης και 9 εκατέρωθεν της). Στη συνέχεια το ανάπτυγμα πελάγους δεν υπολογίζεται από τον αριθμητικό μέσο όρο, όπως πριν, αλλά από την παρακάτω σχέση:

$$X = \frac{\sum_{i=1}^{19} X_i \cos^2 \theta_i}{\sum_{i=1}^{19} \cos \theta_i} \quad (2.18)$$

Στη μέθοδο αυτή η ελάχιστη διάρκεια πνοής του ανέμου ώστε να επιτευχθούν συνθήκες περιορισμένου αναπτύγματος πελάγους (Fetch limited) υπολογίζεται από τον ακόλουθη σχέση:

$$\frac{g^*t_{min}}{U} = 6.5882 * \exp\{[0.0161(\ln\Phi)^2 - 0.369(\ln\Phi) + 2.2024]^{0.5} + 0.8798(\ln\Phi)\} \quad (2.19)$$

Το χαρακτηριστικό ύψος κύματος δίνεται από τον τύπο:

$$\frac{g^*H_s}{U^2} = 0.283 * \tanh^2(0.0125\Phi^{0.42}) \quad (2.20)$$

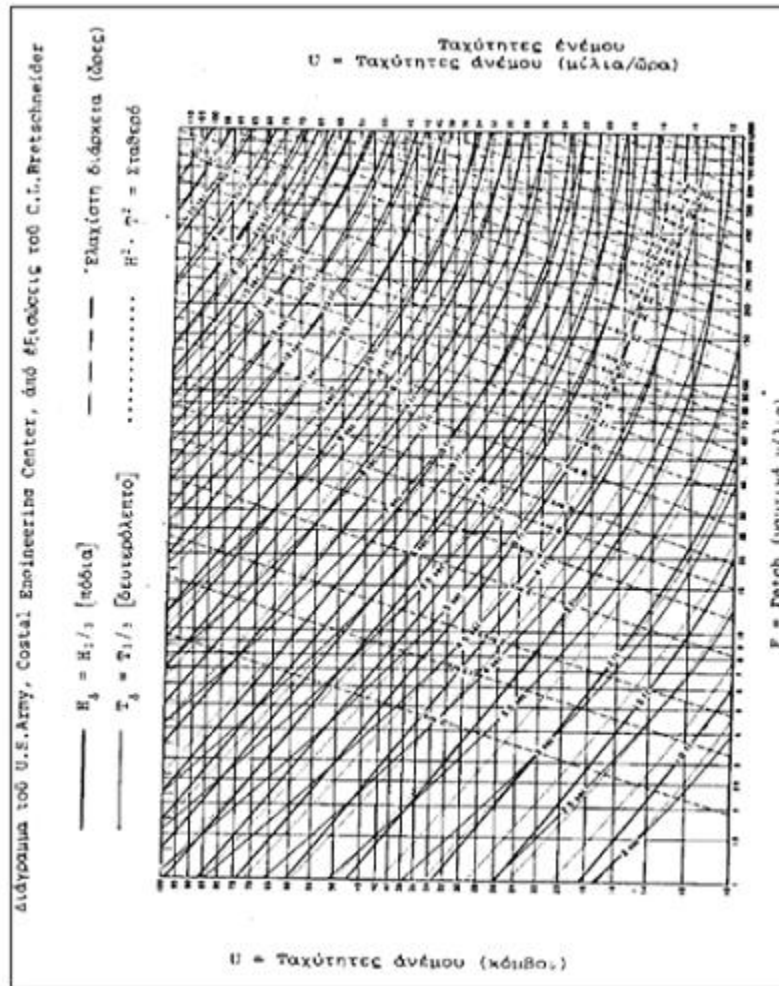
και η χαρακτηριστική περίοδος:

$$\frac{g^*T_s}{U} = 7.54 * \tanh^2(0.077\Phi^{0.25}) \quad (2.21)$$

Όπου στις παραπάνω εξισώσεις ο όρος  $\Phi$  ισούται με:

$$\Phi = \frac{g^*X}{U^2} \quad (2.22)$$

Εναλλακτικά, τα χαρακτηριστικά του κύματος μπορούν να υπολογιστούν από το γράφημα που δίνεται στην εικόνα 2.4. Το γράφημα προκύπτει από τις εξισώσεις του μοντέλου για συνθήκες ανοιχτής θάλασσας. Ακολουθείται η τεταγμένη της ταχύτητας του ανέμου (κόμβοι) έως ότου τμηθεί η τετημένη του αναπτύγματος πελάγους (ναυτικά μίλια) ή η καμπύλη διάρκειας πνοής του ανέμου (ώρες). Στο σημείο τομής τους διαβάζονται το χαρακτηριστικό ύψος κύματος (πόδια) και η χαρακτηριστική περίοδος (δευτερόλεπτα).



**Εικόνα 2.4** Χαρακτηριστικά κύματος στην ανοιχτή θάλασσα-μοντέλο SMB

### 2.2.2 Μέθοδος JONSWAP

Τα φάσματα είναι εμπειρικές εκφράσεις που χρησιμεύουν στην πρόγνωση πραγματικών κυμάτων όταν δεν υπάρχουν δεδομένα μετρήσεων, ή τροποποιούνται κατάλληλα για να εφαρμοστούν σε συγκεκριμένα δεδομένα. Στα βαθιά νερά, η επίδραση του πυθμένα στη

θαλάσσια επιφάνεια είναι μηδενική και το φάσμα είναι συνάρτηση μόνο των πνεόντων ανέμων και του αναπτύγματος πελάγους.

Το φάσμα Pierson-Moskowitz (P-M) (1964) και το φάσμα JONSWAP (Hasselmann et. al 1973) εφαρμόζονται συχνά για ανεμογενείς κυματισμούς. Το φάσμα P-M προέκυψε από μετρήσεις που έγιναν στο Βόρειο Ατλαντικό κατά τη διάρκεια του 1964 (μετρήσεις πεδίου) και αντιπροσωπεύει μόνο πλήρως ανεπτυγμένους κυματισμούς (fully developed seas). Οι Pierson και Moskowitz θεώρησαν ότι εάν ο άνεμος πνέει για ένα μεγάλο χρονικό διάστημα (της τάξεως των μερικών ημερών) διανύοντας μία σημαντική απόσταση (περίπου 100 μίλια), τότε επέρχεται μια κατάσταση ισορροπίας (equilibrium state) μεταξύ των κυματισμών και του ανέμου. Ωστόσο παρατηρήθηκε από τους Hasselmann et. al (1973) ότι ο άνεμος δεν είναι ποτέ πλήρως ανεπτυγμένος, γι' αυτό και το φάσμα Pierson-Moskowitz δεν ήταν αντιπροσωπευτικό των κυμάτων της περιοχής αυτής. Για το λόγο αυτό πρότειναν το φάσμα JONSWAP (Hasselmann et. al 1973) με βάση τα δεδομένα από το Joint North Sea Wave Program (JONSWAP) του 1969 στα δυτικά των ακτών της Δανίας, που αποτελεί μέχρι σήμερα το πλέον διαδεδομένο και χρησιμοποιούμενο φάσμα στα βαθιά νερά. Από την επέκταση του φάσματος P-M για αναπτυσσόμενη θαλάσσια διαταραχή σε συνθήκες περιορισμένου αναπτύγματος πελάγους (fetch-limited), προκύπτει ότι η ενέργεια του δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$S_J(f) = \frac{a g^2}{f^5 (2\pi)^4} \exp\left(-\frac{5}{4} \left(\frac{f}{f_p}\right)^{-4}\right) \gamma \exp\left(-0.5 \left(\frac{f-f_p}{\epsilon f_p}\right)^2\right) \quad (2.23)$$

όπου  $f_p$  η συχνότητα κορυφής του φάσματος:

$$f_p = 3.5 \left(\frac{g}{U_{10}}\right) \left(\frac{gX}{U_{10}^2}\right)^{-0.33} \quad (2.24)$$

η παράμετρος  $\alpha$ :

$$\alpha = 0.076 \left(\frac{gX}{U_{10}^2}\right)^{-0.22}$$

και  $\epsilon$  η παράμετρος εύρους του φάσματος με τιμές:

$$\epsilon = 0.07 \text{ για } \omega \leq \omega_p$$

$$\epsilon = 0.09 \text{ για } \omega > \omega_p$$

Ο συντελεστής  $\gamma$  είναι ο συντελεστής κορυφής και υπολογίζεται όπως περιγράφηκε στην υποενότητα 2.1.2 με μέση τιμή 3.3

Τα χαρακτηριστικά του κύματος με τη μέθοδο JONSWAP υπολογίζονται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$H_s = 2.013 * U_{10}^{0.9} * X^{0.55} * 10^{-2} \quad (2.25)$$

$$T_p = 0.605 * X^{0.33} * U_{10}^{0.34} \quad (2.26)$$

Η σχέση που συνδέει τη μέση περίοδο  $T_m$  με την περίοδο αιχμής  $T_p$  είναι αυτή που περιγράφηκε στην υποενότητα 2.1.2 και είναι μέρος της πρόγνωσης κυματισμών με βάση το φάσμα JONSWAP.

## 2.3 Διάδοση κυματισμών

### 2.3.1 Βαθεία ύδατα

Οι υπολογισμοί των βασικών παραμέτρων του κύματος όπως αυτοί περιγράφηκαν παραπάνω πραγματοποιούνται με την παραδοχή ότι ο κυματισμός βρίσκεται στη ζώνη των βαθιών υδάτων όπου το βάθος  $d$  του πυθμένα δεν ασκεί επιρροή στα μεγέθη. Ο διαχωρισμός των βαθιών από τα ενδιάμεσα και τα ρηχά ύδατα γίνεται με βασική παράμετρο τον λόγο  $d/L$  που ονομάζεται σχετικό βάθος. Όταν ο λόγος αυτός  $\frac{d}{L} > \frac{1}{2}$ , τότε ο κυματισμός θεωρείται ότι διαδίδεται στα βαθιά ύδατα (deep waters).

Με την παραδοχή της γραμμικής θεωρίας η εξίσωση διασποράς είναι:

$$\omega^2 = gk \tanh(kd) \quad (2.27)$$

Όπου:  $g = 9.81 \frac{m}{s^2}$  η επιτάχυνση της βαρύτητας

$k$  είναι ο κυματαριθμός που αντιστοιχεί σε βάθος  $d$

και το  $\omega$  ονομάζεται κυκλική συχνότητα και υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \quad (2.28)$$

Η παραπάνω σχέση ισχύει για όλες τις διάφορες περιόδους,  $T_p$ ,  $T_m$  και  $T_s$ , ανάλογα από το τι ζητείται για υπολογισμό.

Στην περίπτωση των βαθιών υδάτων όπου  $\tanh(kd) \approx 1$  η εξίσωση διασποράς απλοποιείται στη μορφή:

$$\omega^2 = gk_0 \quad (2.29)$$

Ο δείκτης 0 δηλώνει τα βαθιά ύδατα.

Το μήκος κύματος υπολογίζεται από την απλοποιημένη για τα βαθιά νερά εξίσωση διασποράς αν γραφτεί ως προς την περίοδο κύματος:

$$L = \frac{gT^2}{2\pi} \quad (2.30)$$

### 2.3.2 Αβαθή ύδατα

Τα αβαθή ύδατα χωρίζονται σε ενδιάμεσα και ρηχά ύδατα και αποτελούν ξεχωριστή κατηγορία από τα βαθιά ύδατα και γι' αυτό το λόγο αντιμετωπίζονται με διαφορετικό τρόπο.

Όταν το σχετικό βάθος παίρνει τιμές  $0.05 \leq \frac{d}{L} \leq 0.5$  ο κυματισμός θεωρείται ότι διαδίδεται στα ενδιάμεσα νερά (intermediate waters). Στην περίπτωση αυτή η εξίσωση διασποράς δεν επιδέχεται καμία απλοποίηση. Εφόσον το βάθος  $d$  είναι γνωστό όπως και οι υπόλοιποι όροι της εξίσωσης, ο αριθμός του κύματος  $k$  υπολογίζεται με δοκιμές και στη συνέχεια το νέο μήκος κύματος στα ενδιάμεσα νερά δίνεται από τη σχέση:

$$L = \frac{2\pi}{k} \quad (2.31)$$

Τέλος όταν το σχετικό βάθος είναι  $\frac{d}{L} \leq 0.05$  τότε το κύμα διαδίδεται στα ρηχά νερά (swallow waters). Στην περίπτωση αυτή ισχύει  $\tanh(kd) \approx kd$  οπότε η εξίσωση διασποράς απλοποιείται όπως φαίνεται παρακάτω:

$$\omega = k * \sqrt{gd} \quad (2.32)$$

απ' όπου προκύπτει και ο αριθμός κύματος, ενώ το μήκος κύματος εξαρτάται πλέον γραμμικά από την περίοδο και υπολογίζεται ως :

$$L = T\sqrt{gd} \quad (2.33)$$

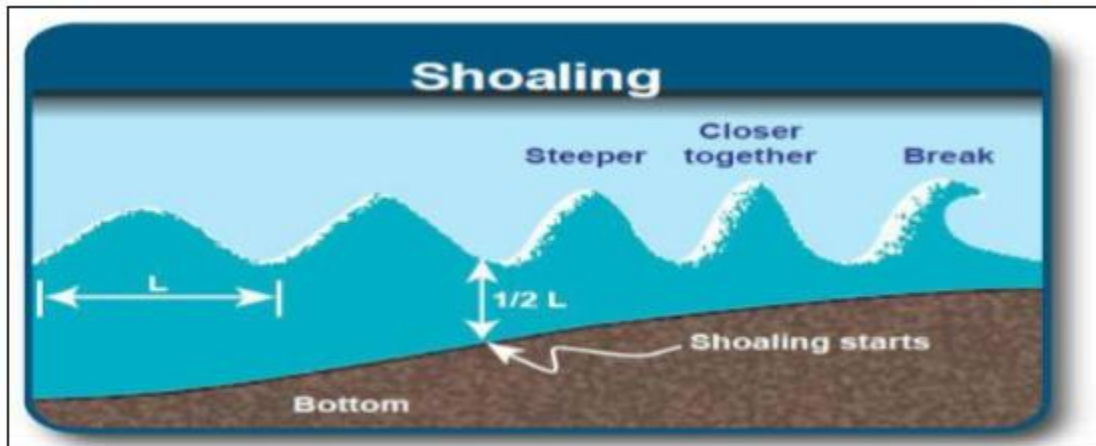
### 2.3.3 Μετασηματισμοί στην παράκτια ζώνη

Όταν το κύμα διαδίδεται από τα βαθιά και εισέρχεται στην παράκτια ζώνη τότε η κλίση και το βάθος του πυθμένα επηρεάζουν τα χαρακτηριστικά του κυματισμού. Το μήκος του κύματος μειώνεται όσο μειώνεται το βάθος. Σχετικά με το ύψος του, αρχικά μειώνεται συγκριτικά με την τιμή που είχε κατά τη διάδοση του στα βαθιά, ενώ στη συνέχεια αυξάνεται έως ότου η κυματομορφή του γίνει ασταθής και οδηγηθεί στη θραύση του. Όσον αφορά την περίοδο του

κυματισμού γίνεται συνήθως η παραδοχή ότι παραμένει σταθερή και δεν μεταβάλλεται εντός της παράκτιας ζώνης.

### 2.3.3.1 Ρήγωση κυματισμού

Ρήγωση (shoaling) είναι το φαινόμενο κατά το οποίο παρατηρείται μεταβολή του εύρους ταλάντωσης του κύματος λόγω μετάδοσής του από τα βαθιά στα ρηγά νερά. Καθώς τα κύματα εισέρχονται στην περιοχή των ενδιάμεσων υδάτων, οι τροχιές των σωματιδίων γίνονται ελλειπτικές λόγω της επίδρασης του πυθμένα. Η ταχύτητα και το μήκος του κύματος, που είναι συναρτήσεις του βάθους, μειώνονται ενώ η περίοδος του κύματος παραμένει σταθερή. Έχει αποδειχτεί, ότι το ύψος κύματος αρχικά μειώνεται (ενδιάμεσα νερά) και στη συνέχεια αρχίζει να αυξάνεται (ρηγά νερά) μέχρι μία οριακή τιμή οπότε και θραύεται. Οι κορυφές του κύματος γίνονται πιο απότομες, η καμπυλότητα αυξάνει και οι διατομές γίνονται ασύμμετρες όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.5.



**Εικόνα 2.5** Ρήγωση κυματισμού

Επειδή γίνεται η παραδοχή ότι οι απώλειες ενέργειας είναι αμελητέες αν υποθέσουμε ότι ένα κύμα διαδίδεται από μία θέση 0 στα βαθιά ύδατα σε μία θέση 2 στα ενδιάμεσα ύδατα η ισχύς του παραμένει σταθερή. Συνεπώς

$$(nCH^2)_0 = (nCH^2)_2 \Rightarrow \frac{H_0}{H_2} = \sqrt{\frac{n_2 C_2}{n_0 C_0}} \quad (2.34)$$

και επειδή η ταχύτητα διάδοσης του κυματισμού είναι:

$$C = \frac{L}{T} \Rightarrow \frac{H_0}{H_2} = \sqrt{\frac{n_2 L_2}{n_0 L_0}} \quad (2.34)$$

Ο συντελεστής  $n$  ορίζεται ως εξής:

$$n = \frac{1}{2} * \left( 1 + \frac{2kd}{\sinh(2kd)} \right) \quad (2.35)$$

Στα ενδιάμεσα νερά ο συντελεστής  $n$  υπολογίζεται από την παραπάνω εξίσωση (2.35) αντικαθιστώντας με το βάθος  $d$  στο οποίο γίνεται η μελέτη και τον αντίστοιχο αριθμό κύματος  $k$  στο βάθος αυτό. Στα ρηγά νερά ο συντελεστής ισούται με την τιμή 1, ενώ στα βαθιά ύδατα ισούται με 0.5.

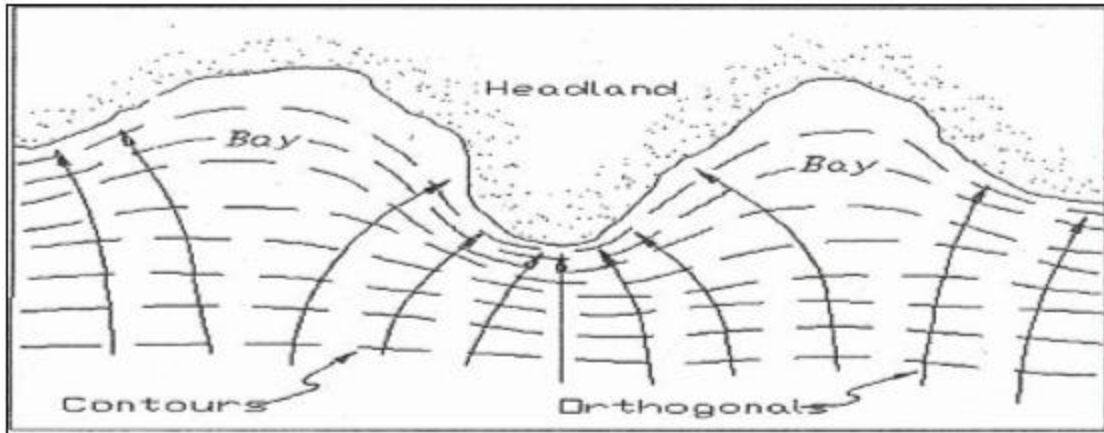
Αντικαθιστώντας στη σχέση (2.34) το συντελεστή  $n$  όπως αυτός ορίστηκε για τα βαθιά και ενδιάμεσα νερά η σχέση τροποποιείται ως εξής:

$$\frac{H_2}{H_0} = \sqrt{\frac{L_0}{2n_2L}} = \sqrt{\frac{1}{\left[ 1 + \frac{2kd}{\sinh(2kd)} \right] \cdot \tanh(kd)}} \quad (2.36)$$

Το δεύτερο μέλος της εξίσωσης 2.36 ονομάζεται συντελεστής ρήχωσης και συμβολίζεται  $K_s$ . Μέσω αυτού επιτυγχάνεται η εύρεση του ύψους κύματος  $H$  σε οποιοδήποτε σημείο στα ενδιάμεσα ύδατα, εφόσον διαθέτουμε πληροφορίες για το βάθος  $d$  και το μήκος κύματος  $L$  στη θέση αυτή, καθώς και το αρχικό ύψος  $H_0$  στα βαθιά.

### 2.3.3.2 Διάθλαση κυματισμών

Διάθλαση (refraction) είναι το φαινόμενο κατά το οποίο σημειώνεται αλλαγή στη διεύθυνση μετάδοσης του κύματος. Καθώς το κύμα προσεγγίζει την ακτή, η ταχύτητα μετάδοσης (ή φάσης) που είναι συνάρτηση του βάθους μειώνεται λόγω τριβής με τον πυθμένα και επειδή η περίοδος είναι σταθερή μειώνεται και το μήκος κύματος. Τα διάφορα σημεία στο μέτωπο του κύματος κινούνται με διαφορετική ταχύτητα, με την κορυφή του κύματος να τείνει να κινηθεί ταχύτερα προς την ακτή. Αυτή η διαφορά στις ταχύτητες κατά μήκος του μετώπου έχουν σαν αποτέλεσμα το μέτωπο του κύματος να καμπυλώνεται και να τείνει να γίνει παράλληλο προς τις ισοβαθείς. Στο Σχήμα 2.6 φαίνεται η διάθλαση κυμάτων σε τυχαία τοπογραφία πυθμένα.



**Εικόνα 2.6** Διάθλαση κυμάτων

Θεωρείται ότι στη διάρκεια της διάθλασης δεν υπάρχουν απώλειες ενέργειας και όλη η ενέργεια μεταδίδεται κατά μήκος των ορθογωνικών.

Έστω ότι ένας κυματισμός διαδίδεται στα βαθιά με μια γωνία  $\theta_0$ , όπου  $\theta_0$  είναι η γωνία μεταξύ της ακτίνας διεύθυνσης διάδοσης του κυματισμού με την κάθετη στην ακτογραμμή. Όταν το κύμα εισέρχεται στην παράκτια ζώνη η γωνία αυτή μειώνεται καθώς το κύμα τείνει να αποκτήσει κάθετη πρόσπτωση στην ακτογραμμή. Ο κυματισμός σε μια θέση στην παράκτια ζώνη θα διαδίδεται με μια γωνία  $\theta$ . Για τον υπολογισμό της γωνίας αυτής εφαρμόζουμε το νόμο του snell ο οποίος διατυπώνεται παρακάτω:

$$\frac{\sin \theta_0}{\sin \theta} = \frac{C_0}{C} \quad (2.37)$$

Όπου  $C_0, C$  οι ταχύτητες διάδοσης του κύματος υπολογισμένες στις αντίστοιχες θέσεις όπως ορίστηκαν παραπάνω.

Αφού υπολογιστεί και η γωνία πρόσπτωσης  $\theta$  ο συντελεστής διάθλασης ορίζεται από την σχέση:

$$K_R = \sqrt{\frac{\cos \theta_0}{\cos \theta}} \quad (2.38)$$

Ένας κυματισμός λοιπόν που διαδίδεται με ένα αρχικό ύψος κύματος  $H_0$  και μια αρχική γωνία πρόσπτωσης  $\theta_0$  στα βαθιά νερά, σε μία θέση εντός της παράκτιας ζώνης και με την παραδοχή ότι δεν υπάρχει κάποιο στερεό όριο που να δημιουργεί περιθλάσεις, θα έχει ύψος στη θέση αυτή εντός της παράκτιας ζώνης το οποίο υπολογίζεται τελικά όπως φαίνεται παρακάτω:

$$H = K_R * K_{S*} * H_0 \quad (2.39)$$



### 2.3.3.3 Περίθλαση κυματισμών

Η περίθλαση των κυματισμών είναι φυσικός μηχανισμός, στον οποίο λαμβάνει χώρα μετάδοση ενέργειας κατά μήκος κορυφογραμμών του προσπίπτοντος κύματος. Χαρακτηριστικό αποτέλεσμα της περιθλάσεως είναι οι κυματισμοί που εμφανίζονται σε θαλάσσια περιοχή προστατευμένη από θαλάσσιο έργο και η οποία θα ηρεμούσε, εφόσον δε θα εμφανιζόταν τέτοια μετάδοση ενέργειας. Εάν η ενέργεια των κυματισμών παρέμενε διατηρούμενη μεταξύ διαδοχικών ορθογωνικών τότε η παρουσία μιας κατασκευής στο χώρο διαδόσεως θα συνεπάγετο πλήρη “σκιά” κυματισμών πίσω από το άκρο της. Αυτό δεν συμβαίνει γιατί παρεμβάλλεται το φαινόμενο της περίθλασης, με αποτέλεσμα τη διάδοση, με συνεχή μείωση, της κυματικής ισχύος (αλλάζει η διεύθυνση διάδοσης και του κυματισμού και το ύψος του μειώνεται) κατά μήκος της κορυφογραμμής πλευρικά. Οι κορυφογραμμές διαμορφώνονται κυκλικά στη σκιά της κατασκευής σαν να αποτελούσε η άκρη της σημειακή πηγή κυματισμών. Για την περιγραφή της περίθλασης των κυματισμών γίνεται εφαρμογή των νόμων της οπτικής για τις “κυματικές ακτίνες” που γεννιούνται με πηγή το άκρο του στερεού ορίου και διαδίδονται στη σκιά του κυματισμού.

Δυο πρακτικές περιπτώσεις περίθλασης είναι: α) η περίθλαση γύρω από ένα άκρο και β) η περίθλαση σε άνοιγμα λιμενολεκάνης. Λόγω του ότι δεν έγινε μελέτη περίθλασης στην παρούσα εργασία, οι περιπτώσεις αυτές δεν θα αναπτυχθούν λεπτομερέστερα.

### 2.3.3.4 Θραύση κυματισμών

Το φαινόμενο του μετασχηματισμού ενός μεταδιδόμενου κύματος σε ένα καθαρό κύμα μεταφοράς μαζών ονομάζεται θραύση. Αποτελεί την κύρια εκδήλωση υδροδυναμικής αστάθειας στη διάδοση των κυματισμών και οφείλεται στις μεγάλες παραμορφώσεις της διατομής από την επίδραση του πυθμένα. Η νοητή γραμμή στην οποία θραύεται το κύμα ονομάζεται γραμμή θραύσης (Δασκαλάκης, 1982).

Η θραύση ενός κύματος συμβαίνει για δύο κυρίως αιτίες. Η μία αιτία είναι η αστάθεια που εμφανίζεται στο κύμα, σαν σώμα ρευστού, όταν ξεπεραστούν ορισμένα όρια στο σχήμα του, από γεωμετρική άποψη. Έχει σχέση με το ιξώδες και το συντελεστή εσωτερικής τριβής. Το υψηλότερο σημείο στο οποίο μπορεί να κρατηθεί σε συνοχή ένα σώμα νερού σε τριγωνική παραμόρφωση, είναι η κορυφή ενός ισοσκελούς τριγώνου με γωνία μεγαλύτερη από  $120^\circ$ . Αν θεωρήσουμε την κορυφή του κύματος σαν την κορυφή του τριγώνου, τότε ορίζουμε το λόγο του ύψους  $H$  προς το μήκος  $L$  που ονομάζεται λόγος καμπυλότητας ή κλίση του κύματος.

Ο Michell (1893) πρότεινε ότι η θραύση ενός κύματος στα βαθιά συμβαίνει όταν ο λόγος καμπυλότητας του υπερβεί το κλάσμα 1/7. Για να διατηρείται δηλαδή η σταθερότητα του κύματος θα πρέπει:

$$\frac{H_0}{L_0} \leq 0.143 \quad (2.40)$$

Ανάλογα με την κλίση του πυθμένα και την καμπυλότητα ή την κλίση του κύματος στα βαθιά, εμφανίζεται διαφορετική μορφή θραύσης με ιδιαίτερα χαρακτηριστικά. Σε γενικές γραμμές η θραύση εμφανίζεται στη βάση (θραύση εφορμήσεως) ή στο άνω μέρος του μετώπου (θραύση κυλίσεως) ή στην κορυφή (θραύση εκτινάξεως) της διατομής του κύματος. Ο τελευταίος αυτός τύπος θραύσεως έχει τη μεγαλύτερη σημασία για την τεχνολογία των παράκτιων έργων λόγω των υψηλών πιέσεων, που αναπτύσσονται κατά την πρόσκρουση.

Η άλλη αιτία θραύσης των κυμάτων, είναι όταν τα κορυφαία τμήματα του κύματος αποκτήσουν μεγαλύτερη ταχύτητα από την ταχύτητα διάδοσης της υπόλοιπης μάζας του. Αυτό προκύπτει σαν ακραία κατάσταση της ασυμμετρίας που παίρνει η κυματομορφή στα ρηχά νερά. Το φαινόμενο της θραύσης λόγω ρήχωσης πρέπει να εξετάζεται με ιδιαίτερη προσοχή καθώς στην περιοχή της ζώνης θραύσης δεν ισχύει πάντα η γραμμική θεωρία.

Υπάρχουν πολλά κριτήρια θραύσης που αφορούν τα ρηχά ύδατα. Στα μονοχρωματικά κύματα ένα κριτήριο που χρησιμοποιείται ευρέως είναι το κριτήριο του McCowan (1891), σύμφωνα με τον οποίο το ύψος θραύσης  $H_b$  συνδέεται με το βάθος θραύσης  $d_b$  ως εξής:

$$\frac{H_b}{d_b} = 0.78 \quad (2.41)$$

## 2.4 Κατανομές πιθανότητας τυχαίων μεταβλητών

Ένα μεγάλο μέρος της παρούσας διπλωματικής εργασίας αφορά τον υπολογισμό και την απεικόνιση των από κοινού κατανομών πιθανότητας του χαρακτηριστικού ύψους κύματος  $H_s$  και της μέσης περιόδου  $T_m$ . Για την παραγωγή των εικόνων αυτών έχουν χρησιμοποιηθεί έννοιες από το αντικείμενο των πιθανοτήτων, όπως η αθροιστική συνάρτηση κατανομής μιας συνεχούς τυχαίας μεταβλητής και η πυκνότητα πιθανότητας μιας συνεχούς τυχαίας μεταβλητής. Για να γίνει περισσότερο κατανοητή η πορεία της εργασίας θα παρατεθούν παρακάτω οι ορισμοί των βασικών εννοιών που χρησιμοποιήθηκαν.

### 2.4.1 Συνάρτηση κατανομής τυχαίας μεταβλητής

Η συνάρτηση  $F$  η οποία ορίζεται από τη σχέση:

$$F(x) = P(X \leq x) \quad (2.42)$$

καλείται συνάρτηση κατανομής ή αθροιστική συνάρτηση κατανομής της τυχαίας μεταβλητής  $X$

Η αθροιστική συνάρτηση κατανομής όπως ορίστηκε, ισούται με την πιθανότητα  $P$  η τυχαία μεταβλητή  $X$  να πάρει τιμές μικρότερες ή ίσες του  $x$ .

Ωστόσο και η πιθανότητα μια τυχαία μεταβλητή να βρίσκεται σε συγκεκριμένο διάστημα  $[\alpha, \beta]$  των πραγματικών αριθμών δύναται να εκφρασθεί συναρτήσει της αθροιστικής συνάρτησης κατανομής όπως φαίνεται παρακάτω

$$P(\alpha \leq X \leq \beta) = F(\beta) - F(\alpha) \quad (2.43)$$

Η μελέτη πολλών σημαντικών εννοιών που συνδέονται με τις τυχαίες μεταβλητές διευκολύνεται με το διαχωρισμό των δύο βασικών κατηγοριών: των διακριτών και των συνεχών τυχαίων μεταβλητών

### 2.4.2 Διακριτή τυχαία μεταβλητή

Μια τυχαία μεταβλητή  $X$  που ορίζεται στο δειγματικό χώρο  $\Omega$ , καλείται διακριτή (ή απαριθμητή) αν παίρνει, με πιθανότητα 1, αριθμήσιμο (πεπερασμένο ή αριθμησίμως άπειρο) σύνολο τιμών  $R_X = [x_0, x_1, \dots, x_n, \dots]$ . Η συνάρτηση  $f$  η οποία σε κάθε σημείο  $x_k$ , με  $k = 0, 1, 2, \dots$ , εκχωρεί την πιθανότητά του

$$f(x_k) = P(X = x_k) = P(\{\omega \in \Omega: X(\omega) = x_k\}), \quad k = 0, 1, 2, \dots, \quad (2.44)$$

καλείται συνάρτηση πιθανότητας της τυχαίας μεταβλητής  $X$ .

Η συνάρτηση πιθανότητας, όπως προκύπτει άμεσα από τον ορισμό της, είναι μη αρνητική

$$f(x_k) \geq 0, \quad k = 0, 1, 2, \dots, \quad (2.45)$$

και

$$\sum_{k=0}^{\infty} f(x_k) = 1 \quad (2.46)$$

Η συνάρτηση πιθανότητας  $f(x_k) = P(X = x_k)$   $k = 0, 1, 2, \dots$ , μιας διακριτής τυχαίας μεταβλητής συνδέεται με τη συνάρτηση κατανομής αυτής  $F(x) = P(X \leq x)$   $-\infty \leq x \leq \infty$ . Συγκεκριμένα στη μερική περίπτωση που ισχύουν  $x_0 < x_1 < x_2 < \dots$ , ισχύουν οι σχέσεις:

$$F(x) = \sum_{k=0}^r f(x_k), \quad x_r \leq x \leq x_{r+1}, \quad r = 0, 1, 2, \dots, \quad (2.47)$$

με  $F(x) = 0$  για  $-\infty \leq x < x_0$  και

$$f(x_k) = F(x_k) - F(x_{k-1}), \quad k = 1, 2, \dots \quad (2.48)$$

με  $f(x_0) = F(x_0)$ . Πιο γενικευμένα για μια διακριτή μεταβλητή ισχύει:

$$F(x) = \sum_{x_k \leq x} f(x_k), \quad -\infty \leq x \leq \infty \quad (2.49)$$

όπου η άθροιση εκτείνεται σε όλα τα  $x_k$  τα οποία είναι μικρότερα ή ίσα του  $x$ .

Να επισημανθεί ότι η συνάρτηση κατανομής  $F$  μιας διακριτής τυχαίας μεταβλητής  $X$  είναι σταθερή κατά διαστήματα και αυξάνει μόνο με άλματα στα σημεία  $x_k \in R_x$ .

### 2.4.3 Τυχαία συνεχής μεταβλητή

Μία τυχαία μεταβλητή  $X$  καλείται συνεχής αν υπάρχει μη αρνητική συνάρτηση,

$$f(x) \geq 0, \quad -\infty \leq x \leq \infty, \quad (2.50)$$

με

$$\int_{-\infty}^{\infty} f(x) dx = 1 \quad (2.51)$$

τέτοια ώστε για πραγματικούς αριθμούς  $\alpha$  και  $\beta$  με  $\alpha < \beta$  να ισχύει

$$P(\alpha < x \leq \beta) = \int_{\alpha}^{\beta} f(x) dx \quad (2.52)$$

Η  $f(x)$  καλείται **πυκνότητα πιθανότητας** ή απλώς πυκνότητα της τυχαίας μεταβλητής  $X$ .

Άμεση συνέπεια των ορισμών της **συνάρτησης κατανομής**  $F(x)$  και της συνάρτησης πυκνότητας  $f(x)$  μιας συνεχούς τυχαίας μεταβλητής  $X$  είναι η σχέση

$$F(x) = \int_{-\infty}^x f(t) dt, \quad -\infty \leq x \leq \infty, \quad (2.53)$$

που δείχνει ότι η συνάρτηση κατανομής  $F$  μιας συνεχούς τυχαίας μεταβλητής  $X$  είναι συνεχής συνάρτηση.

Συνεπώς, αν η  $X$  είναι συνεχής τ.μ., τότε για κάθε  $x \in R$ ,

$$P(X < x) = F(x) = P(X \leq x) \quad (2.54)$$

Αν η συνάρτηση  $f(x)$  είναι συνεχής στο σημείο  $x$  τότε παραγωγίζοντας τη σχέση (2.53) παίρνουμε την

$$F'(x) = \frac{dF(x)}{dx} = f(x) \quad (2.55)$$

Οι σχέσεις (2.51) και (2.53) είναι οι αντίστοιχες των (2.47) και (2.48) για συνεχείς τυχαίες μεταβλητές. Η πυκνότητα  $f(x)$ , σε αντίθεση με τη συνάρτηση πιθανότητας, δεν παριστάνει την πιθανότητα κάποιου ενδεχομένου. Μόνον όταν η συνάρτηση (2.50) ολοκληρώνεται μεταξύ δύο σημείων δίδει κάποια πιθανότητα. Κατά προσέγγιση για μικρό βήμα  $dx > 0$  έχουμε:

$$P(x < X \leq x + dx) \approx f(x)dx \quad (2.56)$$

Να σημειωθεί ότι στην τελευταία σχέση έχει βασιστεί ένα μεγάλο μέρος της παρούσας διπλωματικής εργασίας για τον υπολογισμό των πιθανοτήτων και των πυκνοτήτων των υπό μελέτη μεγεθών.

Τώρα στην περίπτωση που θέλουμε να εξετάσουμε δυο συνεχείς  $X$  και  $Y$  τυχαίες μεταβλητές και να εξετάσουμε την από κοινού πιθανότητα εμφάνισής τους, η κοινή συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας (joint probability density function)  $f_{XY}(x, y)$  θα πρέπει να ικανοποιεί τις συνθήκες:

$$f_{XY}(x, y) \geq 0 \quad \text{και} \quad \iint_{-\infty}^{\infty} f_{XY}(x, y) dy dx = 1$$

Η κοινή αθροιστική συνάρτηση κατανομής (joint cumulative distribution function) για τις  $X$  και  $Y$  ορίζεται ως:

$$F_{XY}(x, y) = P(X \leq x, Y \leq y) = \int_{-\infty}^x \int_{-\infty}^y f_{XY}(x, y) dx dy \quad (2.57)$$

#### 2.4.4 Περιθώρια κατανομή και κατανομή δεσμευμένης πιθανότητας

Στην παρούσα εργασία, χρησιμοποιήθηκαν επίσης, οι έννοιες της περιθώριας κατανομής πιθανότητας, και της κατανομής δεσμευμένης πιθανότητας. Παρακάτω δίνονται σύντομοι ορισμοί σύμφωνα με τη θεωρία των πιθανοτήτων και της στατιστικής.

**Περιθώρια κατανομή** (marginal distribution) ενός υποσύνολου (subset) του δείγματος τυχαίων μεταβλητών είναι η κατανομή πιθανότητας των μεταβλητών που ανήκουν στο υποσύνολο. Δίνει

τις πιθανότητες για διάφορες τιμές των μεταβλητών στο υποσύνολο χωρίς, όμως, να τις συσχετίζει με τις τιμές των υπόλοιπων μεταβλητών.

**Κατανομή δεσμευμένης πιθανότητας** (conditional distribution), είναι αυτή που δίνει τις πιθανότητες εξαρτώμενες από τις τιμές των υπόλοιπων μεταβλητών του δείγματος.

## 2.5 Εκτίμηση μακροχρόνιου κυματικού κλίματος μέσω θεωρητικών πιθανοτικών μοντέλων

### 2.5.1 Ιστορική ανασκόπηση

Για τον πιθανοτικό σχεδιασμό των παράκτιων κατασκευών που αλληλεπιδρούν με τα θαλάσσια κύματα, απαιτείται αξιόπιστη γνώση του μακροπρόθεσμου κυματικού κλίματος. Η σοβαρότητα μιας θαλάσσιας κατάστασης εκφράζεται συνήθως σε όρους του χαρακτηριστικού ύψους κύματος  $H_s$  και της μέσης περιόδου  $T_m$ . Σε πολλές περιπτώσεις χρησιμοποιείται μόνο το χαρακτηριστικό ύψος κύματος για να αντιπροσωπεύσει μια θαλάσσια κατάσταση, αλλά προκειμένου να είναι πιο ολοκληρωμένη η περιγραφή του κυματικού κλίματος είναι σημαντική η χρήση και των δύο παραμέτρων  $H_s$  και  $T_m$ .

Από τα αρχικά στάδια της ανάπτυξης της στατιστικής προσέγγισης του κυματικού κλίματος, αναγνωρίστηκε το πλεονέκτημα μιας αναλυτικής αναπαράστασης των εμπειρικών κατανομών των δεδομένων μέσω παραμετρικών μοντέλων. Η αναλυτική αυτή περιγραφή προσφέρει μια πιο συμπυκνωμένη πληροφορία και συμπληρώνει πιθανά κενά της πληροφορίας που μπορεί να οφείλονται στον περιορισμένο αριθμό δεδομένων. Με τη χρήση των θεωρητικών μοντέλων είναι δυνατόν να απεικονιστούν και οι πολύ μικρές πιθανότητες που μπορεί να μην είχαν συμπεριληφθεί στα δεδομένα, αλλά και να γίνει η εκτίμηση του κυματικού κλίματος για χρονικές περιόδους επαναφοράς μεγαλύτερης της διάρκειας των μετρήσεων. Τα βασικά αυτά πλεονεκτήματα οδήγησαν τους ερευνητές στη χρήση ειδικών παραμετρικών μοντέλων, κατάλληλων για την στατιστική περιγραφή του ύψους και της περιόδου των κυμάτων. Δεδομένου, όμως, του γεγονότος ότι δεν υπάρχουν θεωρητικά στοιχεία, όσον αφορά την πιθανοτική δομή των παραμέτρων μιας θαλάσσιας κατάστασης (σε μια δεδομένη τοποθεσία και για μια δεδομένη εποχή), η ευκολία των αναλυτικών μοντέλων και η καλή του προσαρμογή σε πραγματικά δεδομένα, ήταν και εξακολουθούν να παραμένουν τα καθοδηγητικά κριτήρια επιλογής αναλυτικών πιθανοτικών μοντέλων, είτε μιας (univariate) είτε περισσότερων μεταβλητών (multivariate).

Όσον αφορά τα μοντέλα μιας μεταβλητής, ο Jasper (1956) πρότεινε το 1956 τη χρήση λογαριθμικής κατανομής για την περιγραφή του χαρακτηριστικού ύψους κύματος  $H_s$ . Αυτή η κατανομή δίνει γενικά ικανοποιητική συνολική προσαρμογή, αλλά παρουσιάζει αποκλίσεις στις

υψηλές τιμές του  $H_s$ . Ο Nordenstrom (1969) πρότεινε την κατανομή Weibull τριών παραμέτρων, η οποία, γενικά, προσαρμόζεται καλύτερα στις υψηλές τιμές του  $H_s$ , αλλά εμφανίζει μεγαλύτερες αποκλίσεις στις μικρές τιμές του. Συμπερασματικά, η κατανομή Weibull έχει καλύτερη προσαρμογή στις ακραίες τιμές (large value analysis), ενώ η κατανομή log-normal μοιάζει πιο κατάλληλη για ανάλυση μέσων τιμών (moderate value analysis).

Περαιτέρω προσπάθειες για την ανάπτυξη κατανομών κατάλληλων για την περιγραφή των κυματικών χαρακτηριστικών πραγματοποιήθηκαν από τον Ochi (1976) και τους Andrew and Price (1979), οι οποίοι πρότειναν τη χρήση της γενικευμένης κατανομής Gamma, η οποία περιέχει επίσης τη κατανομή Weibull δύο μεταβλητών ως ειδική περίπτωση. Οι Fang και Hogben (1982) εισήγαγαν μια τροποποιημένη λογαριθμοκανονική κανονική κατανομή που περιλάμβανε διόρθωση για την ασυμμετρία (skewness) παρέχοντας σε σύγκριση με την τυποποιημένη λογαριθμοκανονική κατανομή, μια καλύτερη περιγραφή στις μεγάλες τιμές του χαρακτηριστικού ύψους  $H_s$ , ειδικά για τιμές αθροιστικής πιθανότητας πάνω από 0.95.

Όλα τα παραπάνω μοντέλα έχουν ευρεία χρήση στην εκτίμηση των μακροπρόθεσμων κλιματικών παραμέτρων, όπως οι τιμές σχεδιασμού, οι μέσες μακροπρόθεσμες τιμές, οι διακυμάνσεις κλπ. Όσον αφορά στη μέση περίοδο  $T_m$  χρησιμοποιήθηκε η κατανομή log-normal, τόσο για την περιθώρια κατανομή, όσο και για την κατανομή δεσμευμένης πιθανότητας δεδομένου ενός ύψους κύματος  $H_s$  ( $T_m/H_s$ ).

Η ανάγκη για γνώση του από κοινού μακροχρόνιου στατιστικού χαρακτήρα του ύψους κύματος και της περιόδου, όπως για παράδειγμα στην περίπτωση της πρόβλεψης του ύψους κύματος σχεδιασμού και της αντίστοιχης περιόδου, οδήγησαν στην ανάπτυξη και χρήση παραμετρικών **μοντέλων δύο μεταβλητών (bivariate parametric models)**. Έχουν υιοθετηθεί αρκετές μέθοδοι για τη μελέτη κατανομών δύο μεταβλητών που περιγράφουν το κυματικό κλίμα (π.χ Repko et al., 2004). Μια από τις πρώτες προσεγγίσεις προτάθηκε από τον Ochi (1978), ο οποίος υιοθέτησε την λογαριθμοκανονική κατανομή δυο μεταβλητών για την περιγραφή των  $H_s$ -  $T_m$ , που προκύπτει από μια εκθετική τροποποίηση της κανονικής κατανομής. Αυτή η προσέγγιση, αν και φαίνεται απλή και ικανοποιητική, προϋποθέτει ότι ο λογάριθμος των δεδομένων είναι κανονικά κατανομημένος στα δεδομένα, και παρόλο που αυτό μπορεί να συμβεί για τις χαμηλές και μεσαίες τιμές του  $H_s$ , δεν συμβαίνει το ίδιο στις μεγάλες τιμές του. Οι Fangand και Hogben (1982) ακολούθησαν μια προσέγγιση κατανομής της  $T_m$  δεσμευμένης ως προς το  $H_s$  (conditional distribution) με σκοπό να αναπτύξουν ένα μοντέλο δύο μεταβλητών για τα  $H_s$ -  $T_m$ , υιοθετώντας ένα τροποποιημένο μοντέλο μιας μεταβλητής, που συμπεριλαμβάνει την κυρτότητα για την περιθώρια (marginal) κατανομή  $f_{H_s}$  του  $H_s$  και το λογαριθμοκανονικό μοντέλο κατανομής  $f_{T_m|H_s}$  για την  $T_m$ . Αυτή η προσέγγιση κατανομής δεσμευμένης πιθανότητας επεξεργάστηκε περαιτέρω από τους Dacuncha et.al. (1984). Ένα χρόνο μετά ο Haver (1985) χρησιμοποίησε ένα συνδυασμό λογαριθμοκανονικής κατανομής για τις χαμηλές τιμές του χαρακτηριστικού ύψους κύματος  $H_s$  και κατανομή Weibull για τις μεγαλύτερες τιμές του,

ονομάζοντας το συνδυασμό αυτόν “κατανομή Lonowe”, ενώ για την περίοδο κορυφής  $T_p$  υιοθέτησε την λογαριθμοκανονική κατανομή. Λίγο αργότερα, οι Mathiesen και Bitner-Gregersen (1990) ακολούθησαν την προσέγγιση κατανομής, θεωρώντας μοντέλο Weibull τριών παραμέτρων για την  $f_{H_s}$  και λογαριθμοκανονικό μοντέλο για την  $f_{T_m|H_s}$ , υιοθετώντας τελικά ένα μοντέλο δύο μεταβλητών με εννέα παραμέτρους. Οι δύο ανωτέρω προσεγγίσεις (λογαριθμοκανονικό μοντέλο και κατανομή δεσμευμένης πιθανότητας) είναι αυτές οι οποίες χρησιμοποιούνται σχεδόν αποκλειστικά μέχρι σήμερα για την περιγραφή της από κοινού πιθανότητας ύψους κύματος και περιόδου (Athanasoulis et al., 1994).

Οι Athanasoulis et. Al (1994) εφάρμοσαν τρεις περιθώριες κατανομές, τη Lognormal, Weibull και Gamma, για την προσαρμογή στα  $H_s$  και  $T_m$ . Τα αρχικά δεδομένα λήφθηκαν από μετρήσεις της από κοινού συχνότητάς εμφάνισης των  $H_s$  και  $T_m$  στα βαθιά ύδατα στο σταθμό India του Βόρειου Ατλαντικού Ωκεανού και στο σταθμό Tromsøflaket της Νορβηγίας. Για την αναπαράσταση της από κοινού πυκνότητας πιθανότητας των παραμέτρων αυτών χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο Plackett το οποίο, εξετάζει τις περιθώριες κατανομές κάθε παραμέτρου χωρίς να υπάρχει συσχέτιση των δυο μεγεθών όπως στο μοντέλο δεσμευμένης πιθανότητας. Αφού δοκιμάστηκαν όλοι οι δυνατοί συνδυασμοί έγινε σύγκριση του σφάλματος του μοντέλου Plackett με το σφάλμα του μοντέλου λογαριθμοκανονικής κατανομής δύο μεταβλητών για τα δεδομένα του σταθμού India στο Βόρειο Ατλαντικό. Επιπλέον πραγματοποίησαν σύγκριση του σφάλματος του μοντέλου Plackett με το μοντέλο λογαριθμοκανονικής κατανομής δύο μεταβλητών (Bivariate Lognormal Distribution) και το μοντέλο B-M (bivariate model) των Mathiesen και Bitner-Gregersen (1990), για τα δεδομένα μετρήσεων του σταθμού Tromsøflaket της Νορβηγίας.

Στην πρώτη περίπτωση σύγκρισης (σταθμός India) καταλληλότερο κρίθηκε το μοντέλο Plackett με προσαρμογή λογαριθμοκανονικής κατανομής και για το  $H_s$  και για το  $T_m$ , ενώ έπειτα από τη σύγκριση στο σταθμό Tromsøflaket, καταλληλότερο κρίθηκε το μοντέλο Plackett με προσαρμογή λογαριθμοκανονικής κατανομής για την μέση περίοδο  $T_m$  και κατανομής Gamma για το χαρακτηριστικό ύψος  $H_s$ .

Το 2015 οι Lucas και Guedes (2015) έπειτα από συλλογή δεδομένων από μετρήσεις της από κοινού συχνότητας εμφάνισης των  $H_s$  και  $T_m$  που διήρκησαν από το 1994 έως το 2005 στην περιοχή της Βορειοδυτικής Αυστραλίας εφάρμοσαν τρία διαφορετικά μοντέλα δυο μεταβλητών (bivariate models) για να εξετάσουν ποιο προσαρμόζεται καλύτερα στα πρωτογενή δεδομένα. Τα τρία μοντέλα ήταν, το μοντέλο δεσμευμένης πιθανότητας (Conditional Model), το μοντέλο Plackett, και το τελευταίο ήταν ένα μοντέλο κανονικής κατανομής δυο μεταβλητών που προέκυψε από τους μετασχηματισμούς Box-Cox στα πρωτογενή δεδομένα ώστε αυτά να ακολουθούν περίπου κανονική κατανομή. Η πρωτοτυπία της έρευνας αυτής ήταν ότι έγινε διαχωρισμός των ανεμογενών κυματισμών (winds data) από τα κύματα αποθάλασσας (swell). Η προσαρμογή των μοντέλων έγινε αρχικά για τη συνολική θαλάσσια κατάσταση, και στη συνέχεια για κάθε συνιστώσα χωριστά (wind waves, swell). Στο μοντέλο δεσμευμένης



πιθανότητας χρησιμοποιήθηκαν οι κατανομές Weibull και Lognormal για το χαρακτηριστικό ύψος κύματος  $H_s$  και η λογαριθμοκανονική (Lognormal) για την περίοδο  $T_m/H_s$ , ενώ στο μοντέλο Plackett υπολογίστηκε η από κοινού πυκνότητα πιθανότητας των  $H_s-T_m$  με τον ίδιο συνδυασμό περιθώριων κατανομών.

Από τα τρία μοντέλα το μικρότερο σφάλμα είχε το μοντέλο δεσμευμένης πιθανότητας με προσαρμογή της λογαριθμοκανονικής κατανομής στα  $H_s$  και  $T_m$  ( $D^2 = 0.002$ ). Το μοντέλο Plackett για το συνδυασμό των λογαριθμοκανονικών κατανομών είχε σφάλμα μιας τάξης μεγέθους μεγαλύτερο από το μοντέλο δεσμευμένης πιθανότητας ( $D^2 = 0.071$ ), και λίγο μικρότερο από το σφάλμα των μετασχηματισμών Box-Cox ( $D^2 = 0.078$ ).

Η πιο πρόσφατη προσπάθεια απεικόνισης του κυματικού κλίματος με τη χρήση θεωρητικών πιθανοτικών μοντέλων έγινε από τους Papanikolaou et. al (2016) στα πλαίσια μεταπτυχιακής εργασίας στο Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο. Η έρευνα βασίστηκε σε μετρήσεις της από κοινού συχνότητάς εμφάνισης των  $H_s - T_m$  στην περιοχή της Μυκόνου με διάρκεια 7 ετών. Τα μοντέλα δύο μεταβλητών που εφαρμόστηκαν ήταν το μοντέλο δεσμευμένης πιθανότητας και το μοντέλο Plackett. Στο μοντέλο δεσμευμένης πιθανότητας έγινε προσαρμογή των κατανομών Lognormal και Weibull στις περιθώριες συχνότητες του χαρακτηριστικού ύψους  $H_s$  και μόνο Lognormal στις μέσης περιόδου δεσμευμένης ως προς το χαρακτηριστικό ύψος  $T_m/H_s$ . Οι ίδιες κατανομές με τους ίδιους συνδυασμούς χρησιμοποιήθηκαν για τις περιθώριες συχνότητες των  $H_s$  και  $T_m$  στο μοντέλο Plackett.

Όσον αφορά τα σφάλματα καταλληλότερο κρίθηκε το μοντέλο δεσμευμένης πιθανότητας με χρήση κατανομής Weibull για το χαρακτηριστικό ύψος  $H_s$  και χρήσης κατανομής Lognormal για τη μέση περίοδο  $T_m/H_s$  ( $D^2 = 0.0027$ ) ενώ το μοντέλο Plackett είχε σφάλμα μιας τάξης μεγαλύτερο και για τους δύο συνδυασμούς ( $D^2 = 0.0106$  για Lognormal  $D^2 = 0.011$  για Weibull-Lognormal).

Τα δεδομένα των μετρήσεων στην περιοχή της Μυκόνου στην εργασία της Papanikolaou et.al (2016), αφορούσαν τα βαθιά ύδατα. Η πρωτοτυπία της εργασίας της Papanikolaou ήταν ότι έγινε προσπάθεια απεικόνισης του κυματικού κλίματος με χρήση πιθανοτικών μοντέλων και στα ενδιάμεσα ύδατα εντός της παράκτιας ζώνης. Έτσι λοιπόν έγινε επιλογή του βάθους των 6.75 m, αφού εξασφαλίστηκε ότι στο συγκεκριμένο βάθος δεν υπήρχε θραύση για κανένα  $H_s$  και μπορούσε να χρησιμοποιηθεί η γραμμική θεωρία για τη διαδικασία ρήχωσης. Τα μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν ήταν τα αντίστοιχα των βαθέων υδάτων (Conditional model, Plackett) με τους ίδιους συνδυασμούς κατανομών (Lognormal, Weibull).

Μικρότερο σφάλμα για τα αβαθή ύδατα έδωσε το μοντέλο δεσμευμένης πιθανότητας με χρήση λογαριθμοκανονικής κατανομής για το  $H_s$  και  $T_m/H_s$  ( $D^2 = 0.0045$ ). Σε γενικές γραμμές στα αβαθή ύδατα προκύπτουν μεγαλύτερα σφάλματα από τα αντίστοιχα σφάλματα στα βαθιά, και για το μοντέλο δεσμευμένης πιθανότητας, και για το μοντέλο Plackett.

## 2.5.2 Μοντέλα κατανομών μιας μεταβλητής

### 2.5.2.1 Κατανομή Lognormal

Για την κατανομή Lognormal η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας (probability density function)  $f_L(x; \vec{\theta}_L)$  ως προς το σύνολο των παραμέτρων  $\vec{\theta}_L$  δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$f_L(x; \vec{\theta}_L) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\beta x}} \exp\left\{-\frac{[\ln(x)-a]^2}{2\beta^2}\right\}, \quad x > 0 \quad (2.58)$$

Ενώ η συνάρτηση κατανομής ή αλλιώς συνάρτηση αθροιστικής πιθανότητας (cumulative distribution function) δίνεται ως:

$$F_L(x; \vec{\theta}_L) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \operatorname{erf}\left[\frac{\ln(x)-a}{\sqrt{2}\beta}\right] \quad (2.59)$$

Το  $\vec{\theta}_L = (a, \beta) \in \mathbf{R} \times \mathbf{R}^+$  αντιπροσωπεύει τις παραμέτρους της λογαριθμοκανονικής κατανομής, όπου το  $a$  αποκαλείται παράμετρος θέσης (location parameter) και το  $\beta$  παράμετρος κλίμακος (scale parameter).

### 2.5.2.2 Κατανομή Weibull

Για την κατανομή Weibull η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας (probability density function)  $f_W(x; \vec{\theta}_W)$  ως προς το σύνολο των παραμέτρων  $\vec{\theta}_W$  δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$f_W(x; \vec{\theta}_W) = \frac{\beta^*}{\alpha^*} \left(\frac{x-\gamma}{\alpha^*}\right)^{\beta^*-1} e^{-\left(\frac{x-\gamma}{\alpha^*}\right)^{\beta^*}}, \quad x \geq \gamma \quad (2.60)$$

Στην περίπτωση μας όπου  $\gamma = 0$  έχουμε:

$$f_W(x; \vec{\theta}_W) = \frac{\beta^*}{\alpha^*} \left(\frac{x}{\alpha^*}\right)^{\beta^*-1} e^{-\left(\frac{x}{\alpha^*}\right)^{\beta^*}}, \quad x \geq 0 \quad (2.61)$$

Ενώ η συνάρτηση κατανομής ή αλλιώς συνάρτηση αθροιστικής πιθανότητας (cumulative distribution function) δίνεται από τη σχέση:

$$F_W(x; \vec{\theta}_W) = 1 - e^{-\left(\frac{x}{\alpha^*}\right)^{\beta^*}}, \quad x \geq 0 \quad (2.62)$$

Το  $\vec{\theta}_W = (a^*, \beta^*)$  εκφράζει τις παραμέτρους της κατανομής, όπου το  $\beta^*$  αποκαλείται η παράμετρος σχήματος (shape parameter) και το  $a^*$  παράμετρος κλίμακος (scale parameter). Σημειώνεται ότι το  $\gamma$  που υπάρχει στη σχέση 2.23, επιπλέον των  $a^*$  και  $\beta^*$ , αποτελεί ένα

κατώφλι με προκαθορισμένη σταθερή τιμή, που στην παρούσα εργασία θεωρείται ίσο με το μηδέν.

### 2.5.2.3 Υπολογισμός των παραμέτρων των κατανομών

Ο υπολογισμός των παραμέτρων των κατανομών Lognormal και Weibull  $\vec{\theta}_1 = \vec{\theta}_L$  και  $\vec{\theta}_2 = \vec{\theta}_W$  αντιστοίχως, πραγματοποιήθηκε χρησιμοποιώντας τη μέθοδο μέγιστης πιθανοφάνειας (maximum likelihood method), σύμφωνα με τον Athanassoulis et.al. (1994). Επομένως, η λογαριθμική συνάρτηση πιθανοφάνειας (log-likelihood function) για το δείγμα τιμών  $\vec{x}_i$ , ως προς το σύνολο των παραμέτρων  $\vec{\theta}_i$  είναι :

$$l_i^{N_i}(\vec{x}_i; \vec{\theta}_i) = \ln \left[ \prod_{n=1}^{N_i} f_i(x_i^{(n)}; \vec{\theta}_i) \right], \quad i = 1, 2, \dots \quad (2.63)$$

Το  $\vec{x}_i = (x_i^{(1)}, x_i^{(2)}, \dots, x_i^{(N_i)})$ , με  $i = 1, 2$  είναι το αντίστοιχο δείγμα τιμών μίας μεταβλητής (περιθώριας ή δεσμευμένης πιθανότητας), το οποίο αποτελείται από  $N_i$  παρατηρήσεις. Όταν η παραπάνω λογαριθμική συνάρτηση μεγιστοποιείται προκύπτουν οι τιμές του συνόλου των παραμέτρων (ML estimators)  $\vec{\theta}_i$  για τις δύο περιπτώσεις κατανομών που μελετώνται.

**Lognormal:** Η μεγιστοποίηση της παραπάνω λογαριθμικής συνάρτησης πιθανοφάνειας μας δίνει ότι το σύνολο των παραμέτρων  $\vec{\theta}_1 = \vec{\theta}_L = (a, \beta)$  προκύπτει από τις σχέσης:

$$\text{Παράμετρος θέσης } a: \quad \alpha = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \ln(x^{(n)}) \quad (2.64)$$

$$\text{Παράμετρος μεγέθυνσης } \beta: \quad \beta = \left\{ \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N [\ln(x^{(n)}) - a]^2 \right\}^{1/2} \quad (2.65)$$

**Weibull:** Αντίστοιχα για την κατανομή Weibull το σύνολο των παραμέτρων  $\vec{\theta}_2 = \vec{\theta}_W = (a^*, \beta^*)$  δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$\text{Παράμετρος σχήματος:} \quad -\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \ln(x^{(n)} - \gamma) + \frac{\sum_{n=1}^N [x^{(n)} - \gamma]^{\beta^*} \ln(x^{(n)} - \gamma)}{\sum_{n=1}^N [x^{(n)} - \gamma]^{\beta^*}} = \frac{1}{\beta^*} \quad (2.66)$$

$$\text{Παράμετρος μεγέθυνσης:} \quad \alpha^* = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N [x^{(n)} - \gamma]^{\beta^*} \quad (2.67)$$

Τα  $x^{(n)}$  και στις δύο κατανομές είναι τα στοιχεία του δείγματος των τιμών μιας μεταβλητής που αποτελείται από  $N$  παρατηρήσεις.

### 2.5.3 Μοντέλο δεσμευμένης πιθανότητας

Η από κοινού κατανομή του χαρακτηριστικού ύψους  $H_s$  και της χαρακτηριστικής περιόδου  $T_m$  βασίζεται στη θεωρία της ολικής πιθανότητας, το οποίο υποδεικνύει μια κατανομή πυκνότητας πιθανότητας για το χαρακτηριστικό ύψος κύματος  $f(H_s)$ , και μια κατανομή πυκνότητας πιθανότητας για τη μέση περίοδο δεσμευμένη ως προς το χαρακτηριστικό ύψος κύματος  $f(T_m/H_s)$ , με σκοπό να υπολογιστεί η από κοινού κατανομή των δυο μεγεθών όπως φαίνεται στην παρακάτω σχέση:

$$f(H_s, T_m) = f(H_s) \times f(T_m/H_s) \quad (2.68)$$

όπου:

$f(H_s, T_m)$  είναι η κατανομή από κοινού πυκνότητας πιθανότητας (joint probability density function) του χαρακτηριστικού ύψους κύματος ( $H_s$ ) και της μέσης περιόδου ( $T_m$ )

$f(H_s)$  είναι η περιθώρια κατανομή (marginal distribution) πυκνότητας πιθανότητας του  $H_s$

$f(T_m | H_s)$  είναι η κατανομή πυκνότητας πιθανότητας της μέσης περιόδου  $T_m$  δεσμευμένης ως προς το  $H_s$  (conditional distribution)

Το μοντέλο δεσμευμένης πιθανότητας είχε χρησιμοποιηθεί στο παρελθόν από τον Haver (1985), με τη διαφορά ότι αντί για τη μέση περίοδο  $T_m$  εξετάστηκε η περίοδος κορυφής  $T_p$  και από τους Guedes Soares et. al (2015). Οι τελευταίοι, ωστόσο, εξέτασαν τη μέση μετρούμενη περίοδο  $T_m$  καθώς οι σύνθετες κυματικές καταστάσεις που έλαβαν υπόψη είχαν δυο μέγιστα (αιχμές), συνεπώς δεν ήταν σαφές ποια ήταν η περίοδος αιχμής  $T_p$  της εξεταζόμενης κυματικής κατάστασης.

#### 2.5.3.1 Εκτίμηση σφάλματος του μοντέλου

Για να εκτιμηθεί η καταλληλότητα της προσαρμογής της κατανομής (goodness of fit) στα δεδομένα, χρησιμοποιείται η ευκλείδειος απόσταση  $D^2$ , που είναι η απόκλιση ή αλλιώς το σφάλμα μεταξύ των θεωρητικών κατανομών και της εμπειρικής κατανομής που προκύπτει από τα δεδομένα. Ουσιαστικά μετράει την απόκλιση μεταξύ της θεωρητικής πιθανότητας και της πιθανότητας που προέκυψε από το εμπειρικό μοντέλο. Προτάθηκε από τους Lucas and Guedes Soares (2015) και τους Athanassoulis et al. (1994) και χρησιμοποιήθηκε αντί για το τεστ Kolmogorov-Smirnov αφού το τελευταίο δεν είναι ιδιαίτερα χρήσιμο για μεγάλο αριθμό δεδομένων. Το σφάλμα  $D^2$  ορίζεται όπως φαίνεται παρακάτω:

$$D^2 = \sum_{j=1}^J (p_j - \pi_j)^2, \quad j = 1, 2, \dots, J \quad (2.69)$$

Ο όρος  $p_j$  είναι η πιθανότητα που έχει προκύψει από το στατιστικό μοντέλο (στην περίπτωση της παρούσας εργασίας το μοντέλο δεσμευμένης πιθανότητας), ενώ όρος  $\pi_j = \frac{v_j}{N}$  είναι η θεωρητική πιθανότητα (στην προκειμένη περίπτωση  $p_j$  και  $\pi_j$  είναι οι τιμές της από κοινού πιθανότητας), δηλαδή η σχετική συχνότητα εμφάνισης που προκύπτει από τα αρχικά δεδομένα. Ο δείκτης  $j$  υποδηλώνει ότι αναφερόμαστε σε καθένα στοιχείο (cell) του πίνακα. Παρ' ότι η παραπάνω μέθοδος εκτίμησης του σφάλματος δεν είναι μια τυποποιημένη στατιστική δοκιμασία, η ευκλείδεια απόσταση παρέχει κάποιες αξιόπιστες πληροφορίες σχετικά με την καταλληλότητα των διαφορετικών θεωρητικών κατανομών.



### 3. ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΗΣ ΘΑΣΟΥ

Στο κεφάλαιο αυτό θα παρουσιαστεί λεπτομερειακά η προτεινόμενη μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για την παραγωγή των πιθανοτικών εικόνων που αντιπροσωπεύουν το μακροχρόνιο κυματικό κλίμα. Στις εικόνες αυτές απεικονίζονται οι από κοινού κατανομές των μεταβλητών φόρτισης, δηλαδή του χαρακτηριστικού ύψους  $H_S$  και της μέσης περιόδου  $T_m$ , με τη μορφή καμπυλών ίσης πυκνότητας πιθανότητας, τόσο για τα βαθειά ύδατα όσο και για τα ενδιάμεσα, όπου υπάρχει ένα φανταστικό έργο προστασίας της παράκτιας ζώνης, για τη σχεδίαση του οποίου χρειάζεται η γνώση του κυματικού κλίματος.

Η προτεινόμενη μεθοδολογία αποφασίστηκε να εφαρμοστεί στο Αιγαίο πέλαγος στα βαθειά ύδατα Νοτιοανατολικά της Θάσου (40.5N, 25E). Το σημείο αυτό μεταφέρθηκε στο πρόγραμμα Autocad όπου υπήρχε προσομοίωση του χάρτη της Ελλάδος, και με κέντρο το σημείο αυτό σχεδιάστηκαν οι ακτίνες (με διάστημα 5 μοιρών μεταξύ τους) από τις οποίες υπολογίστηκαν τα ανάπτγματα πελάγους για κάθε κύρια διεύθυνση του ανέμου. Συνολικά υπολογίστηκαν 8 ανάπτγματα πελάγους, όσες είναι δηλαδή και οι κύριες διευθύνσεις του ανέμου. Στη συνέχεια χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις της μεθόδου πρόγνωσης κυματισμών του CEM, υπολογίστηκαν όλα τα ζεύγη  $H_S - T_p$  για κάθε διεύθυνση και κάθε ταχύτητα του ανέμου. Οι εξισώσεις αυτές συσχετίζουν άμεσα τις βασικές παραμέτρους των κυματισμών  $H_S$  και  $T_p$  με το ανάπτγμα πελάγους και τα φυσικά χαρακτηριστικά του ανέμου, που είναι η διεύθυνση και η ταχύτητα του. Με τη βοήθεια των εξισώσεων του φάσματος JONSWAP (εξίσωση 2.7) η περίοδος κορυφής  $T_p$  μετατράπηκε σε μέση περίοδο  $T_m$ . Συνεπώς θεωρήθηκε ότι τα ζεύγη  $H_S - T_m$  που προέκυπταν από τις εξισώσεις πρόγνωσης κυματισμών του CEM, είχαν την ίδια συχνότητα εμφάνισης που είχε και ο άνεμος του οποίου τα χαρακτηριστικά ( ταχύτητα, και ανάπτγμα πελάγους κατά την κύρια διεύθυνση του) εισήχθησαν σαν παράμετροι στις εξισώσεις αυτές.

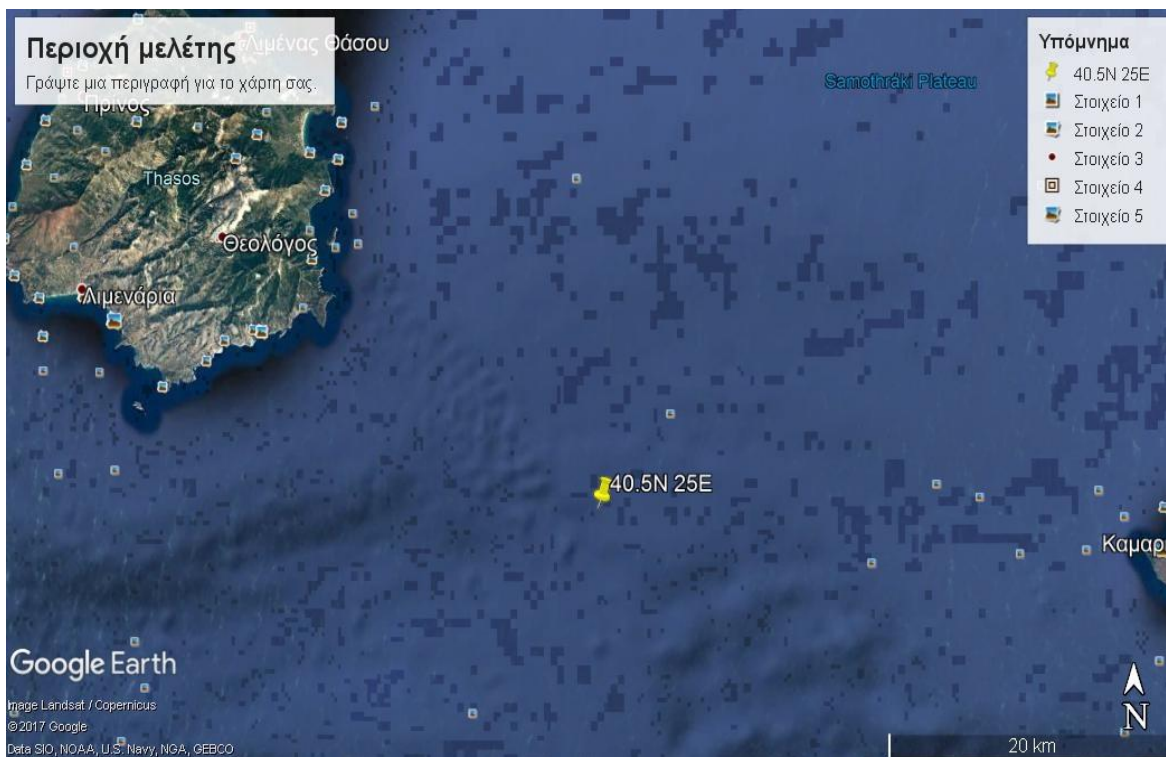
Στη συνέχεια αφού κατασκευάστηκε ένας συνολικός πίνακας για όλους τους ανέμους με τα ζεύγη  $H_S - T_m$  και τις αντίστοιχες από κοινού συχνότητες εμφάνισης τους, θεωρώντας ως δειγματικό χώρο τον πίνακα αυτόν, εφαρμόστηκε το μοντέλο δεσμευμένης πιθανότητας το οποίο δίδει την πιθανοτική εικόνα της σχέσης μεταξύ του χαρακτηριστικού ύψους κύματος και της μέσης περιόδου κύματος, της υπό μελέτη θαλάσσιας περιοχής. Στα πλαίσια της εφαρμογής του, η λογαριθμοκανονική κατανομή και η κατανομή Weibull προσαρμόζονται στις περιθώριες συχνότητες του χαρακτηριστικού ύψους κύματος  $H_S$ , ενώ στις συχνότητες της μέσης περιόδου κύματος δεσμευμένης ως προς το χαρακτηριστικό ύψος  $T_m/H_S$  προσαρμόζεται η λογαριθμοκανονική κατανομή. Στη συνέχεια εφαρμόζεται το ίδιο μοντέλο με τον ίδιο συνδυασμό κατανομών πάνω σε δεδομένα πραγματικών μετρήσεων που είναι δοσμένα σε μορφή πίνακα με τα ζεύγη  $H_S - T_p$  (με τη σειρά του το  $T_p$  μετατράπηκε σε  $T_m$ ) και τις από κοινού συχνότητες εμφάνισης τους, και γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων για τις δυο περιπτώσεις. Τέλος πραγματοποιείται περιγραφή του κυματικού κλίματος στα ενδιάμεσα νερά,

έπειτα από διόδευση των κυματισμών εντός της παράκτιας ζώνης, λαμβάνοντας υπόψη τους μετασχηματισμούς της ρήγωσης και διάθλασης εφαρμόζοντας και πάλι το μοντέλο δεσμευμένης πιθανότητας στα πρωτογενή δεδομένα. Όσον αφορά το βάθος που επιλέχθηκε για τη μελέτη στα αβαθή ύδατα, έγινε έλεγχος ώστε στο συγκεκριμένο βάθος να μην υπάρχει θραύση κανενός κυματισμού.

Η προηγούμενη παράγραφος ήταν μια πολύ σύντομη περιγραφή της μεθοδολογίας που εφαρμόστηκε. Παρακάτω θα πραγματοποιηθεί μια εκτενέστερη περιγραφή της όπου θα παρατεθούν και οι σχετικοί πίνακες ώστε να γίνει περισσότερο κατανοητή.

### 3.1 Υπολογισμός αναπτυγμάτων πελάγους κάθε κύριας διεύθυνσης

Αφού έγινε η επιλογή της περιοχής μελέτης Νοτιοανατολικά της Θάσου (εικόνα 3.1), το σημείο στο οποίο υπολογίστηκαν τα αρχικά χαρακτηριστικά μεγέθη στα βαθιά ύδατα μεταφέρθηκε στο πρόγραμμα Autocad. Εκεί σχεδιάστηκαν ακτίνες ανά 5 μοίρες κυκλικά του σημείου, μέχρι κάθε ακτίνα να έρθει σε επαφή με κάποιο στερεό όριο, με σκοπό τον υπολογισμό των αναπτυγμάτων πελάγους (εικόνα 3.2).



**Εικόνα 3.1** Η περιοχή της Θάσου και το σημείο στο οποίο εφαρμόζεται η μεθοδολογία (Πηγή: Google Earth).





**Εικόνα 3.2** Αναπτύγματα πελάγους γύρω από το σημείο μελέτης( Autocad 2015)

Με πράσινο χρώμα σχεδιάστηκαν όλες οι ακτίνες, εκτός από 8 που επιλέχθηκε διαφορετικό χρώμα καθώς υποδεικνύουν τις κύριες διευθύνσεις των ανέμων. Τα αναπτύγματα πελάγους για κάθε διεύθυνση υπολογίστηκαν ως ο αριθμητικός μέσος όρος των ακτινών που βρίσκονται στον τομέα  $\pm 45^\circ$  μοίρες από κάθε κύρια διεύθυνση. Ο τρόπος αυτός υπολογισμού αποτελεί μέρος της πρόγνωσης κυματισμών με τη μέθοδο του CEM όπως περιγράφηκε στο κεφάλαιο 2. Παρακάτω παρουσιάζονται αναλυτικά οι πίνακες με τους υπολογισμούς των αναπτυγμάτων πελάγους σε κάθε διεύθυνση.

Εναλλακτικά για τον υπολογισμό των αναπτυγμάτων πελάγους θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ο τύπος της μεθόδου πρόγνωσης κυματισμών Wilson:

$$X = \frac{\sum_{i=1}^{19} X_i \cos^2 \theta_i}{\sum_{i=1}^{19} \cos \theta_i} \quad (3.1)$$

Η παραπάνω σχέση χρησιμοποιείται συχνά για τον υπολογισμό του αναπτύματος πελάγους, ωστόσο επιλέχθηκε ο αριθμητικός μέσος όρος καθώς δίνει ελαφρώς μεγαλύτερες τιμές του αναπτύματος πελάγους και θεωρήθηκε ότι είναι περισσότερο <<υπέρ της ασφαλείας>>.

Πίνακας 3.1 Τιμές των αναπτυγμάτων πελάγους σε κάθε κύρια διεύθυνση

Διεύθυνση: B.A

Διεύθυνση: A

Διεύθυνση: N.A

Διεύθυνση: N

ANGLE	R	ANGLE	R	ANGLE	R	ANGLE	R
-45	46880.24	-45	59974.12	-45	139398.9	-45	139922.80
-40	52531.4	-40	61788.13	-40	39724.43	-40	146123.54
-35	55734.07	-35	67975.53	-35	43421.2	-35	65573.51
-30	50883.44	-30	73384.89	-30	114528.5	-30	64873.92
-25	50870.14	-25	87864.24	-25	113528.7	-25	65999.56
-20	52134.06	-20	93900.44	-20	76819.32	-20	59368.66
-15	55621.54	-15	93488.01	-15	72767.24	-15	58472.63
-10	56537.19	-10	93789.50	-10	71686.29	-10	57023.82
-5	57250.51	-5	110006.58	-5	129225.7	-5	334102.79
0	59974.12	0	139398.93	0	139922.8	0	107044.50
5	61788.13	5	39724.43	5	146123.5	5	406000.00
10	67975.53	10	43421.20	10	65573.51	10	184885.09
15	73384.89	15	114528.47	15	64873.92	15	249823.20
20	87864.24	20	113528.73	20	65999.56	20	216671.82
25	93900.44	25	76819.32	25	59368.66	25	222451.58
30	93488.01	30	72767.24	30	58472.63	30	137846.19
35	93789.5	35	71686.29	35	57023.82	35	186908.15
40	110006.6	40	129225.66	40	334102.8	40	216083.78
45	47183.62	45	139922.80	45	107,045	45	202186.12
<b>Fetch</b>	<b>66726.19</b>	<b>Fetch</b>	<b>88589.19</b>	<b>Fetch</b>	<b>99979.26</b>	<b>Fetch</b>	<b>164282.19</b>

Διεύθυνση: N.Δ

Διεύθυνση: Δ

Διεύθυνση: B.Δ

Διεύθυνση: B

ANGLE	R	ANGLE	R	ANGLE	R	ANGLE	R
-45	202186.12	-45	100000	-45	107,045	-45	26150.69
-40	198047.64	-40	102899.1	-40	406000	-40	26738.69
-35	63326.28	-35	112880.6	-35	184885.1	-35	30387.15
-30	64691.22	-30	28044.07	-30	249823.2	-30	43605.57
-25	66365.45	-25	26801.14	-25	216671.8	-25	41738.22
-20	67124.77	-20	24929.3	-20	222451.6	-20	41639.01
-15	70913.46	-15	23115.89	-15	137846.2	-15	43395.32
-10	81150.13	-10	21638.1	-10	186908.2	-10	45729.2
-5	82962.35	-5	23512.62	-5	216083.8	-5	46589.17
0	100000.00	0	26150.69	0	202186.1	0	46880.24
5	102899.12	5	26738.69	5	198047.6	5	52531.4
10	112880.56	10	30387.15	10	63326.28	10	55734.07
15	28044.07	15	43605.57	15	64691.22	15	50883.44
20	26801.14	20	41738.22	20	66365.45	20	50870.14
25	24929.30	25	41639.01	25	67124.77	25	52134.06
30	23115.89	30	43395.32	30	70913.46	30	55621.54
35	21638.10	35	45729.2	35	81150.13	35	56537.19
40	23512.62	40	46589.17	40	82962.35	40	57250.51
45	26150.69	45	46880.24	45	100000	45	59974.12
<b>Fetch</b>	<b>72986.26</b>	<b>Fetch</b>	<b>45088.11</b>	<b>Fetch</b>	<b>153920.1</b>	<b>Fetch</b>	<b>46546.83</b>

## 3.2 Υπολογισμός χαρακτηριστικών μεγεθών στα βαθειά ύδατα

### 3.2.1 Υπολογισμός χαρακτηριστικού ύψους $H_s$ και μέσης περιόδου $T_m$

Αφού έγινε ο υπολογισμός των αναπτυγμάτων πελάγους, η μεθοδολογία συνεχίστηκε με τον υπολογισμό των βασικών παραμέτρων του κυματισμού που είναι τα μεγέθη  $H_s$  και  $T_p$ . Όπως προαναφέρθηκε στο κεφάλαιο 2, βασική παραδοχή της πρόγνωσης των κυματισμών είναι ότι το χαρακτηριστικό κύμα αντιστοιχεί προσεγγιστικά στο φυσικό κύμα. Οι εξισώσεις της μεθόδου πρόγνωσης κυματισμού του CEM που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό των  $H_s$  και  $T_p$  είναι οι (2.13) και (2.16) αντίστοιχα. Παρότι έγινε έλεγχος με βάση τη διάρκεια πνοής του ανέμου  $t_{min}$  για το αν έχουμε συνθήκες περιορισμού του αναπτύγματος πελάγους (Fetch limited) ή συνθήκες περιορισμένης διάρκειας πνοής του ανέμου (duration limited), τελικά θεωρήθηκε ότι για όλους τους συνδυασμούς διεύθυνσης και ταχύτητας ανέμου επικρατούν Fetch limited συνθήκες. Αυτό συνέβη γιατί στην περίπτωση που έχουμε περιορισμό λόγω της διάρκειας πνοής του ανέμου (duration limited) στις εξισώσεις υπεισέρχεται το ισοδύναμο ανάπτυγμα πελάγους, το οποίο προκύπτει βάσει εξίσωσης μικρότερο από το αρχικό που είχε υπολογιστεί (εξίσωση 2.17). Συνεπώς το χαρακτηριστικό ύψος  $H_s$  και η περίοδος κορυφής  $T_p$  που υπολογίζονταν ήταν αρκετά μικρά, κάτι που δεν είναι <<υπέρ της ασφαλείας>> καθώς αποκλείουμε την ύπαρξη κάποιων ακραίων τιμών.

Κατόπιν από τη σχέση του φάσματος Jonswarp (εξίσωση 2.7) υπολογίσθηκαν οι μέσες περίοδοι  $T_m$ . Ο συντελεστής κορυφής ανάλογα με την περίπτωση προσδιορίστηκε από μια από τις εξισώσεις 2.8, 2.9, 2.10. Έτσι για κάθε συνδυασμό διεύθυνσης και ταχύτητας ανέμου προέκυψε ένα ζεύγος  $H_s - T_m$ .

### 3.2.2 Έλεγχος κλίσης του κυματισμού στα βαθειά

Ένας κυματισμός όπως αναφέρθηκε στο δεύτερο κεφάλαιο μπορεί να οδηγηθεί σε θραύση λόγω αστάθειας της γεωμετρίας του εάν ο λόγος καμπυλότητας ή διαφορετικά η κλίση του κυματισμού  $\frac{H}{L}$  ξεπεράσει μια ορισμένη τιμή. Συνεπώς θα πρέπει να πραγματοποιηθεί έλεγχος, έτσι ώστε να μην ληφθούν υπόψη κατά τον πιθανοτικό σχεδιασμό, κυματισμοί οι οποίοι δεν υφίσταται καθώς έχουν οδηγηθεί σε θραύση νωρίτερα. Για τον έλεγχο αυτό στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε το κριτήριο του Michel (1893) όπου ο λόγος καμπυλότητας δεν θα πρέπει να υπερβαίνει την τιμή 0.143 (εξίσωση 2.40).

Αρχικά έγινε υπολογισμός του ' μέσου μήκους '  $L_m$  κάθε κυματισμού στα βαθειά και στη συνέχεια υπολογίστηκε ο λόγος καμπυλότητας. Παρακάτω παρατίθενται οι πίνακες με όλους τους υπολογισμούς και ελέγχους για κάθε συνδυασμό αναπτύγματος πελάγους-ταχύτητας ανέμου.

Πίνακας 3.2 Υπολογισμος βασικών παραμέτρων κυματισμού με Νότια προέλευση

Νότια προέλευση,  $F_{eff}=164.282,2 \text{ m}$

Beauf	U10 (m/s)	U1h (m/s)	Ταχύτητα τριβής $u^*$ (m/s)	Hs (m)	Tp(sec)	Tp/VHs	Όριο Tp/VHs	$\gamma$	Tm	Tm/Tp	Lm	H/L	Έλεγχος καμπυλότητας
0													
1	1.5	1.42852288	0.050922736	<b>0.272</b>	<b>3.110</b>	5.96081	Tp/VHs>=5	1	<b>2.405</b>	0.773471	9.032549	0.030131	H/L<0.1
2	3.3	3.14275034	0.115051271	<b>0.615</b>	<b>4.103</b>	5.23201	3.6<Tp/VHs<5	0.765818	<b>3.136</b>	0.764421	15.35657	0.040041	H/L<0.1
3	5.4	5.14268238	0.193874289	<b>1.036</b>	<b>4.899</b>	4.812912	3.6<Tp/VHs<5	1.240049	<b>3.832</b>	0.782125	22.9239	0.0452	H/L<0.1
4	7.9	7.52355385	0.293099582	<b>1.566</b>	<b>5.638</b>	4.504937	3.6<Tp/VHs<5	1.767069	<b>4.505</b>	0.799062	31.69227	0.049428	H/L<0.1
5	10.7	10.1901299	0.410871641	<b>2.196</b>	<b>6.325</b>	4.267939	3.6<Tp/VHs<5	2.320704	<b>5.149</b>	0.814086	41.3888	0.053056	H/L<0.1
6	13.8	13.1424105	0.549059669	<b>2.934</b>	<b>6.980</b>	4.074479	3.6<Tp/VHs<5	2.898953	<b>5.773</b>	0.827141	52.03831	0.056391	H/L<0.1
7	17.1	16.2851609	0.704739941	<b>3.767</b>	<b>7.598</b>	3.914953	3.6<Tp/VHs<5	3.482687	<b>6.367</b>	0.838009	63.29645	0.059506	H/L<0.1
8	20.7	19.7136158	0.884183242	<b>4.726</b>	<b>8.207</b>	3.775412	Tp/VHs<=3.6	5	<b>7.046</b>	0.858475	77.50439	0.060971	H/L<0.1
9	24.4	23.2373056	1.078579362	<b>5.765</b>	<b>8.781</b>	3.657252	Tp/VHs<=3.6	5	<b>7.538</b>	0.858475	88.71907	0.064975	H/L<0.1
10	28.4	27.0466999	1.299590951	<b>6.946</b>	<b>9.355</b>	3.549785	Tp/VHs<=3.6	5	<b>8.031</b>	0.858475	100.7085	0.068969	H/L<0.1
11	32.6	31.046564	1.543257969	<b>8.248</b>	<b>9.918</b>	3.453512	Tp/VHs<=3.6	5	<b>8.515</b>	0.858475	113.192	0.072867	H/L<0.1

Πίνακας 3.3 Υπολογισμος βασικών παραμέτρων κυματισμού με Νότιοδυτική προέλευση

Νοτιοδυτική προέλευση,  $F_{eff}=153.920,1 \text{ m}$

Beauf	U10 (m/s)	U1h (m/s)	Ταχύτητα τριβής $u^*$ (m/s)	Hs (m)	Tp(sec)	Tp/VHs	Όριο Tp/VHs	$\gamma$	Tm	Tm/Tp	Lm	H/L	Έλεγχος καμπυλότητας
0													
1	1.5	1.42852288	0.050922736	<b>0.263</b>	<b>3.044</b>	5.929822	Tp/VHs>=5	1	<b>2.354</b>	0.773471	8.652378	0.030447	H/L<0.1
2	3.3	3.14275034	0.115051271	<b>0.595</b>	<b>4.015</b>	5.204811	3.6<Tp/VHs<5	0.79015	<b>3.073</b>	0.76539	14.74755	0.040358	H/L<0.1
3	5.4	5.14268238	0.193874289	<b>1.003</b>	<b>4.795</b>	4.787892	3.6<Tp/VHs<5	1.276248	<b>3.756</b>	0.783377	22.02943	0.045528	H/L<0.1
4	7.9	7.52355385	0.293099582	<b>1.516</b>	<b>5.518</b>	4.481518	3.6<Tp/VHs<5	1.815307	<b>4.417</b>	0.800479	30.46613	0.049769	H/L<0.1
5	10.7	10.1901299	0.410871641	<b>2.126</b>	<b>6.190</b>	4.245751	3.6<Tp/VHs<5	2.380679	<b>5.048</b>	0.815558	39.79033	0.053419	H/L<0.1
6	13.8	13.1424105	0.549059669	<b>2.840</b>	<b>6.831</b>	4.053297	3.6<Tp/VHs<5	2.970435	<b>5.660</b>	0.828589	50.02263	0.056783	H/L<0.1
7	17.1	16.2851609	0.704739941	<b>3.646</b>	<b>7.436</b>	3.894601	3.6<Tp/VHs<5	3.565161	<b>6.242</b>	0.839382	60.83119	0.059933	H/L<0.1
8	20.7	19.7136158	0.884183242	<b>4.574</b>	<b>8.033</b>	3.755786	Tp/VHs<=3.6	5	<b>6.896</b>	0.858475	74.24231	0.06161	H/L<0.1
9	24.4	23.2373056	1.078579362	<b>5.580</b>	<b>8.594</b>	3.638239	Tp/VHs<=3.6	5	<b>7.378</b>	0.858475	84.98498	0.065656	H/L<0.1
10	28.4	27.0466999	1.299590951	<b>6.723</b>	<b>9.156</b>	3.531331	Tp/VHs<=3.6	5	<b>7.861</b>	0.858475	96.46978	0.069691	H/L<0.1
11	32.6	31.046564	1.543257969	<b>7.984</b>	<b>9.707</b>	3.435559	Tp/VHs<=3.6	5	<b>8.333</b>	0.858475	108.4279	0.073631	H/L<0.1

Πίνακας 3.4 Υπολογισμος βασικών παραμέτρων κυματισμού με Δυτική προέλευση

Δυτική προέλευση,  $F_{eff}=72.986,26 \text{ m}$

Beauf	U10 (m/s)	U1h (m/s)	Ταχύτητα τριβής $u^*$ (m/s)	Hs (m)	Tp(sec)	Tp/VHs	Όριο Tp/VHs	$\gamma$	Tm	Tm/Tp	Lm	H/L	Έλεγχος καμπυλότητας
0													
1	1.5	1.42852288	0.050922736	<b>0.181</b>	<b>2.379</b>	5.586211	Tp/VHs>=5	1	<b>1.840</b>	0.773471	5.287614	0.034307	H/L<0.1
2	3.3	3.14275034	0.115051271	<b>0.410</b>	<b>3.139</b>	4.903211	3.6<Tp/VHs<5	1.117738	<b>2.442</b>	0.777793	9.306906	0.044037	H/L<0.1
3	5.4	5.14268238	0.193874289	<b>0.691</b>	<b>3.748</b>	4.510451	3.6<Tp/VHs<5	1.755899	<b>2.994</b>	0.798731	13.99543	0.049348	H/L<0.1
4	7.9	7.52355385	0.293099582	<b>1.044</b>	<b>4.314</b>	4.22183	3.6<Tp/VHs<5	2.447079	<b>3.525</b>	0.817155	19.4022	0.053815	H/L<0.1
5	10.7	10.1901299	0.410871641	<b>1.464</b>	<b>4.839</b>	3.999726	3.6<Tp/VHs<5	3.159189	<b>4.027</b>	0.832248	25.32195	0.057802	H/L<0.1
6	13.8	13.1424105	0.549059669	<b>1.956</b>	<b>5.340</b>	3.818423	3.6<Tp/VHs<5	3.891571	<b>4.510</b>	0.844468	31.75262	0.061599	H/L<0.1
7	17.1	16.2851609	0.704739941	<b>2.511</b>	<b>5.813</b>	3.668923	Tp/VHs<=3.6	5	<b>4.991</b>	0.858475	38.8854	0.064562	H/L<0.1
8	20.7	19.7136158	0.884183242	<b>3.150</b>	<b>6.279</b>	3.538152	Tp/VHs<=3.6	5	<b>5.391</b>	0.858475	45.37073	0.069423	H/L<0.1
9	24.4	23.2373056	1.078579362	<b>3.842</b>	<b>6.718</b>	3.427416	Tp/VHs<=3.6	5	<b>5.768</b>	0.858475	51.93575	0.073981	H/L>0.1
10	28.4	27.0466999	1.299590951	<b>4.630</b>	<b>7.158</b>	3.326704	Tp/VHs<=3.6	5	<b>6.145</b>	0.858475	58.9543	0.078528	H/L>0.1
11	32.6	31.046564	1.543257969	<b>5.498</b>	<b>7.589</b>	3.236481	Tp/VHs<=3.6	5	<b>6.515</b>	0.858475	66.2621	0.082968	H/L>0.1

Πίνακας 3.5 Υπολογισμος βασικών παραμέτρων κυματισμού με Νότιοανατολική προέλευση

Νοτιοανατολική προέλευση,  $F_{eff}=99.979,26 \text{ m}$

Beauf	U10 (m/s)	U1h (m/s)	Ταχύτητα τριβής $u^*$ (m/s)	Hs (m)	Tp(sec)	Tp/VHs	Όριο Tp/VHs	$\gamma$	Tm	Tm/Tp	Lm	H/L	Έλεγχος καμπυλότητας
0													
1	1.5	1.42852288	0.050922736	<b>0.212</b>	<b>2.640</b>	5.728631	Tp/VHs>=5	1	<b>2.042</b>	0.773471	6.508204	0.032623	H/L<0.1
2	3.3	3.14275034	0.115051271	<b>0.480</b>	<b>3.483</b>	5.028218	3.6<Tp/VHs<5	0.96807	<b>2.689</b>	0.772273	11.2933	0.042476	H/L<0.1
3	5.4	5.14268238	0.193874289	<b>0.808</b>	<b>4.159</b>	4.625445	3.6<Tp/VHs<5	1.538393	<b>3.294</b>	0.792048	16.93908	0.04772	H/L<0.1
4	7.9	7.52355385	0.293099582	<b>1.222</b>	<b>4.786</b>	4.329466	3.6<Tp/VHs<5	2.162175	<b>3.877</b>	0.810053	23.46767	0.052073	H/L<0.1
5	10.7	10.1901299	0.410871641	<b>1.713</b>	<b>5.368</b>	4.101699	3.6<Tp/VHs<5	2.809613	<b>4.431</b>	0.825284	30.64785	0.055895	H/L<0.1
6	13.8	13.1424105	0.549059669	<b>2.289</b>	<b>5.925</b>	3.915774	3.6<Tp/VHs<5	3.479401	<b>4.965</b>	0.837954	38.48171	0.059489	H/L<0.1
7	17.1	16.2851609	0.704739941	<b>2.938</b>	<b>6.449</b>	3.762462	Tp/VHs<=3.6	5	<b>5.537</b>	0.858475	47.86169	0.061392	H/L<0.1
8	20.7	19.7136158	0.884183242	<b>3.686</b>	<b>6.967</b>	3.628357	Tp/VHs<=3.6	5	<b>5.981</b>	0.858475	55.84408	0.066014	H/L<0.1
9	24.4	23.2373056	1.078579362	<b>4.497</b>	<b>7.454</b>	3.514798	Tp/VHs<=3.6	5	<b>6.399</b>	0.858475	63.92457	0.070348	H/L<0.1
10	28.4	27.0466999	1.299590951	<b>5.418</b>	<b>7.941</b>	3.411518	Tp/VHs<=3.6	5	<b>6.817</b>	0.858475	72.56329	0.074672	H/L<0.1
11	32.6	31.046564	1.543257969	<b>6.434</b>	<b>8.419</b>	3.318995	Tp/VHs<=3.6	5	<b>7.228</b>	0.858475	81.55801	0.078894	H/L<0.1

Πίνακας 3.6 Υπολογισμος βασικών παραμέτρων κυματισμού με Ανατολική προέλευση

Ανατολική προέλευση,  $F_{eff}=88.589,19 \text{ m}$

Beauf	U10 (m/s)	U1h (m/s)	Ταχύτητα τριβής $u^*$ (m/s)	Hs (m)	Tp(sec)	Tp/VHs	Όριο Tp/VHs	$\gamma$	Tm	Tm/Tp	Lm	H/L	Έλεγχος καμπυλότητας
0													
1	1.5	1.42852288	0.050922736	<b>0.200</b>	<b>2.536</b>	5.673467	Tp/VHs>=5	1	<b>1.962</b>	0.773471	6.008857	0.03326	H/L<0.1
2	3.3	3.14275034	0.115051271	<b>0.452</b>	<b>3.346</b>	4.979798	3.6<Tp/VHs<5	1.023504	<b>2.591</b>	0.774346	10.48286	0.043074	H/L<0.1
3	5.4	5.14268238	0.193874289	<b>0.761</b>	<b>3.996</b>	4.580904	3.6<Tp/VHs<5	1.619246	<b>3.175</b>	0.794585	15.73976	0.048342	H/L<0.1
4	7.9	7.52355385	0.293099582	<b>1.150</b>	<b>4.599</b>	4.287775	3.6<Tp/VHs<5	2.268365	<b>3.738</b>	0.812777	21.81308	0.052736	H/L<0.1
5	10.7	10.1901299	0.410871641	<b>1.613</b>	<b>5.158</b>	4.062201	3.6<Tp/VHs<5	2.940175	<b>4.271</b>	0.82798	28.48156	0.056617	H/L<0.1
6	13.8	13.1424105	0.549059669	<b>2.155</b>	<b>5.693</b>	3.878067	3.6<Tp/VHs<5	3.633598	<b>4.785</b>	0.840493	35.74486	0.060285	H/L<0.1
7	17.1	16.2851609	0.704739941	<b>2.766</b>	<b>6.197</b>	3.726231	Tp/VHs<=3.6	5	<b>5.320</b>	0.858475	44.18947	0.062592	H/L<0.1
8	20.7	19.7136158	0.884183242	<b>3.470</b>	<b>6.694</b>	3.593417	Tp/VHs<=3.6	5	<b>5.747</b>	0.858475	51.5594	0.067304	H/L<0.1
9	24.4	23.2373056	1.078579362	<b>4.233</b>	<b>7.162</b>	3.480952	Tp/VHs<=3.6	5	<b>6.148</b>	0.858475	59.01991	0.071723	H/L<0.1
10	28.4	27.0466999	1.299590951	<b>5.100</b>	<b>7.630</b>	3.378666	Tp/VHs<=3.6	5	<b>6.551</b>	0.858475	66.99581	0.076132	H/L<0.1
11	32.6	31.046564	1.543257969	<b>6.057</b>	<b>8.090</b>	3.287034	Tp/VHs<=3.6	5	<b>6.945</b>	0.858475	75.30041	0.080435	H/L<0.1

Πίνακας 3.7 Υπολογισμος βασικών παραμέτρων κυματισμού με Βόρεια προέλευση

Βόρεια προέλευση,  $F_{eff}=46.546,83 \text{ m}$

Beauf	U10 (m/s)	U1h (m/s)	Ταχύτητα τριβής $u^*$ (m/s)	Hs (m)	Tp(sec)	Tp/VHs	Όριο Tp/VHs	$\gamma$	Tm	Tm/Tp	Lm	H/L	Έλεγχος καμπυλότητας
0													
1	1.5	1.42852288	0.050922736	<b>0.145</b>	<b>2.051</b>	5.388765	Tp/VHs>=5	1	<b>1.586</b>	0.773471	3.929416	0.036868	H/L<0.1
2	3.3	3.14275034	0.115051271	<b>0.327</b>	<b>2.706</b>	4.729906	3.6<Tp/VHs<5	1.364254	<b>2.128</b>	0.786365	7.069603	0.046297	H/L<0.1
3	5.4	5.14268238	0.193874289	<b>0.552</b>	<b>3.231</b>	4.351028	3.6<Tp/VHs<5	2.109219	<b>2.613</b>	0.808659	10.66067	0.051736	H/L<0.1
4	7.9	7.52355385	0.293099582	<b>0.834</b>	<b>3.719</b>	4.072609	3.6<Tp/VHs<5	2.905193	<b>3.077</b>	0.827269	14.7776	0.056425	H/L<0.1
5	10.7	10.1901299	0.410871641	<b>1.169</b>	<b>4.171</b>	3.858355	3.6<Tp/VHs<5	3.716908	<b>3.512</b>	0.841813	19.2527	0.060712	H/L<0.1
6	13.8	13.1424105	0.549059669	<b>1.562</b>	<b>4.604</b>	3.68346	Tp/VHs<=3.6	5	<b>3.952</b>	0.858475	24.38578	0.064054	H/L<0.1
7	17.1	16.2851609	0.704739941	<b>2.005</b>	<b>5.011</b>	3.539244	Tp/VHs<=3.6	5	<b>4.302</b>	0.858475	28.89715	0.06938	H/L<0.1
8	20.7	19.7136158	0.884183242	<b>2.515</b>	<b>5.413</b>	3.413095	Tp/VHs<=3.6	5	<b>4.647</b>	0.858475	33.71662	0.074603	H/L<0.1
9	24.4	23.2373056	1.078579362	<b>3.068</b>	<b>5.792</b>	3.306274	Tp/VHs<=3.6	5	<b>4.972</b>	0.858475	38.59533	0.079502	H/L<0.1
10	28.4	27.0466999	1.299590951	<b>3.697</b>	<b>6.170</b>	3.209121	Tp/VHs<=3.6	5	<b>5.297</b>	0.858475	43.81107	0.084389	H/L<0.1
11	32.6	31.046564	1.543257969	<b>4.390</b>	<b>6.542</b>	3.122087	Tp/VHs<=3.6	5	<b>5.616</b>	0.858475	49.24175	0.089159	H/L<0.1

Πίνακας 3.8 Υπολογισμος βασικών παραμέτρων κυματισμού με Βόρειοανατολική προέλευση

Βορειοανατολική προέλευση,  $F_{eff}=66.727,2 \text{ m}$

Beauf	U10 (m/s)	U1h (m/s)	Ταχύτητα τριβής $u^*$ (m/s)	Hs (m)	Tp(sec)	Tp/VHs	Όριο Tp/VHs	$\gamma$	Tm	Tm/Tp	Lm	H/L	Έλεγχος καμπυλότητας
0													
1	1.5	1.42852288	0.050922736	<b>0.173</b>	<b>2.310</b>	5.54628	Tp/VHs>=5	1	<b>1.787</b>	0.773471	4.983749	0.034803	H/L<0.1
2	3.3	3.14275034	0.115051271	<b>0.392</b>	<b>3.047</b>	4.868162	3.6<Tp/VHs<5	1.163711	<b>2.375</b>	0.77944	8.809254	0.044485	H/L<0.1
3	5.4	5.14268238	0.193874289	<b>0.660</b>	<b>3.639</b>	4.478209	3.6<Tp/VHs<5	1.822227	<b>2.914</b>	0.80068	13.25562	0.049818	H/L<0.1
4	7.9	7.52355385	0.293099582	<b>0.998</b>	<b>4.188</b>	4.191652	3.6<Tp/VHs<5	2.533497	<b>3.431</b>	0.819182	18.37804	0.054322	H/L<0.1
5	10.7	10.1901299	0.410871641	<b>1.399</b>	<b>4.698</b>	3.971135	3.6<Tp/VHs<5	3.264788	<b>3.919</b>	0.834197	23.97869	0.058364	H/L<0.1
6	13.8	13.1424105	0.549059669	<b>1.870</b>	<b>5.185</b>	3.791129	3.6<Tp/VHs<5	4.015662	<b>4.388</b>	0.846267	30.05554	0.062224	H/L<0.1
7	17.1	16.2851609	0.704739941	<b>2.400</b>	<b>5.644</b>	3.642697	Tp/VHs<=3.6	5	<b>4.845</b>	0.858475	36.65077	0.065495	H/L<0.1
8	20.7	19.7136158	0.884183242	<b>3.012</b>	<b>6.096</b>	3.51286	Tp/VHs<=3.6	5	<b>5.233</b>	0.858475	42.7634	0.070426	H/L<0.1
9	24.4	23.2373056	1.078579362	<b>3.674</b>	<b>6.522</b>	3.402917	Tp/VHs<=3.6	5	<b>5.599</b>	0.858475	48.95115	0.07505	H/L<0.1
10	28.4	27.0466999	1.299590951	<b>4.427</b>	<b>6.949</b>	3.302924	Tp/VHs<=3.6	5	<b>5.966</b>	0.858475	55.56636	0.079663	H/L<0.1
11	32.6	31.046564	1.543257969	<b>5.257</b>	<b>7.367</b>	3.213346	Tp/VHs<=3.6	5	<b>6.325</b>	0.858475	62.4542	0.084167	H/L<0.1

Πίνακας 3.9 Υπολογισμος βασικών παραμέτρων κυματισμού με Βόρειοανατολική προέλευση

Βορειοδυτική προέλευση,  $F_{eff}=45.088,1 \text{ m}$

Beauf	U10 (m/s)	U1h (m/s)	Ταχύτητα τριβής $u^*$ (m/s)	Hs (m)	Tp(sec)	Tp/VHs	Όριο Tp/VHs	$\gamma$	Tm	Tm/Tp	Lm	H/L	Έλεγχος καμπυλότητας
0													
1	1.5	1.42852288	0.050922736	<b>0.143</b>	<b>2.030</b>	5.375056	Tp/VHs>=5	1	<b>1.570</b>	0.773471	3.847703	0.037056	H/L<0.1
2	3.3	3.14275034	0.115051271	<b>0.322</b>	<b>2.678</b>	4.717873	3.6<Tp/VHs<5	1.383264	<b>2.107</b>	0.787	6.933773	0.046459	H/L<0.1
3	5.4	5.14268238	0.193874289	<b>0.543</b>	<b>3.198</b>	4.339959	3.6<Tp/VHs<5	2.136239	<b>2.588</b>	0.809373	10.45742	0.051909	H/L<0.1
4	7.9	7.52355385	0.293099582	<b>0.821</b>	<b>3.680</b>	4.062248	3.6<Tp/VHs<5	2.940015	<b>3.047</b>	0.827977	14.49507	0.056616	H/L<0.1
5	10.7	10.1901299	0.410871641	<b>1.150</b>	<b>4.128</b>	3.848539	3.6<Tp/VHs<5	3.759102	<b>3.478</b>	0.842468	18.88169	0.060927	H/L<0.1
6	13.8	13.1424105	0.549059669	<b>1.537</b>	<b>4.555</b>	3.67409	Tp/VHs<=3.6	5	<b>3.911</b>	0.858475	23.87867	0.064381	H/L<0.1
7	17.1	16.2851609	0.704739941	<b>1.973</b>	<b>4.959</b>	3.53024	Tp/VHs<=3.6	5	<b>4.257</b>	0.858475	28.29622	0.069734	H/L<0.1
8	20.7	19.7136158	0.884183242	<b>2.476</b>	<b>5.357</b>	3.404412	Tp/VHs<=3.6	5	<b>4.598</b>	0.858475	33.01547	0.074984	H/L<0.1
9	24.4	23.2373056	1.078579362	<b>3.020</b>	<b>5.731</b>	3.297863	Tp/VHs<=3.6	5	<b>4.920</b>	0.858475	37.79273	0.079908	H/L<0.1
10	28.4	27.0466999	1.299590951	<b>3.639</b>	<b>6.106</b>	3.200957	Tp/VHs<=3.6	5	<b>5.242</b>	0.858475	42.9	0.08482	H/L<0.1
11	32.6	31.046564	1.543257969	<b>4.321</b>	<b>6.473</b>	3.114144	Tp/VHs<=3.6	5	<b>5.557</b>	0.858475	48.21775	0.089614	H/L<0.1

### 3.3 Δημιουργία πινάκων από κοινού συχνοτήτων με βάση τα ανεμολογικά δεδομένα

Η μέθοδος πρόγνωσης κυματισμού του CEM, (όπως και οι υπόλοιπες μέθοδοι πρόγνωσης κυματισμών), από την οποία υπολογίστηκαν τα ζεύγη χαρακτηριστικού ύψους  $H_s$  και μέσης περιόδου  $T_m$  εφαρμόζεται για τη βραχυχρόνια περιγραφή μια θαλάσσιας κατάστασης. Η μακροχρόνια περιγραφή όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 2 επιτυγχάνεται με τον προσδιορισμό των κυματικών διαταραχών σε μια περιοχή, για το σύνολο των εμφανιζόμενων ανέμων σε ευρέα χρονικά διαστήματα. Στην παρούσα εργασία εξετάζεται το μακροχρόνιο κυματικό κλίμα, δηλαδή μας ενδιαφέρει να γνωρίζουμε τις από κοινού συχνότητες εμφάνισης των  $H_s$  και  $T_m$  για ένα μεγάλο χρονικό διάστημα.

Η προσπάθεια περιγραφής του μακροχρόνιου κυματικού κλίματος βασίζεται σε πραγματικές μετρήσεις διάρκειας 5-10 ετών, στις οποίες γίνεται συλλογή δεδομένων από κατάλληλα μετρητικά όργανα και στη συνέχεια με στατιστική επεξεργασία προκύπτουν τα χαρακτηριστικά μεγέθη. Στην παρούσα εργασία όμως γίνεται μια διαφορετική προσέγγιση καθώς γίνεται προσπάθεια περιγραφής του κυματικού κλίματος συνδυάζοντας τη μέθοδο πρόβλεψης κυματισμών. Για το σκοπό αυτό γίνεται η παραδοχή ότι τα ζεύγη  $H_s$  και  $T_m$  που υπολογίστηκαν από τις εξισώσεις μεθόδου πρόγνωσης του CEM, έχουν από κοινού συχνότητα εμφάνισης ίδια με τη συχνότητα του ανέμου από τον οποίον έχουν προέλθει. Κάθε άνεμος ανάλογα με την διεύθυνση και την ταχύτητα του έχει μια μέση ετήσια συχνότητα εμφάνισης η οποία έχει προκύψει από τη εθνική μετεωρολογική υπηρεσία ύστερα από δεδομένα πολλών ετών. Συνεπώς η παραδοχή αυτή μας οδηγεί στο να θεωρήσουμε ότι οι από κοινού συχνότητες εμφάνισης των  $H_s$  και  $T_m$  αφορούν το ίδιο ευρύ χρονικό διάστημα με αυτό των ανεμολογικών δεδομένων και κατά συνέπεια η μελέτη που πραγματοποιείται αφορά τη μακροχρόνια περιγραφή του κυματικού κλίματος. Το άθροισμα των συχνοτήτων για όλους τους συνδυασμούς διευθύνσεων και ταχυτήτων των ανέμων είναι 100.

Ένας ανεμογενής κυματισμός σε ένα σημείο δεν είναι αποτέλεσμα των ανέμων που πνέουν πάνω από εκείνο το σημείο ή σε κάποια πολύ κοντινή περιοχή. Συνεπώς κατά το σχεδιασμό ενός έργου προστασίας της παράκτιας ζώνης σε μια περιοχή, ή κατά τη μελέτη του κυματικού κλίματος με βάση τα ανεμολογικά δεδομένα όπως στην παρούσα εργασία, τα ανεμολογικά δεδομένα που λαμβάνονται υπόψη δεν πρέπει να είναι της υπό μελέτη περιοχής, αλλά κάποιας πιο μακρινής περιοχής που μεταξύ τους θα υπάρχει ανάπτυγμα πελάγους ικανό ώστε να αναπτυχθεί ο κυματισμός. Για να είναι η μελέτη όσο πιο ακριβής και ορθή γίνεται καλό θα είναι να ληφθούν υπόψη ανεμολογικά δεδομένα από διαφορετικές περιοχές ανάλογα με τη διεύθυνση του ανέμου.

Στην παρούσα εργασία για το σημείο που βρίσκεται Νοτιοανατολικά της Θάσου εξετάστηκαν τρεις διαφορετικές περιπτώσεις ανεμολογικών δεδομένων α) ανεμολογικά δεδομένα της



περιοχής της Λήμνου β) συνδυασμένα ανεμολογικά της Λήμνου και της Αλεξανδρούπολης γ) συνδυασμένα ανεμολογικά Λήμνου-Αλεξανδρούπολης-Καβάλας. Ο λόγος που εξετάστηκαν οι τρεις διαφορετικές περιπτώσεις είναι για τη μετέπειτα σύγκριση των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από την εφαρμογή του μοντέλου δεσμευμένης πιθανότητας στα ιστογράμματα συχνοτήτων (περιθωρίων συχνοτήτων  $H_s$  και  $T_m/H_s$ ) που βασίζονται σε ανεμολογικά δεδομένα, με τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την εφαρμογή του ίδιου μοντέλου στα πρωτογενή δεδομένα πραγματικών μετρήσεων στο ίδιο σημείο.

### 3.3.1 Ανεμολογικά δεδομένα της Λήμνου

Στην πρώτη περίπτωση λάβαμε υπόψη τα ανεμολογικά δεδομένα της περιοχής της Λήμνου που βρίσκεται περίπου 100 χιλιόμετρα Νοτιότερα από το σημείο μελέτης. Θεωρήσαμε δηλαδή, ότι η από κοινού συχνότητα εμφάνισης των ζευγών  $H_s - T_m$  που προκύπτουν για τους διάφορους κυματισμούς στο σημείο μελέτης, ταυτίζεται με τις αντίστοιχες συχνότητες των ανέμων που πνέουν στην περιοχή της Λήμνου. Για παράδειγμα, ένα χαρακτηριστικό ύψος  $H_s$  και μια μέση περίοδος  $T_m$  που υπολογίσθηκαν με βάση το ανάπτυσμα πελάγους Νότια του σημείου και με μια ταχύτητα ανέμου 3 beaufort, έχουν από κοινού συχνότητα εμφάνισης ίδια με του Νότιου ανέμου ταχύτητας 3 beaufort που πνέει στην περιοχή της Λήμνου. Παρακάτω παρατίθεται ο πίνακας με τις μέσες ετήσιες συχνότητες εμφάνισης όλων των ανέμων. Να σημειωθεί ότι η περίπτωση της νηνεμίας η οποία δεν δημιουργεί κύμα δεν έχει ληφθεί υπόψη, και το ποσοστό της νηνεμίας στον αρχικό πίνακα των ανεμολογικών δεδομένων έχει ανακατανομηθεί ομοιόμορφα στις υπόλοιπες συχνότητες.

**Πίνακας 3.10** Ανεμολογικά δεδομένα της Λήμνου όπως προέκυψαν από την EMY

Διεύθυνση Ανέμου	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	SUM
Beaufort 0	0	0.002355	0	0	0	0	0	0	0.002355
Beaufort 1	0.758996	0.459119	0.241513	0.151713	0.384521	0.152684	0.222964	0.420071	2.791581
Beaufort 2	6.889137	6.155761	1.727592	0.72371	3.508014	1.11477	0.625565	1.2567	22.00125
Beaufort 3	7.327721	9.265149	1.798519	0.607487	5.748339	1.087454	0.640635	1.189103	27.66441
Beaufort 4	5.182228	12.86147	1.025121	0.450358	5.521216	0.778901	0.465728	0.582248	26.86727
Beaufort 5	1.505169	7.721953	0.189727	0.140711	2.170053	0.170315	0.162182	0.140094	12.2002
Beaufort 6	0.582466	3.856973	0.087193	0.064812	1.163564	0.061534	0.060666	0.037377	5.914585
Beaufort 7	0.243564	1.182653	0.018653	0.023139	0.313504	0.014	0.006973	0.005815	1.808301
Beaufort 8	0.092183	0.426396	0.003451	0.009289	0.098822	0.001174	0	0	0.631315
Beaufort 9	0.014095	0.088392	0.001151	0	0.013955	0	0.001145	0	0.118738
Beaufort 10	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Beaufort >11	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>SUM</b>	<b>22.59556</b>	<b>42.02022</b>	<b>5.09292</b>	<b>2.171219</b>	<b>18.92199</b>	<b>3.380832</b>	<b>2.185859</b>	<b>3.631406</b>	<b>100</b>

Ο πίνακας αυτός έχει προκύψει από την εθνική μετεωρολογική υπηρεσία και αφορά μια περίοδο διάρκειας 40 ετών. Επομένως οι από κοινού συχνότητες εμφάνισης των ζευγών  $H_s - T_m$  που προέκυψαν βασιζόμενοι σε αυτά τα ανεμολογικά δεδομένα αφορούν την ίδια χρονική περίοδο. Αυτή η παραδοχή έγινε όπως προαναφέρθηκε διότι η παρούσα εργασία ενδιαφέρεται για τη μακροχρόνια μελέτη του κυματικού κλίματος.

### 3.3.1.1 Δημιουργία πινάκων άνισου πλάτους

Οι άνεμοι ωστόσο δεν πνέουν πάντοτε με ταχύτητα ακέραιου αριθμού beaufort, δηλαδή 1,2,3,...11 αλλά μπορούν να πνέουν και με τιμές ενδιάμεσες αυτών. Επομένως για τις ανάγκες της εργασίας μπορούμε να υποθέσουμε ότι οι συχνότητες του παραπάνω πίνακα δεν αφορούν τις ακέραιες τιμές των ταχυτήτων, αλλά τα μεταξύ τους διαστήματα. Για παράδειγμα, ο άνεμος με Νότια προέλευση (S) που έχει ταχύτητα από 2-3 beaufort έχει συχνότητα εμφάνισης 5.758 φορές στις 100. Το διάστημα είναι κλειστό για την μικρή τιμή και ανοιχτό για τη μεγάλη, δηλαδή [2, 3) Ομοίως γίνεται και για όλους του υπόλοιπους ανέμους, δηλαδή για κάθε άνεμο έχουμε 11 διαστήματα με τις αντίστοιχες συχνότητες εμφάνισης όπως φαίνονται στον πίνακα.

Με βάση τα αναπτύγματα πελάγους και τις ταχύτητες των ανέμων όπως παρουσιάζεται στους πίνακες 3.2-3.9 υπολογίστηκαν το χαρακτηριστικό ύψος  $H_s$  και η μέση περίοδος  $T_m$ . Επομένως όπως οι συχνότητες εμφάνισης των ανέμων αφορούν τις τιμές μέσα στα διαστήματα με άκρα τις ακέραιες τιμές των ταχυτήτων τους όπως περιγράφηκε παραπάνω, έτσι μπορούμε να θεωρήσουμε διαστήματα και για τα ζεύγη  $H_s$  και  $T_m$  με από κοινού συχνότητα εμφάνισης τους τις αντίστοιχες των διαστημάτων των ταχυτήτων των ανέμων. Δηλαδή, η συχνότητα εμφάνισης 'κυματισμών' με χαρακτηριστικά ύψη μεταξύ  $H_s = 0.615 - 1.036$  και μέσες περιόδους  $T_m = 4.104 - 4.899$  (πίνακας 3.2), που είναι οι τιμές των  $H_s$  και  $T_m$  που υπολογίστηκαν με βάση το Νότιο ανάπτυγμα πελάγους και για ταχύτητες 2 και 3 beaufort αντίστοιχα, είναι 5.748 φορές στις 100, όση είναι δηλαδή η συχνότητα εμφάνισης Νότιου ανέμου με ταχύτητα από 2-3 beaufort.

Να αναφερθεί ότι το χαρακτηριστικό ύψος όπως εξεξηγήθηκε και στο δεύτερο κεφάλαιο είναι στατιστικό μέγεθος που προκύπτει από χρονοσειρά, όπου υπάρχουν πολλά επιμέρους κύματα με διαφορετικά ύψη  $H$  και περιόδους  $T$ . Ο όρος 'κυματισμός' με χαρακτηριστικό ύψος και μέση περίοδο που χρησιμοποιείται στην προηγούμενη παράγραφο έγκειται αποκλειστικά στη βασική παραδοχή του μοντέλου πρόγνωσης κυματισμών, ότι το χαρακτηριστικό κύμα αντιστοιχεί προσεγγιστικά στο φυσικό κύμα.

Με βάση τις παραπάνω παραδοχές, κατασκευάστηκαν για κάθε διεύθυνση άνεμου δισδιάστατοι πίνακες με τις από κοινού συχνότητες εμφάνισης του χαρακτηριστικού ύψους κύματος  $H_s$  και της μέσης περιόδου  $T_m$ . Θεωρήθηκαν κλάσεις άνισου πλάτους για τα  $H_s$  και  $T_m$  με άκρα κάθε κλάσης τις τιμές τους όπως υπολογίστηκαν και φαίνονται στους πίνακες 3.2-3.9. Το συνολικό

άθροισμα των συχνοτήτων των ανέμων, και συνεπώς και των γεγονότων  $H_s$  και  $T_m$  είναι 100. Στην παρούσα εργασία έγινε αναγωγή του δειγματικού χώρου στα 1000 (απλώς κάθε συχνότητα απλά πολλαπλασιάστηκε επί 10). Ο λόγος που έγινε αυτό είναι για να γίνει πιο αντιληπτή η σύγκριση που θα πραγματοποιηθεί αργότερα με δεδομένα από πραγματικές μετρήσεις στο ίδιο σημείο, όπου ο συνολικός πίνακας έχει 995 ζεύγη παρατηρήσεων  $H_s$  και  $T_m$ . Επιπλέον λόγω του ότι μας διευκολύνει οι από κοινού συχνότητες να είναι ακέραιοι αριθμοί, έγινε στρογγυλοποίηση σε κάθε συχνότητα προς τον άνω ακέραιο αριθμό. Για παράδειγμα, , μια συχνότητα εμφάνισης 0.67/100, έγινε 6.7/1000 και με τη στρογγυλοποίηση 7/1000.

Για να γίνει πιο αντιληπτό αυτό που περιγράφηκε, παρατίθενται παρακάτω οι πίνακες με τις κλάσεις άνισου πλάτους για τα  $H_s$  και  $T_m$  και τις από κοινού συχνότητες εμφάνισης τους για κάθε διεύθυνση ανέμου. Πρόκειται για διαγώνιους πίνακες αφού τα ζεύγη  $H_s$  και  $T_m$  σε κάθε πίνακα προέκυψαν μονοσήμαντα (εξισώσεις 2.13, 2.16) από συγκεκριμένο σταθερό ανάπτυγμα πελάγους και ταχύτητες ανέμων που ακολουθούσαν αύξουσα πορεία (από 1-11 beaufort)

**Πίνακας 3.11** Από κοινού συχνότητες εμφάνισης του χαρακτηριστικού ύψους και της μέσης περιόδου διαμορφωμένα σε πίνακα κλάσεων άνισου πλάτους για κυματισμούς Νότιας προέλευσης

Κλάσεις της $T_m$	Κλάσεις του $H_s$								Total
	0 0.272	0.272 0.615	0.615 1.036	1.036 1.566	1.566 2.196	2.196 2.934	2.934 3.767	3.767 4.726	
0 - 2.405	4	0	0	0	0	0	0	0	4
2.405- 3.136	0	36	0	0	0	0	0	0	36
3.136-3.832	0	0	58	0	0	0	0	0	58
3.832 - 4.505	0	0	0	56	0	0	0	0	56
4.505 -5.149	0	0	0	0	22	0	0	0	22
5.149 - 5.773	0	0	0	0	0	12	0	0	12
5.773 - 6.367	0	0	0	0	0	0	4	0	4
6.367 - 7.046	0	0	0	0	0	0	0	1	1
Total	4	36	58	56	22	12	4	1	193

**Πίνακας 3.12** Από κοινού συχνότητες εμφάνισης του χαρακτηριστικού ύψους και της μέσης περιόδου διαμορφωμένα σε πίνακα κλάσεων άνισου πλάτους για κυματισμούς Νοτιοδυτικής προέλευσης

Κλάσεις της $T_m$	Κλάσεις του $H_s$						Total
	0 0.263	0.263 0.595	0.595 1.003	1.003 1.516	1.516 2.126	2.126 2.840	
0 - 2.354	2	0	0	0	0	0	2
2.354 - 3.073	0	12	0	0	0	0	12
3.073 - 3.756	0	0	11	0	0	0	11
3.756 - 4.417	0	0	0	8	0	0	8
4.417 - 5.048	0	0	0	0	2	0	2
5.048- 5.660	0	0	0	0	0	1	1
Total	2	12	11	8	2	1	36

**Πίνακας 3.13** Από κοινού συχνότητες εμφάνισης του χαρακτηριστικού ύψους και της μέσης περιόδου διαμορφωμένα σε πίνακα κλάσεων άνισου πλάτους για κυματισμούς Δυτικής προέλευσης

κλάσεις της $T_m$	κλάσεις του $H_s$						Total
	0 0.181	0.181 0.410	0.410 0.691	0.691 1.044	1.044 1.464	1.464 1.956	
0 - 1.678	3	0	0	0	0	0	3
1.678 - 2.270	0	7	0	0	0	0	7
2.270- 2.789	0	0	7	0	0	0	7
2.789 - 3.282	0	0	0	5	0	0	5
3.282 - 3.743	0	0	0	0	2	0	2
3.743 - 4.184	0	0	0	0	0	1	1
Total	3	7	7	5	2	1	25

**Πίνακας 3.14** Από κοινού συχνότητες εμφάνισης του χαρακτηριστικού ύψους και της μέσης περιόδου διαμορφωμένα σε πίνακα κλάσεων άνισου πλάτους για κυματισμούς Νοτιοανατολικής προέλευσης

κλάσεις της $T_m$	κλάσεις του $H_s$						Total
	0 0.212	0.212 0.480	0.480 0.808	0.808 1.222	1.222 1.713	1.713 2.289	
0 - 2.042	2	0	0	0	0	0	2
2.042- 2.689	0	8	0	0	0	0	8
2.689 - 3.294	0	0	7	0	0	0	7
3.294- 3.877	0	0	0	5	0	0	5
3.877 - 4.431	0	0	0	0	2	0	2
4.431- 4.965	0	0	0	0	0	1	1
Total	2	8	7	5	2	1	25

**Πίνακας 3.15** Από κοινού συχνότητες εμφάνισης του χαρακτηριστικού ύψους και της μέσης περιόδου διαμορφωμένα σε πίνακα κλάσεων άνισου πλάτους για κυματισμούς Ανατολικής προέλευσης

Κλάσεις της $T_m$	Κλάσεις του $H_s$						Total
	0 0.200	0.190 0.452	0.429 0.761	0.722 1.150	1.092 1.613	1.531 2.155	
0 - 1.962	3	0	0	0	0	0	3
1.962 - 2.591	0	18	0	0	0	0	18
2.591 - 3.175	0	0	18	0	0	0	18
3.175 - 3.738	0	0	0	11	0	0	11
3.738 - 4.271	0	0	0	0	2	0	2
4.271 - 4.785	0	0	0	0	0	1	1
Total	3	18	18	11	2	1	53

**Πίνακας 3.16** Από κοινού συχνότητες εμφάνισης του χαρακτηριστικού ύψους και της μέσης περιόδου διαμορφωμένα σε πίνακα κλάσεων άνισου πλάτους για κυματισμούς Βόρειας προέλευσης

Κλάσεις της $T_m$	Κλάσεις του $H_s$								Total
	0 0.145	0.145 0.327	0.327 0.552	0.552 0.834	0.834 1.169	1.169 1.562	1.562 2.005	2.005 2.515	
0 - 1.586	8	0	0	0	0	0	0	0	8
1.586- 2.128	0	69	0	0	0	0	0	0	69
2.128 - 2.613	0	0	74	0	0	0	0	0	74
2.613 - 3.077	0	0	0	52	0	0	0	0	52
3.077 - 3.512	0	0	0	0	16	0	0	0	16
3.512 - 3.952	0	0	0	0	0	6	0	0	6
3.952 - 4.302	0	0	0	0	0	0	3	0	3
4.302 - 4.647	0	0	0	0	0	0	0	1	1
Total	8	69	74	52	16	6	3	1	229

**Πίνακας 3.17** Από κοινού συχνότητες εμφάνισης του χαρακτηριστικού ύψους και της μέσης περιόδου διαμορφωμένα σε πίνακα κλάσεων άνισου πλάτους για κυματισμούς Βορειανατολικής προέλευσης

Κλάσεις της $T_m$	Κλάσεις του $H_s$										Total
	0	0.173	0.392	0.660	0.998	1.399	1.870	2.400	3.012		
	0.173	0.392	0.660	0.998	1.399	1.870	2.400	3.012	3.674		
0 - 1.787	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5
1.787 - 2.375	0	62	0	0	0	0	0	0	0	0	62
2.375- 2.914	0	0	93	0	0	0	0	0	0	0	93
2.914 - 3.431	0	0	0	129	0	0	0	0	0	0	129
3.431 - 3.919	0	0	0	0	78	0	0	0	0	0	78
3.919- 4.388	0	0	0	0	0	39	0	0	0	0	39
4.388 - 4.845	0	0	0	0	0	0	12	0	0	0	12
4.845 - 5.233	0	0	0	0	0	0	0	5	0	0	5
5.233-5.599	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
Total	5	62	93	129	78	39	12	5	1		424

**Πίνακας 3.18** Από κοινού συχνότητες εμφάνισης του χαρακτηριστικού ύψους και της μέσης περιόδου διαμορφωμένα σε πίνακα κλάσεων άνισου πλάτους για κυματισμούς Βορειοδυτικής προέλευσης

Κλάσεις της $T_m$	Κλάσεις του $H_s$					Total
	0	0.143	0.322	0.543	0.821	
	0.143	0.322	0.543	0.821	1.150	
0 - 1.57	5	0	0	0	0	5
1.57- 2.107	0	13	0	0	0	13
2.107- 2.588	0	0	12	0	0	12
2.588 - 3.047	0	0	0	6	0	6
3.047-3.478	0	0	0	0	2	2
Total	5	13	12	6	2	38

### 3.3.1.2 Δημιουργία πινάκων σταθερού πλάτους

Για την παραγωγή των πιθανοτικών εικόνων είναι αναγκαία η δημιουργία ενός συνολικού πίνακα στον οποίο θα φαίνονται οι από κοινού συχνότητες εμφάνισης των  $H_s$  και  $T_m$  που θα προέρχονται από όλες τις κατευθύνσεις και για όλες τις ταχύτητες των ανέμων. Για τη δημιουργία του πίνακα αυτού, πρώτα έγινε ανακατανομή των από κοινού συχνοτήτων σε κλάσεις των  $H_s$  και  $T_m$  μικρότερου και σταθερού εύρους, για κάθε διεύθυνση ανέμου. Δηλαδή

κάθε ένας από του 8 παραπάνω πίνακες 3.11-3.18 τροποποιήθηκε και μετατράπηκε σε πίνακα, όπου οι νέες κλάσεις του  $H_s$  έχουν σταθερό εύρος 0.25, όπως και της μέσης περιόδου  $T_m$  έχουν επίσης σταθερό εύρος 0.25. Αντιπροσωπευτικές πλέον θεωρούνται οι μέσες-κεντρικές τιμές κάθε διαστήματος  $H_s$  και  $T_m$ .

Αφού κατασκευαστούν 8 νέοι πίνακες, για κάθε διεύθυνση ανέμου, με τις από κοινού συχνότητες εμφάνισης των κεντρικών τιμών των κλάσεων σταθερού εύρους του χαρακτηριστικού ύψους κύματος  $H_s$  και της μέσης περιόδου  $T_m$ , οι από κοινού συχνότητες αθροίστηκαν κατά κελί. Οι 8 αυτοί νέοι πίνακες δεν είναι ίσων διαστάσεων, αφού όπως φαίνεται και στους πίνακες άνισου πλάτους οι ακραίες τιμές των  $H_s$  και  $T_m$  διαφέρουν σε κάθε διεύθυνση, με μεγαλύτερες τιμές να δίνει η Νότια διεύθυνση, κάτι που είναι λογικό αφού το Νότιο ανάπτυγμα πελάγους είναι το μεγαλύτερο. Έτσι για παράδειγμα μετά την τροποποίηση του ο πίνακας που αφορά τη Νότια διεύθυνση θα έχει περισσότερες γραμμές και στήλες από τον πίνακα που αφορά τη Δυτική διεύθυνση. Για να καταστεί λοιπόν δυνατή η άθροιση των πινάκων κατά κελί, όλοι οι πίνακες έγιναν ίσων διαστάσεων τοποθετώντας μηδενικές τιμές στις από κοινού συχνότητες εμφάνισης των  $H_s$  και  $T_m$  που είχαν μεγαλύτερες τιμές από τις ακραίες τιμές κάθε πίνακα.

Η διαμόρφωση των πινάκων με κλάσεις σταθερού εύρους πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια κατάλληλου κώδικα σε προγραμματιστικό περιβάλλον Matlab. Ο κώδικας είναι ίδιος για κάθε διεύθυνση ανέμου και συνολικά έτρεξε 8 φορές, όσοι δηλαδή ήταν οι αρχικοί πίνακες με κλάσεις άνισου εύρους που μετατράπηκαν σε πίνακες με κλάσεις σταθερού εύρους. Σαν αρχικά δεδομένα εισάγονταν οι ανώτατες τιμές των διαστημάτων  $H_s$  και  $T_p$  για κάθε διεύθυνση και οι αρχικές από κοινού συχνότητες εμφάνισης τους. Αναλυτικά ο κώδικας παρουσιάζεται στο υπόμνημα της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Παρακάτω παρατίθενται οι πίνακες κλάσεων σταθερού πλάτους για τα  $H_s$  και  $T_m$  για Νότια και Νοτιοανατολική διεύθυνση με σκοπό να γίνει πιο κατανοητή η παραπάνω περιγραφή. Την ίδια ακριβώς μορφή με διαφορετικές συχνότητες εμφάνισης έχουν και οι πίνακες σταθερού πλάτους των υπόλοιπων διευθύνσεων, ωστόσο δεν θα παρουσιαστούν όλοι για λόγους εξοικονόμησης χώρου. Από το άθροισμα των 8 πινάκων κατά κελί προκύπτει τελικά ο πίνακας 3.21. Για λόγους σύγκρισης που θα γίνει στη συνέχεια της εργασίας με δεδομένα πραγματικών μετρήσεων, μελετήθηκαν μέσες περίοδοι με τιμές μεγαλύτερες του 1,5 s.



**Πίνακας 3.19** Από κοινού συχνότητες εμφάνισης των κεντρικών τιμών των κλάσεων σταθερού πλάτους του χαρακτηριστικού ύψους κύματος  $H_s$  και της μέσης περιόδου για κυματισμούς με Νότια προέλευση

Κλάσεις περιόδου $T_m$	Κεντρικές Τιμές	Κλάσεις Ύψους κύματος $H_s$																Total	
		0 - 0.25	0.25 - 0.5	0.5 - 0.75	0.75 - 1	1 - 1.25	1.25 - 1.5	1.5 - 1.75	1.75 - 2	2 - 2.25	2.25 - 2.5	2.5 - 2.75	2.75 - 3	3 - 3.25	3.25 - 3.5	3.5 - 3.75	3.75 - 4		4 - 4.25
		0.125	0.375	0.625	0.875	1.125	1.375	1.625	1.875	2.125	2.375	2.625	2.875	3.125	3.375	3.625	3.875		4.125
1.5 - 1.75	1.625	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
1.75 - 2	1.875	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2 - 2.25	2.125	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
2.25 - 2.5	2.375	0	6	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	11
2.5 - 2.75	2.625	0	5	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8
2.75 - 3	2.875	0	6	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9
3 - 3.25	3.125	0	7	4	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	15
3.25 - 3.5	3.375	0	0	7	14	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	22
3.5 - 3.75	3.625	0	0	5	18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	23
3.75 - 4	3.875	0	0	1	5	6	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	18
4 - 4.25	4.125	0	0	0	0	5	11	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	24
4.25 - 4.5	4.375	0	0	0	0	8	10	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	20
4.5 - 4.75	4.625	0	0	0	0	0	0	3	5	2	0	0	0	0	0	0	0	0	10
4.75 - 5	4.875	0	0	0	0	0	0	2	5	1	0	0	0	0	0	0	0	0	8
5 - 5.25	5.125	0	0	0	0	0	0	0	0	4	1	0	0	0	0	0	0	0	5
5.25 - 5.5	5.375	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	2	0	0	0	0	0	4
5.5 - 5.75	5.625	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	2	2	0	0	0	0	0	6
5.75 - 6	5.875	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	3
6 - 6.25	6.125	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1
6.25 - 6.5	6.375	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1
6.5 - 6.75	6.625	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6.75 - 7	6.875	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
Total		2	25	28	41	20	27	15	10	8	3	3	5	2	1	1	0	1	192

**Πίνακας 3.20** Από κοινού συχνότητες εμφάνισης των ,κεντρικών τιμών των κλάσεων σταθερού πλάτους του χαρακτηριστικού ύψους κύματος  $H_s$  και της μέσης περιόδου για κυματισμούς με Δυτική προέλευση

Κλάσεις περιόδου $T_m$	Κεντρικές Τιμές	Κλάσεις Ύψους κύματος $H_s$																	Total
		0 - 0.25	0.25 - 0.5	0.5 - 0.75	0.75 - 1	1 - 1.25	1.25 - 1.5	1.5 - 1.75	1.75 - 2	2 - 2.25	2.25 - 2.5	2.5 - 2.75	2.75 - 3	3 - 3.25	3.25 - 3.5	3.5 - 3.75	3.75 - 4	4 - 4.25	
		0.125	0.375	0.625	0.875	1.125	1.375	1.625	1.875	2.125	2.375	2.625	2.875	3.125	3.375	3.625	3.875	4.125	
1.5 - 1.75	1.625	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
1.75 - 2	1.875	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
2 - 2.25	2.125	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
2.25 - 2.5	2.375	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4
2.5 - 2.75	2.625	0	2	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3
2.75 - 3	2.875	0	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4
3 - 3.25	3.125	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
3.25 - 3.5	3.375	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
3.5 - 3.75	3.625	0	0	0	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3
3.75 - 4	3.875	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
4 - 4.25	4.125	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
4.25 - 4.5	4.375	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
4.5 - 4.75	4.625	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4.75 - 5	4.875	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	2
5 - 5.25	5.125	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5.25 - 5.5	5.375	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5.5 - 5.75	5.625	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5.75 - 6	5.875	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6 - 6.25	6.125	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6.25 - 6.5	6.375	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6.5 - 6.75	6.625	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6.75 - 7	6.875	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>Total</b>		<b>4</b>	<b>6</b>	<b>5</b>	<b>5</b>	<b>2</b>	<b>2</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>26</b>

**Πίνακας 3.21** Από κοινού συχνότητες εμφάνισης των κεντρικών τιμών των κλάσεων σταθερού πλάτους του χαρακτηριστικού ύψους κύματος  $H_s$  και της μέσης περιόδου  $T_m$ , βασισμένες στα ανεμολογικά δεδομένα της Λήμνου για τα βαθιά ύδατα και για την τοποθεσία M4 (40.5N, 25°E) Νοτιοανατολικά της Θάσου

Κλάσεις περιόδου $T_m$	Κεντρικές Τιμές	Κλάσεις Ύψους κύματος $H_s$																	Total	
		0-0.25	0.25-0.5	0.5-0.75	0.75-1	1-1.25	1.25-1.5	1.5-1.75	1.75-2	2-2.25	2.25-2.5	2.5-2.75	2.75-3	3-3.25	3.25-3.5	3.5-3.75	3.75-4	4-4.25		
		0.125	0.375	0.625	0.875	1.125	1.375	1.625	1.875	2.125	2.375	2.625	2.875	3.125	3.375	3.625	3.875	4.125		
1.5 - 1.75	1.625	24	14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	38
1.75 - 2	1.875	40	33	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	73
2 - 2.25	2.125	25	49	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	77
2.25 - 2.5	2.375	4	76	42	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	122
2.5 - 2.75	2.625	0	52	51	11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	114
2.75 - 3	2.875	0	17	67	54	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	138
3 - 3.25	3.125	0	7	31	50	10	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	99
3.25 - 3.5	3.375	0	0	10	34	35	12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	91
3.5 - 3.75	3.625	0	0	6	23	23	12	5	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	70
3.75 - 4	3.875	0	0	1	6	8	19	15	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	50
4 - 4.25	4.125	0	0	0	0	6	21	14	3	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	48
4.25 - 4.5	4.375	0	0	0	0	9	11	2	5	2	2	1	0	0	0	0	0	0	0	32
4.5 - 4.75	4.625	0	0	0	0	0	0	3	5	2	1	3	0	0	0	0	0	0	0	14
4.75 - 5	4.875	0	0	0	0	0	0	2	7	2	2	1	0	0	1	0	0	0	0	15
5 - 5.25	5.125	0	0	0	0	0	0	0	0	4	1	0	0	0	0	0	0	0	0	5
5.25 - 5.5	5.375	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	2	0	0	0	0	0	0	4
5.5 - 5.75	5.625	0	0	0	0	0	0	0	0	2	1	2	2	0	0	0	0	0	0	7
5.75 - 6	5.875	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	4
6 - 6.25	6.125	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1
6.25 - 6.5	6.375	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1
6.5 - 6.75	6.625	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6.75 - 7	6.875	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
<b>Total</b>		<b>93</b>	<b>248</b>	<b>211</b>	<b>178</b>	<b>91</b>	<b>76</b>	<b>41</b>	<b>22</b>	<b>16</b>	<b>8</b>	<b>8</b>	<b>5</b>	<b>3</b>	<b>2</b>	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>1004</b>	

**Πίνακας 3.22** Από κοινού πυκνότητες πιθανότητας των κεντρικών τιμών των κλάσεων σταθερού πλάτους του χαρακτηριστικού ύψους κύματος  $H_s$  και της μέσης περιόδου  $T_m$ , βασισμένες στα ανεμολογικά δεδομένα της Λήμνου χωρίς την εφαρμογή κάποιου θεωρητικού μοντέλου για τα βαθιά ύδατα και για την τοποθεσία M4 (40.5°N, 25°E) Νοτιοανατολικά της Θάσου

Κλάσεις περιόδου $T_m$	Κεντρικές Τιμές	Κλάσεις Ύψους κύματος $H_s$																		Total
		0 - 0.25	0.25 - 0.5	0.5 - 0.75	0.75 - 1	1 - 1.25	1.25 - 1.5	1.5 - 1.75	1.75 - 2	2 - 2.25	2.25 - 2.5	2.5 - 2.75	2.75 - 3	3 - 3.25	3.25 - 3.5	3.5 - 3.75	3.75 - 4	4 - 4.25		
		0.125	0.375	0.625	0.875	1.125	1.375	1.625	1.875	2.125	2.375	2.625	2.875	3.125	3.375	3.625	3.875	4.125		
1.5 - 1.75	1.625	0.38247	0.223108	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.605578
1.75 - 2	1.875	0.63745	0.525896	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.163347
2 - 2.25	2.125	0.398406	0.780876	0.047809	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.227092
2.25 - 2.5	2.375	0.063745	1.211155	0.669323	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.944223
2.5 - 2.75	2.625	0	0.828685	0.812749	0.175299	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.816733
2.75 - 3	2.875	0	0.270916	1.067729	0.860558	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2.199203
3 - 3.25	3.125	0	0.111554	0.494024	0.796813	0.159363	0.015936	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.577689
3.25 - 3.5	3.375	0	0	0.159363	0.541833	0.557769	0.191235	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.450199
3.5 - 3.75	3.625	0	0	0.095618	0.366534	0.366534	0.191235	0.079681	0.015936	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.115538
3.75 - 4	3.875	0	0	0.015936	0.095618	0.12749	0.302789	0.239044	0.015936	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.796813
4 - 4.25	4.125	0	0	0	0	0.095618	0.334661	0.223108	0.047809	0.063745	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.76494
4.25 - 4.5	4.375	0	0	0	0	0.143426	0.175299	0.031873	0.079681	0.031873	0.031873	0.015936	0	0	0	0	0	0	0	0.50996
4.5 - 4.75	4.625	0	0	0	0	0	0	0.047809	0.079681	0.031873	0.015936	0.047809	0	0	0	0	0	0	0	0.223108
4.75 - 5	4.875	0	0	0	0	0	0	0.031873	0.111554	0.031873	0.031873	0.015936	0	0	0.015936	0	0	0	0	0.239044
5 - 5.25	5.125	0	0	0	0	0	0	0	0	0.063745	0.015936	0	0	0	0	0	0	0	0	0.079681
5.25 - 5.5	5.375	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.015936	0.015936	0.031873	0	0	0	0	0	0	0.063745
5.5 - 5.75	5.625	0	0	0	0	0	0	0	0	0.031873	0.015936	0.031873	0.031873	0	0	0	0	0	0	0.111554
5.75 - 6	5.875	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.015936	0.015936	0.015936	0.015936	0	0	0.063745
6 - 6.25	6.125	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.015936	0	0	0	0	0.015936
6.25 - 6.5	6.375	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.015936	0	0	0	0	0.015936
6.5 - 6.75	6.625	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6.75 - 7	6.875	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.015936
<b>Total</b>		<b>1.482072</b>	<b>3.952191</b>	<b>3.36255</b>	<b>2.836653</b>	<b>1.450199</b>	<b>1.211155</b>	<b>0.653386</b>	<b>0.350598</b>	<b>0.25498</b>	<b>0.12749</b>	<b>0.12749</b>	<b>0.079681</b>	<b>0.047809</b>	<b>0.031873</b>	<b>0.015936</b>	<b>0</b>	<b>0.015936</b>	<b>0</b>	<b>16</b>

### 3.3.2 Συνδυασμένα ανεμολογικά δεδομένα Λήμνου-Αλεξανδρούπολης

Στη δεύτερη περίπτωση εξετάσαμε τα συνδυασμένα ανεμολογικά δεδομένα της Λήμνου και της Αλεξανδρούπολης. Τα ανεμολογικά δεδομένα και των δύο περιοχών έχουν προκύψει από την εθνική μετεωρολογική υπηρεσία έπειτα από παρατηρήσεις ίδιας χρονικής διάρκειας 40 ετών. Η λογική του συνδυασμού έγκειται στο ότι, στο υπό εξέταση σημείο ο κυματισμός έχει ήδη 'γεννηθεί' σε κάποιο άλλο σημείο πιο μακρινό και έχει προλάβει να αναπτυχθεί μέχρι εκεί. Έτσι θεωρήσαμε για παράδειγμα ότι το σημείο 'γέννησης' ενός κυματισμού που έχει Ανατολική διεύθυνση (ή αλλιώς Ανατολική προέλευση) βρίσκεται κοντά στην Αλεξανδρούπολη. Συνεπώς ο άνεμος που θα συμβάλει στη ανάπτυξη αυτού του κυματισμού θα είναι ο Ανατολικός άνεμος που πνέει στην περιοχή της Αλεξανδρούπολης. Με τη λογική αυτή θεωρήσαμε ότι ο Βόρειος, Ανατολικός και Βορειοανατολικός άνεμος έχουν τις συχνότητες που προκύπτουν από τα ανεμολογικά δεδομένα της Αλεξανδρούπολης, ενώ οι υπόλοιποι πέντε έχουν τις συχνότητες που προκύπτουν από τα ανεμολογικά της Λήμνου. Οι συχνότητες αυτές τοποθετήθηκαν σε ένα κοινό πίνακα και υπέστησαν μία μικρή τροποποίηση έτσι ώστε το άθροισμα τους να είναι 100.

Παρακάτω παρουσιάζεται ο πίνακας με τις συχνότητες των ανέμων που προκύπτουν από το συνδυασμό των ανεμολογικών δεδομένων Λήμνου και Αλεξανδρούπολης. Με κόκκινα γράμματα είναι οι συχνότητες των ανέμων που πνέουν στην περιοχή της Αλεξανδρούπολης ενώ με μαύρο οι συχνότητες των ανέμων που πνέουν στην περιοχή της Λήμνου.

**Πίνακας 3.23** Συνδυασμένα ανεμολογικά δεδομένα Λήμνου-Αλεξανδρούπολης

Διεύθυνση Ανέμου	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	SUM
beaufort 0				0	0	0	0	0	0
beaufort 1	1.26590349	0.84495455	0.63168548	0.15171308	0.3845212	0.15268425	0.22296412	0.42007064	4.07449682
beaufort 2	5.29981162	6.76572801	4.56560717	0.7237102	3.50801365	1.11477012	0.62556499	1.25669952	23.8599053
beaufort 3	5.88291536	10.6891363	4.91725271	0.60748678	5.74833884	1.08745421	0.64063548	1.18910256	30.7623223
beaufort 4	6.53769345	9.29867202	2.57146552	0.45035764	5.52121611	0.77890087	0.46572818	0.58224756	26.2062814
beaufort 5	3.29079005	2.68367515	0.54886995	0.14071066	2.17005321	0.17031519	0.16218218	0.14009398	9.30669036
beaufort 6	1.76531062	0.86483714	0.10466764	0.06481196	1.16356424	0.06153406	0.06066616	0.03737714	4.12276897
beaufort 7	0.57650217	0.19862339	0.0110126	0.02313921	0.31350414	0.01399972	0.0069733	0.0058148	1.14956931
beaufort 8	0.29000127	0.05773019	0.00090907	0.00928916	0.09882241	0.001174	0	0	0.45792611
beaufort 9	0.01880202	0.00366772	0	0	0.01395538	0	0.00114467	0	0.03756979
beaufort 10	0.01880202	0.00366772	0	0	0	0	0	0	0.02246974
beaufort 11	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>SUM</b>	<b>24.9465321</b>	<b>31.4106922</b>	<b>13.3514701</b>	2.17121868	18.9219892	3.38083244	2.18585908	3.63140619	<b>100</b>

Η διαδικασία για τη δημιουργία του τελικού πίνακα με τα μεγέθη  $H_s$  και  $T_m$  και της από κοινού συχνότητες εμφάνισης τους είναι ακριβώς η ίδια που περιγράφηκε παραπάνω με βάση τα ανεμολογικά δεδομένα της Λήμνου. Αρχικά κατασκευάστηκαν 8 πίνακες με κλάσεις άνισου πλάτους, που ουσιαστικά αυτό που άλλαζε ήταν οι από κοινού συχνότητες των  $H_s$  και  $T_m$ , αφού τα μεγέθη αυτά έχουν ήδη υπολογιστεί στους πίνακες 3.2-3.9 για συγκεκριμένα αναπτύγματα

πελάγους και ταχύτητες ανέμων, και η τιμή τους δεν επηρεάζεται από την περιοχή που θα λάβουμε τα ανεμολογικά δεδομένα. Δηλαδή αυτό που επηρεάζεται μόνο είναι η συχνότητα με την οποία εμφανίζεται κάθε ένα ζεύγος.

Στη συνέχεια κάθε ένας πίνακας και πάλι με τη βοήθεια κατάλληλου κώδικα σε προγραμματιστικό εργαλείο Matlab μετατράπηκε σε πίνακα με κλάσεις σταθερού εύρους. Ομοίως και εδώ οι 8 αυτοί πίνακες προστέθηκαν κατά κελί και σε κάθε κλάση των  $H_s$  και  $T_m$ , αντιπροσωπευτική θεωρείται η μέση τιμή της κλάσης. Έτσι προέκυψε ένας συνολικός πίνακας με όλους του κυματισμούς από όλες τις κατευθύνσεις πάνω στον οποίο εφαρμόστηκε στη συνέχεια το μοντέλο δεσμευμένης πιθανότητας. Στο στάδιο αυτό της μελέτης που το υπό εξέταση σημείο βρίσκεται στα βαθιά ύδατα δεν μας ενδιαφέρει η διεύθυνση των κυματισμών, αλλά η πιθανότητα εμφάνισης τους σε μακροχρόνιο επίπεδο. Σε επόμενο στάδιο της εργασίας που θα γίνει διόδευση των κυματισμών σε μια υποθετική θέση ενός έργου που θα επιλεγθεί, τότε θα ληφθούν υπόψη μόνο οι άνεμοι που δημιουργούν κυματισμό προς τη θέση αυτή.

Παρακάτω παρατίθεται ο πίνακας με τις κεντρικές τιμές του χαρακτηριστικού ύψους  $H_s$  και της μέσης περιόδου  $T_m$  και τις από κοινού συχνότητές εμφάνισης τους, όπως προέκυψε από τη διαδικασία που περιγράφηκε ανωτέρω. Κατόπιν παρουσιάζεται ο πίνακας με τις πυκνότητες πιθανότητας των κεντρικών τιμών  $H_s$  και  $T_m$ , όπως αυτές προέκυψαν διαιρώντας τη συχνότητα κάθε κελιού με το συνολικό πλήθος και με το χωρικό βήμα των κλάσεων  $H_s$  και το χρονικό βήμα των κλάσεων  $T_m$ , δηλαδή με  $0.25^2$ , αφού  $dH_s = dT_m = 0.25$ .

**Πίνακας 3.24** Από κοινού συχνότητες εμφάνισης των κεντρικών τιμών των κλάσεων σταθερού πλάτους του χαρακτηριστικού ύψους κύματος  $H_s$  και της μέσης περιόδου  $T_m$ , βασισμένες στα ανεμολογικά δεδομένα της Λήμνου-Αλεξανδρούπολης για τα βαθιά ύδατα και για την τοποθεσία M4 (40.5N, 25°E) Νοτιοανατολικά της Θάσου

Κλάσεις περιόδου $T_m$	Κεντρικές Τιμές	Κλάσεις Ύψους κύματος $H_s$																Total	
		0 - 0.25	0.25 - 0.5	0.5 - 0.75	0.75 - 1	1 - 1.25	1.25 - 1.5	1.5 - 1.75	1.75 - 2	2 - 2.25	2.25 - 2.5	2.5 - 2.75	2.75 - 3	3 - 3.25	3.25 - 3.5	3.5 - 3.75	3.75 - 4		4 - 4.25
		0.125	0.375	0.625	0.875	1.125	1.375	1.625	1.875	2.125	2.375	2.625	2.875	3.125	3.375	3.625	3.875		4.125
1.5 - 1.75	1.625	23	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	33
1.75 - 2	1.875	28	29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	57
2 - 2.25	2.125	22	64	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	95
2.25 - 2.5	2.375	14	83	27	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	124
2.5 - 2.75	2.625	0	42	55	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	102
2.75 - 3	2.875	0	28	83	24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	135
3 - 3.25	3.125	0	8	45	54	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	116
3.25 - 3.5	3.375	0	0	18	62	19	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100
3.5 - 3.75	3.625	0	0	6	27	14	16	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	64
3.75 - 4	3.875	0	0	1	6	14	17	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	41
4 - 4.25	4.125	0	0	0	0	7	22	13	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	47
4.25 - 4.5	4.375	0	0	0	0	9	13	3	2	0	1	0	0	0	0	0	0	0	28
4.5 - 4.75	4.625	0	0	0	0	0	0	3	6	3	2	0	0	0	0	0	0	0	14
4.75 - 5	4.875	0	0	0	0	0	0	2	7	2	2	1	0	0	0	0	0	0	14
5 - 5.25	5.125	0	0	0	0	0	0	0	0	4	1	0	1	1	0	0	0	0	7
5.25 - 5.5	5.375	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	2	1	0	0	0	0	5
5.5 - 5.75	5.625	0	0	0	0	0	0	0	0	2	1	2	2	0	0	1	0	0	8
5.75 - 6	5.875	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	4
6 - 6.25	6.125	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1
6.25 - 6.5	6.375	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1
6.5 - 6.75	6.625	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6.75 - 7	6.875	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
<b>Total</b>		<b>87</b>	<b>264</b>	<b>244</b>	<b>178</b>	<b>72</b>	<b>69</b>	<b>24</b>	<b>21</b>	<b>11</b>	<b>8</b>	<b>4</b>	<b>6</b>	<b>5</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>997</b>

**Πίνακας 3.25** Από κοινού πυκνότητες πιθανότητας των κεντρικών τιμών των κλάσεων σταθερού πλάτους του χαρακτηριστικού ύψους κύματος  $H_s$  και της μέσης περιόδου  $T_m$ , βασισμένες στα συνδυασμένα ανεμολογικά δεδομένα της Λήμνου-Αλεξανδρούπολης χωρίς την εφαρμογή κάποιου θεωρητικού μοντέλου για τα βαθιά ύδατα και για την τοποθεσία M4 (40.5°N, 25°E) Νοτιοανατολικά της Θάσου

Κλάσεις περιόδου $T_m$	Κεντρικές Τιμές	Κλάσεις Ύψους κύματος $H_s$																	Total	
		0 - 0.25	0.25 - 0.5	0.5 - 0.75	0.75 - 1	1 - 1.25	1.25 - 1.5	1.5 - 1.75	1.75 - 2	2 - 2.25	2.25 - 2.5	2.5 - 2.75	2.75 - 3	3 - 3.25	3.25 - 3.5	3.5 - 3.75	3.75 - 4	4 - 4.25		
		0.125	0.375	0.625	0.875	1.125	1.375	1.625	1.875	2.125	2.375	2.625	2.875	3.125	3.375	3.625	3.875	4.125		
1.5 - 1.75	1.625	0.369107	0.160481	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.529589
1.75 - 2	1.875	0.449348	0.465396	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.914744
2 - 2.25	2.125	0.353059	1.027081	0.144433	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.524574
2.25 - 2.5	2.375	0.224674	1.331996	0.4333	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.98997
2.5 - 2.75	2.625	0	0.674022	0.882648	0.080241	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.636911
2.75 - 3	2.875	0	0.449348	1.331996	0.385155	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2.166499
3 - 3.25	3.125	0	0.128385	0.722166	0.8666	0.144433	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.861585
3.25 - 3.5	3.375	0	0	0.288867	0.994985	0.304915	0.016048	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.604814
3.5 - 3.75	3.625	0	0	0.096289	0.4333	0.224674	0.25677	0.016048	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.027081
3.75 - 4	3.875	0	0	0.016048	0.096289	0.224674	0.272818	0.032096	0.016048	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.657974
4 - 4.25	4.125	0	0	0	0	0.112337	0.353059	0.208626	0.080241	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.754263
4.25 - 4.5	4.375	0	0	0	0	0.144433	0.208626	0.048144	0.032096	0	0.016048	0	0	0	0	0	0	0	0	0.449348
4.5 - 4.75	4.625	0	0	0	0	0	0	0.048144	0.096289	0.048144	0.032096	0	0	0	0	0	0	0	0	0.224674
4.75 - 5	4.875	0	0	0	0	0	0	0.032096	0.112337	0.032096	0.032096	0.016048	0	0	0	0	0	0	0	0.224674
5 - 5.25	5.125	0	0	0	0	0	0	0	0	0.064193	0.016048	0	0.016048	0.016048	0	0	0	0	0	0.112337
5.25 - 5.5	5.375	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.016048	0.016048	0.032096	0.016048	0	0	0	0	0	0.080241
5.5 - 5.75	5.625	0	0	0	0	0	0	0	0	0.032096	0.016048	0.032096	0.032096	0	0	0.016048	0	0	0	0.128385
5.75 - 6	5.875	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.016048	0.016048	0.016048	0.016048	0	0	0.064193
6 - 6.25	6.125	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.016048	0	0	0	0	0.016048
6.25 - 6.5	6.375	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.016048	0	0	0	0	0.016048
6.5 - 6.75	6.625	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6.75 - 7	6.875	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.016048	0.016048
Total		1.396189	4.23671	3.915747	2.85657	1.155466	1.107322	0.385155	0.337011	0.17653	0.128385	0.064193	0.096289	0.080241	0.016048	0.032096	0	0.016048		16



### 3.3.3 Συνδυασμένα ανεμολογικά δεδομένα Λήμνου-Αλεξανδρούπολης-Καβάλας

Στην τρίτη και τελευταία περίπτωση συνδυάστηκαν τα ανεμολογικά δεδομένα τριών περιοχών, για τον καθορισμό των από κοινού συχνοτήτων των  $H_s$  και  $T_m$ : της Λήμνου της Αλεξανδρούπολης και της Καβάλας. Οι κυματισμοί που έρχονται στο υπό μελέτη σημείο από Βορειοδυτική και δυτική κατεύθυνση θεωρείται ότι έχουν τις συχνότητες αντίστοιχα του Βορειοδυτικού και Δυτικού ανέμου που πνέουν στην περιοχή της Καβάλας καθώς το σημείο 'γέννησης' τους βρίσκεται προσεγγιστικά σε εκείνη τη ευρύτερη θαλάσσια περιοχή. Οι υπόλοιποι κυματισμοί ανάλογα με τη διεύθυνση τους έχουν τις συχνότητες των ανέμων της Λήμνου και της Αλεξανδρούπολης όπως περιγράφηκε παραπάνω. Οι συχνότητες των ανέμων υπέστησαν ανακατανομή έτσι ώστε το συνολικό τους άθροισμα να είναι 100. Λόγω του ότι μεγαλύτερα αναπτύγματα πελάγους έχουμε Νότια οι συχνότητες των ανεμολογικών δεδομένων της Λήμνου (Νότιος, Νοτιοανατολικός και Δυτικός άνεμος) έμειναν αμετάβλητες, καθώς οι άνεμοι που προέρχονται από εκεί θεωρήθηκαν οι περισσότερο 'κρίσιμοι', και η ανακατανομή έγινε για τις συχνότητες των υπόλοιπων ανέμων που προήλθαν από τα ανεμολογικά δεδομένα της Αλεξανδρούπολης και της Καβάλας. Όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις έτσι και εδώ αγνοήθηκε η περίπτωση της νηνεμίας το ποσοστό της οποίας ανακατανεμήθηκε ομοιόμορφα στους υπόλοιπους ανέμους.

Παρακάτω παρατίθεται πίνακας των συνδυασμένων ανεμολογικών δεδομένων των τριών περιοχών. Με μαύρα γράμματα φαίνονται οι συχνότητες των ανέμων που πνέουν στην περιοχή της Λήμνου, με κόκκινα στην περιοχή της Αλεξανδρούπολης, και με μπλε της Καβάλας.

**Πίνακας 3.26** Συνδυασμένα ανεμολογικά δεδομένα Λήμνου-Αλεξανδρούπολης-Καβάλας

Διεύθυνση Ανέμου	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	SUM
Beaufort 0									
Beaufort 1	1.174647	0.784043	0.586148	0.146524	0.371368	0.147462	0.248323	0.100175	3.558689
Beaufort 2	4.917757	6.277998	4.23648	0.698955	3.388018	1.076638	5.515449	1.234254	27.34555
Beaufort 3	5.458826	9.918574	4.562776	0.586707	5.551711	1.050257	3.041279	0.474625	30.64475
Beaufort 4	6.066402	8.628346	2.386093	0.434953	5.332357	0.752258	0.698747	0.20971	24.50886
Beaufort 5	3.053562	2.490213	0.509303	0.135897	2.095824	0.164489	0.111022	0.015442	8.575754
Beaufort 6	1.638052	0.802492	0.097122	0.062595	1.123763	0.059429	0.021011	0.007634	3.812099
Beaufort 7	0.534943	0.184305	0.010219	0.022348	0.30278	0.013521	0	0.001942	1.070058
Beaufort 8	0.269096	0.053569	0.000844	0.008971	0.095442	0.001134	0	0	0.429055
Beaufort 9	0.017447	0.003403	0	0	0.013478	0	0	0	0.034328
Beaufort 10	0.017447	0.003403	0	0	0	0	0	0	0.02085
beaufort >=11	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>SUM</b>	<b>23.14818</b>	<b>29.14635</b>	<b>12.38898</b>	<b>2.09695</b>	<b>18.27474</b>	<b>3.265187</b>	<b>9.635831</b>	<b>2.043781</b>	<b>100</b>

Ακολουθώντας την ίδια διαδικασία με τις δυο προηγούμενες περιπτώσεις, παρακάτω παρατίθενται ο τελικός πίνακας κλάσεων ίσου πλάτους για τα  $H_s$  και  $T_m$  με τις από κοινού συχνότητες εμφάνισης των κεντρικών τιμών τους, και ο πίνακας με τις από κοινού πυκνότητες πιθανότητας τους.

**Πίνακας 3.27** Από κοινού συχνότητες εμφάνισης των κεντρικών τιμών των κλάσεων σταθερού πλάτους του χαρακτηριστικού ύψους κύματος  $H_s$  και της μέσης περιόδου  $T_m$ , βασισμένες στα ανεμολογικά δεδομένα της Λήμνου-Αλεξανδρούπολης-Καβάλας για τα βαθιά ύδατα και για την τοποθεσία M4 (40.5N, 25°E) Νοτιοανατολικά της Θάσου

Κλάσεις περιόδου $T_m$	Κεντρικές Τιμές	Κλάσεις Ύψους κύματος $H_s$																Total	
		0 - 0.25	0.25 - 0.5	0.5 - 0.75	0.75 - 1	1 - 1.25	1.25 - 1.5	1.5 - 1.75	1.75 - 2	2 - 2.25	2.25 - 2.5	2.5 - 2.75	2.75 - 3	3 - 3.25	3.25 - 3.5	3.5 - 3.75	3.75 - 4		4 - 4.25
		0.125	0.375	0.625	0.875	1.125	1.375	1.625	1.875	2.125	2.375	2.625	2.875	3.125	3.375	3.625	3.875		4.125
1.5 - 1.75	1.625	11	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	18
1.75 - 2	1.875	30	49	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	79
2 - 2.25	2.125	33	67	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	104
2.25 - 2.5	2.375	13	70	25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	108
2.5 - 2.75	2.625	0	48	67	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	123
2.75 - 3	2.875	0	31	91	18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	140
3 - 3.25	3.125	0	10	28	47	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	94
3.25 - 3.5	3.375	0	0	23	58	18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	99
3.5 - 3.75	3.625	0	0	9	26	17	11	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	65
3.75 - 4	3.875	0	0	0	2	19	22	3	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	49
4 - 4.25	4.125	0	0	0	0	7	13	6	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	31
4.25 - 4.5	4.375	0	0	0	0	8	17	5	1	4	1	0	0	0	0	0	0	0	36
4.5 - 4.75	4.625	0	0	0	0	0	0	2	5	2	1	0	0	0	0	0	0	0	10
4.75 - 5	4.875	0	0	0	0	0	0	0	3	4	0	2	0	0	0	0	0	0	9
5 - 5.25	5.125	0	0	0	0	0	0	4	3	1	2	1	0	1	0	0	0	0	12
5.25 - 5.5	5.375	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	4	1	0	0	0	0	0	8
5.5 - 5.75	5.625	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	1	0	0	0	4
5.75 - 6	5.875	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	2	1	0	0	1	0	5
6 - 6.25	6.125	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	2
6.25 - 6.5	6.375	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6.5 - 6.75	6.625	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
<b>Total</b>		<b>87</b>	<b>282</b>	<b>247</b>	<b>159</b>	<b>78</b>	<b>63</b>	<b>22</b>	<b>20</b>	<b>11</b>	<b>9</b>	<b>8</b>	<b>4</b>	<b>2</b>	<b>2</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>997</b>

**Πίνακας 3.28** Από κοινού πυκνότητες πιθανότητας των κεντρικών τιμών των κλάσεων σταθερού πλάτους του χαρακτηριστικού ύψους κύματος  $H_s$  και της μέσης περιόδου  $T_m$ , βασισμένες στα συνδυασμένα ανεμολογικά δεδομένα της Λήμνου-Αλεξανδρούπολης-Καβάλας χωρίς την εφαρμογή κάποιου θεωρητικού μοντέλου για τα βαθιά ύδατα και για την τοποθεσία M4 (40.5°N, 25°E) Νοτιοανατολικά της Θάσου

Κλάσεις περιόδου $T_m$	Κεντρικές Τιμές	Κλάσεις Ύψους κύματος $H_s$																	Total	
		0 - 0.25	0.25 - 0.5	0.5 - 0.75	0.75 - 1	1 - 1.25	1.25 - 1.5	1.5 - 1.75	1.75 - 2	2 - 2.25	2.25 - 2.5	2.5 - 2.75	2.75 - 3	3 - 3.25	3.25 - 3.5	3.5 - 3.75	3.75 - 4	4 - 4.25		
		0.125	0.375	0.625	0.875	1.125	1.375	1.625	1.875	2.125	2.375	2.625	2.875	3.125	3.375	3.625	3.875	4.125		
1.5 - 1.75	1.625	0.17653	0.112337	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.288867
1.75 - 2	1.875	0.481444	0.786359	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.267803
2 - 2.25	2.125	0.529589	1.075226	0.064193	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.669007
2.25 - 2.5	2.375	0.208626	1.12337	0.401204	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.7332
2.5 - 2.75	2.625	0	0.770311	1.075226	0.128385	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.973922
2.75 - 3	2.875	0	0.497492	1.460381	0.288867	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2.24674
3 - 3.25	3.125	0	0.160481	0.449348	0.754263	0.144433	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.508526
3.25 - 3.5	3.375	0	0	0.369107	0.930792	0.288867	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.588766
3.5 - 3.75	3.625	0	0	0.144433	0.417252	0.272818	0.17653	0.032096	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.043129
3.75 - 4	3.875	0	0	0	0.032096	0.304915	0.353059	0.048144	0.048144	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.786359
4 - 4.25	4.125	0	0	0	0	0.112337	0.208626	0.096289	0.080241	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.497492
4.25 - 4.5	4.375	0	0	0	0	0.128385	0.272818	0.080241	0.016048	0.064193	0.016048	0	0	0	0	0	0	0	0	0.577733
4.5 - 4.75	4.625	0	0	0	0	0	0	0.032096	0.080241	0.032096	0.016048	0	0	0	0	0	0	0	0	0.160481
4.75 - 5	4.875	0	0	0	0	0	0	0	0.048144	0.064193	0	0.032096	0	0	0	0	0	0	0	0.144433
5 - 5.25	5.125	0	0	0	0	0	0	0.064193	0.048144	0.016048	0.032096	0.016048	0	0.016048	0	0	0	0	0	0.192578
5.25 - 5.5	5.375	0	0	0	0	0	0	0	0	0.048144	0.064193	0.016048	0	0	0	0	0	0	0	0.128385
5.5 - 5.75	5.625	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.016048	0.016048	0.016048	0	0.016048	0	0	0	0	0.064193
5.75 - 6	5.875	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.016048	0	0.032096	0.016048	0	0	0.016048	0	0	0.080241
6 - 6.25	6.125	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.016048	0.016048	0	0	0	0.032096
6.25 - 6.5	6.375	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6.5 - 6.75	6.625	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.016048	0.016048
Total		1.396189	4.525577	3.963892	2.551655	1.251755	1.011033	0.353059	0.320963	0.17653	0.144433	0.128385	0.064193	0.032096	0.032096	0.016048	0.016048	0.016048	0.016048	16

### 3.4 Δεδομένα από πραγματικές μετρήσεις

Η διαδικασία που περιγράφηκε παραπάνω για τη δημιουργία πινάκων με κλάσεις σταθερού εύρους όπου αναγράφονται οι από κοινού συχνότητες εμφάνισης των δύο μεγεθών  $H_s$  και  $T_m$ , και το γεγονός ότι εξετάστηκαν τρεις διαφορετικές περιπτώσεις ανεμολογικών δεδομένων, είχε απώτερο σκοπό τη σύγκριση των αποτελεσμάτων έπειτα από την εφαρμογή του μοντέλου δεσμευμένης πιθανότητας στους πίνακες αυτούς, με τα αποτελέσματα από την εφαρμογή του ίδιου μοντέλου σε πίνακες με δεδομένα συχνοτήτων που έχουν προκύψει από επιτόπου μετρήσεις πεδίου. Η πληροφορία που προσφέρουν τα δεδομένα από πραγματικές μετρήσεις δίδεται σε μορφή Πίνακα, διαστάσεων  $(i \times j)$  όπου αναγράφονται οι από κοινού συχνότητες εμφάνισης των δύο μεγεθών (ταξινομημένων σε κλάσεις), ως προς τον συνολικό αριθμό των παρατηρήσεων. Τέτοιοι Πίνακες για διάφορες περιοχές της Ελλάδας υπάρχουν στον 'Άτλαντα Ανέμου και Κυμάτων των Ελληνικών Θαλασσών' (Soukissian et.al., 2007). Στην παρούσα εργασία ο πίνακας εξήχθη από τον ηλεκτρονικό Άτλαντα 'Wind and wave mediterranean Atlas', καθώς μόνο εκεί παρέχονταν δεδομένα μετρήσεων για το σημείο ενδιαφέροντος Νοτιοανατολικά της Θάσου (40.5N, 25E)

Επισημαίνεται ότι η περιγραφή του μακροπρόθεσμου (longterm) κυματικού κλίματος, που είναι ο σκοπός της εργασίας, χρειάζεται δεδομένα που να αναφέρονται σε πολλές ανεξάρτητες κυματικές καταγιίδες - όχι παρατηρήσεις μέσα στην ίδια κυματική καταγιίδα- και που να καλύπτουν μια υπερετήσια χρονική περίοδο. Ο ζητούμενος Πίνακας δεδομένων, αν δεν υπάρχει αυτούσιος, μπορεί και να κατασκευαστεί. Για παράδειγμα, εφόσον υπάρχουν διαθέσιμες καταγραφές ανύψωσης της μέσης στάθμης της θάλασσας  $\eta$  ως προς το χρόνο  $t$  (χρονοσειρές) μπορούν να επεξεργασθούν κατάλληλα έτσι ώστε να εξαχθούν τα μεγέθη  $H_s$  και  $T_m$ , σύμφωνα με τις σχέσεις του 2<sup>ου</sup> κεφαλαίου 2.1 και 2.3.

Να σημειωθεί ότι τρόπος που κατασκευάστηκαν οι πίνακες βασιζόμενοι στα ανεμολογικά δεδομένα ώστε να εφαρμοσθεί το μοντέλο δεσμευμένης πιθανότητας, δεν αποτελεί κλασικό τρόπο, αλλά είναι ένα από τα πρωτότυπα σημείο της εργασίας και μια δοκιμή ουσιαστικά ώστε όταν γίνει διόδευση των κυματισμών στα ενδιάμεσα ύδατα να ληφθεί υπόψη και το φαινόμενο της διάθλασης, καθώς γνωρίζουμε εκ των προτέρων τη διεύθυνση των κυματισμών.

Παρακάτω δίδεται ο πίνακας με κλάσεις άνισου πλάτους με τις από κοινού συχνότητες εμφάνισης του χαρακτηριστικού (σημαντικού) ύψους κύματος  $H_s$  και της περιόδου αιχμής  $T_p$  ως προς τον συνολικό αριθμό των παρατηρήσεων μιας επταετίας. Τα μεγέθη  $H_s$  και  $T_p$  είναι μονόμετρα, διότι τα όργανα που τοποθετούνται στο σημείο μελέτης μετρούν μόνο τις ανυψώσεις της μέσης στάθμης της θάλασσας  $\eta$  ως προς το χρόνο  $t$  (χρονοσειρές) και εξάγονται στη συνέχεια τα μεγέθη  $H_s$  και  $T_m$ , χωρίς να υπάρχει πληροφορία για τη διεύθυνση των κυματισμών. Για το λόγο αυτό η σύγκριση με τους πίνακες που προέκυψαν βασιζόμενοι στα ανεμολογικά δεδομένα θα γίνει μόνο για τα βαθειά ύδατα, όπου οι μετασχηματισμοί της παράκτιας ζώνης δεν έχουν ασκήσει επιρροή στα μεγέθη.

**Πίνακας 3.29** Από κοινού συχνότητες εμφάνισης του χαρακτηριστικού ύψους κύματος  $H_s$  και της περιόδου αιχμής  $T_p$ , ως προς τον συνολικό αριθμό των παρατηρήσεων επτά ετών (μακροχρόνιες), για τα βαθιά ύδατα και για την τοποθεσία (40.5N,25E) νοτιοανατολικά της Θάσου

tp-hs	0-0.25	0.25-0.50	0.50-0.75	0.75-1	1-1.25	1.25-1.5	1.5-1.75	1.75-2	2-2.5	2.5-3	3-3.5	3.5-4	4.0-5.0	Total
1.93 - 2.58	67	11	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	79
2.58 - 3.12	49	18	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	70
3.12 - 3.78	107	69	32	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	212
3.78 - 4.57	55	70	56	37	11	1	0	0	0	0	0	0	0	230
4.57 - 5.03	11	20	20	21	19	8	1	0	0	0	0	0	0	100
5.03 - 5.53	7	12	13	18	15	15	6	1	0	0	0	0	0	87
5.53 - 6.08	5	7	8	9	12	13	11	7	2	0	0	0	0	74
6.08 - 6.69	2	4	4	3	5	5	7	5	9	1	0	0	0	45
6.69 - 7.36	3	3	2	2	2	2	3	4	6	6	1	0	0	34
7.36 - 8.10	2	2	2	1	1	0	1	0	1	3	4	1	0	18
8.10 - 8.90	2	2	1	1	1	0	0	0	0	1	1	2	1	12
8.90 - 9.79	1	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	3
9.79 - 10.78	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
10.78 - 11.86	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
11.86 - 13.04	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13.04 - 14.35	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
14.35 - 17.36	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17.36 - 20.91	26	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	26
Total	340	218	142	97	66	44	29	17	19	11	6	3	1	993

Όπως προαναφέρθηκε, η εφαρμογή του μοντέλου δεσμευμένης πιθανότητας που θα γίνει στη συνέχεια της εργασίας απαιτεί την ύπαρξη κλάσεων σταθερού εύρους όσον αφορά και την περίοδο (μέση και αιχμής) αλλά και το χαρακτηριστικό ύψος κύματος, ώστε να είναι δυνατή η προσαρμογή των κατανομών πυκνότητας πιθανότητας (λογαριθμοκανονική και Weibull) στα δεδομένα.. Έτσι αναδιατάχθηκαν οι από κοινού συχνότητες εμφάνισης των  $H_s$  και  $T_p$  του πίνακα 3.29 και τελικά, οι νέες κλάσεις του  $H_s$  και  $T_p$  έχουν ίσο σταθερό εύρος 0.25 m, όπως δηλαδή οι πίνακες που βασίστηκαν στις συχνότητες των ανεμολογικών δεδομένων. Για την κατασκευή του πίνακα με κλάσεις ίσου πλάτους χρησιμοποιήθηκε ο ίδιος κώδικας σε προγραμματιστικό περιβάλλον Matlab που χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή των προηγούμενων πινάκων. Η διαφορά ήταν ότι στην περίπτωση αυτή για τη μέση-κεντρική τιμή (central value) του κάθε διαστήματος της περιόδου κορυφής  $T_p$  χρησιμοποιήθηκε η σχέση 2.11 ( $T_m = 0.83 * T_p$ ) και όχι η σχέση 2.7 που προκύπτει από το φάσμα του JONSWAP. Αυτό έγινε διότι ήταν αδύνατο στον πίνακα 3.29 να γίνει προσδιορισμός της παραμέτρου  $\gamma$  με μία από τις σχέσεις 2.8, 2.9, 2.10 καθώς η ίδια κεντρική τιμή περιόδου αιχμής  $T_p$  αντιστοιχούσε σε διάφορες τιμές του χαρακτηριστικού ύψους κύματος  $H_s$ .

Όπως εύκολα παρατηρείται στον παραπάνω πίνακα αρκετές θαλάσσιες καταστάσεις έχουν μεγάλες τιμές περιόδου αιχμής με μικρά χαρακτηριστικά ύψη κύματος. Οι κυματισμοί αυτοί αποκαλούνται κύματα ρεστίας ή αποθάλασσα (swell), όπως αναφέρθηκε στο 2<sup>ο</sup> κεφάλαιο και

πρέπει να μελετηθούν ξεχωριστά. Λόγω λοιπόν του ότι δεν αντιπροσωπεύουν το κυματικό κλίμα της περιοχής ενδιαφέροντος θα διαχωριστούν από τα ανεμογενή κύματα. Το κριτήριο που επιλέχθηκε για το διαχωρισμό τους προτάθηκε από τον Thompson ( 1984) και σχετίζεται με την καμπυλότητα του κυματισμού. Το κριτήριο αυτό διατυπώνει ότι εάν η κλίση του κύματος  $H/L$  έχει τιμή μικρότερη του 0.004 τότε ο κυματισμός ανήκει στην κατηγορία της ‘παλαιά αποθάλασσας’ (old swell), εάν κυμαίνεται από 0.004-0.01 τότε χαρακτηρίζεται ως <<ώριμη αποθάλασσα>> ( mature swell), και εάν η τιμή της κυμαίνεται από 0.01-0.025 ο κυματισμός χαρακτηρίζεται <<νέα αποθάλασσα>> (young swell). Συνεπώς, στον συγκεκριμένο πίνακα μελετήθηκαν μόνο οι θαλάσσιες καταστάσεις που αποτελούνται από ανεμογενείς κυματισμούς με κλίση μεγαλύτερη της τιμής 0.025 .

Έπειτα και από την εφαρμογή του κριτηρίου για τον διαχωρισμό των κυμάτων αποθάλασσας από τους ανεμογενείς κυματισμούς ο συνολικός αριθμός θαλάσσιων καταστάσεων μειώθηκε από 993 σε 707, όπως είναι λογικό. Παρακάτω παρατίθεται ο σχετικός πίνακας από κοινού συχνοτήτων με κλάσεις σταθερού εύρους  $dH_s = dT_m = 0.25$  , και ο πίνακας με τις από κοινού πυκνότητες πιθανότητας κάθε ζεύγους  $H_s$  και  $T_m$ , όπως αυτές προέκυψαν από τη διαίρεση κάθε από κοινού συχνότητας εμφάνισης με το συνολικό πλήθος των 707 παρατηρήσεων και στη συνέχεια διαιρώντας με το χωρικό και το χρονικό βήμα, δηλαδή με το  $0.25^2$ .

**Πίνακας 3.30** 2Από κοινού συχνότητες εμφάνισης των κεντρικών τιμών των κλάσεων σταθερού πλάτους του χαρακτηριστικού ύψους κύματος  $H_s$  και της μέσης περιόδου  $T_m$ , ως προς τον συνολικό αριθμό των παρατηρήσεων επτά ετών (μακροχρόνιες), για τα βαθιά ύδατα και για την τοποθεσία (40.5N,25E) νοτιοανατολικά της Θάσου

Κλάσεις περιόδου $T_m$	Κεντρικές τιμές	Κλάσεις Ύψους $H_s$																	Total
		0-0.25	0.25-0.5	0.5-0.75	0.75-1	1-1.25	1.25-1.5	1.5-1.75	1.75-2	2-2.25	2.25-2.5	2.5-2.75	2.75-3	3-3.25	3.25-3.5	3.5-3.75	3.75-4	4-4.25	
		0.125	0.375	0.625	0.875	1.125	1.375	1.625	1.875	2.125	2.375	2.625	2.875	3.125	3.375	3.625	3.875	4.125	
1.5-1.75	1.625	21	3	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	25
1.75-2	1.875	27	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	30
2-2.25	2.125	37	10	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	48
2.25-2.5	2.375	23	9	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	33
2.5-2.75	2.625	40	25	12	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	79
2.75-3	2.875	52	33	15	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	101
3-3.25	3.125	0	25	16	10	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	52
3.25-3.5	3.375	0	27	21	13	4	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	66
3.5-3.75	3.625	0	0	23	14	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	42
3.75-4	3.875	0	0	14	12	11	5	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	43
4-4.25	4.125	0	0	0	11	12	6	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	31
4.25-4.5	4.375	0	0	0	13	9	8	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	34
4.5-4.75	4.625	0	0	0	7	8	8	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	27
4.75-5	4.875	0	0	0	0	5	8	7	4	1	0	0	0	0	0	0	0	0	25
5-5.25	5.125	0	0	0	0	3	2	5	6	1	4	0	0	0	0	0	0	0	21
5.25-5.5	5.375	0	0	0	0	0	3	2	2	2	2	0	1	0	0	0	0	0	12
5.5-5.75	5.625	0	0	0	0	0	1	2	0	1	2	0	0	0	0	0	0	0	6
5.75-6	5.875	0	0	0	0	0	1	1	2	0	2	1	2	1	0	0	0	0	10
6-6.25	6.125	0	0	0	0	0	0	1	2	1	1	2	1	0	0	0	0	0	8
6.25-6.5	6.375	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	2	0	0	1	0	4
6.5-6.75	6.625	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	5
6.75-7.00	6.875	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	1	0	3
7.00-7.25	7.125	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	2
Total		200	135	104	83	58	43	28	17	6	12	6	5	5	1	1	2	1	707

**Πίνακας 3.31** Από κοινού πυκνότητες πιθανότητας των κεντρικών τιμών των κλάσεων σταθερού πλάτους του χαρακτηριστικού ύψους κύματος  $H_s$  και της μέσης περιόδου  $T_m$  ως προς τον συνολικό αριθμό των παρατηρήσεων επτά ετών (μακροχρόνιες), για τα βαθιά ύδατα και για την τοποθεσία (40.5N,25E) νοτιοανατολικά της Θάσου

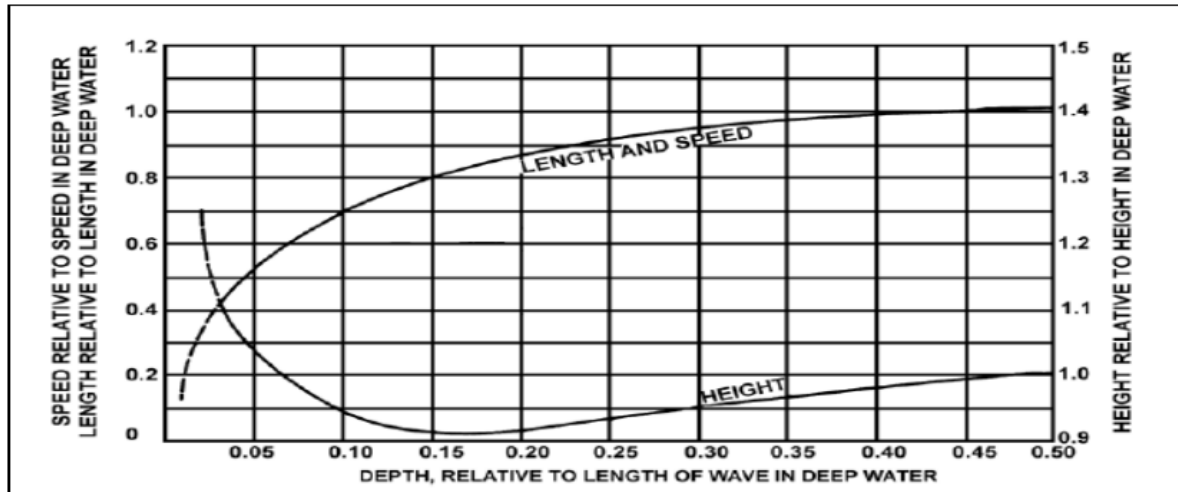
Κλάσεις περιόδου $T_m$	Κεντρικές τιμές	Κλάσεις Ύψους $H_s$																	Total
		0-0.25	0.25-0.5	0.5-0.75	0.75-1	1-1.25	1.25-1.5	1.5-1.75	1.75-2	2-2.25	2.25-2.5	2.5-2.75	2.75-3	3-3.25	3.25-3.5	3.5-3.75	3.75-4	4-4.25	
		0.125	0.375	0.625	0.875	1.125	1.375	1.625	1.875	2.125	2.375	2.625	2.875	3.125	3.375	3.625	3.875	4.125	
1.5 - 1.75	1.625	0.475248	0.067893	0.022631	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.565771
1.75 - 2	1.875	0.611033	0.067893	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.678925
2 - 2.25	2.125	0.837341	0.226308	0.022631	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.08628
2.25 - 2.5	2.375	0.520509	0.203678	0.022631	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.746818
2.5 - 2.75	2.625	0.905233	0.565771	0.27157	0.045262	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.787836
2.75 - 3	2.875	1.176803	0.746818	0.339463	0.022631	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2.285714
3 - 3.25	3.125	0	0.565771	0.362093	0.226308	0.022631	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.176803
3.25 - 3.5	3.375	0	0.611033	0.475248	0.294201	0.090523	0.022631	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.493635
3.5 - 3.75	3.625	0	0	0.520509	0.316832	0.113154	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.950495
3.75 - 4	3.875	0	0	0.316832	0.27157	0.248939	0.113154	0.022631	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.973126
4 - 4.25	4.125	0	0	0	0.248939	0.27157	0.135785	0.022631	0.022631	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.701556
4.25 - 4.5	4.375	0	0	0	0.294201	0.203678	0.181047	0.090523	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.769448
4.5 - 4.75	4.625	0	0	0	0.158416	0.181047	0.181047	0.090523	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.611033
4.75 - 5	4.875	0	0	0	0	0.113154	0.181047	0.158416	0.090523	0.022631	0	0	0	0	0	0	0	0	0.565771
5 - 5.25	5.125	0	0	0	0	0.067893	0.045262	0.113154	0.135785	0.022631	0.090523	0	0	0	0	0	0	0	0.475248
5.25 - 5.5	5.375	0	0	0	0	0	0.067893	0.045262	0.045262	0.045262	0.045262	0	0.022631	0	0	0	0	0	0.27157
5.5 - 5.75	5.625	0	0	0	0	0	0.022631	0.045262	0	0.022631	0.045262	0	0	0	0	0	0	0	0.135785
5.75 - 6	5.875	0	0	0	0	0	0.022631	0.022631	0.045262	0	0.045262	0.022631	0.045262	0.022631	0	0	0	0	0.226308
6 - 6.25	6.125	0	0	0	0	0	0	0.022631	0.045262	0.022631	0.022631	0.022631	0.045262	0.022631	0	0	0	0	0.181047
6.25 - 6.5	6.375	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.022631	0	0.045262	0	0	0.022631	0	0.090523
6.5 - 6.75	6.625	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.022631	0.022631	0.022631	0.022631	0.022631	0	0	0	0.113154
6.75 - 7.00	6.875	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.022631	0	0	0	0.022631	0.022631	0	0.067893
7.00 - 7.25	7.125	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.022631	0	0	0	0.022631	0.045262
Total		4.526167	3.055163	2.353607	1.878359	1.312588	0.973126	0.633663	0.384724	0.135785	0.27157	0.135785	0.113154	0.113154	0.022631	0.022631	0.045262	0.022631	16

### 3.5 Αβαθή ύδατα

Στη συνέχεια της εργασίας έγινε διόδευση των κυματισμών στα ενδιάμεσα ύδατα, σε μια θέση όπου υπάρχει ένα υποτιθέμενο λιμενικό έργο. Καθώς ένας κυματισμός προχωράει προς την ακτή, δηλαδή από τα βαθιά ύδατα προς τα αβαθή, το χαρακτηριστικό ύψος κύματος  $H_s$  αλλάζει. Αυτό συμβαίνει κυρίως, διότι καθώς το βάθος του νερού μειώνεται, αρχίζει να αυξάνεται η επίδραση του πυθμένα στη ροή (φαινόμενο ρήχωσης). Επίσης, σημαντικό ρόλο στη μεταβολή του ύψους κύματος διαδραματίζουν και άλλα φαινόμενα, όπως η διάθλαση, σε περίπτωση που ο κυματισμός δεν διαδίδεται με κατεύθυνση κάθετη προς την ακτογραμμή, αλλά υπό κάποια γωνία, αλλά και η ανάκλαση και η περίθλαση σε περίπτωση που υπάρχει στην πορεία διάδοσης του κύματος κάποιο φυσικό ή τεχνητό στερεό όριο (κυματοθραύστης, λιμενοβραχίονας).

Σχετικά με το φαινόμενο της ρήχωσης στο ακόλουθο σχήμα απεικονίζεται η επίδραση του πυθμένα και του σχετικού βάθους ( $\frac{d}{L}$ ) στη μεταβολή του ύψους κύματος, του μήκους κύματος και της ταχύτητάς του. Παρατηρούμε ότι το ύψος κύματος μειώνεται σταδιακά, έως κάποιο βάθος, μετά το οποίο αυξάνεται, μέχρις ότου φτάσει στην ακτογραμμή





**Εικόνα 3.3** Επίδραση του πυθμένα στη μεταβολή ύψους κύματος, του μήκους κύματος και της ταχύτητάς του, λόγω ρήξης (Πηγή: <http://www.nga.mil>)

Η διόδευση των κυματισμών στα ενδιάμεσα ύδατα έγινε σε ένα βάθος στο οποίο οι κυματισμοί δεν υφίσταται θραύσης λόγω ρήξης. Όπως αναφέρθηκε και στο δεύτερο κεφάλαιο η θραύση του κυματισμού (breaking) συμβαίνει, προσεγγιστικά, όταν ο λόγος του ύψους κύματος  $H$  ως προς το βάθος του νερού  $d$ , σε ένα σημείο, λαμβάνει τιμή περίπου 0.78. Για μεγαλύτερη τιμή του λόγου από 0.78 ο κυματισμός έχει ήδη θραυστεί (σχέση 2.41). Συνεπώς για λόγους ασφαλείας, το βάθος νερού  $d$  στο οποίο θα πραγματοποιηθεί η διόδευση είναι ίσο περίπου με μιάμιση φορά το μεγαλύτερο ύψος κύματος  $H_{max}$  που παρουσιάζεται στους πίνακες των δεδομένων (με συχνότητα εμφάνισης μη μηδενική). Έτσι προκειμένου να εξασφαλιστεί ότι δεν έχει συμβεί ακόμη θραύση έχουμε:

$$\frac{H_b}{d_b} \approx 0.78 \rightarrow d_b \approx 1.28 H_b \rightarrow d_b = 7.5 \text{ m} \quad (3.2)$$

Για την επίδραση του φαινομένου της διάθλασης στο οποίο διαδραματίζει σημαντικό ρόλο η διεύθυνση των κυματισμών, υποτέθηκε η ύπαρξη ενός έργου προστασίας μιας ακτογραμμής όπου οι ισοβαθείς είναι παράλληλες με την Ανατολική και Δυτική διεύθυνση και τα μεγάλα αναπτύγματα πελάγους βρίσκονται Νότια της ακτογραμμής. Δηλαδή οι κυματισμοί οι οποίοι επιδρούν στην ακτογραμμή και κατά συνέπεια και στην κατασκευή είναι εκείνοι με Νότια, Νοτιοανατολική και Νοτιοδυτική διεύθυνση. Επομένως στη μελέτη στα ενδιάμεσα νερά οι άνεμοι οι οποίοι επιδρούν στην υποτιθέμενη κατασκευή είναι αντίστοιχα οι Νότιος, Νοτιοανατολικός και ο Νοτιοδυτικός. Με την παραδοχή αυτή οι κυματισμοί οι οποίοι προέρχονται από τις υπόλοιπες διευθύνσεις δεν έχουν επίδραση και για αυτό δεν λαμβάνονται υπόψη. Το βάθος του έργου είναι στα 7.5 m, όπου όπως αναφέρθηκε νωρίτερα, δεν υπάρχει επίδραση του φαινομένου της θραύσης. Η αρχική γωνία των κυματισμών στα βαθιά θεωρήθηκε προσεγγιστικά ότι είναι 0 μοίρες όταν πνέει Νότιος άνεμος, 45 μοίρες όταν πνέει

Νοτιοανατολικός και -45 μοίρες όταν πνέει Νοτιοδυτικός. Η παραδοχή αυτή έγινε, χάριν απλοποίησης.

Έχοντας κατασκευάσει τους πίνακες με κλάσεις σταθερού πλάτους για κάθε άνεμο στα βαθειά νερά επιλέγουμε τις κεντρικές τιμές των χαρακτηριστικών υψών  $H_s$  από τους πίνακες για τους τρεις ανέμους ενδιαφέροντος που δημιουργούν κυματισμούς με κατεύθυνση προς το έργο. Με κατάλληλο κώδικα σε πρόγραμμα Matlab οι κεντρικές τιμές σε κάθε πίνακα αλλάζουν λαμβάνοντας την επίδραση της ρήχωσης και της διάθλασης.

Εν συντομία στον κώδικα, αρχικά υπολογίζεται το μήκος κύματος στα βαθειά ύδατα για κάθε κεντρική τιμή της μέσης περιόδου και στη συνέχεια εφαρμόζεται η εξίσωση διασποράς (με δοκιμές μέσω του κώδικα) ώστε να υπολογιστεί το μήκος κύματος, πάλι για όλες τις κεντρικές τιμές της  $T_m$  στο βάθος των 7,5 μέτρων. Έπειτα υπολογίζονται οι συντελεστές ρήχωσης για κάθε τιμή της  $T_m$  οι οποίοι είναι κοινοί και για τις τρεις διευθύνσεις και οι συντελεστές διάθλασης με εφαρμογή του νόμου του Snell για κάθε τιμή της  $T_m$  και για κάθε διεύθυνση. Για τη Νότια διεύθυνση οι συντελεστές διάθλασης ισούται με τη μονάδα καθώς η πρόσπτωση των κυματισμών είναι κάθετη στη θέση του υποτιθέμενου έργου, ενώ για τη Νοτιοανατολική και τη Νοτιοδυτική διεύθυνση οι συντελεστές διάθλασης συμπίπτουν (αρχικές γωνίες +45 -45). Στη συνέχεια οι κεντρικές τιμές των  $H_s$  και στους τρεις πίνακες πολλαπλασιάζονται με τους αντίστοιχους συντελεστές ρήχωσης και διάθλασης, έτσι ώστε να δούμε σε ποια κελιά των πινάκων οι κεντρικές τιμές βρίσκονται εκτός των ορίων των κλάσεων και επομένως οι από κοινού συχνότητες των εν λόγω υψών πρέπει να μετακινηθούν στη σωστή κλάση.

Οι συχνότητες των κυματισμών για τις τρεις διευθύνσεις (Νότια, Νοτιοανατολική, Νοτιοδυτική) που εξετάζονται στα ενδιάμεσα ύδατα είναι οι συχνότητες των τριών αντίστοιχων ανέμων που προκύπτουν από τα ανεμολογικά της Λήμνου. Το άθροισμα τους όπως παρατηρείται από τον πίνακα 3.10 είναι 24.49, δηλαδή και οι τρεις άνεμοι ανεξαρτήτου ταχύτητας εμφανίζονται 24,49 φορές στις 100 η 249,9 στις 1000 που μετά τις στρογγυλοποιήσεις έγιναν 255. Έπειτα από την αναδιάταξη των συχνοτήτων στις νέες κλάσεις στον πίνακα κάθε διεύθυνσης, οι πίνακες αυτοί αθροίστηκαν ανά κελί όπως έγινε στα βαθειά. Έτσι προέκυψε ο τελικός πίνακας με συνολικά 255 θαλάσσιες καταστάσεις όπου απεικονίζονται τα ζεύγη των κεντρικών τιμών των  $H_s$  και  $T_m$  με τις από κοινού συχνότητες εμφάνισης τους για το βάθος των 7.5 μέτρων.

Οι πραγματικές πιθανότητες κάθε ζεύγους  $H_s$  και  $T_m$  στο βάθος των 7.5 μέτρων προκύπτει αν διαιρέσουμε κάθε από κοινού συχνότητα σε κάθε κελί του πίνακα 3.32 με το συνολικό αριθμό παρατηρήσεων του πίνακα 3.21 που είναι 1004. Ωστόσο όπως προαναφέραμε για την παραγωγή των πιθανοτικών εικόνων στο βάθος των 7.5 μέτρων θεωρούμε ότι πνέουν μόνο οι τρεις άνεμοι με κατεύθυνση προς το υποτιθέμενο έργο οπότε δεδομένο αυτού οι πιθανότητες προκύπτουν διαιρώντας με τον αριθμό παρατηρήσεων που προκύπτουν λόγω αυτών των ανέμων, δηλαδή 255. Παρακάτω παρατίθεται ο τελικός πίνακας πάνω στον οποίο εφαρμόστηκε το μοντέλο δεσμευμένης πιθανότητας για το βάθος των 7,5 μέτρων.

**Πίνακας 3.32** Από κοινού συχνότητες εμφάνισης των κεντρικών τιμών των κλάσεων σταθερού πλάτους του χαρακτηριστικού ύψους κύματος  $H_s$  και της μέσης περιόδου  $T_m$ , για το βάθος  $d=7.5$  m

Κλάσεις περιόδου $T_m$	Κεντρικές Τιμές	Κλάσεις Ύψους κύματος $H_s$															Total	
		0 - 0.25	0.25 - 0.5	0.5 - 0.75	0.75 - 1	1 - 1.25	1.25 - 1.5	1.5 - 1.75	1.75 - 2	2 - 2.25	2.25 - 2.5	2.5 - 2.75	2.75 - 3	3 - 3.25	3.25 - 3.5	3.5 - 3.75		3.75 - 4
		0.125	0.375	0.625	0.875	1.125	1.375	1.625	1.875	2.125	2.375	2.625	2.875	3.125	3.375	3.625		3.875
1.5 - 1.75	1.625	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3
1.75 - 2	1.875	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
2 - 2.25	2.125	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4
2.25 - 2.5	2.375	2	9	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	17
2.5 - 2.75	2.625	0	10	4	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	15
2.75 - 3	2.875	0	9	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	18
3 - 3.25	3.125	0	7	7	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	22
3.25 - 3.5	3.375	0	0	9	16	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	26
3.5 - 3.75	3.625	0	0	6	22	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	30
3.75 - 4	3.875	0	0	1	6	8	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	21
4 - 4.25	4.125	0	0	0	0	6	16	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	30
4.25 - 4.5	4.375	0	0	0	0	10	10	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	22
4.5 - 4.75	4.625	0	0	0	0	0	0	8	2	0	0	0	0	0	0	0	0	10
4.75 - 5	4.875	0	0	0	0	0	2	7	2	1	0	0	0	0	0	0	0	12
5 - 5.25	5.125	0	0	0	0	0	0	0	4	1	0	0	0	0	0	0	0	5
5.25 - 5.5	5.375	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	2	0	0	0	0	0	4
5.5 - 5.75	5.625	0	0	0	0	0	0	0	2	1	2	2	0	0	0	0	0	7
5.75 - 6	5.875	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	1	1	0	0	0	4
6 - 6.25	6.125	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1
6.25 - 6.5	6.375	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1
6.5 - 6.75	6.625	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6.75 - 7	6.875	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
<b>Total</b>		<b>7</b>	<b>38</b>	<b>42</b>	<b>53</b>	<b>27</b>	<b>34</b>	<b>25</b>	<b>10</b>	<b>4</b>	<b>3</b>	<b>6</b>	<b>2</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>255</b>

**Πίνακας 3.33** Από κοινού πυκνότητες πιθανότητας εμφάνισης των κεντρικών τιμών των κλάσεων σταθερού πλάτους του χαρακτηριστικού ύψους κύματος  $H_s$  και της μέσης περιόδου  $T_m$ , για το βάθος  $d=7.5$  m

Κλάσεις περιόδου $T_m$	Κεντρικές Τιμές	Κλάσεις Ύψους κύματος $H_s$																				Total
		0-0.25	0.25-0.5	0.5-0.75	0.75-1	1-1.25	1.25-1.5	1.5-1.75	1.75-2	2-2.25	2.25-2.5	2.5-2.75	2.75-3	3-3.25	3.25-3.5	3.5-3.75	3.75-4	4-4.25	4.25-4.5	4.5-4.75	4.75-5	
		0.125	0.375	0.625	0.875	1.125	1.375	1.625	1.875	2.125	2.375	2.625	2.875	3.125	3.375	3.625	3.875	4.125	4.375	4.625	4.875	
1.5 - 1.75	1.625	0.12549	0.062745	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.188235
1.75 - 2	1.875	0.062745	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.062745
2 - 2.25	2.125	0.12549	0.12549	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.25098
2.25 - 2.5	2.375	0.12549	0.564706	0.376471	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.066667
2.5 - 2.75	2.625	0	0.627451	0.25098	0.062745	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.941176
2.75 - 3	2.875	0	0.564706	0.564706	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.129412
3 - 3.25	3.125	0	0.439216	0.439216	0.501961	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.380392
3.25 - 3.5	3.375	0	0	0.564706	1.003922	0.062745	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.631373
3.5 - 3.75	3.625	0	0	0.376471	1.380392	0.12549	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.882353
3.75 - 4	3.875	0	0	0.062745	0.376471	0.501961	0.376471	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.317647
4 - 4.25	4.125	0	0	0	0	0.376471	1.003922	0.501961	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.882353
4.25 - 4.5	4.375	0	0	0	0	0.627451	0.627451	0.12549	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.380392
4.5 - 4.75	4.625	0	0	0	0	0	0	0.501961	0.12549	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.627451
4.75 - 5	4.875	0	0	0	0	0	0.12549	0.439216	0.12549	0.062745	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.752941
5 - 5.25	5.125	0	0	0	0	0	0	0	0.25098	0.062745	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.313725
5.25 - 5.5	5.375	0	0	0	0	0	0	0	0	0.062745	0.062745	0.12549	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.25098
5.5 - 5.75	5.625	0	0	0	0	0	0	0	0.12549	0.062745	0.12549	0.12549	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.439216
5.75 - 6	5.875	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.12549	0	0.062745	0.062745	0	0	0	0	0	0	0.25098
6 - 6.25	6.125	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.062745	0	0	0	0	0	0	0	0.062745
6.25 - 6.5	6.375	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.062745	0	0	0	0	0	0	0	0.062745
6.5 - 6.75	6.625	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6.75 - 7	6.875	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.062745	0	0	0	0	0.062745
7-7.25	7.125	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7.25-7.5	7.375	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.062745	0.062745
Total		0.439216	2.384314	2.635294	3.32549	1.694118	2.133333	1.568627	0.627451	0.25098	0.188235	0.376471	0.12549	0.062745	0.062745	0	0.062745	0	0	0	0.062745	16

## 3.6 Μοντέλο δεσμευμένης πιθανότητας

### 3.6.1 Περιγραφή του μοντέλου

Στην παράγραφο αυτή παρατίθεται η διαδικασία που εφαρμόζεται στα πλαίσια του μοντέλου δεσμευμένης πιθανότητας για τα βαθιά ύδατα και για το βάθος των 7,5 μέτρων. Αρχικά, προσαρμόζονται στο χαρακτηριστικό ύψος κύματος  $H_s$  και στη μέση περίοδο  $T_m$  οι κατανομές μίας μεταβλητής (Lognormal, Weibull) και έπειτα το εν λόγω μοντέλο των δύο μεταβλητών. Το μοντέλο δεσμευμένης πιθανότητας εφαρμόζεται σε όλες τις περιπτώσεις ανεμολογικών δεδομένων που αναλύθηκαν παραπάνω αλλά και στα δεδομένα που προέκυψαν από πραγματικές μετρήσεις πεδίου. Αφετηρία των υπολογισμών ανά περίπτωση είναι οι πίνακες 3.21, 3.24, 3.27 3.30 για τα βαθιά ύδατα και ο πίνακας 3.32 για το βάθος των 7,5 μέτρων. Σε όλες τις περιπτώσεις υπολογίζεται και το σφάλμα του μοντέλου, που είναι η ευκλείδειος απόσταση μεταξύ των πραγματικών πιθανοτήτων και των θεωρητικών που προέκυψαν από το μοντέλο.

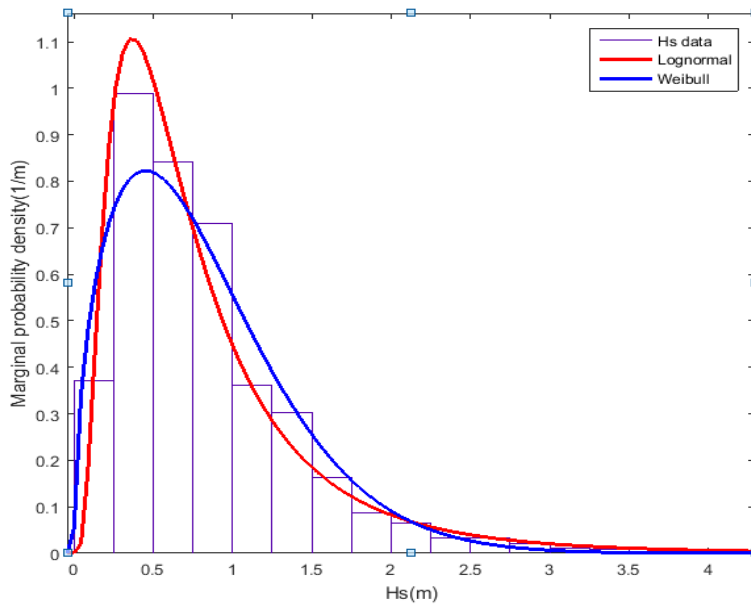
Για την εφαρμογή του μοντέλου δεσμευμένης πιθανότητας απ' όπου υπολογίζονται οι από κοινού πυκνότητες πιθανότητας του χαρακτηριστικού ύψους  $H_s$  και της μέσης περιόδου  $T_m$  κατασκευάστηκαν κατάλληλοι κώδικες σε προγραμματιστικό περιβάλλον Matlab στους οποίους εισάγονται τα στοιχεία υπό μορφή συχνοτήτων. Για το χαρακτηριστικό ύψος κύματος χρειάζεται μόνο το ιστόγραμμα των περιθωρίων (marginal) συχνοτήτων. Για τη μέση περίοδο απαιτούνται οι από κοινού συχνότητες εμφάνισης των δύο μεγεθών, δηλαδή, για κάθε μία τιμή του ύψους κύματος  $H_s$  κατασκευάζεται και ένα ξεχωριστό ιστόγραμμα μέσης περιόδου  $T_m$  στο οποίο προσαρμόζεται μία κατανομή.

### 3.6.2 Μακροχρόνιες κατανομές πυκνότητας πιθανότητας χαρακτηριστικού ύψους κύματος και μέσης περιόδου

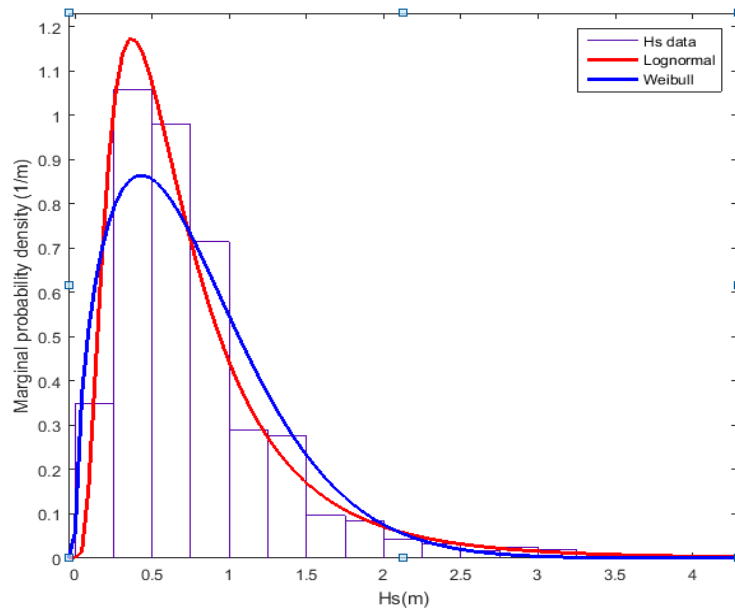
Προκειμένου να εφαρμοσθεί το μοντέλο δεσμευμένης πιθανότητας (conditional model) ώστε να ευρεθεί η συνάρτηση από κοινού πυκνότητας πιθανότητας (joint probability density function) του χαρακτηριστικού ύψους κύματος  $H_s$  και της μέσης περιόδου  $T_m$ , απαιτείται γνώση της περιθωριας κατανομής (marginal distribution) του  $H_s$  καθώς και της κατανομής δεσμευμένης πιθανότητας (conditional distribution) της  $T_m$  ως προς το  $H_s$ . Ερευνώνται δύο διαφορετικές περιπτώσεις:

- i. Λογαριθμοκανονική κατανομή (lognormal distribution) και για το χαρακτηριστικό ύψος κύματος  $H_s$  και για τη μέση περίοδο  $T_m|H_s$
- ii. Κατανομή Weibull για το χαρακτηριστικό ύψος κύματος  $H_s$  και λογαριθμοκανονική κατανομή για τη μέση περίοδο  $T_m|H_s$

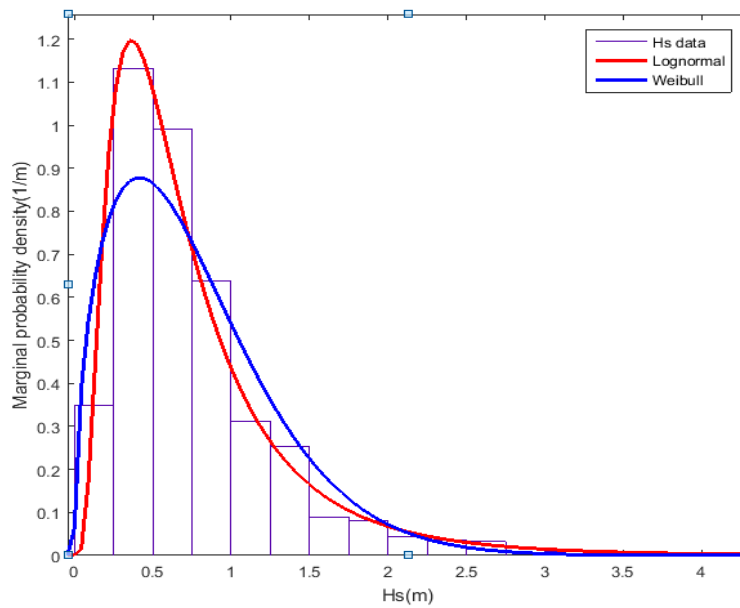
Όσον αφορά το χαρακτηριστικό ύψος  $H_s$  οι περιθώριες συχνότητες του που εισήχθησαν στο λογισμικό Matlab φαίνονται με έντονα μαυρισμένα γράμματα στην τελευταία σειρά των πινάκων 3.21, 3.24, 3.27 3.30 για τα βαθειά και στον πίνακα 3.32 για τα ενδιάμεσα ύδατα. Σε κάθε περίπτωση κατασκευάστηκαν τα ιστογράμματα περιθωρίων συχνοτήτων για το  $H_s$  πάνω στα οποία προσαρμόστηκαν οι κατανομές Lognormal και Weibull. Για την εκτίμηση των παραμέτρων  $\alpha, \beta$  (λογαριθμικής κατανομής) και  $\alpha^*, \beta^*$  (κατανομής Weibull) το πρόγραμμα χρησιμοποιεί τη μέθοδο μέγιστης πιθανοφάνειας (Maximum likelihood method) που περιγράφεται από τη σχέση 2.63. Παρακάτω φαίνεται η προσαρμογή των κατανομών στο ιστόγραμμα περιθωρίων συχνοτήτων του χαρακτηριστικού ύψους κύματος  $H_s$ , για τις περιπτώσεις των βαθέων και των ενδιάμεσων υδάτων.



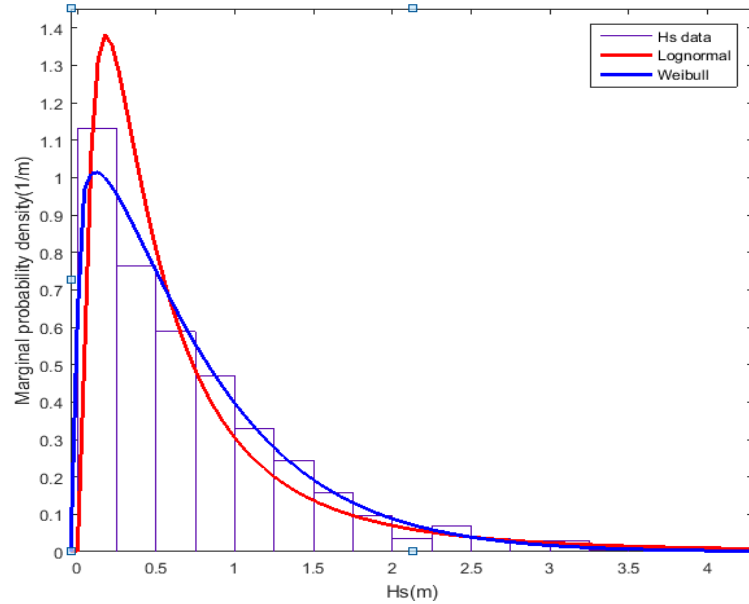
**Εικόνα 3.4** Προσαρμογή κατανομών Lognormal και Weibull στο ιστόγραμμα περιθωρίων συχνοτήτων εμφάνισης του χαρακτηριστικού ύψους κύματος  $H_s$  που προέκυψε από τα ανεμολογικά δεδομένα της Λήμνου για βαθειά νερά



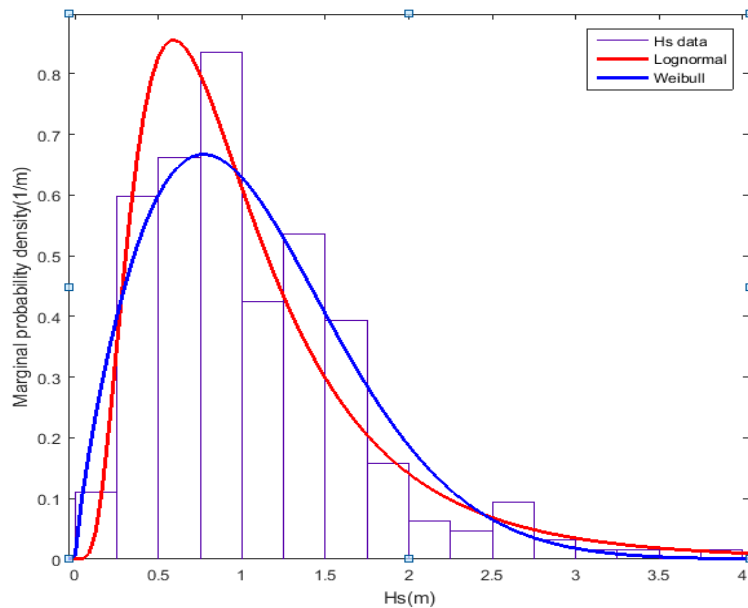
**Εικόνα 3.5** Προσαρμογή κατανομών Lognormal και Weibull στο ιστόγραμμα περιθωρίων συχνοτήτων εμφάνισης του χαρακτηριστικού ύψους κύματος  $H_s$  που προέκυψε από τα συνδυασμένα ανεμολογικά δεδομένα των περιοχών Λήμνος-Αλεξανδρούπολη για βαθειά νερά



**Εικόνα 3.6** Προσαρμογή κατανομών Lognormal και Weibull στο ιστόγραμμα περιθωρίων συχνοτήτων εμφάνισης του χαρακτηριστικού ύψους κύματος  $H_s$  που προέκυψε από τα συνδυασμένα ανεμολογικά δεδομένα των περιοχών Λήμνος-Αλεξανδρούπολη-Καβάλα για βαθειά νερά



**Εικόνα 3.7** Προσαρμογή της κατανομής Weibull στο ιστόγραμμα περιθωρίων συχνότητας εμφάνισης του χαρακτηριστικού ύψους κύματος  $H_s$  που προέκυψε από τις μετρήσεις του Ατλαντα για βαθιά ύδατα

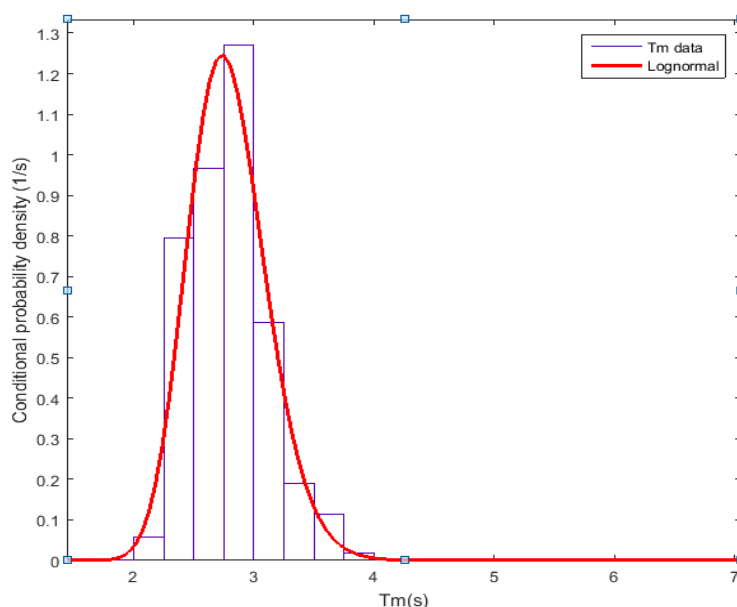


**Εικόνα 3.8** Προσαρμογή κατανομής Weibull στο ιστόγραμμα περιθωρίων συχνότητας εμφάνισης του χαρακτηριστικού ύψους κύματος  $H_s$  που προέκυψε από ανεμολογικά δεδομένα για βάθος  $d=7.5m$

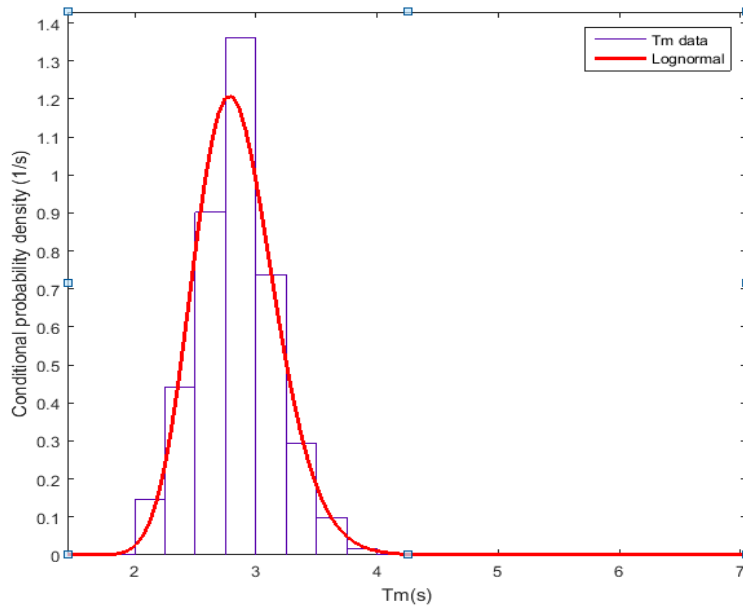


Όπως παρατηρείται στα παραπάνω σχήματα για τα βαθειά και τα ενδιάμεσα ύδατα και οι δυο κατανομές προσαρμόζονται αρκετά ικανοποιητικά στο ιστόγραμμα των περιθωρίων συχνότητων του χαρακτηριστικού ύψους κύματος. Τα ιστογράμματα που προκύπτουν για τα βαθειά ύδατα από τα ανεμολογικά δεδομένα των τριών περιπτώσεων εμφανίζουν αρκετές ομοιότητες μεταξύ και αυτό είναι λογικό καθώς οι συχνότητες κάποιων ανέμων και επομένως και κάποιων υψών  $H_s$  είναι κοινές. Για παράδειγμα και στις τρεις περιπτώσεις οι συχνότητες του Νότιου, Νοτιοανατολικού και του Νοτιοδυτικού έχουν προκύψει από τα ανεμολογικά δεδομένα της Λήμνου. Όσον αφορά τη λογαριθμοκανονική κατανομή εν γένει δίνει μια ικανοποιητική συνολική προσαρμογή (fit) στα δεδομένα, αλλά έχει μικρές αποκλίσεις από αυτά για μεγάλες τιμές του  $H_s$  καθώς υπερεκτιμά την περιθώρια πυκνότητα του, ενώ για μεσαίες τιμές  $H_s = 0.125 - 1,5 m$  έχει πολύ καλή προσαρμογή. Αντίθετα, η κατανομή Weibull φαίνεται να προσαρμόζεται καλύτερα στις μεγάλες τιμές ύψους κύματος (uppertail) για  $H_s > 1.75 m$  περίπου, γεγονός που οφείλεται στο ότι η ίδια είναι μια κατανομή ακραίων τιμών.

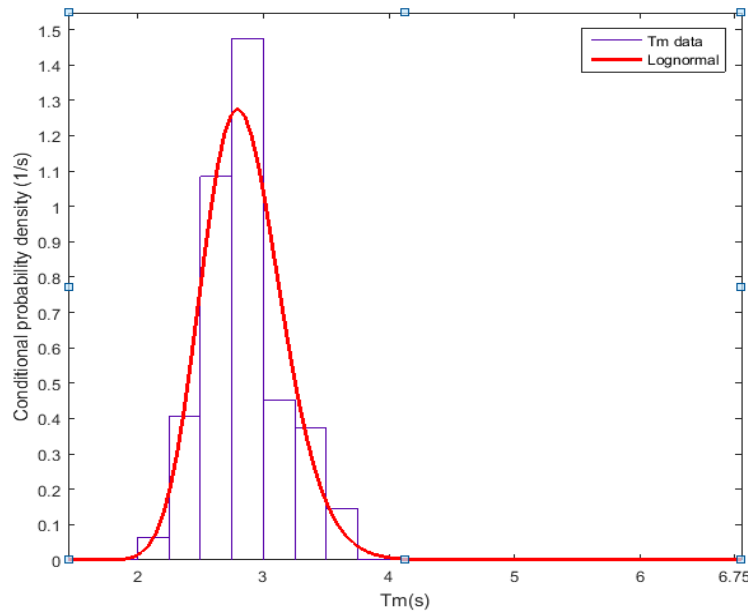
Για την μέση περίοδο δεσμευμένη ως προς το  $H_s$  κατασκευάστηκαν τόσα ιστογράμματα, όσες ήταν και οι κεντρικές τιμές των  $H_s$ . Οι από κοινού συχνότητες ομοίως με πριν λαμβάνονται από τους πίνακες 3.21, 3.24, 3.27 3.30 για τα βαθειά και στον πίνακα 3.32 για τα ενδιάμεσα ύδατα. Στις εικόνες 3.8-3.12 παρατίθενται ενδεικτικά η προσαρμογή της κατανομής Lognormal στο ιστόγραμμα των συχνότητων της μέσης περιόδου  $T_m$  για ύψος κύματος  $H_s = 0.625m$  ( $j=3$  στους πίνακες).



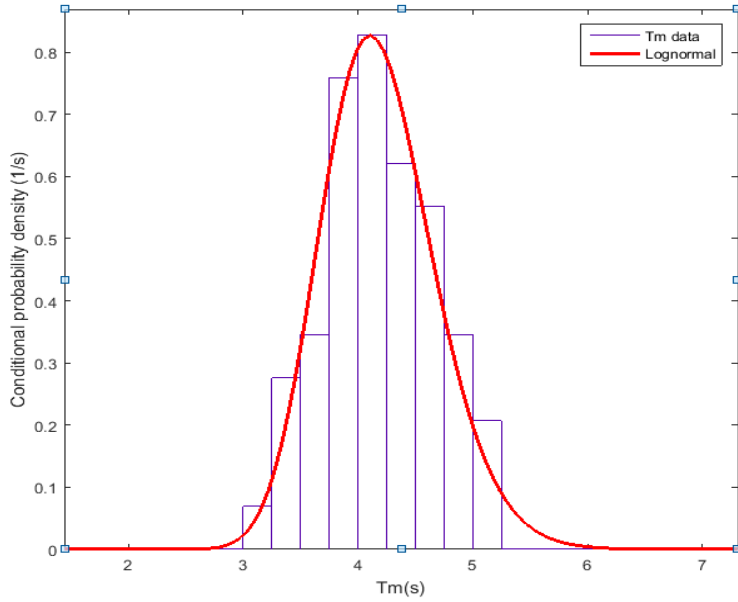
**Εικόνα 3.9** Προσαρμογή λογαριθμικής κατανομής στο ιστόγραμμα συχνότητων εμφάνισης της δεσμευμένης μέσης περιόδου  $T_m|H_s$  που προέκυψε από τα ανεμολογικά δεδομένα της Λήμνου, για  $H_s=0.625m$  για βαθειά ύδατα



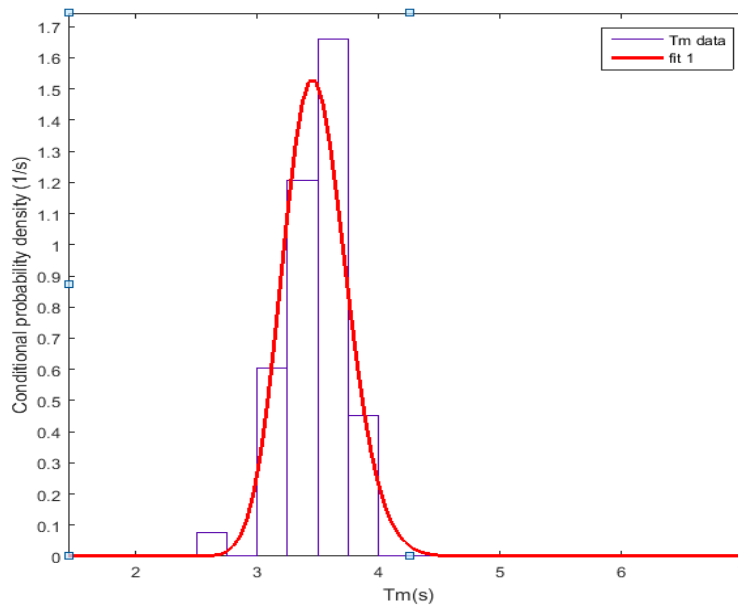
**Εικόνα 3.10** Προσαρμογή λογαριθμικής κατανομής στο ιστόγραμμα συχνοτήτων εμφάνισης της δεσμευμένης μέσης περιόδου  $T_m|H_s$  που προέκυψε από τα συνδυασμένα ανεμολογικά των περιοχών Λήμνος-Αλεξανδρούπολη, για  $H_s=0.625\text{m}$  για βαθειά ύδατα



**Εικόνα 3.11** Προσαρμογή λογαριθμικής κατανομής στο ιστόγραμμα συχνοτήτων εμφάνισης της δεσμευμένης μέσης περιόδου  $T_m|H_s$  που προέκυψε από τα συνδυασμένα ανεμολογικά των περιοχών Λήμνος-Αλεξανδρούπολη-Καβάλα για  $H_s=0.625\text{m}$  για βαθειά ύδατα



**Εικόνα 3.12** Προσαρμογή λογαριθμικής κατανομής στο ιστόγραμμα συχνότητας εμφάνισης της δεσμευμένης μέσης περιόδου  $T_m|H_s$  που προέκυψε από τις μετρήσεις του Άτλαντα για  $H_s=0.625$ m για βαθιά ύδατα



**Εικόνα 3.13** Προσαρμογή λογαριθμικής κατανομής στο ιστόγραμμα συχνότητας εμφάνισης της δεσμευμένης μέσης περιόδου  $T_m|H_s$  που προέκυψε από ανεμολογικά δεδομένα, για  $H_s=0.625$ m και βάθος  $d=7.5$ m

Αν παρατηρήσουμε τα παραπάνω σχήματα φαίνεται ότι η κατανομή lognormal εμφανίζει ιδιαίτερα ικανοποιητική προσαρμογή στο ιστόγραμμα συχνοτήτων της μέσης περιόδου για χαρακτηριστικό ύψος  $H_s = 0.625 m$ . Παρόμοια είναι και η προσαρμογή της λογαριθμοκανονικής κατανομής στο ιστόγραμμα της μέσης περιόδου και για τα υπόλοιπα ύψη κύματος. Μικρή εξαίρεση αποτελούν τα σχήματα 3.10, 3.11 όπου για τις τιμές της μέσης περιόδου  $T_m = 2.75 - 3 s$  η λογαριθμοκανονική κατανομή υποεκτιμά την τιμή της πυκνότητας πιθανότητας σε σχέση με την τιμή που προκύπτει από το ιστόγραμμα.

Να διευκρινιστεί στις περιπτώσεις που στους πίνακες με τις από κοινού συχνότητες των  $H_s$  και  $T_m$  στις στήλες στις οποίες υπάρχει μόνο μια μη μηδενική τιμή δεν είναι δυνατή η προσαρμογή της λογαριθμοκανονικής κατανομής στην  $T_m|H_s$ . Για παράδειγμα στον πίνακα 3.21 για ύψος κύματος  $H_s = 3.625 m$  αντιστοιχεί μόνο μια περίοδος με τιμή  $T_m = 5.875 s$ . Αυτό σημαίνει ότι η τιμή της πιθανότητας να υπάρξει οποιαδήποτε τιμή της περιόδου εκτός από αυτής της τιμής είναι μηδενική, ενώ η πιθανότητα για το δεδομένο ύψος κύματος να υπάρξει η συγκεκριμένη περίοδος ισούται με τη μονάδα. Επομένως κατά την εφαρμογή του μοντέλου δεσμευμένης πιθανότητας η πυκνότητα πιθανότητας της περιόδου  $T_m|H_s$  για τα κελιά αυτά δεν υπολογίζεται από τη σχέση 2.60, αλλά υπολογίζεται διαιρώντας την πιθανότητα της που ισούται με τη μονάδα, με το χρονικό βήμα 0.25. Αναλυτικά αυτό παρουσιάζεται στους κώδικες υπολογισμού στο υπόμνημα της παρούσας εργασίας.

### 3.6.3 Μακροχρόνια από κοινού κατανομή του χαρακτηριστικού ύψους και της μέσης περιόδου

Αφού υπολογίστηκαν ξεχωριστά οι περιθώριες πυκνότητες πιθανότητας του χαρακτηριστικού ύψους κύματος  $H_s$  και της μέσης περιόδου  $T_m|H_s$  η εκτίμηση της από κοινού πυκνότητας πιθανότητας τους προκύπτει από τη σχέση 2.68 της υποενότητας 2.5.3. Η σχέση αυτή είναι ενσωματωμένη στους κώδικες Matlab που προαναφέρθηκαν και τα αποτελέσματα σε μορφή πινάκων εξάγονται από εκεί.

Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την εφαρμογή της σχέσης 2.68 δίνονται σε πίνακες ίδιων διαστάσεων με τους αρχικούς πίνακες δεδομένων (και για τα βαθιά και για τα ενδιάμεσα ύδατα), όπου φαίνονται οι κεντρικές τιμές των  $H_s$  και  $T_m$  και οι θεωρητικές από κοινού πυκνότητες πιθανότητας που υπολογίστηκαν από το μοντέλο. Η απεικόνιση της κατανομής των  $H_s$  και  $T_m$  προκύπτει ύστερα από την εισαγωγή των τιμών των πυκνοτήτων τους στο πρόγραμμα *surfer*.

Να σημειωθεί ότι οι πίνακες με τα αποτελέσματα της εφαρμογής του μοντέλου για τις περιπτώσεις των βαθέων και των ενδιάμεσων υδάτων όπως και η διαγραμματική απεικόνιση των αποτελεσμάτων αυτών με τη μορφή καμπυλών ίσης πυκνότητας πιθανότητας θα δοθεί συγκεντρωτικά στο κεφάλαιο 4 όπου θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα της εργασίας και θα γίνει κατάλληλος σχολιασμός τους.

### 3.7 Μακροχρόνια από κοινού κατανομή του χαρακτηριστικού ύψους κύματος και της περιόδου συσχετίζοντας τις παραμέτρους $\alpha$ $\beta$ της λογαριθμοκανονικής κατανομής με το χαρακτηριστικό ύψος κύματος

Το μοντέλο δεσμευμένης πιθανότητας όπως εφαρμόστηκε παραπάνω, δίνει τη δυνατότητα να εμφανιστούν κάποια ζεύγη τιμών  $H_s$  και  $T_m$  που πρίν εμφάνιζαν μηδενικές πιθανότητες. Όπως αναφέραμε σε κάθε κλάση χαρακτηριστικού ύψους και περιόδου αντιπροσωπευτική τιμή θεωρείται η κεντρική τιμή της κλάσης. Οι παράμετροι των κατανομών υπολογίζονται από τις σχέσεις 2.64 και 2.65 για την λογαριθμοκανονική κατανομή, και 2.66 και 2.67 για την κατανομή Weibull, οι οποίες προέκυψαν με τη μέθοδο μέγιστης πιθανοφάνειας (maximum likelihood method) σύμφωνα με τους Athanasoulis et. al.(1994).

Οι παράμετροι των κατανομών όπως φαίνεται και από τις σχέσεις υπολογίζονται με βάση την κεντρική τιμή του μεγέθους στο ιστόγραμμα του οποίου θα προσαρμοσθεί η κατανομή. Το  $x$  δηλαδή στις εξισώσεις υπολογισμού των παραμέτρων είναι, είτε οι κεντρικές τιμές των μέσων περιόδων (στις παραμέτρους της λογαριθμοκανονικής κατανομής), είτε των χαρακτηριστικών υψών (στις παραμέτρους της κατανομής Weibull). Με τον τρόπο αυτό, όταν προσαρμόζεται η λογαριθμοκανονική κατανομή στη μέση περίοδο δεσμευμένη ως προς μια κεντρική τιμή του  $H_s$  χάνεται η πληροφορία για τις υπόλοιπες τιμές της κλάσης του χαρακτηριστικού ύψους κύματος. Δηλαδή για παράδειγμα εάν θέλαμε να υπολογίσουμε την κατανομή της μέσης περιόδου δεσμευμένη ως προς ένα χαρακτηριστικό ύψος κύματος με τιμή  $H_s = 0.2 m$  που δεν αποτελεί κεντρική τιμή της κλάσης αυτό δεν θα ήταν δυνατό.

Για να εξασφαλίσουμε λοιπόν μια συνέχεια (continuity) στην εξάρτηση (conditionality) της μέσης περιόδου  $T_m$  και του χαρακτηριστικού ύψους κύματος  $H_s$  έγινε μια προσπάθεια έκφρασης των παραμέτρων  $\alpha$ ,  $\beta$  της λογαριθμοκανονικής συναρτήσεως του χαρακτηριστικού ύψους κύματος. Με τον τρόπο αυτό οι παράμετροι υπολογίζονται μέσα από συναρτήσεις που εξαρτημένη μεταβλητή αποτελούν οι ίδιες οι παράμετροι ενώ ανεξάρτητη μεταβλητή είναι το χαρακτηριστικό ύψος κύματος. Οι συναρτήσεις αυτές επιλέχθηκαν έπειτα από πολλές δοκιμές στο λογισμικό Matlab (curve fitting), έτσι ώστε η καμπύλη των συναρτήσεων να προσεγγίζει όσο περισσότερο γίνεται τις τιμές (που εμφανίζονται με μορφή κουκίδων στο γράφημα) των παραμέτρων όπως αυτές υπολογίστηκαν από τις σχέσεις 2.66, 2.67. Ο τρόπος αυτός υπολογισμού έχει ξαναγίνει και σε παλαιότερη έρευνα (Li et. al 2013) όπου κατά την προσαρμογή της λογαριθμοκανονικής κατανομής στο ιστόγραμμα της μέσης περιόδου  $T_m|H_s$ , οι παράμετροι υπολογίστηκαν ως εκθετικές συναρτήσεις του χαρακτηριστικού ύψους κύματος. Στην παρούσα εργασία οι συναρτήσεις που επιλέχθηκαν έπειτα από δοκιμές είναι:

$$\text{Για την παράμετρο } \alpha: \alpha = (p1 * Hs + p2) / (Hs + q1) \quad (3.3)$$

$$\text{Για την παράμετρο } \beta: \beta = c1 * \exp(c2 * Hs) \quad (3.4)$$

Όπου  $p_1$   $p_2$   $q_1$  είναι σταθεροί συντελεστές της κλασματικής συνάρτησης (rational function) και οι  $c_1$   $c_2$  είναι σταθεροί συντελεστές της εκθετικής συνάρτησης (exponential function) που υπολογίζονται από το λογισμικό Matlab. Οι παραπάνω εξισώσεις χρησιμοποιήθηκαν για τη συσχέτιση των παραμέτρων της λογαριθμοκανονικής κατανομής με το χαρακτηριστικό ύψος κύματος και για τα βαθειά και για τα ενδιάμεσα ύδατα

Παρατηρούμε ότι με βάση τις παραπάνω εξισώσεις για οποιαδήποτε τιμή του χαρακτηριστικού ύψους κύματος μπορούν να υπολογιστούν οι παράμετροι  $\alpha, \beta$ . Κατά συνέπεια εισάγοντας τις παραμέτρους αυτές για ένα τυχαίο  $H_s$  στις εξισώσεις 2.58, 2.59 μπορούμε να υπολογίσουμε την κατανομή της μέσης περιόδου δεσμευμένη ως προς το τυχαίο αυτό χαρακτηριστικό ύψος, κάτι που δεν μπορούσε να γίνει πριν όπου αντιπροσωπευτική τιμή κάθε κλάσης θεωρείτο η κεντρική της τιμή.

Αναλυτικότερα οι παραπάνω εξισώσεις με τους συντελεστές και τα γραφήματα τους, όπως και τα αποτελέσματα που προέκυψαν έπειτα από την εφαρμογή του μοντέλου δεσμευμένης πιθανότητας σε μορφή πίνακα αλλά και απεικονισμένα με τη μορφή καμπυλών ίσης πυκνότητας πιθανότητας, θα δοθούν στο επόμενο κεφάλαιο της εργασίας.

#### 4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΗΣ ΘΑΣΟΥ

Στο κεφάλαιο αυτό θα παρουσιαστούν αναλυτικά όλα τα αποτελέσματα της παρούσας διπλωματικής εργασίας, σε πίνακες με τις από κοινού πυκνότητες πιθανότητας του χαρακτηριστικού κύματος  $H_s$  και της μέσης περιόδου  $T_m$  για τα βαθιά και τα ενδιάμεσα ύδατα που προέκυψαν από την εφαρμογή του μοντέλου δεσμευμένης πιθανότητας (conditional model) για την περιοχή της Θάσου. Η απεικόνιση των από κοινού κατανομών των  $H_s$  και  $T_m$  θα παρουσιαστεί με τη μορφή καμπυλών ίσης πυκνότητας πιθανότητας, για την παραγωγή των οποίων χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα *surfer*. Αφετηρία όλων αυτών των αποτελεσμάτων για τα βαθιά ύδατα αποτέλεσαν οι αρχικοί πίνακες από κοινού συχνοτήτων των  $H_s$  και  $T_m$ , οι οποίοι κατασκευάστηκαν βάσει των ανεμολογικών δεδομένων για τρεις διαφορετικές περιπτώσεις όπως περιγράφηκε στο κεφάλαιο 3, και ο αρχικός πίνακας με δεδομένα από μετρήσεις πεδίου που ελήφθη από τον *Wind and Wave Mediterranean Atlas* και επεξεργάστηκε κατάλληλα. Ομοίως ισχύει και για τα ενδιάμεσα νερά.

Πιο συγκεκριμένα, αρχικά θα παρουσιαστούν οι κατανομές των  $H_s$  και  $T_m$  με τη μορφή καμπυλών ίσης πυκνότητας πιθανότητας όπως αυτές προέκυψαν για τα βαθιά ύδατα χωρίς την εφαρμογή κάποιου μοντέλου, αλλά διαιρώντας τη συχνότητα κάθε ζεύγους με το συνολικό πλήθος παρατηρήσεων και με το χωρικό και χρονικό βήμα ( $0.25^2$ ). Τα αποτελέσματα θα παρουσιαστούν μαζί για τις τέσσερις περιπτώσεις (τρεις των ανεμολογικών δεδομένων και μια οι μετρήσεις πεδίου) όπου θα ακολουθήσει σύγκριση μεταξύ τους. Η σύγκριση θα πραγματοποιηθεί μεταξύ κάθε μιας εικόνας που υπολογίστηκε βάσει ανεμολογικών δεδομένων και της εικόνας που προέκυψε από τις πραγματικές μετρήσεις πεδίου. Σκοπός τη σύγκρισης είναι να δούμε το κατά πόσον η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε υπολογίζοντας τα μεγέθη  $H_s$  και  $T_m$  σύμφωνα με τη μέθοδο πρόγνωσης κυματισμών του CEM και κατασκευάζοντας τους πίνακες από κοινού συχνοτήτων τους με βάση τα ανεμολογικά δεδομένα, δίνει αποτελέσματα που είναι κοντινά με αυτά που προκύπτουν από πραγματικές μετρήσεις πεδίου. Για τη σύγκριση αυτή υπολογίστηκε το μεταξύ τους σφάλμα, που εκφράζεται με την Ευκλείδειο απόσταση των πιθανοτήτων τους.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι κατανομές των  $H_s$  και  $T_m$  έπειτα από την εφαρμογή του μοντέλου δεσμευμένης πιθανότητας σε κάθε μία περίπτωση. Για το μοντέλο χρησιμοποιήθηκαν οι κατανομές Lognormal και Weibull και υπολογίστηκαν τα σφάλματα των μοντέλων τα οποία αναγράφονται πάνω σε κάθε πιθανοτική εικόνα, όπως επίσης και ο συντελεστής συσχέτισης των μεγεθών  $H_s$  και  $T_m$ . Ακολούθησε σύγκριση των αποτελεσμάτων των ανεμολογικών δεδομένων και των πραγματικών μετρήσεων (όπως περιγράφηκε στη παραπάνω παράγραφο).

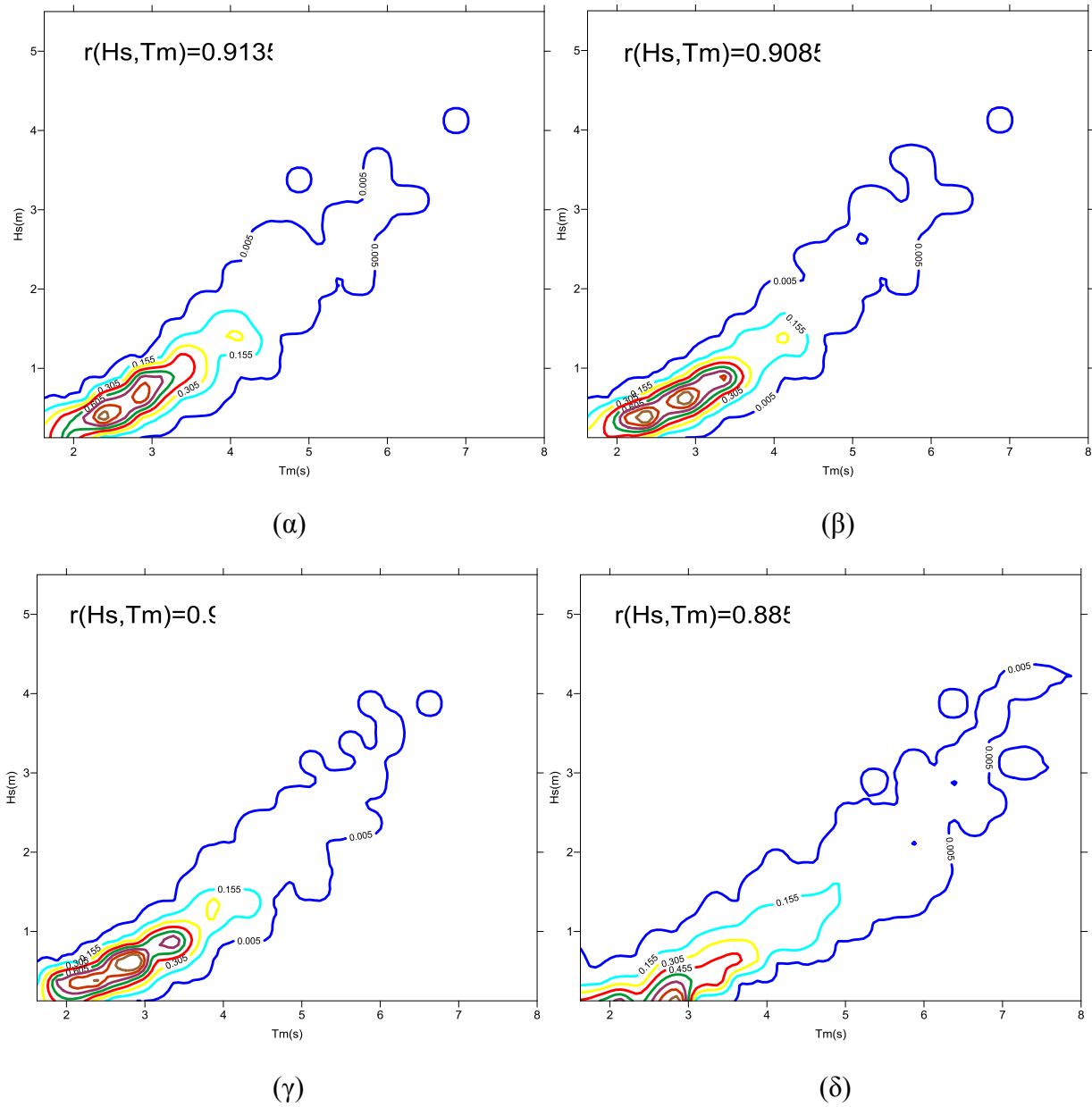
Ακολουθεί η πιθανοτική απεικόνιση του χαρακτηριστικού ύψους  $H_s$  και της μέσης περιόδου  $T_m$ , ύστερα από την εφαρμογή του μοντέλου δεσμευμένης πιθανότητας, όπου οι παράμετροι της λογαριθμικής κατανομής υπολογίστηκαν σαν συναρτήσεις του χαρακτηριστικού ύψους κύματος, όπως περιγράφηκε στην υποενότητα 3.7.

Τέλος παρουσιάζονται οι κατανομές των  $H_s$  και  $T_m$  για το βάθος των 7.5 μέτρων. Οι καμπύλες αυτές ίσης πυκνότητας έχουν προκύψει όπως προαναφέραμε με την βασική παραδοχή ότι πνέουν μόνο τρεις άνεμοι οι οποίοι δημιουργούν κυματισμούς προς τη θέση του υποθετικού έργου, έτσι ώστε κατά τη διάδοση των κυματισμών να λάβουμε υπόψη το φαινόμενο της διάθλασης. Για το λόγο αυτό δεν μπορεί να γίνει σύγκριση με τις πιθανοτικές εικόνες των βαθέων υδάτων, όπου έχουν ληφθεί υπόψη όλοι οι άνεμοι ανεξαρτήτου διεύθυνσης. Για να μπορούσε να γίνει σύγκριση με τα βαθειά ύδατα θα έπρεπε να εφαρμόζαμε μόνο τη διαδικασία ρήχωσης όπου δεν αποκλείεται κανένας κυματισμός και αναφερόμαστε στον ίδιο δειγματικό χώρο.

#### 4.1 Αποτελέσματα για τα βαθειά νερά χωρίς την εφαρμογή του μοντέλου

Αρχικά παρατίθεται παρακάτω στα σχήματα 5.1(α) (β) (γ) (δ) η κατανομή πυκνότητας πιθανότητας των μεγεθών  $H_s - T_m$  όπως αυτές προέκυψαν σύμφωνα με τους πίνακες με κλάσεις σταθερού εύρους για τα βαθειά ύδατα. Να υπενθυμίσουμε ότι οι πίνακες με κλάσεις πίνακες σταθερού πλάτους που προέρχονται από τα ανεμολογικά δεδομένα, έχουν βασιστεί στη θεώρηση ότι ένας κυματισμός που οι βασικές του παράμετροι ( $H_s, T_m$ ) υπολογίζονται σαν συνάρτηση ενός αναπτύγματος πελάγους, και μιας ταχύτητας του ανέμου, έχει συχνότητα εμφάνισης ίδια με αυτή του αντίστοιχου ανέμου. Η συχνότητα αυτή λαμβάνεται από διαθέσιμα ανεμολογικά δεδομένα. Έχοντας κατασκευάσει τρεις πίνακες λοιπόν που βασίζονται στην παραπάνω θεώρηση, αλλά και επεξεργάζοντας κατάλληλα έναν τέταρτο πίνακα που βασίζεται σε πραγματικές μετρήσεις και μετατρέποντας τον σε πίνακα κλάσεων σταθερού εύρους παρήχθησαν οι πρώτες πιθανοτικές εικόνες χωρίς την εφαρμογή του μοντέλου. Οι πυκνότητες πιθανότητας προέκυψαν διαιρώντας κάθε κελί πίνακα με το συνολικό πλήθος και έπειτα με το χωρικό  $DH$  και το χρονικό βήμα  $DT$ . Οι παρακάτω εικόνες αποτελούν την απεικόνιση των αποτελεσμάτων που παρουσιάζονται στους πίνακες 3.22, 3.25, 3.28, 3.31 στο 3<sup>ο</sup> κεφάλαιο.





**Εικόνα 4.1** Από κοινού κατανομές των  $H_s, T_m$  για τα βαθιά ύδατα χωρίς την εφαρμογή μοντέλου: (α) Καμπύλες ίσης πυκνότητας που προέκυψαν από τα ανεμολογικά δεδομένα της Λήμνου, (β) Καμπύλες ίσης πυκνότητας που προέκυψαν από τα συνδυασμένα ανεμολογικά δεδομένα των περιοχών Λίμνου-Αλεξανδρούπολη, (γ) Καμπύλες ίσης πυκνότητας που προέκυψαν από τα συνδυασμένα ανεμολογικά δεδομένα των περιοχών Λήμνου-Αλεξανδρούπολη- Καβάλα, (δ) Καμπύλες ίσης πυκνότητας που προέκυψαν από μετρήσεις του Άτλα

Όπως παρατηρείται παραπάνω, μεταξύ των εικόνων που προέρχονται από διαφορετικούς συνδυασμούς ανεμολογικών δεδομένων υπάρχουν σε γενικές γραμμές αρκετές ομοιότητες. Για μικρές πυκνότητες πιθανότητας και συγκεκριμένα για πυκνότητα  $0.005 m^{-1} s^{-1}$  το μέγιστο ύψος στα σχήματα (α) και (β) φτάνει την τιμή  $H_s=4.3m$  και η μέγιστη περίοδος  $T_m=7.1$  s, ενώ στο σχήμα (γ) το μέγιστο ύψος είναι ελαφρώς μικρότερο με τιμή των  $H_s=4.05m$ , όπως και η μέγιστη μέση περίοδος που είναι  $T_m=6.8s$ . Οι πιο μεγάλες τιμές των πυκνοτήτων παρατηρείται ότι είναι αρκετά ' πυκνομένες ' σε πιο μικρές τιμές του χαρακτηριστικού ύψους και της μέσης περιόδου. Η τιμή πυκνότητας  $0.155 m^{-1} s^{-1}$  αντιστοιχεί σε μέγιστα ύψη κύματος  $H_s=1.7$  m και μέγιστη μέση περίοδο  $T_m=4,4$  s για τα σχήματα (α) και (β) ενώ στο σχήμα (γ) το χαρακτηριστικό ύψος είναι πάλι ελαφρώς μικρότερο με τιμή  $H_s=1.55$  m ενώ η μέγιστη μέση περίοδος είναι  $T_m=4,5$  s. Σε γενικές γραμμές οι τρεις εικόνες μοιάζουν αρκετά ως προς την κατανομή που ακολουθούν τα  $H_s$  και  $T_m$ , παρατηρώντας μια πύκνωση των μεγαλύτερων πυκνοτήτων ( $0.155-0.905 m^{-1} s^{-1}$ ) σε τιμές χαρακτηριστικού ύψους  $H_s =0.124-1.7m$  και μέσης περιόδου  $T_m=1.5-4.5$  s, ενώ οι μικρότερες πυκνότητες ( $0.005 m^{-1} s^{-1}$ ) αντιστοιχούν σε μέγιστο ύψος και μέγιστη περίοδο παρόμοιο και για τις τρεις περιπτώσεις. Επίσης φαίνεται ότι οι καμπύλες ακολουθούν την κλίση της κυρίας διαγωνίου κάτι που φαίνεται και από τις υψηλές τιμές του συντελεστή συσχέτισης  $r(H_s, T_m)$  των μεγεθών  $H_s$ -  $T_m$ . Αυτό είναι λογικό καθώς οι τιμές  $H_s$  και  $T_m$  (πρώτα υπολογίστηκε η περίοδος αιχμής  $T_p$  και έπειτα η  $T_m$ ) υπολογίστηκαν από εξισώσεις πρόγνωσης κυματισμού όπου και τα δυο μεγέθη εξαρτώνται από τις ίδιες παραμέτρους ( ανάπτυγμα πελάγους και ταχύτητα ανέμου) , οπότε μεταβάλλονται με τον ίδιο ρυθμό και αποκλείεται και η εμφάνιση κυματισμού αποθάλασσας.

Όσον αφορά την κατανομή των  $H_s$  και  $T_m$  που έχουν προκύψει από πραγματικές μετρήσεις που παρέχονται από το <Wind and Wave Mediterranean Atlas> και απεικονίζεται στο σχήμα 4.1(δ) παρατηρούνται κάποιες ομοιότητες, αλλά και κάποιες σημαντικές διαφορές σε σχέση με τα υπόλοιπα τρία σχήματα. Αρχικά για τη μικρότερη πυκνότητα που απεικονίζεται με τιμή  $0.005 m^{-1} s^{-1}$ , αυτή αντιστοιχεί σε μέγιστο χαρακτηριστικό ύψος  $H_s=4.4m$ , περίπου δηλαδή ίδιο με τα υπόλοιπα σχήματα, αλλά σε μεγαλύτερη μέγιστη μέση περίοδο  $T_m=7,9$  s. Για μεγαλύτερες πυκνότητες παρατηρείται σημαντική πτώση του χαρακτηριστικού ύψους κύματος, αλλά όχι ανάλογη πτώση για τις μέσες περιόδους. Η πυκνότητα  $0.155 m^{-1} s^{-1}$ , ενώ αντιστοιχεί σε ύψος  $H_s=1,6$  m, τιμή που είναι κοντά σε αυτή των υπόλοιπων εικόνων, αντιστοιχεί σε μια μέγιστη μέση περίοδο  $T_m=5s$ . Η τάση αυτή συνεχίζει και για μεγαλύτερες τιμές πυκνότητας πιθανότητας καθώς βλέπουμε ότι μικρότερα ύψη αντιστοιχούν σε μεγαλύτερες περιόδους, συγκριτικά με τις υπόλοιπες εικόνες. Η τάση αυτή φαίνεται και από το ότι η κλίση των καμπυλών είναι ' πιο κάτω ' από την κλίση της κύριας διαγωνίου. Αυτό φαίνεται επίσης και από την τιμή του συντελεστή συσχέτισης που είναι μικρότερος από των υπόλοιπων εικόνων. Το γεγονός αυτό μπορεί να αποδοθεί στην ύπαρξη κάποιων κυματισμών αποθάλασσας που έχουν καταγραφεί από τις μετρήσεις, παρά την εφαρμογή του κριτηρίου Thompson (1984) για τον διαχωρισμό τους από τους ανεμογενείς κυματισμούς.

Παρακάτω έχει υπολογιστεί το σφάλμα μεταξύ των πυκνοτήτων πιθανότητας των εικόνων 4.1 (α) (β) (γ) με της εικόνας (δ) με σκοπό να αποτιμηθεί ποιος συνδυασμός ανεμολογικών δεδομένων ' πλησιάζει περισσότερο ' τα αποτελέσματα των πραγματικών μετρήσεων χωρίς την εφαρμογή κάποιου μοντέλου. Το σφάλμα υπολογίστηκε με τη μορφή της Ευκλειδείου απόστασης των πυκνοτήτων και όπως φαίνεται έχει πολύ κοντινή τιμή και για τις τρεις περιπτώσεις, με λίγο μικρότερη αυτή για τα ανεμολογικά δεδομένα της Λήμνου. Η τιμή 0.0345 σημαίνει ότι τα αποτελέσματα των δυο περιπτώσεων έχουν μια απόκλιση της τάξεως του 3,45% που δεν είναι τόσο αμελητέο καθώς οι πιθανότητες είναι μεγέθη της τάξεως του  $10^{-1}$  και  $10^{-2}$ .

**Πίνακας 4.1** Σφάλματα μεταξύ των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από τα ανεμολογικά δεδομένα και της μετρήσεις του Άτλα, χωρίς την εφαρμογή θεωρητικού πιθανοτικού μοντέλου

Σταθμός	Ανεμολογικά δεδομένα-Μετρήσεις	Μοντέλο	Σφάλμα $D^2$ :
Θάσος	Λήμνου	Χωρίς εφαρμογή μοντέλου	0.0345
	Άτλας	Χωρίς εφαρμογή μοντέλου	
Θάσος	Λήμνος-Αλεξανδρούπολη	Χωρίς εφαρμογή μοντέλου	0.0354
	Άτλας	Χωρίς εφαρμογή μοντέλου	
Θάσος	Λήμνος-Αλεξανδρούπολη-Καβάλα	Χωρίς εφαρμογή μοντέλου	0.0351
	Άτλας	Χωρίς εφαρμογή μοντέλου	

## 4.2 Αποτελέσματα για τα βαθιά νερά έπειτα από εφαρμογή του μοντέλου δεσμευμένης πιθανότητας

Στη συνέχεια παρατίθενται οι κατανομές πυκνότητας πιθανότητας όπως αυτές προέκυψαν έπειτα από την εφαρμογή του μοντέλου δεσμευμένης πιθανότητας στους αρχικούς πίνακες των από κοινού συχνοτήτων των  $H_s$  και  $T_m$  για τα βαθιά ύδατα. Για το μοντέλο δεσμευμένης πιθανότητας όπως αναφέρθηκε και στο κεφάλαιο 3 εξετάστηκαν δυο περιπτώσεις i) προσαρμογή της κατανομής Weibull στις περιθώριες συχνότητες του  $H_s$  και λογαριθμοκανονικής κατανομής στην μέση περίοδο  $T_m|H_s$  ii) λογαριθμοκανονική κατανομή και για το  $H_s$  και για την  $T_m|H_s$ . Το μοντέλο εφαρμόστηκε στους πίνακες αρχικών δεδομένων που προέκυψαν από τα ανεμολογικά δεδομένα, και από μετρήσεις πεδίου ( Wind and Wave Mediterranean atlas). Πρώτα παρατίθενται οι πίνακες με τα αποτελέσματα των από κοινού πυκνοτήτων πιθανοτήτων εμφάνισης αναλυτικά για κάθε ζεύγος  $H_s$  και  $T_m$ , και στη συνέχεια παρουσιάζεται η απεικόνιση της κατανομής τους , έπειτα από εισαγωγή των τιμών των πυκνοτήτων στο πρόγραμμα Surfer. Πάνω σε κάθε εικόνα αναγράφεται το σφάλμα , το οποίο

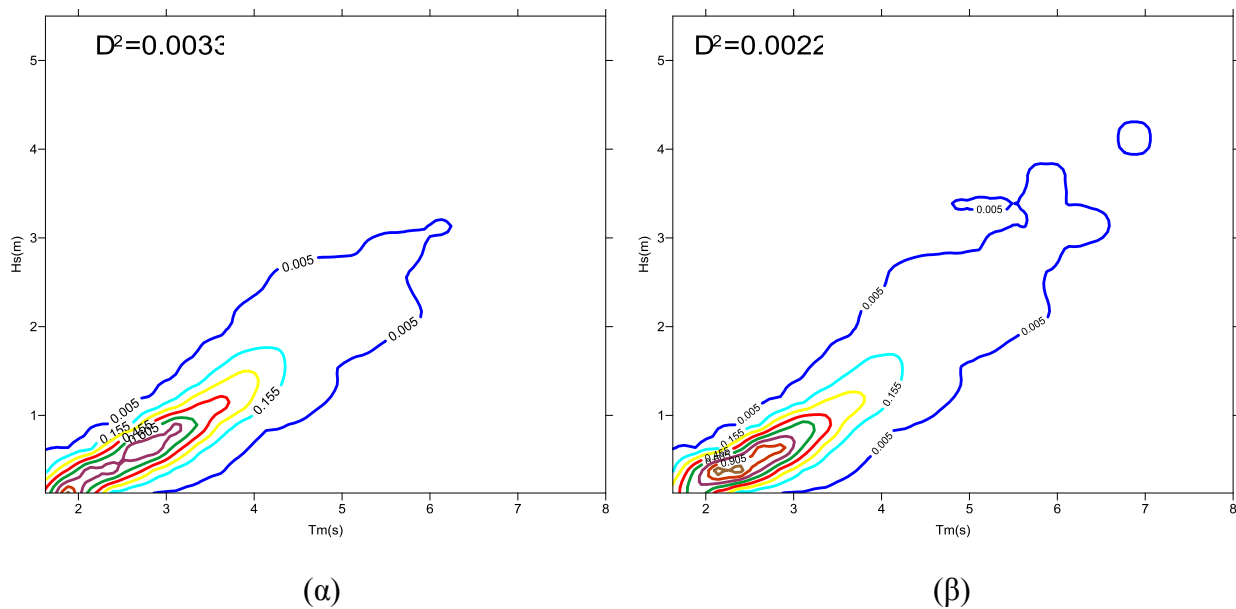
αποτελεί μια ποσοτικοποίηση της απόκλισης του μοντέλου από τα αρχικά δεδομένα. Κάτω από κάθε εικόνα ακολουθεί κατάλληλος σχολιασμός, και τέλος παρατίθενται ένας πίνακας, με υπολογισμένα τα σφάλματα ανάμεσα στα αποτελέσματα από την εφαρμογή του μοντέλου στους πίνακες που προέκυψαν βάσει ανεμολογικών δεδομένων, και στους πίνακες των πραγματικών μετρήσεων.

**Πίνακας 4.2** Μακροχρόνια από κοινού πυκνότητα πιθανότητας του χαρακτηριστικού ύψους κύματος  $H_s$  και της μέσης περιόδου  $T_m$  με εφαρμογή του μοντέλου δεσμευμένης πιθανότητας στον πίνακα κλάσεων σταθερού πλάτους που κατασκευάστηκε βάσιμένος στα ανεμολογικά δεδομένα της Λήμνου, θεωρώντας κατανομή Weibull για το  $H_s$  (περιθώρια) και λογαριθμική κατανομή για την  $T_m | H_s$  στα βαθιά ύδατα.

Κλάσεις περιόδου $T_m$	Κεντρικές Τιμές	Κλάσεις Ύψους κύματος $H_s$																Total		
		0-0.25	0.25-0.5	0.5-0.75	0.75-1	1-1.25	1.25-1.5	1.5-1.75	1.75-2	2-2.25	2.25-2.5	2.5-2.75	2.75-3	3-3.25	3.25-3.5	3.5-3.75	3.75-4		4-4.25	
		0.125	0.375	0.625	0.875	1.125	1.375	1.625	1.875	2.125	2.375	2.625	2.875	3.125	3.375	3.625	3.875		4.125	
1.5-1.75	1.625	0.493847	0.103323	4.24E-05	2.17E-10	3.48E-15	3.12E-22	1.73E-32	8.77E-34	1.20E-22	3.61E-33	1.92E-29	1.62E-238	2.71E-231	7.33E-21	0	0	0	0.597213	
1.75-2	1.875	1.09222	0.469511	0.004965	1.24E-06	1.82E-10	8.30E-16	2.02E-23	2.66E-25	1.99E-17	1.36E-25	6.45E-23	8.06E-187	1.32E-184	6.35E-17	0	0	0	1.566696	
2-2.25	2.125	0.538576	0.870154	0.092226	0.000417	4.06E-07	3.84E-11	9.16E-17	6.04E-19	1.75E-13	7.79E-20	5.97E-18	7.79E-147	3.84E-148	6.73E-14	0	0	0	1.501372	
2.25-2.5	2.375	0.095903	0.865455	0.466932	0.018442	9.40E-05	9.59E-08	7.59E-12	3.97E-14	1.82E-10	2.12E-15	4.06E-14	2.13E-115	3.68E-119	1.54E-11	0	0	0	1.446826	
2.5-2.75	2.625	0.008398	0.551707	0.917626	0.18463	0.004082	2.74E-05	3.18E-08	1.84E-10	3.82E-08	5.86E-12	3.89E-11	2.09E-90	7.76E-96	1.12E-09	0	0	0	1.666471	
2.75-3	2.875	0.000444	0.254106	0.89041	0.603471	0.049675	0.001501	1.37E-05	1.11E-07	2.35E-06	2.79E-09	8.24E-09	2.13E-70	6.74E-77	3.33E-08	0	0	0	1.799624	
3-3.25	3.125	1.64E-05	0.091929	0.505348	0.834931	0.225736	0.022714	0.000998	1.37E-05	5.51E-05	3.34E-07	5.33E-07	2.52E-54	1.97E-61	4.93E-07	0	0	0	1.681743	
3.25-3.5	3.375	4.65E-07	0.027735	0.189625	0.590605	0.472227	0.124296	0.017778	0.000474	0.000598	1.32E-05	1.33E-05	2.06E-41	9.19E-49	4.15E-06	0	0	0	1.423369	
3.5-3.75	3.625	1.09E-08	0.007292	0.051512	0.245822	0.531778	0.300805	0.102062	0.005875	0.003483	0.000214	0.000154	4.49E-31	2.21E-38	2.21E-05	0	0	0	1.249019	
3.75-4	3.875	2.25E-10	0.001726	0.010849	0.066976	0.363179	0.375428	0.233166	0.031483	0.01217	0.001659	0.000951	7.31E-23	6.84E-30	8.11E-05	0	0	0	1.097668	
4-4.25	4.125	4.22E-12	0.000377	0.001867	0.012969	0.164989	0.272299	0.249768	0.084342	0.027855	0.006984	0.003466	2.01E-16	5.53E-23	0.000217	0	0	0	0.825133	
4.25-4.5	4.375	7.41E-14	7.76E-05	0.000273	0.001904	0.053615	0.126104	0.142799	0.126753	0.044765	0.017645	0.008137	1.79E-11	2.06E-17	0.000447	0	0	0	0.52252	
4.5-4.75	4.625	1.25E-15	1.52E-05	3.52E-05	0.000223	0.013206	0.040199	0.048328	0.117203	0.053414	0.028972	0.013182	8.60E-08	5.60E-13	0.000736	0	0	0	0.315515	
4.75-5	4.875	2.06E-17	2.89E-06	4.09E-06	2.17E-05	0.002583	0.009373	0.010527	0.071866	0.049514	0.032987	0.015581	3.43E-05	1.61E-09	0.001003	0	0	0	0.193497	
5-5.25	5.125	3.37E-19	5.35E-07	4.37E-07	1.81E-06	0.000417	0.001679	0.00158	0.031071	0.037005	0.027468	0.014065	0.001608	6.68E-07	0.001161	0	0	0	0.116058	
5.25-5.5	5.375	5.51E-21	9.73E-08	4.38E-08	1.34E-07	5.72E-05	0.000241	0.000173	0.009964	0.022994	0.017481	0.01007	0.011829	5.15E-05	0.001167	0	0	0	0.074028	
5.5-5.75	5.625	9.11E-23	1.75E-08	4.16E-09	8.88E-09	6.85E-06	2.86E-05	1.45E-05	0.002472	0.012187	0.008821	0.005901	0.017412	0.000918	0.001039	0	0	0	0.048801	
5.75-6	5.875	1.53E-24	3.12E-09	3.79E-10	5.43E-10	7.33E-07	2.89E-06	9.61E-07	0.000492	0.00563	0.003641	0.002908	0.006291	0.004523	0.000832	0.003685	0	0	0	0.028005
6-6.25	6.125	2.64E-26	5.56E-10	3.35E-11	3.10E-11	7.11E-08	2.55E-07	5.25E-08	8.08E-05	0.002308	0.001261	0.001232	0.000664	0.007201	0.000607	0	0	0	0.013354	
6.25-6.5	6.375	4.66E-28	9.90E-11	2.89E-12	1.67E-12	6.36E-09	2.00E-08	2.42E-09	1.12E-05	0.000853	0.000375	0.000457	2.37E-05	0.004225	0.000409	0	0	0	0.006355	
6.5-6.75	6.625	8.47E-30	1.77E-11	2.45E-13	8.59E-14	5.32E-10	1.42E-09	9.63E-11	1.36E-06	0.000288	9.76E-05	0.000151	3.27E-07	0.001024	0.000256	0	0	0	0.001819	
6.75-7	6.875	1.59E-31	3.17E-12	2.05E-14	4.27E-15	4.20E-11	9.28E-11	3.39E-12	1.44E-07	8.98E-05	2.26E-05	4.52E-05	1.93E-09	0.000113	0.000151	0	0	0.000656	0.001078	
Total		2.229405	3.243412	3.131715	2.560414	1.881646	1.274698	0.80721	0.482102	0.273212	0.147643	0.076315	0.037863	0.018056	0.008133	0.003685	0	0.000656	16.17616	

**Πίνακας 4.3** Μακροχρόνια από κοινού πυκνότητα πιθανότητας του χαρακτηριστικού ύψους κύματος  $H_s$  και της μέσης περιόδου  $T_m$  με εφαρμογή του μοντέλου δεσμευμένης πιθανότητας στον πίνακα κλάσεων σταθερού πλάτους που κατασκευάστηκε βάσιμμένος στα ανεμολογικά δεδομένα της Λήμνου, θεωρώντας λογαριθμοκανονική κατανομή για το  $H_s$  (περιθώρια) για την  $T_m|H_s$  στα βαθιά ύδατα.

Κλάσεις περιόδου $T_m$	Κεντρικές Τιμές	Κλάσεις Ύψους κύματος $H_s$																	Total
		0-0.25	0.25-0.5	0.5-0.75	0.75-1	1-1.25	1.25-1.5	1.5-1.75	1.75-2	2-2.25	2.25-2.5	2.5-2.75	2.75-3	3-3.25	3.25-3.5	3.5-3.75	3.75-4	4-4.25	
		0.125	0.375	0.625	0.875	1.125	1.375	1.625	1.875	2.125	2.375	2.625	2.875	3.125	3.375	3.625	3.875	4.125	
1.5 - 1.75	1.625	0.33962	0.140858	4.65E-05	1.9E-10	2.64E-15	2.24E-22	1.29E-32	7.29E-34	1.2E-22	4.65E-33	3.37E-29	4.1E-238	1.0527E-230	4.57E-20	0	0	0	0.480525
1.75 - 2	1.875	0.751124	0.640072	0.005442	1.09E-06	1.38E-10	5.97E-16	1.5E-23	2.21E-25	1.99E-17	1.75E-25	1.13E-22	2E-186	5.126E-184	3.96E-16	0	0	0	1.396639
2 - 2.25	2.125	0.370381	1.186259	0.10109	0.000365	3.08E-07	2.76E-11	6.81E-17	5.02E-19	1.75E-13	1E-19	1.05E-17	2E-146	1.4926E-147	4.2E-13	0	0	0	1.658095
2.25 - 2.5	2.375	0.065953	1.179852	0.511813	0.016151	7.13E-05	6.9E-08	5.64E-12	3.3E-14	1.82E-10	2.72E-15	7.14E-14	5.4E-115	1.4286E-118	9.63E-11	0	0	0	1.77384
2.5 - 2.75	2.625	0.005775	0.752128	1.005825	0.161693	0.003096	1.97E-05	2.37E-08	1.53E-10	3.82E-08	7.53E-12	6.84E-11	5.31E-90	3.01678E-95	6.98E-09	0	0	0	1.928538
2.75 - 3	2.875	0.000306	0.346417	0.975993	0.5285	0.037682	0.00108	1.02E-05	9.25E-08	2.35E-06	3.59E-09	1.45E-08	5.41E-70	2.61868E-76	2.08E-07	0	0	0	1.889991
3 - 3.25	3.125	1.13E-05	0.125325	0.55392	0.731205	0.171237	0.016336	0.000742	1.14E-05	5.51E-05	4.29E-07	9.36E-07	6.41E-54	7.6553E-61	3.07E-06	0	0	0	1.598848
3.25 - 3.5	3.375	3.2E-07	0.037811	0.207851	0.517232	0.358218	0.089397	0.013212	0.000394	0.000598	1.7E-05	2.34E-05	5.25E-41	3.56861E-48	2.59E-05	0	0	0	1.22478
3.5 - 3.75	3.625	7.53E-09	0.00994	0.056463	0.215282	0.403392	0.216346	0.075851	0.004883	0.003482	0.000275	0.000271	1.14E-30	8.60321E-38	0.000138	0	0	0	0.986326
3.75 - 4	3.875	1.55E-10	0.002353	0.011891	0.058656	0.275498	0.270016	0.173286	0.02617	0.012167	0.002132	0.001671	1.86E-22	2.65916E-29	0.000506	0	0	0	0.834346
4 - 4.25	4.125	2.9E-12	0.000514	0.002046	0.011358	0.125156	0.195844	0.185624	0.070109	0.027847	0.008976	0.00609	5.12E-16	2.14882E-22	0.001355	0	0	0	0.634919
4.25 - 4.5	4.375	5.1E-14	0.000106	0.0003	0.001667	0.040671	0.090697	0.106126	0.105363	0.044752	0.022677	0.014297	4.54E-11	8.00736E-17	0.002789	0	0	0	0.429445
4.5 - 4.75	4.625	8.59E-16	2.08E-05	3.86E-05	0.000195	0.010018	0.028912	0.035917	0.097425	0.053399	0.037235	0.023163	2.19E-07	2.17493E-12	0.004593	0	0	0	0.290916
4.75 - 5	4.875	1.42E-17	3.94E-06	4.48E-06	1.9E-05	0.001959	0.006741	0.007824	0.059739	0.049499	0.042395	0.027378	8.73E-05	6.25636E-09	0.006257	0	0	0	0.201907
5 - 5.25	5.125	2.31E-19	7.29E-07	4.79E-07	1.59E-06	0.000316	0.001208	0.001175	0.025828	0.036995	0.035302	0.024714	0.00409	2.59337E-06	0.007242	0	0	0	0.136873
5.25 - 5.5	5.375	3.79E-21	1.33E-07	4.8E-08	1.17E-07	4.34E-05	0.000173	0.000129	0.008283	0.022987	0.022466	0.017694	0.030092	0.000200141	0.007283	0	0	0	0.10935
5.5 - 5.75	5.625	6.27E-23	2.38E-08	4.56E-09	7.78E-09	5.2E-06	2.06E-05	1.08E-05	0.002055	0.012184	0.011337	0.01037	0.044293	0.003564915	0.006484	0	0	0	0.090323
5.75 - 6	5.875	1.05E-24	4.26E-09	4.16E-10	4.75E-10	5.56E-07	2.08E-06	7.15E-07	0.000409	0.005628	0.004679	0.005109	0.016004	0.017572915	0.005192	0.038717	0	0	0.093314
6 - 6.25	6.125	1.81E-26	7.58E-10	3.68E-11	2.71E-11	5.39E-08	1.84E-07	3.9E-08	6.72E-05	0.002307	0.001621	0.002164	0.001689	0.027976109	0.003789	0	0	0	0.039614
6.25 - 6.5	6.375	3.2E-28	1.35E-10	3.17E-12	1.46E-12	4.83E-09	1.44E-08	1.8E-09	9.35E-06	0.000853	0.000482	0.000803	6.04E-05	0.016416519	0.00255	0	0	0	0.021174
6.5 - 6.75	6.625	5.82E-30	2.41E-11	2.69E-13	7.53E-14	4.04E-10	1.02E-09	7.16E-11	1.13E-06	0.000288	0.000125	0.000266	8.31E-07	0.003978617	0.001597	0	0	0	0.006257
6.75 - 7	6.875	1.09E-31	4.32E-12	2.25E-14	3.74E-15	3.18E-11	6.68E-11	2.52E-12	1.2E-07	8.98E-05	2.91E-05	7.94E-05	4.91E-09	0.000439428	0.00094	0	0	0.022333	0.02391
Total		1.53317	4.421661	3.432726	2.242325	1.427365	0.916792	0.599906	0.400747	0.273132	0.189748	0.134094	0.096317	0.070151244	0.050743	0.038717	0	0.022333	15.84993



**Εικόνα 4.2** Από κοινού κατανομές των  $H_s$ ,  $T_m$  για τα βαθιά ύδατα που προέκυψαν από τα ανεμολογικά δεδομένα της Λήμνου: (α) Καμπύλες ίσης πυκνότητας με εφαρμογή μοντέλου δεσμευμένης πιθανότητας (Conditional model) με λογαριθμική κατανομή για  $T_m|H_s$  και κατανομή Weibull για το  $H_s$  (β) Καμπύλες ίσης πυκνότητας με εφαρμογή μοντέλου δεσμευμένης πιθανότητας (Conditional model) με λογαριθμική κατανομή για  $T_m|H_s$  και  $H_s$

Παρατηρώντας τα παραπάνω σχήματα είναι εύκολα αντιληπτό ότι υπάρχουν διαφορές έπειτα από την εφαρμογή του μοντέλου δεσμευμένης πιθανότητας στον πίνακα με τις από κοινού συχνότητες των  $H_s$  και  $T_m$ , όπως αυτές προέκυψαν με βάση τα ανεμολογικά δεδομένα της Λήμνου. Αρχικά σε σχέση με την εικόνα 5.1 (α), όπου φαίνεται η κατανομή των μεγεθών χωρίς την εφαρμογή του θεωρητικού μοντέλου, οι καμπύλες είναι περισσότερο ομαλές χωρίς ιδιαίτερες ασυνέχειες, κάτι που οφείλεται στο ότι η εφαρμογή του μοντέλου, δίνει κάποια τιμή πυκνότητας σε όλα τα δυνατά ζεύγη του χαρακτηριστικού ύψους και της μέσης περιόδου (πίνακας 4.2), σε αντίθεση με τις πραγματικές πυκνότητες, όπου πολλά κελία του πίνακα 3.22 έχουν μηδενική τιμή καθώς δεν υπάρχει καμία συχνότητα εμφάνισης του αντίστοιχου ζεύγους  $H_s - T_m$ . Όσον αφορά τα σφάλματα του μοντέλου όπως φαίνεται η χρήση της λογαριθμοκανονικής κατανομής για τις περιθώριες συχνότητες του χαρακτηριστικού ύψους  $H_s$  και της  $T_m|H_s$ , δίνει σφάλμα μικρότερο έναντι της κατανομής Weibull για το  $H_s$  και της λογαριθμοκανονικής για την  $T_m|H_s$ . Για την ακρίβεια το σφάλμα είναι 0.022 και 0.033 αντίστοιχα. Η τάξη μεγέθους των σφαλμάτων αποδεικνύει ότι το μοντέλο δεσμευμένης πιθανότητας έχει καλή προσαρμογή στις από κοινού συχνότητες των μεγεθών  $H_s$  και  $T_m$ , και ότι μπορεί να περιγράψει καλά τη μακροχρόνια κατανομή τους.

Πιο συγκεκριμένα για μια ορισμένη πολύ μικρή τιμή της πυκνότητας πιθανότητας  $0,005m^{-1} s^{-1}$  (που αντιστοιχεί σε πιθανότητα  $3,125 * 10^{-4}$ ) το μέγιστο ύψος που αντιστοιχεί στην περίπτωση της προσαρμογής Weibull στις περιθώριες συχνότητες του  $H_s$  είναι 3.3 m, ενώ

στην ίδια τιμή πυκνότητας πιθανότητας έπειτα από την προσαρμογή της λογαριθμοκανονικής κατανομής στις περιθώριες συχνότητες του  $H_s$  αντιστοιχεί μέγιστο ύψος κύματος 4.32 μέτρα. Υπάρχει δηλαδή μια υποεκτίμηση των ακραίων τιμών του ύψους κύματος στην περίπτωση της κατανομής Weibull σε σχέση με την λογαριθμοκανονική κατανομή-προσαρμοσμένες στις περιθώριες συχνότητες του  $H_s$ - αλλά και σε σχέση με τις πραγματικές πυκνότητες που έχουν προκύψει χωρίς την προσαρμογή του θεωρητικού μοντέλου, όπως φαίνεται στην εικόνα 4.1(α) το μέγιστο ύψος φτάνει την τιμή 4.4 m, πολύ κοντά στα αποτελέσματα του μοντέλου δεσμευμένης πιθανότητας με λογαριθμοκανονική κατανομή για το  $H_s$ ). Το ίδιο συμβαίνει και με τις μέγιστες περιόδους που αντιστοιχούν στην τιμή πυκνότητας  $0.005m^{-1}s^{-1}$ , όπου στην περίπτωση της κατανομής Weibull η μέγιστη περίοδος που αντιστοιχεί στην πυκνότητα αυτή είναι 6.5 s. ενώ εφαρμόζοντας τη λογαριθμοκανονική κατανομή για το  $H_s$  η μέγιστη περίοδος είναι 7,1 s, όσο περίπου δηλαδή στην περίπτωση μη εφαρμογής θεωρητικού μοντέλου. Αυτό είναι λογικό καθώς αν παρατηρήσουμε το ιστόγραμμα περιθωρίων συχνοτήτων του  $H_s$  (εικόνα 3.3), για μεγάλες τιμές του χαρακτηριστικού ύψους, πάνω από 2.25 m η λογαριθμοκανονική τιμή υπερεκτιμά την περιθώρια πυκνότητα των  $H_s$ , σε σχέση με την κατανομή Weibull, δηλαδή η καμπύλη της λογαριθμοκανονικής κατανομής είναι πιο 'ψηλά'. Για πιο μικρές τιμές πυκνότητας παρατηρείται το αντίστροφο γεγονός, δηλαδή το μοντέλο δεσμευμένης πιθανότητας με κατανομή Weibull για το  $H_s$  υπερεκτιμά το ύψος κύματος και τη μέση περίοδο σε σχέση με την περίπτωση της λογαριθμοκανονικής κατανομής. Στην τιμή πυκνότητας πιθανότητας  $0.155m^{-1}s^{-1}$  από το σχήμα 4.2 (α) φαίνεται ότι αντιστοιχεί μέγιστο ύψος  $H_s$  με τιμή 1.9 m και μέγιστη μέση περίοδος με τιμή 4.5 s, ενώ τα αντίστοιχα μέγιστα ύψη -περίοδος από το σχήμα 4.2 (β) φαίνεται να έχουν τιμές 1.7 m και 4.25 s. Αυτό εξηγείται και πάλι παρατηρώντας την εικόνα 3.3, όπου φαίνεται ότι η καμπύλη της κατανομής Weibull βρίσκεται πιο 'ψηλά' από την καμπύλη της λογαριθμοκανονικής κατανομής για τιμές του  $H_s$  από 0.75-2.25 m. Δηλαδή για μεσαίες τιμές του ύψους κύματος η κατανομή Weibull γενικά υπερεκτιμά του χαρακτηριστικό ύψος, ενώ η λογαριθμοκανονική το υπερεκτιμά για πιο ακραίες τιμές. Τέλος παρατηρείται για μεγάλες τιμές της πυκνότητας (στα σχήματα  $f=0.905m^{-1}s^{-1}$ ) που αντιστοιχούν σε μικρά ζεύγη χαρακτηριστικού ύψους κύματος και μέσης περιόδου, το μοντέλο δεσμευμένης πιθανότητας με χρήση λογαριθμοκανονικής κατανομής για το  $H_s$  υπερεκτιμά αρκετά το ύψος κύματος και τη μέση περίοδο συγκριτικά με την περίπτωση χρήσης της κατανομής Weibull, και πλησιάζει περισσότερο τα αποτελέσματα του σχήματος 5.1 (α), όπου δεν έχει εφαρμοστεί κάποιο θεωρητικό μοντέλο.

Παρακάτω ακολουθούν οι πίνακες με τα αποτελέσματα της εφαρμογής του μοντέλου στους πίνακες συχνοτήτων των  $H_s$  και  $T_m$ , που προέκυψαν από τα συνδυασμένα ανεμολογικά Λήμνου-Αλεξανδρούπολης, καθώς και η διαγραμματική απεικόνισή τους.

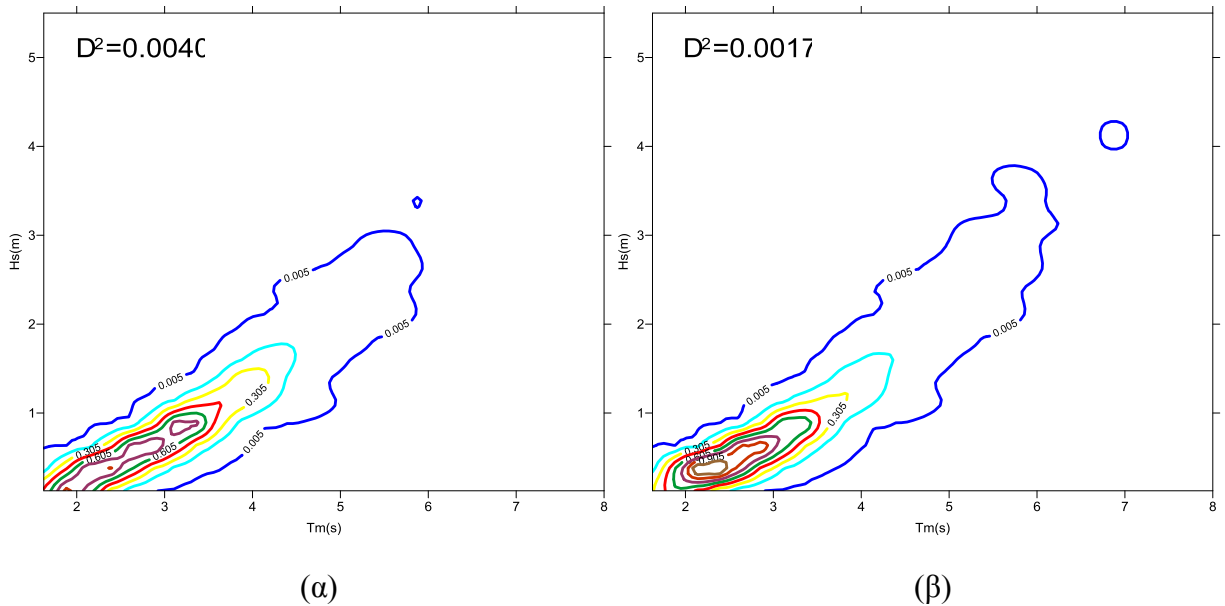


**Πίνακας 4.4** Μακροχρόνια από κοινού πυκνότητα πιθανότητας του χαρακτηριστικού ύψους κύματος  $H_s$  και της μέσης περιόδου  $T_m$  με εφαρμογή του μοντέλου δεσμευμένης πιθανότητας στον πίνακα κλάσεων σταθερού πλάτους που κατασκευάστηκε βάσισιμνος στα ανεμολογικά δεδομένα της Λήμνου-Αλεξανδρούπολης, θεωρώντας κατανομή Weibull για το  $H_s$  (περιθώρια) και λογαριθμική κατανομή για την  $T_m|H_s$  στα βαθιά ύδατα.

Κλάσεις περιόδου $T_m$	Κεντρικές Τιμές	Κλάσεις Ύψους κύματος $H_s$																Total	
		0-0.25	0.25-0.5	0.5-0.75	0.75-1	1-1.25	1.25-1.5	1.5-1.75	1.75-2	2-2.25	2.25-2.5	2.5-2.75	2.75-3	3-3.25	3.25-3.5	3.5-3.75	3.75-4		4-4.25
		0.125	0.375	0.625	0.875	1.125	1.375	1.625	1.875	2.125	2.375	2.625	2.875	3.125	3.375	3.625	3.875		4.125
1.5 - 1.75	1.625	0.469895	0.078052	2.82E-05	4.46E-15	9.55E-14	3.2E-37	1.15E-40	3.57E-42	2.49E-57	6.83E-40	4.26E-70	1.4E-143	4.45E-45	0	0	0	0	0.547976
1.75 - 2	1.875	0.94615	0.435812	0.003501	9.82E-10	1.26E-09	1.56E-26	9.94E-30	1.43E-31	4.07E-44	9.39E-31	7.95E-55	2.3E-112	4.04E-36	0	1.9E-291	0	0	1.385463
2 - 2.25	2.125	0.670605	0.911383	0.070574	4.44E-06	1.11E-06	1.02E-18	1.28E-21	1.31E-23	4.94E-34	8.41E-24	4.52E-43	2.77E-88	3.59E-29	0	1.1E-230	0	0	1.652567
2.25 - 2.5	2.375	0.233548	0.963287	0.394113	0.001253	0.000139	5.69E-13	1.48E-15	1.44E-17	3.17E-26	1.94E-18	7.02E-34	2.21E-69	1.08E-23	0	9.9E-183	0	0	1.59234
2.5 - 2.75	2.625	0.049495	0.624783	0.86329	0.045909	0.004133	9.12E-09	5.1E-11	5.85E-13	3.96E-20	2.86E-14	1.28E-26	2.19E-54	2.55E-19	0	2E-144	0	0	1.587611
2.75 - 3	2.875	0.007364	0.283469	0.940067	0.360101	0.040911	9.73E-06	1.19E-07	1.88E-09	2.38E-15	5.1E-11	7.59E-21	2.06E-42	8.36E-16	0	1.3E-113	0	0	1.631922
3 - 3.25	3.125	0.000849	0.09858	0.601337	0.861948	0.173017	0.001258	3.42E-05	8.32E-07	1.32E-11	1.72E-08	3E-16	8.02E-33	5.76E-13	0	1.03E-88	0	0	1.737023
3.25 - 3.5	3.375	8.13E-05	0.028058	0.25499	0.815004	0.374217	0.03059	0.001848	7.56E-05	1.08E-08	1.54E-06	1.35E-12	3.81E-25	1.13E-10	0	1.46E-68	0	0	1.504865
3.5 - 3.75	3.625	6.81E-06	0.006858	0.07839	0.368955	0.473545	0.194135	0.025974	0.001909	1.86E-06	4.69E-05	1.04E-09	4.99E-19	8E-09	0	2.77E-52	0	0	1.149821
3.75 - 4	3.875	5.18E-07	0.001492	0.018694	0.092549	0.388466	0.413482	0.121788	0.016926	9.02E-05	0.000588	1.87E-07	3.39E-14	2.43E-07	0	3.3E-39	0	0	1.054076
4 - 4.25	4.125	3.67E-08	0.000297	0.003643	0.0144	0.223692	0.359306	0.231139	0.063169	0.001515	0.003535	1E-05	1.95E-10	3.65E-06	0	8.32E-29	0	0	0.900709
4.25 - 4.5	4.375	2.48E-09	5.52E-05	0.000604	0.001518	0.096259	0.148611	0.206845	0.114537	0.010466	0.01149	0.000193	1.41E-07	3.03E-05	0	1.17E-20	0	0	0.590609
4.5 - 4.75	4.625	1.63E-10	9.75E-06	8.79E-05	0.000116	0.032538	0.03309	0.098626	0.113205	0.034162	0.022216	0.001574	1.75E-05	0.000152	0	2.02E-14	0	0	0.335794
4.75 - 5	4.875	1.05E-11	1.66E-06	1.15E-05	6.86E-06	0.008994	0.004381	0.027661	0.066958	0.058918	0.027622	0.006141	0.000483	0.000494	0	8.06E-10	0	0	0.201673
5 - 5.25	5.125	6.68E-13	2.74E-07	1.39E-06	3.26E-07	0.002101	0.000374	0.004948	0.025583	0.058855	0.023547	0.012738	0.003668	0.001108	0	1.25E-06	0	0	0.132924
5.25 - 5.5	5.375	4.25E-14	4.43E-08	1.57E-07	1.29E-08	0.000426	2.2E-05	0.000603	0.006726	0.036748	0.014511	0.015311	0.009115	0.001804	0	0.000117	0	0	0.085383
5.5 - 5.75	5.625	2.72E-15	7.06E-09	1.68E-08	4.42E-10	7.66E-05	9.46E-07	5.3E-05	0.001283	0.015284	0.006758	0.011465	0.00859	0.00222	0	0.000947	0	0	0.046678
5.75 - 6	5.875	1.76E-16	1.12E-09	1.72E-09	1.33E-11	1.25E-05	3.1E-08	3.52E-06	0.000185	0.004467	0.002468	0.005685	0.003475	0.002141	0.005067	0.000906	0	0	0.024411
6 - 6.25	6.125	1.15E-17	1.76E-10	1.71E-10	3.64E-13	1.86E-06	8.07E-10	1.83E-07	2.11E-05	0.00096	0.00073	0.001965	0.00067	0.001666	0	0.000133	0	0	0.006148
6.25 - 6.5	6.375	7.64E-19	2.77E-11	1.65E-11	9.14E-15	2.59E-07	1.72E-11	7.76E-09	1.95E-06	0.000158	0.000179	0.000495	6.75E-05	0.001073	0	3.75E-06	0	0	0.001979
6.5 - 6.75	6.625	5.17E-20	4.37E-12	1.57E-12	2.14E-16	3.39E-08	3.11E-13	2.74E-10	1.5E-07	2.05E-05	3.75E-05	9.44E-05	3.83E-06	0.000585	0	2.46E-08	0	0	0.000742
6.75 - 7	6.875	3.57E-21	6.93E-13	1.46E-13	4.74E-18	4.21E-09	4.85E-15	8.28E-12	9.91E-09	2.16E-06	6.81E-06	1.41E-05	1.31E-07	0.000275	0	4.41E-11	0	0.000328	0.000627
Total		2.377996	3.432138	3.229333	2.561765	1.818531	1.18526	0.719522	0.41058	0.221647	0.113738	0.055685	0.026091	0.011552	0.005067	0.002108	0	0.000328	16.17134

**Πίνακας 4.5** Μακροχρόνια από κοινού πυκνότητα πιθανότητας του χαρακτηριστικού ύψους κύματος  $H_s$  και της μέσης περιόδου  $T_m$  με εφαρμογή του μοντέλου δεσμευμένης πιθανότητας στον πίνακα κλάσεων σταθερού πλάτους που κατασκευάστηκε βάσει μέσων στα ανεμολογικά δεδομένα της Λήμνου-Αλεξανδρούπολης, θεωρώντας λογαριθμοκανονική κατανομή για το  $H_s$  (περιθώρια) για την  $T_m | H_s$  στα βαθιά ύδατα.

Κλάσεις περιόδου $T_m$	Κεντρικές Τιμές	Κλάσεις Ύψους κύματος $H_s$																	Total
		0-0.25	0.25-0.5	0.5-0.75	0.75-1	1-1.25	1.25-1.5	1.5-1.75	1.75-2	2-2.25	2.25-2.5	2.5-2.75	2.75-3	3-3.25	3.25-3.5	3.5-3.75	3.75-4	4-4.25	
		0.125	0.375	0.625	0.875	1.125	1.375	1.625	1.875	2.125	2.375	2.625	2.875	3.125	3.375	3.625	3.875	4.125	
1.5 - 1.75	1.625	0.288801	0.106733	3.13E-05	3.93E-15	7.28E-14	2.32E-37	8.66E-41	3.05E-42	2.60E-57	9.37E-40	8.21E-70	4.10E-143	2.02E-44	0	0	0	0	0.395565
1.75 - 2	1.875	0.58151	0.595955	0.003876	8.66E-10	9.64E-10	1.13E-26	7.50E-30	1.23E-31	4.26E-44	1.29E-30	1.53E-54	6.47E-112	1.83E-35	0	2.54E-290	0	0	1.18134
2 - 2.25	2.125	0.412158	1.246278	0.078137	3.91E-06	8.47E-07	7.41E-19	9.62E-22	1.12E-23	5.17E-34	1.15E-23	8.70E-43	7.95E-88	1.63E-28	0	1.46E-229	0	0	1.736578
2.25 - 2.5	2.375	0.14354	1.317253	0.436352	0.001105	0.000106	4.13E-13	1.11E-15	1.23E-17	3.31E-26	2.66E-18	1.35E-33	6.36E-69	4.91E-23	0	1.31E-181	0	0	1.898357
2.5 - 2.75	2.625	0.03042	0.854364	0.955813	0.040469	0.00315	6.60E-09	3.84E-11	5.00E-13	4.14E-20	3.93E-14	2.47E-26	6.28E-54	1.16E-18	0	2.59E-143	0	0	1.884216
2.75 - 3	2.875	0.004526	0.387632	1.040819	0.317427	0.03118	7.05E-06	9.01E-08	1.61E-09	2.49E-15	7.00E-11	1.46E-20	5.92E-42	3.79E-15	0	1.69E-112	0	0	1.781591
3 - 3.25	3.125	0.000522	0.134804	0.665785	0.759803	0.131863	0.000912	2.58E-05	7.11E-07	1.38E-11	2.36E-08	5.77E-16	2.30E-32	2.61E-12	0	1.36E-87	0	0	1.693715
3.25 - 3.5	3.375	5.00E-05	0.038367	0.282319	0.718422	0.285205	0.022161	0.001394	6.45E-05	1.12E-08	2.11E-06	2.60E-12	1.09E-24	5.13E-10	0	1.94E-67	0	0	1.347985
3.5 - 3.75	3.625	4.19E-06	0.009378	0.086792	0.325232	0.360908	0.140642	0.01959	0.00163	1.95E-06	6.43E-05	2.00E-09	1.43E-18	3.63E-08	0	3.67E-51	0	0	0.944242
3.75 - 4	3.875	3.18E-07	0.00204	0.020698	0.081581	0.296066	0.29955	0.091857	0.014458	9.43E-05	0.000807	3.60E-07	9.73E-14	1.10E-06	0	4.37E-38	0	0	0.807152
4 - 4.25	4.125	2.26E-08	0.000406	0.004033	0.012694	0.170485	0.260301	0.174334	0.053957	0.001583	0.004853	1.93E-05	5.60E-10	1.66E-05	0	1.10E-27	0	0	0.682681
4.25 - 4.5	4.375	1.53E-09	7.55E-05	0.000669	0.001338	0.073363	0.107662	0.156011	0.097834	0.010937	0.015773	0.000372	4.04E-07	0.000137	0	1.56E-19	0	0	0.464172
4.5 - 4.75	4.625	1.00E-10	1.33E-05	9.74E-05	0.000103	0.024799	0.023972	0.074387	0.096696	0.035701	0.030496	0.003031	5.02E-05	0.000688	0	2.68E-13	0	0	0.290034
4.75 - 5	4.875	6.44E-12	2.27E-06	1.28E-05	6.05E-06	0.006855	0.003174	0.020863	0.057193	0.061571	0.037918	0.011826	0.001388	0.002239	0	1.07E-08	0	0	0.203049
5 - 5.25	5.125	4.10E-13	3.74E-07	1.54E-06	2.87E-07	0.001601	0.000271	0.003732	0.021852	0.061505	0.032324	0.02453	0.010533	0.005025	0	1.66E-05	0	0	0.161392
5.25 - 5.5	5.375	2.61E-14	6.05E-08	1.74E-07	1.14E-08	0.000325	1.60E-05	0.000455	0.005745	0.038403	0.01992	0.029485	0.026176	0.00818	0	0.001547	0	0	0.130252
5.5 - 5.75	5.625	1.67E-15	9.66E-09	1.86E-08	3.89E-10	5.84E-05	6.85E-07	4.00E-05	0.001096	0.015972	0.009277	0.022079	0.024671	0.010069	0	0.012542	0	0	0.095805
5.75 - 6	5.875	1.08E-16	1.53E-09	1.91E-09	1.18E-11	9.50E-06	2.25E-08	2.65E-06	0.000158	0.004669	0.003388	0.010947	0.009981	0.009707	0.038288	0.012009	0	0	0.089159
6 - 6.25	6.125	7.06E-18	2.41E-10	1.89E-10	3.21E-13	1.42E-06	5.85E-10	1.38E-07	1.80E-05	0.001003	0.001002	0.003785	0.001925	0.007553	0	0.001763	0	0	0.017052
6.25 - 6.5	6.375	4.70E-19	3.79E-11	1.83E-11	8.06E-15	1.97E-07	1.25E-11	5.85E-09	1.67E-06	0.000165	0.000246	0.000954	0.000194	0.004867	0	4.97E-05	0	0	0.006477
6.5 - 6.75	6.625	3.18E-20	5.98E-12	1.73E-12	1.89E-16	2.58E-08	2.25E-13	2.07E-10	1.28E-07	2.14E-05	5.15E-05	0.000182	1.10E-05	0.002654	0	3.25E-07	0	0	0.002921
6.75 - 7	6.875	2.20E-21	9.48E-13	1.62E-13	4.18E-18	3.21E-09	3.52E-15	6.25E-12	8.46E-09	2.26E-06	9.35E-06	2.71E-05	3.75E-07	0.001249	0	5.85E-10	0	0.015391	0.016679
Total		1.461531	4.693302	3.575437	2.258184	1.385974	0.858669	0.542692	0.350705	0.231628	0.156133	0.107236	0.07493	0.052387	0.038288	0.027927	0	0.015391	15.83041



**Εικόνα 4.3** Από κοινού κατανομές των  $H_s$ ,  $T_m$  για τα βαθιά ύδατα που προέκυψαν από τα συνδυασμένα ανεμολογικά δεδομένα των περιοχών Λήμιнос-Αλεξανδρούπολη: (α) Καμπύλες ίσης πυκνότητας με εφαρμογή μοντέλου δεσμευμένης πιθανότητας (Conditional model) με λογαριθμική κατανομή για  $T_m|H_s$  και κατανομή Weibull για το  $H_s$  (β) Καμπύλες ίσης πυκνότητας με εφαρμογή μοντέλου δεσμευμένης πιθανότητας (Conditional model) με λογαριθμική κατανομή για  $T_m|H_s$  και  $H_s$

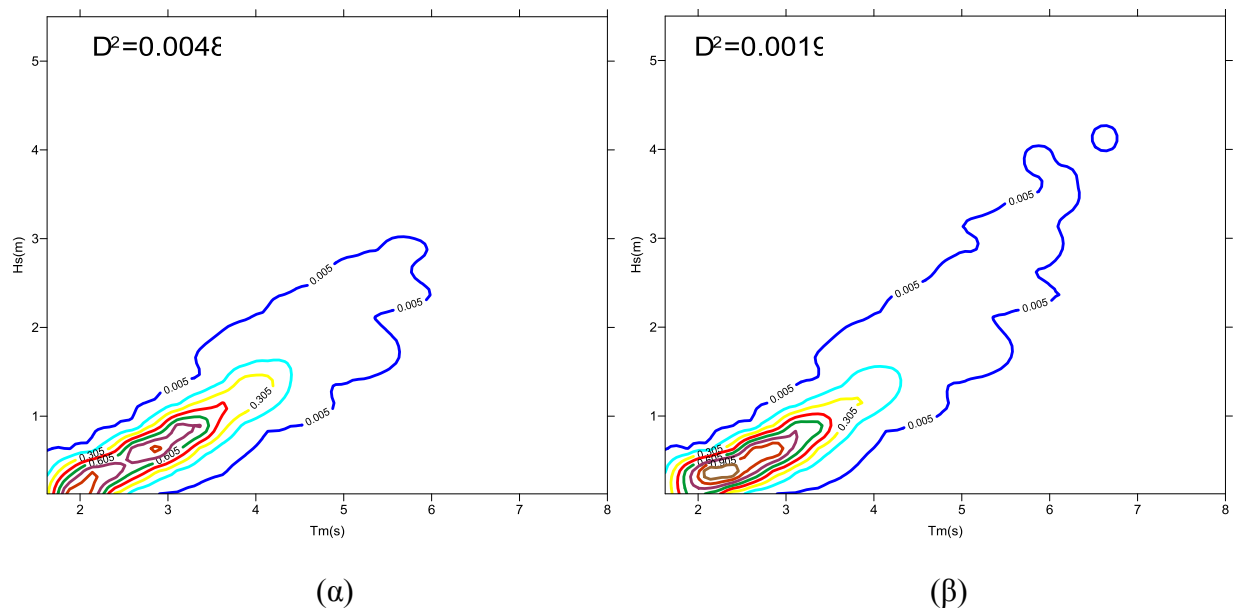
Από τα παραπάνω σχήματα διακρίνεται ότι η εφαρμογή του μοντέλου δεσμευμένης πιθανότητας στους αρχικούς πίνακες από κοινού συχνοτήτων των μεγεθών  $H_s$ -  $T_m$ , που προέκυψαν βάσει των συνδυασμένων ανεμολογικών δεδομένων της Λίμνου και της Αλεξανδρούπολης, έχει παρόμοια με τα προηγούμενα αποτελέσματα (εικόνες 4.2 (α) (β)). Για πολύ μικρές πυκνότητες πιθανότητας, βλέπουμε ότι το μέγιστο ύψος κύματος που αντιστοιχεί στην περίπτωση της κατανομής Weibull είναι 3.3 m και η μέγιστη περίοδος 6 s, ενώ στην περίπτωση της λογαριθμοκανονικής κατανομής είναι 4.28 m και 7.05 s αντίστοιχα. Υπάρχει δηλαδή μια απόκλιση περίπου 1 μέτρο για το ύψος κύματος και 1 s για την περίοδο, όπως δηλαδή συμβαίνει και για τα αποτελέσματα στους πίνακες που βασίστηκαν μόνο στα ανεμολογικά δεδομένα της Λήμινου. Για πιο μεσαίες τιμές πυκνοτήτων η προσαρμογή της κατανομής Weibull στο  $H_s$  και λογαριθμοκανονικής στην  $T_m|H_s$  δίνει μεγαλύτερα μέγιστα ύψη και περιόδους σε σχέση με τη λογαριθμοκανονική κατανομή για το  $H_s$  και για την  $T_m|H_s$ . Συγκριτικά με τα αποτελέσματα που προέκυψαν χωρίς την εφαρμογή θεωρητικού μοντέλου (εικόνα 4.1 (β)) μικρότερο σφάλμα έχει το μοντέλο δεσμευμένης πιθανότητας με χρήση λογαριθμοκανονικής κατανομής και για το  $H_s$  και για την  $T_m|H_s$ , (0,0019 έναντι 0,0040 που έχει με προσαρμογή της Weibull στο  $H_s$ ).

**Πίνακας 4.6** Μακροχρόνια από κοινού πυκνότητα πιθανότητας του χαρακτηριστικού ύψους κύματος  $H_s$  και της μέσης περιόδου  $T_m$  με εφαρμογή του μοντέλου δεσμευμένης πιθανότητας στον πίνακα κλάσεων σταθερού πλάτους που κατασκευάστηκε βάσιμνος στα ανεμολογικά δεδομένα της Λήμνου-Αλεξανδρούπολης-Καβάλας, θεωρώντας κατανομή Weibull για το  $H_s$  (περιθώρια) και λογαριθμική κατανομή για την  $T_m|H_s$  στα βαθιά ύδατα.

Κλάσεις περιόδου $T_m$	Κεντρικές Τιμές	Κλάσεις Ύψους κύματος $H_s$																	Total
		0-0.25	0.25-0.5	0.5-0.75	0.75-1	1-1.25	1.25-1.5	1.5-1.75	1.75-2	2-2.25	2.25-2.5	2.5-2.75	2.75-3	3-3.25	3.25-3.5	3.5-3.75	3.75-4	4-4.25	
		0.125	0.375	0.625	0.875	1.125	1.375	1.625	1.875	2.125	2.375	2.625	2.875	3.125	3.375	3.625	3.875	4.125	
1.5 - 1.75	1.625	0.254824	0.106077	7.04E-06	1.46E-14	2.52E-15	2.67E-40	1.94E-19	5.50E-25	5.11E-74	3.74E-36	1.57E-114	1.12E-190	2.31E-37	8.02E-102	0	0	0	0.360908
1.75 - 2	1.875	1.008059	0.489818	0.001642	2.17E-09	1.06E-10	8.32E-29	1.62E-14	7.92E-19	1.07E-55	2.76E-28	9.11E-89	4.09E-150	8.59E-30	4.25E-81	0	0	0	1.499519
2 - 2.25	2.125	0.908063	0.923453	0.049654	7.40E-06	2.14E-07	2.20E-20	7.35E-11	3.22E-14	7.20E-42	2.93E-22	5.50E-69	1.13E-118	5.93E-24	5.54E-65	0	0	0	1.881178
2.25 - 2.5	2.375	0.297315	0.934787	0.354411	0.001706	4.88E-05	3.54E-14	4.07E-08	9.93E-11	2.68E-31	1.43E-17	1.45E-53	6.78E-94	2.24E-19	3.09E-52	0	0	0	1.588268
2.5 - 2.75	2.625	0.047785	0.6066	0.882515	0.054114	0.002218	1.28E-09	4.67E-06	4.43E-08	3.61E-23	6.84E-14	2.01E-41	3.84E-74	9.47E-16	4.93E-42	0	0	0	1.593236
2.75 - 3	2.875	0.004611	0.284396	1.000644	0.384099	0.029519	2.56E-06	0.000161	4.50E-06	6.47E-17	5.47E-11	8.19E-32	2.82E-58	7.37E-13	8.44E-34	0	0	0	1.703437
3 - 3.25	3.125	0.000307	0.104716	0.623278	0.861184	0.151617	0.000532	0.002168	0.000143	3.91E-12	1.07E-08	3.38E-24	1.75E-45	1.51E-10	4.00E-27	0	0	0	1.743946
3.25 - 3.5	3.375	1.56E-05	0.032147	0.244316	0.783794	0.367503	0.018486	0.013808	0.001813	1.58E-08	6.77E-07	3.52E-18	3.70E-35	1.06E-08	1.06E-21	0	0	0	1.461883
3.5 - 3.75	3.625	6.47E-07	0.008597	0.066654	0.349073	0.488667	0.152235	0.048099	0.010871	7.15E-06	1.71E-05	1.83E-13	7.57E-27	3.11E-07	2.66E-17	0	0	0	1.124222
3.75 - 4	3.875	2.32E-08	0.00207	0.013657	0.087678	0.399821	0.388813	0.102398	0.03541	0.000538	0.000203	8.12E-10	3.37E-20	4.44E-06	9.52E-14	0	0	0	1.030593
4 - 4.25	4.125	7.49E-10	0.00046	0.002228	0.013859	0.220035	0.379535	0.145256	0.069678	0.009157	0.001286	4.62E-07	6.16E-15	3.49E-05	6.71E-11	0	0	0	0.841529
4.25 - 4.5	4.375	2.24E-11	9.61E-05	0.000303	0.001502	0.087363	0.166975	0.147003	0.090077	0.045029	0.004813	4.70E-05	7.64E-11	0.000165	1.20E-08	0	0	0	0.543373
4.5 - 4.75	4.625	6.36E-13	1.92E-05	3.56E-05	0.00012	0.026462	0.037772	0.112104	0.081827	0.077849	0.011534	0.001114	9.66E-08	0.000511	6.72E-07	0	0	0	0.349348
4.75 - 5	4.875	1.74E-14	3.69E-06	3.71E-06	7.38E-06	0.006396	0.004887	0.067337	0.05516	0.055482	0.018912	0.007611	1.73E-05	0.001096	1.38E-05	0	0	0	0.216927
5 - 5.25	5.125	4.69E-16	6.94E-07	3.52E-07	3.69E-07	0.00128	0.000395	0.033033	0.028853	0.018572	0.022396	0.017914	0.000577	0.001719	0.000121	0	0	0	0.124863
5.25 - 5.5	5.375	1.25E-17	1.28E-07	3.10E-08	1.55E-08	0.000218	2.14E-05	0.013637	0.012151	0.003253	0.020038	0.016817	0.004499	0.002057	0.0005	0	0	0	0.073192
5.5 - 5.75	5.625	3.33E-19	2.34E-08	2.57E-09	5.66E-10	3.26E-05	8.22E-07	0.004856	0.004249	0.000326	0.014064	0.007118	0.009893	0.001946	0.001084	0	0	0	0.04357
5.75 - 6	5.875	8.93E-21	4.24E-09	2.02E-10	1.83E-11	4.35E-06	2.37E-08	0.001523	0.001266	2.02E-05	0.007993	0.001506	0.007204	0.0015	0.001332	0	0.00079	0	0.023139
6 - 6.25	6.125	2.43E-22	7.65E-10	1.54E-11	5.36E-13	5.27E-07	5.31E-10	0.000428	0.000328	8.23E-07	0.003778	0.000174	0.00199	0.000966	0.000995	0.001966	0	0	0.010628
6.25 - 6.5	6.375	6.71E-24	1.38E-10	1.13E-12	1.45E-14	5.89E-08	9.63E-12	0.00011	7.55E-05	2.33E-08	0.00152	1.18E-05	0.000234	0.000531	0.00048	0	0	0	0.002962
6.5 - 6.75	6.625	1.89E-25	2.50E-11	8.19E-14	3.67E-16	6.14E-09	1.45E-13	2.59E-05	1.56E-05	4.81E-10	0.000531	5.03E-07	1.30E-05	0.000255	0.000157	0	0	0.000307	0.001303
Total		2.520981	3.49324	3.239348	2.537145	1.781187	1.149654	0.691954	0.391923	0.210234	0.107086	0.052313	0.024429	0.010785	0.004684	0.001966	0.00079	0.000307	16.21802

**Πίνακας 4.7** Μακροχρόνια από κοινού πυκνότητα πιθανότητας του χαρακτηριστικού ύψους κύματος  $H_s$  και της μέσης περιόδου  $T_m$  με εφαρμογή του μοντέλου δεσμευμένης πιθανότητας στον πίνακα κλάσεων σταθερού πλάτους που κατασκευάστηκε βάσιμνος στα ανεμολογικά δεδομένα της Λήμνου-Αλεξανδρούπολης, θεωρώντας λογαριθμοκανονική κατανομή για το  $H_s$  (περιθώρια) για την  $T_m | H_s$  στα βαθιά ύδατα.

Κλάσεις περιόδου $T_m$	Κεντρικές Τιμές	Κλάσεις Ύψους κύματος $H_s$																	Total
		0-0.25	0.25-0.5	0.5-0.75	0.75-1	1-1.25	1.25-1.5	1.5-1.75	1.75-2	2-2.25	2.25-2.5	2.5-2.75	2.75-3	3-3.25	3.25-3.5	3.5-3.75	3.75-4	4-4.25	
		0.125	0.375	0.625	0.875	1.125	1.375	1.625	1.875	2.125	2.375	2.625	2.875	3.125	3.375	3.625	3.875	4.125	
1.5-1.75	1.625	0.156863	0.145705	7.80E-06	1.28E-14	1.92E-15	1.93E-40	1.45E-19	4.66E-25	5.28E-74	5.07E-36	2.97E-114	3.16E-190	1.02E-36	5.89E-101	0	0	0	0.302575
1.75-2	1.875	0.620534	0.6728	0.00182	1.91E-09	8.04E-11	6.00E-29	1.21E-14	6.71E-19	1.10E-55	3.73E-28	1.73E-88	1.15E-149	3.80E-29	3.12E-80	0	0	0	1.295154
2-2.25	2.125	0.558979	1.268429	0.055052	6.52E-06	1.62E-07	1.58E-20	5.51E-11	2.73E-14	7.44E-42	3.98E-22	1.04E-68	3.18E-118	2.63E-23	4.07E-64	0	0	0	1.882466
2.25-2.5	2.375	0.183019	1.283996	0.392936	0.001502	3.71E-05	2.55E-14	3.05E-08	8.41E-11	2.77E-31	1.94E-17	2.75E-53	1.91E-93	9.92E-19	2.27E-51	0	0	0	1.861491
2.5-2.75	2.625	0.029415	0.833208	0.978445	0.047644	0.001685	9.24E-10	3.50E-06	3.76E-08	3.73E-23	9.27E-14	3.81E-41	1.08E-73	4.19E-15	3.62E-41	0	0	0	1.890401
2.75-3	2.875	0.002838	0.390638	1.109415	0.33818	0.022426	1.84E-06	0.000121	3.81E-06	6.69E-17	7.42E-11	1.55E-31	7.93E-58	3.27E-12	6.20E-33	0	0	0	1.863624
3-3.25	3.125	0.000189	0.143834	0.691029	0.758229	0.115186	0.000384	0.001625	0.000121	4.04E-12	1.45E-08	6.41E-24	4.93E-45	6.69E-10	2.94E-26	0	0	0	1.710597
3.25-3.5	3.375	9.59E-06	0.044157	0.270873	0.690091	0.279197	0.013327	0.010346	0.001536	1.63E-08	9.17E-07	6.67E-18	1.04E-34	4.70E-08	7.77E-21	0	0	0	1.309537
3.5-3.75	3.625	3.98E-07	0.011809	0.073899	0.307341	0.371247	0.109749	0.036041	0.009208	7.40E-06	2.32E-05	3.47E-13	2.13E-26	1.38E-06	1.95E-16	0	0	0	0.919327
3.75-4	3.875	1.43E-08	0.002843	0.015141	0.077196	0.30375	0.280301	0.076727	0.029994	0.000556	0.000275	1.54E-09	9.50E-20	1.97E-05	6.99E-13	0	0	0	0.786803
4-4.25	4.125	4.61E-10	0.000632	0.00247	0.012202	0.167164	0.273612	0.10884	0.059019	0.009469	0.001743	8.76E-07	1.74E-14	0.000154	4.93E-10	0	0	0	0.635307
4.25-4.5	4.375	1.38E-11	0.000132	0.000336	0.001323	0.066371	0.120375	0.110149	0.076298	0.046565	0.006521	8.91E-05	2.15E-10	0.000732	8.83E-08	0	0	0	0.42889
4.5-4.75	4.625	3.91E-13	2.63E-05	3.94E-05	0.000105	0.020104	0.02723	0.083999	0.06931	0.080505	0.015629	0.002111	2.72E-07	0.002262	4.93E-06	0	0	0	0.301326
4.75-5	4.875	1.07E-14	5.08E-06	4.11E-06	6.50E-06	0.004859	0.003523	0.050455	0.046722	0.057375	0.025626	0.014425	4.87E-05	0.004854	0.000102	0	0	0	0.208006
5-5.25	5.125	2.88E-16	9.54E-07	3.91E-07	3.25E-07	0.000972	0.000284	0.024752	0.02444	0.019206	0.030347	0.033951	0.001626	0.007615	0.000887	0	0	0	0.144083
5.25-5.5	5.375	7.69E-18	1.76E-07	3.44E-08	1.37E-08	0.000166	1.54E-05	0.010218	0.010293	0.003364	0.027152	0.031872	0.012672	0.009112	0.003674	0	0	0	0.108538
5.5-5.75	5.625	2.05E-19	3.21E-08	2.84E-09	4.98E-10	2.48E-05	5.93E-07	0.003639	0.003599	0.000337	0.019057	0.01349	0.027864	0.00862	0.007963	0	0	0	0.084594
5.75-6	5.875	5.49E-21	5.82E-09	2.24E-10	1.61E-11	3.30E-06	1.71E-08	0.001142	0.001072	2.09E-05	0.01083	0.002855	0.020291	0.006643	0.009788	0	0.018491	0	0.071136
6-6.25	6.125	1.49E-22	1.05E-09	1.70E-11	4.72E-13	4.00E-07	3.83E-10	0.000321	0.000278	8.51E-07	0.005119	0.00033	0.005606	0.004279	0.007313	0.025183	0	0	0.04843
6.25-6.5	6.375	4.13E-24	1.90E-10	1.26E-12	1.28E-14	4.47E-08	6.94E-12	8.22E-05	6.39E-05	2.41E-08	0.002059	2.24E-05	0.00066	0.002354	0.003522	0	0	0	0.008764
6.5-6.75	6.625	1.16E-25	3.43E-11	9.08E-14	3.23E-16	4.67E-09	1.05E-13	1.94E-05	1.33E-05	4.98E-10	0.000719	9.54E-07	3.66E-05	0.001127	0.001151	0	0	0.013731	0.016798
Total		1.551847	4.798215	3.591469	2.233827	1.353195	0.828803	0.518479	0.33197	0.217407	0.145103	0.099146	0.068804	0.047773	0.034405	0.025183	0.018491	0.013731	15.87785



**Εικόνα 4.4** Από κοινού κατανομές των  $H_s$ ,  $T_m$  για τα βαθιά ύδατα που προέκυψαν από τα συνδυασμένα ανεμολογικά δεδομένα των περιοχών Λήμνος-Αλεξανδρούπολη-Καβάλα: (α) Καμπύλες ίσης πυκνότητας με εφαρμογή μοντέλου δεσμευμένης πιθανότητας (Conditional model) με λογαριθμική κατανομή για  $T_m|H_s$  και κατανομή Weibull για το  $H_s$  (β) Καμπύλες ίσης πυκνότητας με εφαρμογή μοντέλου δεσμευμένης πιθανότητας (Conditional model) με λογαριθμική κατανομή για  $T_m|H_s$  και  $H_s$

Η τελευταία περίπτωση προσαρμογής του μοντέλου δεσμευμένης πιθανότητας στους πίνακες από κοινού συχνοτήτων που προέκυψαν βάσει των ανεμολογικών δεδομένων Λήμνου-Αλεξανδρούπολης-Καβάλας, δεν έχει διαφορές από τις προηγούμενες δυο περιπτώσεις. Και στην περίπτωση αυτή η προσαρμογή της κατανομής Weibull στις περιθώριες τιμές του ύψους κύματος, για πολύ μικρές τιμές πυκνότητας υποεκτιμά αρκετά το μέγιστο ύψος  $H_s$ , όπως και την περίοδο, και για μεσαίες τιμές δίνει μια ελαφρή υπερεκτίμηση έναντι της προσαρμογής της λογαριθμικής κατανομής, ακριβώς δηλαδή όπως συμβαίνει στα προηγούμενα αποτελέσματα (εικόνες 4.2, 4.3). Μικρότερο σφάλμα έχει το μοντέλο δεσμευμένης πιθανότητας με χρήση λογαριθμοκανονικής κατανομής για το  $H_s$  και για την  $T_m|H_s$  με τιμή 0.0019, που είναι αρκετά μικρότερο από την τιμή 0.048 που έχει το μοντέλο με προσαρμογή της κατανομής Weibull στο  $H_s$  και λογαριθμοκανονικής στην δεσμευμένη περίοδο  $T_m|H_s$ .

Όπως διαπιστώθηκε παραπάνω και στις 3 περιπτώσεις των ανεμολογικών δεδομένων το μοντέλο δεσμευμένης πιθανότητας είχε παρόμοια προσαρμογή και ίδια συμπεράσματα ως προς τις κατανομές που προσαρμόστηκαν. Αυτό είναι λογικό καθώς πολλές από κοινού συχνότητες εμφάνισης των  $H_s$ ,  $T_m$ , είναι όμοιες. Ο σκοπός που έγινε η εκτενής ανάλυση ως προς τον συνδυασμό των ανεμολογικών δεδομένων δεν είναι η μεταξύ τους σύγκριση, αλλά η σύγκριση με τα αποτελέσματα από την εφαρμογή του μοντέλου σε πίνακες πραγματικών μετρήσεων στο

ίδιο σημείο μελέτης. Ουσιαστικά γίνεται μια προσπάθεια να υπάρξει όσο το δυνατόν περισσότερο φυσική προσέγγιση στη μεθοδολογία μας, όσο αυτό καθίσταται δυνατό.

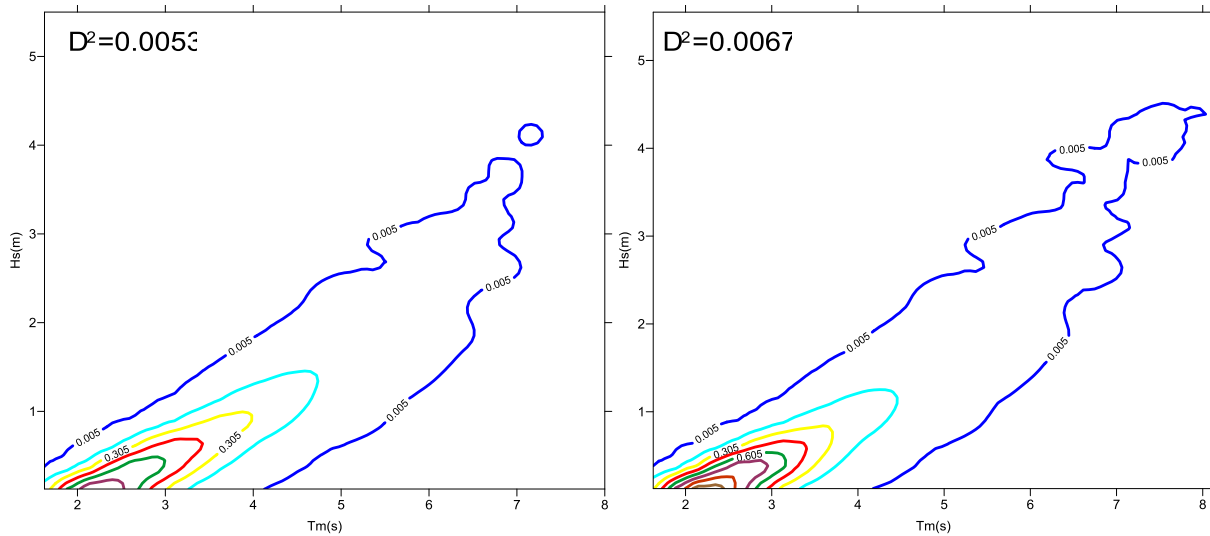
**Πίνακας 4.8** Μακροχρόνια από κοινού πυκνότητα πιθανότητας του χαρακτηριστικού ύψους κύματος  $H_s$ , και της μέσης περιόδου  $T_m$  με εφαρμογή του μοντέλου δεσμευμένης πιθανότητας στον πίνακα κλάσεων σταθερού πλάτους του Wind and Wave Mediterranean Atlas, θεωρώντας κατανομή Weibull για το  $H_s$  (περιθώρια) και λογαριθμική κατανομή για την  $T_m | H_s$  στα βαθιά ύδατα.

Κλάσεις περιόδου $T_m$	Κλάσεις Ύψους $H_s$																		Total
	Κεντρικές τιμές	0-0.25	0.25-0.5	0.5-0.75	0.75-1	1-1.25	1.25-1.5	1.5-1.75	1.75-2	2-2.25	2.25-2.5	2.5-2.75	2.75-3	3-3.25	3.25-3.5	3.5-3.75	3.75-4	4-4.25	
		0.125	0.375	0.625	0.875	1.125	1.375	1.625	1.875	2.125	2.375	2.625	2.875	3.125	3.375	3.625	3.875	4.125	
1.5 - 1.75	1.625	0.224995	0.006332	2.66E-05	6.48E-09	5.65E-15	1.62E-18	4.22E-25	1.95E-31	2.69E-52	1.11E-49	7.63E-122	1.23E-65	1.64E-86	0	0	8.71E-153	0	0.231354
1.75 - 2	1.875	0.603898	0.061589	0.001207	1.90E-06	4.49E-11	4.80E-14	2.38E-19	1.47E-24	5.97E-41	3.31E-39	6.49E-98	1.95E-52	5.70E-70	0	0	8.72E-124	0	0.666697
2 - 2.25	2.125	0.899751	0.24706	0.015968	0.000113	3.38E-08	1.09E-10	5.55E-15	2.75E-19	3.28E-32	4.10E-31	3.60E-79	3.70E-42	5.44E-57	0	0	5.60E-101	0	1.162892
2.25 - 2.5	2.375	0.891072	0.530502	0.087683	0.002109	4.63E-06	3.81E-08	1.28E-11	3.48E-15	2.27E-25	9.34E-25	3.17E-64	5.14E-34	1.27E-46	0	0	1.03E-82	0	1.511371
2.5 - 2.75	2.625	0.659125	0.722851	0.252279	0.016803	0.000179	3.31E-06	5.23E-09	5.82E-12	5.80E-20	1.05E-19	3.73E-52	1.74E-27	3.15E-38	0	0	6.87E-68	0	1.65124
2.75 - 3	2.875	0.39395	0.701732	0.445931	0.0699	0.002612	9.88E-05	5.61E-07	2.04E-09	1.16E-15	1.14E-15	2.58E-42	3.30E-22	2.28E-31	0	0	9.72E-56	0	1.614225
3 - 3.25	3.125	0.200981	0.526553	0.541991	0.175608	0.017907	0.001274	2.10E-05	2.09E-07	3.13E-12	1.98E-12	3.04E-34	6.44E-18	9.99E-26	0	0	1.04E-45	0	1.464334
3.25 - 3.5	3.375	0.091028	0.323938	0.491631	0.296298	0.067301	0.008423	0.000341	8.01E-06	1.68E-09	7.87E-10	1.35E-27	2.01E-14	4.57E-21	0	0	2.16E-37	0	1.27897
3.5 - 3.75	3.625	0.037672	0.17068	0.353755	0.363552	0.155925	0.032461	0.002801	0.000138	2.44E-07	9.37E-08	4.09E-22	1.40E-11	3.29E-17	0	0	1.78E-30	0	1.116985
3.75 - 4	3.875	0.014556	0.079598	0.211493	0.344669	0.243586	0.080422	0.013163	0.001222	1.20E-05	4.14E-06	1.34E-17	2.84E-09	5.12E-14	0	0	1.00E-24	0	0.988725
4 - 4.25	4.125	0.005337	0.033697	0.108879	0.264655	0.275138	0.138291	0.038915	0.006272	0.000241	8.00E-05	6.82E-14	2.04E-07	2.21E-11	0	0	5.99E-20	0	0.871504
4.25 - 4.5	4.375	0.001881	0.013206	0.049636	0.170803	0.237439	0.175365	0.078069	0.020319	0.002259	0.00077	7.21E-11	6.15E-06	3.21E-09	0	0	5.35E-16	0	0.749753
4.5 - 4.75	4.625	0.000643	0.004866	0.020489	0.095431	0.163607	0.172162	0.112921	0.044592	0.011173	0.004104	1.99E-08	8.83E-05	1.85E-07	0	0	9.47E-13	0	0.630075
4.75 - 5	4.875	0.000215	0.001707	0.007795	0.047272	0.093282	0.136109	0.123706	0.07023	0.03198	0.013214	1.75E-06	0.000671	4.81E-06	0	0	4.16E-10	0	0.526187
5 - 5.25	5.125	7.07E-05	0.000576	0.002773	0.021168	0.04531	0.089499	0.106875	0.083227	0.057228	0.027576	5.66E-05	0.002949	6.29E-05	0	0	5.47E-08	0	0.437371
5.25 - 5.5	5.375	2.30E-05	0.000188	0.000933	0.008706	0.019206	0.05027	0.075295	0.077187	0.068269	0.039553	0.000774	0.008067	0.000454	0	0	2.52E-06	0	0.348927
5.5 - 5.75	5.625	7.43E-06	6.00E-05	0.0003	0.003333	0.007247	0.024661	0.044483	0.057891	0.057283	0.040961	0.004986	0.014592	0.00194	0	0	4.66E-05	0	0.257792
5.75 - 6	5.875	2.39E-06	1.87E-05	9.29E-05	0.001201	0.002476	0.010765	0.022561	0.036098	0.035374	0.031924	0.016577	0.018383	0.005247	0	0	0.000384	0	0.181104
6 - 6.25	6.125	7.66E-07	5.77E-06	2.79E-05	0.000411	0.000776	0.004248	0.01002	0.019158	0.016705	0.019397	0.030792	0.016851	0.00948	0	0	0.001558	0	0.129431
6.25 - 6.5	6.375	2.46E-07	1.76E-06	8.17E-06	0.000135	0.000226	0.001536	0.003964	0.008828	0.006234	0.009469	0.034186	0.01167	0.011985	0	0	0.003366	0	0.091607
6.5 - 6.75	6.625	7.90E-08	5.31E-07	2.34E-06	4.25E-05	6.19E-05	0.000515	0.001417	0.003594	0.001891	0.003811	0.024041	0.006306	0.011034	0.035487	0	0.004158	0	0.092359
6.75-7.00	6.875	2.55E-08	1.59E-07	6.60E-07	1.30E-05	1.60E-05	0.000161	0.000464	0.001311	0.000478	0.001293	0.011261	0.002734	0.007659	0	0.022931	0.003121	0	0.051443
7.00-7.25	7.125	8.26E-09	4.77E-08	1.84E-07	3.87E-06	3.96E-06	4.78E-05	0.00014	0.000435	0.000103	0.000377	0.003671	0.000974	0.004132	0	0	0.0015	0.009445	0.020832
Total		4.025209	3.425162	2.592902	1.882227	1.332305	0.926312	0.635156	0.430509	0.289227	0.192534	0.126346	0.083292	0.051998	0.035487	0.022931	0.014136	0.009445	16.07518



**Πίνακας 4.9** Μακροχρόνια από κοινού πυκνότητα πιθανότητας του χαρακτηριστικού ύψους κύματος  $H_s$  και της μέσης περιόδου  $T_m$  με εφαρμογή του μοντέλου δεσμευμένης πιθανότητας στον πίνακα κλάσεων σταθερού πλάτους του Wind and Wave Mediterranean Atlas, θεωρώντας λογαριθμοκανονική κατανομή για το  $H_s$  (περιθώρια) για την  $T_m | H_s$  στα βαθιά ύδατα.

Κλάσεις περιόδου $T_m$	Κεντρικές τιμές	Κλάσεις Ύψους $H_s$																	Total
		0 - 0.25	0.25 - 0.5	0.5 - 0.75	0.75 - 1	1 - 1.25	1.25 - 1.5	1.5 - 1.75	1.75 - 2	2 - 2.25	2.25 - 2.5	2.5 - 2.75	2.75 - 3	3 - 3.25	3.25 - 3.5	3.5 - 3.75	3.75 - 4	4 - 4.25	
		0.125	0.375	0.625	0.875	1.125	1.375	1.625	1.875	2.125	2.375	2.625	2.875	3.125	3.375	3.625	3.875	4.125	
1.5 - 1.75	1.625	0.286189	0.007749	2.56E-05	5.26E-09	4.16E-15	1.15E-18	3.05E-25	1.49E-31	2.24E-52	1.04E-49	8.24E-122	1.56E-65	2.51E-86	0	0	2.57E-152	0	0.293964
1.75 - 2	1.875	0.768146	0.07537	0.001161	1.55E-06	3.31E-11	3.42E-14	1.72E-19	1.12E-24	4.97E-41	3.09E-39	7.01E-98	2.48E-52	8.73E-70	0	0	2.57E-123	0	0.844679
2 - 2.25	2.125	1.144466	0.30234	0.015348	9.15E-05	2.49E-08	7.73E-11	4.01E-15	2.09E-19	2.73E-32	3.84E-31	3.89E-79	4.72E-42	8.34E-57	0	0	1.65E-100	0	1.462246
2.25 - 2.5	2.375	1.133427	0.649204	0.084278	0.001713	3.42E-06	2.71E-08	9.26E-12	2.65E-15	1.89E-25	8.74E-25	3.42E-64	6.55E-34	1.95E-46	0	0	3.04E-82	0	1.868624
2.5 - 2.75	2.625	0.838394	0.884592	0.242481	0.013642	0.000132	2.36E-06	3.77E-09	4.43E-12	4.82E-20	9.80E-20	4.03E-52	2.21E-27	4.83E-38	0	0	2.03E-67	0	1.979244
2.75 - 3	2.875	0.501097	0.858747	0.428613	0.056751	0.001927	7.03E-05	4.05E-07	1.55E-09	9.68E-16	1.07E-15	2.78E-42	4.21E-22	3.49E-31	0	0	2.87E-55	0	1.847205
3 - 3.25	3.125	0.255643	0.644371	0.520941	0.142574	0.013211	0.000907	1.52E-05	1.59E-07	2.61E-12	1.86E-12	3.29E-34	8.20E-18	1.53E-25	0	0	3.07E-45	0	1.577662
3.25 - 3.5	3.375	0.115786	0.396421	0.472537	0.240561	0.049652	0.005997	0.000246	6.10E-06	1.40E-09	7.37E-10	1.46E-27	2.56E-14	7.01E-21	0	0	6.37E-37	0	1.281207
3.5 - 3.75	3.625	0.047919	0.20887	0.340016	0.295163	0.115035	0.023112	0.002022	0.000105	2.03E-07	8.77E-08	4.41E-22	1.78E-11	5.05E-17	0	0	5.23E-30	0	1.032242
3.75 - 4	3.875	0.018515	0.097408	0.203279	0.279832	0.179709	0.057259	0.009499	0.000931	1.00E-05	3.88E-06	1.45E-17	3.61E-09	7.85E-14	0	0	2.95E-24	0	0.846446
4 - 4.25	4.125	0.006789	0.041237	0.10465	0.21487	0.202987	0.098461	0.028084	0.004778	0.0002	7.48E-05	7.37E-14	2.60E-07	3.38E-11	0	0	1.77E-19	0	0.70213
4.25 - 4.5	4.375	0.002392	0.016161	0.047709	0.138673	0.175173	0.124857	0.05634	0.015479	0.00188	0.00072	7.79E-11	7.84E-06	4.91E-09	0	0	1.58E-15	0	0.579393
4.5 - 4.75	4.625	0.000818	0.005955	0.019693	0.077479	0.120703	0.122576	0.081492	0.033971	0.009298	0.003841	2.15E-08	0.000112	2.83E-07	0	0	2.79E-12	0	0.475939
4.75 - 5	4.875	0.000273	0.002089	0.007492	0.038379	0.06882	0.096907	0.089275	0.053503	0.026613	0.012369	1.89E-06	0.000855	7.37E-06	0	0	1.23E-09	0	0.396584
5 - 5.25	5.125	9.00E-05	0.000704	0.002665	0.017186	0.033428	0.063721	0.077129	0.063404	0.047624	0.025811	6.11E-05	0.003757	9.65E-05	0	0	1.61E-07	0	0.335678
5.25 - 5.5	5.375	2.93E-05	0.00023	0.000897	0.007068	0.014169	0.035791	0.054339	0.058802	0.056812	0.037022	0.000836	0.010276	0.000695	0	0	7.44E-06	0	0.276975
5.5 - 5.75	5.625	9.45E-06	7.34E-05	0.000288	0.002706	0.005347	0.017558	0.032102	0.044103	0.04767	0.03834	0.005384	0.018588	0.002973	0	0	0.000137	0	0.215279
5.75 - 6	5.875	3.04E-06	2.29E-05	8.93E-05	0.000975	0.001827	0.007665	0.016281	0.027501	0.029437	0.029882	0.0179	0.023416	0.008042	0	0	0.001133	0	0.164173
6 - 6.25	6.125	9.74E-07	7.06E-06	2.68E-05	0.000333	0.000573	0.003025	0.007231	0.014595	0.013901	0.018156	0.03325	0.021465	0.01453	0	0	0.004592	0	0.131687
6.25 - 6.5	6.375	3.12E-07	2.15E-06	7.85E-06	0.000109	0.000167	0.001094	0.002861	0.006726	0.005188	0.008863	0.036915	0.014865	0.018368	0	0	0.009923	0	0.105088
6.5 - 6.75	6.625	1.00E-07	6.49E-07	2.25E-06	3.45E-05	4.57E-05	0.000366	0.001023	0.002738	0.001573	0.003567	0.02596	0.008032	0.016911	0.066605	0	0.01226	0	0.139118
6.75 - 7.00	6.875	3.24E-08	1.95E-07	6.35E-07	1.05E-05	1.18E-05	0.000115	0.000335	0.000999	0.000397	0.00121	0.012161	0.003483	0.011739	0	0.053554	0.009202	0	0.093217
7.00 - 7.25	7.125	1.05E-08	5.84E-08	1.77E-07	3.14E-06	2.92E-06	3.40E-05	0.000101	0.000331	8.54E-05	0.000353	0.003964	0.001241	0.006332	0	0	0.004423	0.035624	0.052496
Total		5.119986	4.191556	2.4922	1.528156	0.982924	0.659518	0.458376	0.327972	0.240688	0.180214	0.136433	0.106099	0.079693	0.066605	0.053554	0.041678	0.035624	16.70128



**Εικόνα 4.5** Από κοινού κατανομές των  $H_s$ ,  $T_m$  για τα βαθιά ύδατα που προέκυψαν από τις μετρήσεις του Άτλαντα: (α) Καμπύλες ίσης πυκνότητας με εφαρμογή μοντέλου δεσμευμένης πιθανότητας (Conditional model) με λογαριθμική κατανομή για  $T_m|H_s$  και κατανομή Weibull για το  $H_s$  (β) Καμπύλες ίσης πυκνότητας με εφαρμογή μοντέλου δεσμευμένης πιθανότητας (Conditional model) με λογαριθμική κατανομή για  $T_m|H_s$  και  $H_s$

Τα αποτελέσματα από την εφαρμογή του μοντέλου δεσμευμένης πιθανότητας στον πίνακα από κοινού συχνοτήτων που προέκυψαν από μετρήσεις πεδίου παρουσιάζουν κάποιες διαφορές συγκριτικά με τα προηγούμενα αποτελέσματα των ανεμολογικών δεδομένων. Αρχικά παρατηρείται πως καταλληλότερη για την προσαρμογή στις περιθώριες συχνότητες του  $H_s$ , είναι η κατανομή Weibull, γεγονός που φαίνεται από το μικρότερο σφάλμα σε σχέση με αυτό της προσαρμογής της λογαριθμοκανονικής κατανομής. Για την ακρίβεια στην περίπτωση της κατανομής Weibull για το  $H_s$  και λογαριθμοκανονικής για την  $T_m|H_s$  το σφάλμα είναι 0.0053, ενώ για λογαριθμοκανονική κατανομή για το  $H_s$  και την  $T_m|H_s$  είναι 0.0067. Για μικρές πυκνότητες  $0.005 m^{-1} s^{-1}$  η κατανομή Weibull για το  $H_s$  και λογαριθμοκανονική για την  $T_m|H_s$  δίνει μέγιστο ύψος κύματος 4.25 m και μέγιστη περίοδο 7.3 s, ενώ η λογαριθμοκανονική κατανομή για το  $H_s$  και την  $T_m|H_s$ , δίνουν 4.54 m και 8.05 s. Είναι εμφανές ότι η κατανομή Weibull δεν οδηγεί σε μεγάλη υποεκτίμηση των μέγιστων τιμών (ύψους και περιόδου), όπως γινόταν στις περιπτώσεις των πινάκων που βασίζονταν στα ανεμολογικά δεδομένα και έχει παρόμοια αποτελέσματα με την προσαρμογή της λογαριθμοκανονικής, γι' αυτό και η διαφορά των σφαλμάτων τους δεν είναι μεγάλη. Παρατηρείται επίσης ότι για μεσαίες τιμές πυκνοτήτων ( $0.305 m^{-1} s^{-1}$  και  $0.455 m^{-1} s^{-1}$ ) στην εικόνα 4.4 (α) το μέγιστο ύψος και η μέγιστη περίοδος είναι μεγαλύτερα από της εικόνας 4.4 (β) ( $H_{s_{max}} = 1.46 m$  και  $T_{m_{max}} = 4.7 s$  για την εικόνα 4.4(α) ενώ  $H_{s_{max}} = 1.25 m$  και  $T_{m_{max}} = 4.45 s$  για το σχήμα 4.4 (β)), ενώ για μεγάλες τιμές ( $0.755$ ) πυκνοτήτων στην εικόνα 4.4(α) οι τιμές του ύψους και της περιόδου είναι πολύ μικρές  $H_{s_{max}} = 0.24 m$   $T_{m_{max}} = 2.5 s$  που σχεδόν δεν απεικονίζονται, ενώ στο σχήμα 4.4 (β) είναι ελαφρώς μεγαλύτερες:  $H_{s_{max}} = 0.46 m$   $T_{m_{max}} = 3 s$ .

Η παρούσα διπλωματική εργασία είχε ως απώτερο σκοπό την απεικόνιση των από κοινού κατανομών του χαρακτηριστικού ύψους  $H_s$  και περιόδου  $T_m$ , όταν αυτά έχουν προκύψει από εξισώσεις αριθμητικού μοντέλου πρόγνωσης κυματισμών, και η από κοινού συχνότητα εμφάνισης των μεγαθών αυτών προκύπτει από τις συχνότητες των ανέμων που αποτελούν το γενεσιουργό αίτιο τους. Η μεθοδολογία εμπεριέχει την πιθανότητα σφάλματος από διάφορες σκοπιές. Αρχικά κατά τη χρήση ενός αριθμητικού μοντέλου, όπως έγινε στην περίπτωση μας με της εξισώσεις του CEM, αλλά και την εξίσωση του φάσματος JONSWAP (για τη μετατροπή της  $T_p$  σε  $T_m$ ), πάντα υπάρχει περιθώριο σφάλματος, ως προς την απόλυτα σωστή εκτίμηση των μεγεθών. Επίσης περιθώριο λάθους μπορεί να υπάρχει και ως προς τα ανεμολογικά δεδομένα που χρησιμοποιούνται, καθώς σε ένα σημείο στα βαθιά του πελάγους έρχονται κυματισμοί από διάφορες κατευθύνσεις που μπορεί να οφείλονται σε ανέμους που πνέουν πάνω από αρκετές διαφορετικές περιοχές (ενώ στην εργασία μας εξετάστηκαν μόλις 3 ανεμολογικοί σταθμοί).

Από την άλλη μεριά περιθώρια λάθους μπορούν να υπάρξουν και κατά τις πραγματικές μετρήσεις πεδίου. Αυτά μπορεί να οφείλονται είτε σε εξωγενείς παράγοντες όπως η εμφάνιση ενός πλοίου κοντά στην περιοχή όπου υπάρχει το όργανο μέτρησης, είτε στο ότι το όργανο μπορεί να μην παραμένει σταθερό ως προς την στάθμη της ελεύθερης επιφάνειας. Επίσης στις πραγματικές μετρήσεις πεδίου σε πολλές περιπτώσεις δεν υπάρχει ο διαχωρισμός των ανεμογενών κυματισμών, από τους κυματισμούς αποθάλασσας, και αυτό πραγματοποιείται αργότερα πάλι βασισμένο σε κάποιο μαθηματικό κριτήριο, όπως έγινε και στην παρούσα εργασία (κριτήριο Thomson).

Όπως αναλύθηκε υπάρχουν διάφορα μειονεκτήματα ως προς την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων που προκύπτουν, είτε κατά την εφαρμογή του θεωρητικού μοντέλου σε πίνακες που βασίζονται σε ανεμολογικά δεδομένα και σε κάποιο αριθμητικό μοντέλο πρόγνωσης κυματισμού, είτε σε πίνακες που βασίζονται σε μετρήσεις πεδίου. Η βασικότερη όμως διαφορά που πρέπει να ληφθεί υπόψη κατά τη σύγκριση των αποτελεσμάτων στα βαθιά νερά, είναι η διάρκεια χρόνου που εκείνα αναφέρονται. Η διάρκεια των μετρήσεων, για να εξαχθεί ο πίνακας 3.30 ήταν από το 1999 έως το 2006, δηλαδή 7 χρόνια. Οι συχνότητες των ανεμολογικών δεδομένων βάσει των οποίων εξήχθησαν και οι από κοινού συχνότητες των πινάκων 3.21, 3.24, 3.27 είναι οι μέσες ετήσιες συχνότητες για μετρήσεις ανέμων διάρκειας 40 ετών. Συνεπώς για μια καλύτερη σύγκριση θα έπρεπε να πραγματοποιηθεί αναγωγή σε ετήσια βάση και για τις μετρήσεις πεδίου που έχουν διάρκεια 7 έτη. Έγινε μια προσπάθεια αυτής της αναγωγής των αποτελεσμάτων των 7 ετών σε ετήσια βάση αλλά δεν υπήρξε κάποια βελτίωση στα αποτελέσματα της σύγκρισης και για το λόγο αυτό δεν θα παρουσιαστεί.

Παρακάτω παρουσιάζεται ο πίνακας με τα σφάλματα μεταξύ των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από την εφαρμογή του μοντέλου δεσμευμένης πιθανότητας στους πίνακες των από κοινού συχνοτήτων που βασίστηκαν σε ανεμολογικά δεδομένα και στους πίνακες που βασίστηκαν σε μετρήσεων πεδίου. Το σφάλμα εκτιμήθηκε μόνο μεταξύ των αποτελεσμάτων

που προέκυψαν από την προσαρμογή των ίδιων κατανομών στο  $H_s$  και στην  $T_m|H_s$  σε κάθε αρχικό πίνακα.

**Πίνακας 4.10** Σφάλματα μεταξύ των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από τα ανεμολογικά δεδομένα και της μετρήσεις του Άτλαντα, έπειτα από την εφαρμογή του μοντέλου δεσμευμένης πιθανότητας

Σταθμός:	Ανεμολογικά δεδομένα-Μετρήσεις:	Μοντέλο:	Κατανομή $H_s$ :	Κατανομή $T_m H_s$ :	Σφάλμα $D^2$ :
Θάσος	Λήμνου	Conditional	Weibull	Lognormal	0.0229
	Wind and Wave Mediterranean Atlas	Conditional	Weibull	Lognormal	
	Λήμνος	Conditional	Lognormal	Lognormal	0.0292
	Άτλας	Conditional	Lognormal	Lognormal	
Θάσος	Λήμνος-Αλεξανδρούπολη	Conditional	Weibull	Lognormal	0.0197
	Wind and Wave Mediterranean Atlas	Conditional	Weibull	Lognormal	
	Λήμνος-Αλεξανδρούπολη	Conditional	Lognormal	Lognormal	0.0280
	Wind and Wave Mediterranean Atlas	Conditional	Lognormal	Lognormal	
Θάσος	Λήμνος-Αλεξανδρούπολη-Καβάλα	Conditional	Weibull	Lognormal	0.0193
	Wind and Wave Mediterranean Atlas	Conditional	Weibull	Lognormal	
	Λήμνος-Αλεξανδρούπολη-Καβάλα	Conditional	Lognormal	Lognormal	0.0275
	Wind and Wave Mediterranean Atlas	Conditional	Lognormal	Lognormal	

Όπως φαίνεται από τον παραπάνω πίνακα μικρότερο σφάλμα παρουσιάζεται μεταξύ των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από την προσαρμογή της κατανομής Weibull στο  $H_s$  και λογαριθμοκανονικής στην  $T_m|H_s$ , στους πίνακες από κοινού συχνοτήτων των  $H_s$  και  $T_m$  βάσει των συνδυασμένων ανεμολογικών Λήμνου-Αλεξανδρούπολης-Καβάλας, και στους πίνακες μετρήσεων πεδίου ( εικόνες 4.4 (α), 4.5 (α)). Τα σφάλματα όπως φαίνεται είναι μικρότερα απ' ό τι στην περίπτωση όπου δεν έχει εφαρμοσθεί κανένα θεωρητικό μοντέλο (πίνακας 4.1), που είναι λογικό καθώς τα θεωρητικά μοντέλα δίνουν τιμές πιθανοτήτων σε όλα τα δυνατά ζεύγη  $H_s$  και  $T_m$ . Ωστόσο παραμένουν της ίδιας τάξεως. Επίσης αξίζει να σημειωθεί, πως ενώ σε κάθε περίπτωση ανεμολογικών δεδομένων ξεχωριστά, η λογαριθμοκανονική κατανομή για το  $H_s$  και  $T_m|H_s$  είχε μικρότερο σφάλμα (σε σχέση με τα αρχικά δεδομένα κάθε περίπτωσης), στη σύγκριση με την αντίστοιχη εφαρμογή του μοντέλου στις πραγματικές μετρήσεις, μικρότερα

σφάλματα παρουσιάζει το μοντέλο με κατανομή Weibull για το  $H_s$  και λογαριθμοκανονική για την  $T_m|H_s$ .

Λαμβάνοντας υπόψη όλα τα παραπάνω καταλήγουμε πως για τις περιπτώσεις των από κοινού συχνοτήτων που βασίζονται στα ανεμολογικά δεδομένα, καταλληλότερο είναι το μοντέλο δεσμευμένης πιθανότητας με λογαριθμοκανονική κατανομή για  $H_s$  και  $T_m|H_s$  καθώς έχει μικρότερο σφάλμα και για τις τρεις περιπτώσεις ανεμολογικών δεδομένων. Επίσης και οπτικά η μορφή των θεωρητικών καμπύλων μοιάζει περισσότερο με αυτή των πραγματικών δεδομένων, αλλά και εκτιμά με περισσότερη ασφάλεια την τιμή του μέγιστου ύψους κύματος που αντιστοιχεί σε μια ορισμένη μικρή πιθανότητα. Αντίθετα καλύτερη προσαρμογή στους πίνακες από κοινού συχνοτήτων των  $H_s$ ,  $T_m$ , που προέκυψαν από μετρήσεις, έχει το μοντέλο δεσμευμένης πιθανότητας με κατανομή Weibull για το  $H_s$  και λογαριθμοκανονικής για την δεσμευμένη  $T_m|H_s$ . Συνεπώς παρόλο που γενικά η κατανομή Weibull θεωρείται περισσότερο αντιπροσωπευτική για ακραίες τιμές του ύψους κύματος, αυτό δεν συμβαίνει πάντα καθώς πολύ σημαντικό ρόλο διαδραματίζουν οι αρχικές από κοινού περιθώριες συχνότητες του ύψους κύματος, που υπεισέρχονται στις εξισώσεις υπολογισμού των παραμέτρων των κατανομών.

Για τη μεταξύ τους σύγκριση, (αποτελέσματα ανεμολογικών- μετρήσεων) συμπερασματικά προκύπτει ότι τα αποτελέσματα πλησιάζουν περισσότερο μεταξύ τους, έπειτα από την εφαρμογή των θεωρητικών μοντέλων, παρά αν συγκριθούν οι πραγματικές πιθανότητες τους. Αυτό φαίνεται και από το μέγεθος των μεταξύ τους σφαλμάτων όπου στον πίνακα 4.1 τα σφάλματα είναι μεγαλύτερα απ' ό,τι στον πίνακα 4.10. Όσον αφορά τα μέγιστα ύψη αλλά και τις μέγιστες περιόδους, που είναι και τα κρισιμότερα για το σχεδιασμό, παρατηρήθηκε ότι χωρίς την εφαρμογή κάποιου θεωρητικού μοντέλου το μέγιστο χαρακτηριστικό ύψος που αντιστοιχεί στην ορισμένη πυκνότητα 0.005, έχει περίπου ίδια τιμή για τις δυο περιπτώσεις, είτε βασιστούμε δηλαδή στα ανεμολογικά δεδομένα είτε στις μετρήσεις πεδίου, με μια μικρή εξαίρεση τα συνδυασμένα ανεμολογικά Λήμνου-Αλεξανδρούπολης-Καβάλας που έχει ελαφρώς μικρότερη τιμή. (εικόνες 5.1 (α), (β), (γ), (δ) ). Σχετικά με τις μέσες περιόδους, τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τις μετρήσεις υπερεκτιμούν τις τιμές τους σε σχέση με τα αποτελέσματα βάσει των ανεμολογικών δεδομένων, και αυτό οφείλεται, (i) πρώτον στην πιθανή ύπαρξη των κυμάτων αποθάλασσας στην πρώτη περίπτωση, καθώς ένα μαθηματικό μοντέλο όπως αυτό που χρησιμοποιήθηκε για τον διαχωρισμό τους από τα ανεμογενή κύματα, δεν μπορεί να εξασφαλίσει την πλήρη αποφυγή τους, (ii) και δεύτερον στο γεγονός ότι στην περίπτωση των ανεμολογικών το χαρακτηριστικό ύψος και η μέση περίοδος υπολογίζονται από εξισώσεις και λόγω αυτού έχουν ανάλογο ρυθμό μεταβολής, δηλαδή η μείωση του ενός συνεπάγεται τη μείωση του άλλου και αντίστροφα. Λόγω αυτού δεν παρατηρούνται πολύ μικρές τιμές του ύψους κύματος με μεγάλες τιμές της μέσης περιόδου, και οι περισσότερες συχνότητες είναι συγκεντρωμένες γύρω από την κύρια διαγώνιο των πινάκων των από κοινού συχνοτήτων των  $H_s$ ,  $T_m$ . Αυτό έχει και σαν αποτέλεσμα οι καμπύλες των από κοινού κατανομών των  $H_s$ ,  $T_m$ , στην περίπτωση των ανεμολογικών δεδομένων να έχουν κλίση αρκετά κοντά στη κύρια διαγώνιο και οι μεσαίες τιμές των πυκνοτήτων να είναι πιο πυκνομένες, σε αντίθεση με την περίπτωση των

πραγματικών μετρήσεων όπου οι καπύλες μεσαίων πυκνοτήτων είναι πιο αραιωμένες και παρατηρούνται χαμηλά ύψη κύματος με μεγάλες μέσες περιόδους.

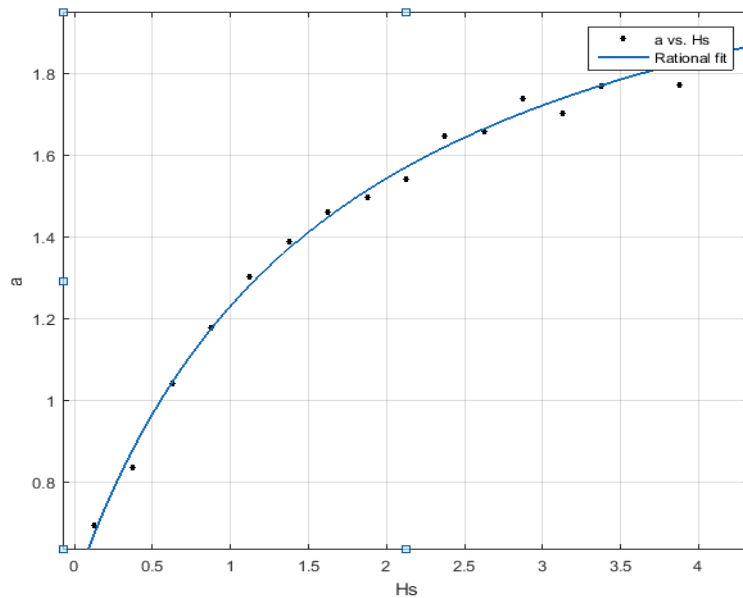
Μετά την εφαρμογή του μοντέλου δεσμευμένης πιθανότητας, με κατανομή Weibull για το χαρακτηριστικό ύψος  $H_s$  και λογαριθμοκανονική για την  $T_m|H_s$ , δίνει χαμηλότερες τιμές για το μέγιστο ύψος κύματος στις περιπτώσεις των ανεμολογικών δεδομένων σε σχέση με τη λογαριθμοκανονική για το  $H_s$  και την  $T_m|H_s$ , ενώ για τις πραγματικές μετρήσεις οι διαφορές που δίνουν οι δύο κατανομές είναι μικρές. Οπτικά λοιπόν είναι εμφανές ότι για την πολύ μικρή πυκνότητα  $0.005m^{-1}s^{-1}$  που σε αυτήν αντιστοιχεί το μέγιστο ύψος και περίοδος, είναι καταλληλότερη η προσαρμογή της λογαριθμικής κατανομής και στα δυο μεγέθη. Τα μέγιστα ύψη που αντιστοιχούν στην πυκνότητα αυτή είναι πάνω από 4 m και σε κοντινές τιμές μεταξύ τους (και για τα ανεμολογικά και για τις μετρήσεις πεδίου), κάτι που είναι θετικό καθώς αποδεικνύει ότι η μεθοδολογία της παρούσας διπλωματικής για την παραγωγή των πιθανοτικών εικόνων που βασίζεται σε συχνότητες των ανεμολογικών δεδομένων δεν οδηγεί σε υποεκτίμηση του μέγιστου ύψους κύματος, που είναι και το βασικό για το σχεδιασμό. Παρ'όλα αυτά καταλληλότερη για τη σύγκριση μεταξύ των ανεμολογικών δεδομένων και των πραγματικών μετρήσεων με βάση το μεταξύ τους σφάλμα προέκυψε η κατανομή Weibull για το  $H_s$  και λογαριθμοκανονική για την  $T_m|H_s$  για τα συνδυασμένα ανεμολογικά Αλεξανδρούπολης-Καβάλας-Λήμνου. Αυτό συμβαίνει διότι κατά τον υπολογισμό της ευκλείδειου απόστασης λαμβάνονται υπόψη όλες οι πυκνότητες για όλα τα ζεύγη  $H_s, T_m$  χωρίς να υπάρχει διάκριση των ακραίων τιμών, δηλαδή είναι ένα καθαρά αριθμητικό μέτρο σύγκρισης.

Σε αυτό που καταλήγουμε είναι πως η παραγωγή πιθανοτικών εικόνων με βάση τα ανεμολογικά δεδομένα, σε γενικές γραμμές παρουσιάζει κάποια πλεονεκτήματα σε σχέση με την παραγωγή των πιθανοτικών εικόνων με βάση τις μετρήσεις πεδίου. Πρώτον η μελέτη αφορά καθαρά και μόνο ανεμογενείς κυματισμούς καθώς βασίζεται σε μοντέλο πρόγνωσης κυματισμών, δεύτερον είτε χωρίς εφαρμογή κάποιου θεωρητικού μοντέλου, είτε με εφαρμογή θεωρητικού μοντέλου με κατάλληλες κατανομές, βλέπουμε ότι δεν οδηγεί σε υποεκτίμηση του μέγιστου χαρακτηριστικού ύψους (που είναι και το κρίσιμο), αντίθετως για πιο μεσαίες τιμές του ύψους και της περιόδου που είναι και αυτές σημαντικές για το έργο, δίνει μεγαλύτερες τιμές πιθανότητας εμφάνισης. Και τέλος παρέχει τη δυνατότητα να λάβουμε υπόψη και το φαινόμενο της διάθλασης κατά τη διάδοση των κυματισμών εντός της παράκτιας ζώνης, καθώς είναι γνωστή η διεύθυνση τους, αντίθετα με τις μετρήσεις πεδίου, όπου λαμβάνεται μόνο το φαινόμενο της ρήχωσης διότι τα όργανα δεν έχουν τη δυνατότητα να μετρήσουν την αρχική γωνία πρόσπτωσης των κυματισμών.

### 4.3 Αποτελέσματα μετά την εφαρμογή του μοντέλου δεσμευμένης πιθανότητας με συσχετισμένες παραμέτρους της λογαριθμοκανονικής κατανομής ως προς το χαρακτηριστικό ύψος κύματος για τα βαθειά ύδατα

Όπως αναφέρθηκε και στην τελευταία υποενότητα του τρίτου κεφαλαίου έγινε μια προσπάθεια συσχέτισης των μεταβλητών της λογαριθμοκανονικής κατανομής που προσαρμόζεται στη δεσμευμένη μέση περίοδο  $T_m|H_s$ , με το χαρακτηριστικό ύψος  $H_s$ , έτσι ώστε η λογαριθμοκανονική κατανομή να μπορεί να προσαρμοσθεί στη μέση περίοδο δεσμευμένη ως προς οποιαδήποτε τιμή του ύψους κύματος, και όχι μόνο ως προς τις κεντρικές τιμές του. Οι συναρτήσεις που χρησιμοποιήθηκαν για την έκφραση αυτής της εξάρτησης επιλέχθηκαν έπειτα από αρκετές δοκιμές με χρήση του λογισμικού Matlab. Βασικός γνώμονας της επιλογής αυτής ήταν η καμπύλη της επιλεγμένης συνάρτησης να προσαρμόζεται όσο καλύτερα γίνεται στις αρχικές τιμές των παραμέτρων όπως αυτές υπολογίζονται από τις εξισώσεις 2.64, 2.65, και επίσης η συνάρτηση να έχει όσο το δυνατό πιο απλοποιημένη μορφή προς ευκολία του χρήστη. Παρακάτω παρουσιάζονται τα γραφήματα με τις καμπύλες των συναρτήσεων συσχέτισης, ο μαθηματικός τύπος τους, καθώς και η τετραγωνική απόκλιση (R-square) που δηλώνει πόσο καλά προσαρμόζεται η συνάρτηση στις αρχικές τιμές των παραμέτρων. Μέγιστη τιμή της τετραγωνικής απόκλισης που δηλώνει 'άριστη' προσαρμογή είναι η μονάδα

## Παράμετρος α



**Εικόνα 4.6** Συσχέτιση της παραμέτρου  $\alpha$  της λογαριθμοκανονικής κατανομής με το χαρακτηριστικό ύψος κύματος με τη βοήθεια της κλασματικής συνάρτησης, για τα βαθειά ύδατα

$$f(H_s) = (p_1 * H_s + p_2) / (H_s + q_1)$$

$$p_1 = 2.377$$

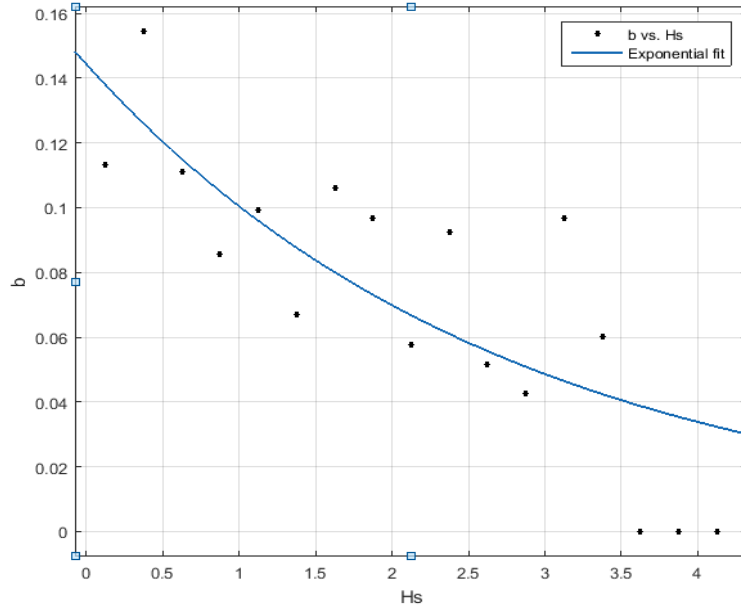
$$p_2 = 0.905$$

$$q_1 = 1.668$$

$$R\text{-square: } 0.9937$$



## Παράμετρος b



**Εικόνα 4.7** Συσχέτιση της παραμέτρου  $\beta$  της λογαριθμοκανονικής κατανομής με το χαρακτηριστικό ύψος κύματος με τη βοήθεια της εκθετικής συνάρτησης για τα βαθειά ύδατα

$$f(H_s) = a * \exp(b * H_s)$$

$$a = 0.1442$$

$$b = -0.3625$$

$$R\text{-square: } 0.636$$

$$\text{Adjusted R-square: } 0.6117$$

Όπως φαίνεται από τα παραπάνω διαγράμματα η κλασματική συνάρτηση (rational function), αποτελεί πολύ καλή επιλογή και αυτό κρίνεται τόσο από το γράφημα όπου οι αρχικές τιμές της παραμέτρου είτε συμπίπτουν με την καμπύλη είτε απέχουν ελάχιστα, όσο και από την τετραγωνική απόκλιση που είναι 0.9937, και σχεδόν συμπίπτει με τη μονάδα. Σχετικά με την παράμετρο  $\beta$ , η εκθετική συνάρτηση που επιλέχθηκε για τη συσχέτιση της παραμέτρου με το χαρακτηριστικό ύψος, δεν έχει τόσο ικανοποιητική προσέγγιση και η τετραγωνική απόκλιση είναι αρκετά μικρότερη της μονάδας ( 0.636). Αυτό οφείλεται κυρίως στο ότι οι αρχικές τιμές της παραμέτρου  $\beta$  είναι αρκετά διάσπαρτες και για να επιτευχθεί μια καλή προσαρμογή σε αυτές θα έπρεπε να επιλεχθεί κάποια συνάρτηση με αρκετά πιο πολύπλοκη μορφή, όπως η Gaussian function που υπάρχει στο λογισμικό Matlab, κάτι ωστόσο που δεν ήταν επιθυμητό.

Για την αξιολόγηση του μοντέλου δεσμευμένης πιθανότητας με τον συγκεκριμένο τρόπο επιλέχθηκε η εφαρμογή του μοντέλου στον πίνακα των από κοινού συχνοτήτων που βασίστηκε στα ανεμολογικά δεδομένα Λήμνου-Αλεξανδρούπολης-Καβάλας. Ο λόγος που επιλέχθηκε ο συγκεκριμένος πίνακας είναι ότι τα αποτελέσματα του μετά της εφαρμογή του θεωρητικού μοντέλου με τον κλασικό τρόπο, (όπου δηλαδή οι παράμετροι της λογαριθμοκανονικής κατανομής υπολογίστηκαν από τις εξισώσεις 2.66, 2.67) είχαν τη μικρότερη ευκλείδειο απόσταση από τα αποτελέσματα της εφαρμογής του μοντέλου στον πίνακα μετρήσεων πεδίου (πίνακας 4.10) και για τις δυο περιθώριες κατανομές του  $H_s$ .

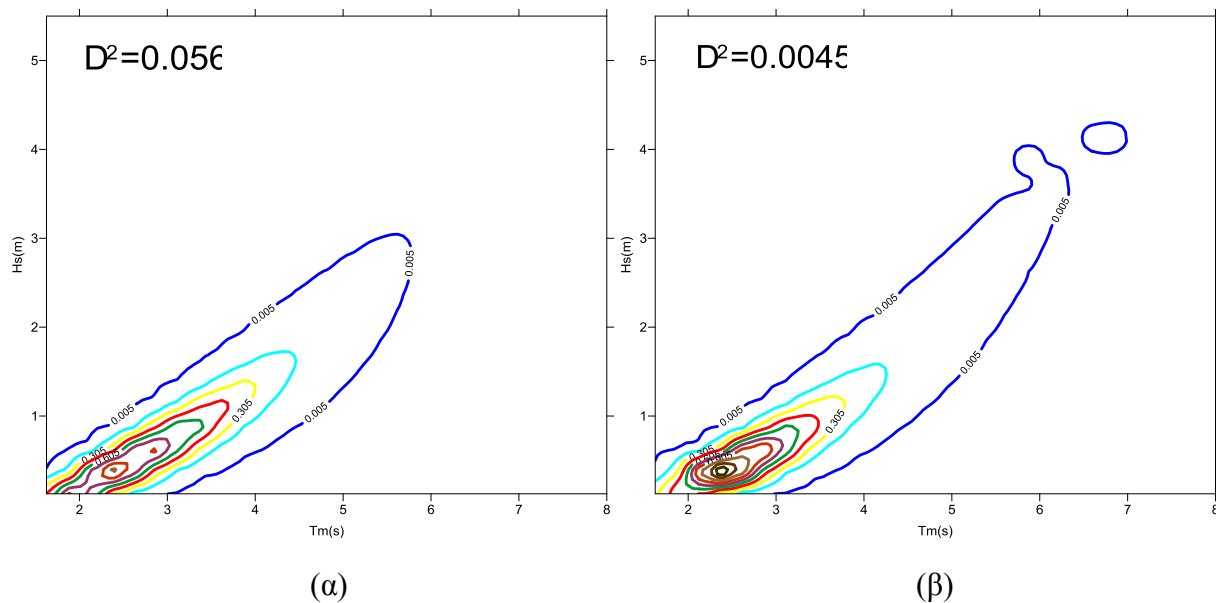
Παρακάτω παρουσιάζονται οι πίνακες με τα αποτελέσματα των από κοινού πυκνοτήτων των  $H_s$  και  $T_m$ , ύστερα από την εφαρμογή του μοντέλου δεσμευμένης πιθανότητας με υπολογισμένες τις παραμέτρους  $\alpha$ ,  $\beta$  της λογαριθμοκανονικής κατανομής και στη συνέχεια η διαγραμματική απεικόνιση τους.

**Πίνακας 4.11** Μακροχρόνια από κοινού πυκνότητα πιθανότητας του χαρακτηριστικού ύψους κύματος  $H_s$  και της μέσης περιόδου  $T_m$  με εφαρμογή του μοντέλου δεσμευμένης πιθανότητας στον πίνακα κλάσεων σταθερού πλάτους που κατασκευάστηκε βάσιμνος στα ανεμολογικά δεδομένα της Λήμνου-Αλεξανδρούπολης-Καβάλας, θεωρώντας κατανομή Weibull για το  $H_s$  (περιθώρια) και λογαριθμική κατανομή για την  $T_m|H_s$  και συσχετίζοντας τις παραμέτρους  $\alpha, \beta$  της λογαριθμοκανονικής κατανομής με το χαρακτηριστικό ύψος  $H_s$  στα βαθιά ύδατα

Κλάσεις περιόδου $T_m$	Κεντρικές Τιμές	Κλάσεις Ύψους κύματος $H_s$																	Total
		0-0.25	0.25-0.5	0.5-0.75	0.75-1	1-1.25	1.25-1.5	1.5-1.75	1.75-2	2-2.25	2.25-2.5	2.5-2.75	2.75-3	3-3.25	3.25-3.5	3.5-3.75	3.75-4	4-4.25	
		0.125	0.375	0.625	0.875	1.125	1.375	1.625	1.875	2.125	2.375	2.625	2.875	3.125	3.375	3.625	3.875	4.125	
1.5 - 1.75	1.625	0.457478	0.01279	1.38E-05	6.96E-10	1.26E-15	4.94E-23	2.06E-32	3.61E-44	8.47E-59	6.43E-77	2.79E-99	8.41E-127	1.35E-160	5.16E-202	0	0	0	0.470282
1.75 - 2	1.875	0.93173	0.203551	0.002293	1.80E-06	8.57E-11	1.69E-16	7.92E-24	4.21E-33	1.00E-44	3.34E-59	3.79E-77	2.57E-99	1.26E-126	3.45E-160	0	0	0	1.137575
2 - 2.25	2.125	0.717107	0.793664	0.056373	0.000381	2.33E-07	9.83E-12	1.86E-17	8.69E-25	4.71E-34	1.14E-45	3.84E-60	4.26E-78	2.71E-100	1.18E-127	0	0	0	1.567526
2.25 - 2.5	2.375	0.284396	1.159952	0.358923	0.013453	6.27E-05	3.04E-08	1.09E-12	1.81E-18	7.50E-26	3.53E-35	7.16E-47	1.90E-61	1.54E-79	6.43E-102	0	0	0	1.816786
2.5 - 2.75	2.625	0.070908	0.837299	0.852992	0.12742	0.003059	1.06E-05	4.09E-09	1.22E-13	1.68E-19	5.63E-27	2.06E-36	3.06E-48	5.44E-63	2.61E-81	0	0	0	1.891689
2.75 - 3	2.875	0.012696	0.359747	0.970767	0.447179	0.0407	0.000697	1.87E-06	5.83E-10	1.41E-14	1.56E-20	4.03E-28	1.07E-37	1.06E-49	1.13E-64	0	0	0	1.831787
3 - 3.25	3.125	0.00179	0.104827	0.630601	0.731016	0.197993	0.012546	0.000164	3.53E-07	8.99E-11	1.76E-15	1.53E-21	2.99E-29	5.58E-39	3.51E-51	0	0	0	1.678937
3.25 - 3.5	3.375	0.000212	0.022754	0.265512	0.657525	0.435998	0.080937	0.003899	4.11E-05	7.31E-08	1.55E-11	2.49E-16	1.71E-22	2.50E-30	3.24E-40	0	0	0	1.466879
3.5 - 3.75	3.625	2.21E-05	0.003942	0.079621	0.368398	0.509838	0.228968	0.032256	0.001262	1.12E-05	1.71E-08	3.09E-12	4.15E-17	2.32E-23	2.59E-31	0	0	0	1.224318
3.75 - 4	3.875	2.11E-06	0.000574	0.01826	0.141273	0.357556	0.331548	0.112847	0.01301	0.000437	3.42E-06	4.63E-09	7.42E-13	8.68E-18	4.07E-24	0	0	0	0.975508
4 - 4.25	4.125	1.88E-07	7.31E-05	0.003383	0.039879	0.165266	0.277113	0.194229	0.054415	0.005461	0.000165	1.19E-06	1.51E-09	2.24E-13	2.41E-18	0	0	0	0.739986
4.25 - 4.5	4.375	1.60E-08	8.38E-06	0.000528	0.008773	0.054222	0.146986	0.185365	0.107207	0.026418	0.00244	7.02E-05	4.92E-07	6.10E-10	8.97E-14	0	0	0	0.532018
4.5 - 4.75	4.625	1.32E-09	8.87E-07	7.19E-05	0.001573	0.013396	0.053369	0.107945	0.112159	0.057355	0.013171	0.00118	3.40E-05	2.45E-07	3.18E-10	0	0	0	0.360256
4.75 - 5	4.875	1.07E-10	8.83E-08	8.76E-06	0.000239	0.002614	0.014101	0.041448	0.06867	0.063072	0.030233	0.006825	0.000626	1.91E-05	1.51E-07	0	0	0	0.227856
5 - 5.25	5.125	8.60E-12	8.39E-09	9.77E-07	3.15E-05	0.000419	0.00285	0.01118	0.026645	0.038798	0.03337	0.015795	0.00369	0.000366	1.26E-05	0	0	0	0.133157
5.25 - 5.5	5.375	6.89E-13	7.70E-10	1.01E-07	3.71E-06	5.68E-05	0.000459	0.002232	0.006998	0.014493	0.019609	0.016592	0.008137	0.00207	0.000235	0	0	0	0.070885
5.5 - 5.75	5.625	5.54E-14	6.89E-11	9.95E-09	3.97E-07	6.71E-06	6.10E-05	0.000345	0.001314	0.003521	0.00668	0.008788	0.007637	0.004058	0.001181	0	0	0	0.033593
5.75 - 6	5.875	4.49E-15	6.07E-12	9.32E-10	3.94E-08	7.05E-07	6.88E-06	4.27E-05	0.000185	0.000589	0.001417	0.002564	0.003403	0.003153	0.001891	0	0.00079	0	0.014043
6 - 6.25	6.125	3.68E-16	5.28E-13	8.43E-11	3.66E-09	6.70E-08	6.74E-07	4.37E-06	2.02E-05	7.14E-05	0.000199	0.000444	0.00079	0.001088	0.001108	0.001966	0	0	0.005692
6.25 - 6.5	6.375	3.06E-17	4.57E-14	7.42E-12	3.22E-10	5.87E-09	5.86E-08	3.79E-07	1.78E-06	6.52E-06	1.95E-05	4.88E-05	0.000103	0.000184	0.000268	0	0	0	0.000632
6.5 - 6.75	6.625	2.58E-18	3.96E-15	6.39E-13	2.72E-11	4.79E-10	4.59E-09	2.86E-08	1.30E-07	4.65E-07	1.39E-06	3.58E-06	8.16E-06	1.65E-05	2.95E-05	0	0	0.000307	0.000366
Total		2.476341	3.499182	3.239348	2.537145	1.781187	1.149654	0.691961	0.391926	0.210234	0.107309	0.052313	0.024429	0.010954	0.004725	0.001966	0.00079	0.000307	16.17977

**Πίνακας 4.12** Μακροχρόνια από κοινού πυκνότητα πιθανότητας του χαρακτηριστικού ύψους κύματος  $H_s$  και της μέσης περιόδου  $T_m$  με εφαρμογή του μοντέλου δεσμευμένης πιθανότητας στον πίνακα κλάσεων σταθερού πλάτους που κατασκευάστηκε βάσιμνος στα ανεμολογικά δεδομένα της Λήμνου-Αλεξανδούπολης-Καβάλας, θεωρώντας λογαριθμοκανονική κατανομή για το  $H_s$  (περιθώρια) για την  $T_m|H_s$ , και συσχετίζοντας τις παραμέτρους  $\alpha, \beta$  της λογαριθμοκανονικής κατανομής με το χαρακτηριστικό ύψος  $H_s$  στα βαθιά ύδατα.

Κλάσεις περιόδου $T_m$	Κεντρικές Τιμές	Κλάσεις Ύψους κύματος $H_s$																Total	
		0-0.25	0.25-0.5	0.5-0.75	0.75-1	1-1.25	1.25-1.5	1.5-1.75	1.75-2	2-2.25	2.25-2.5	2.5-2.75	2.75-3	3-3.25	3.25-3.5	3.5-3.75	3.75-4		4-4.25
		0.125	0.375	0.625	0.875	1.125	1.375	1.625	1.875	2.125	2.375	2.625	2.875	3.125	3.375	3.625	3.875		4.125
1.5 - 1.75	1.625	0.283405	0.017505	1.52E-05	6.12E-10	9.59E-16	3.58E-23	1.55E-32	3.09E-44	8.86E-59	8.84E-77	5.38E-99	2.41E-126	6.10E-160	3.87E-201	0	0	0	0.300925
1.75 - 2	1.875	0.5772	0.278593	0.002534	1.59E-06	6.52E-11	1.22E-16	5.97E-24	3.60E-33	1.05E-44	4.59E-59	7.29E-77	7.36E-99	5.70E-126	2.59E-159	0	0	0	0.858329
2 - 2.25	2.125	0.444243	1.086258	0.062312	0.000335	1.77E-07	7.11E-12	1.40E-17	7.43E-25	4.92E-34	1.57E-45	7.39E-60	1.22E-77	1.23E-99	8.83E-127	0	0	0	1.593149
2.25 - 2.5	2.375	0.176181	1.587582	0.396736	0.011834	4.77E-05	2.20E-08	8.24E-13	1.55E-18	7.84E-26	4.84E-35	1.38E-46	5.46E-61	6.97E-79	4.83E-101	0	0	0	2.172381
2.5 - 2.75	2.625	0.043927	1.145979	0.942857	0.11209	0.002328	7.66E-06	3.09E-09	1.04E-13	1.75E-19	7.74E-27	3.98E-36	8.79E-48	2.46E-62	1.96E-80	0	0	0	2.247188
2.75 - 3	2.875	0.007865	0.492372	1.073039	0.393377	0.030972	0.000504	1.41E-06	4.98E-10	1.47E-14	2.14E-20	7.76E-28	3.08E-37	4.81E-49	8.46E-64	0	0	0	1.998131
3 - 3.25	3.125	0.001109	0.143473	0.697036	0.643065	0.15067	0.009083	0.000124	3.02E-07	9.40E-11	2.42E-15	2.96E-21	8.57E-29	2.52E-38	2.63E-50	0	0	0	1.64456
3.25 - 3.5	3.375	0.000131	0.031143	0.293484	0.578416	0.331789	0.058599	0.002942	3.51E-05	7.65E-08	2.13E-11	4.79E-16	4.91E-22	1.13E-29	2.43E-39	0	0	0	1.29654
3.5 - 3.75	3.625	1.37E-05	0.005395	0.088009	0.324074	0.387981	0.165774	0.024335	0.001079	1.17E-05	2.35E-08	5.95E-12	1.19E-16	1.05E-22	1.94E-30	0	0	0	0.996673
3.75 - 4	3.875	1.30E-06	0.000786	0.020183	0.124276	0.272096	0.240042	0.085135	0.011122	0.000457	4.69E-06	8.92E-09	2.13E-12	3.92E-17	3.06E-23	0	0	0	0.754103
4 - 4.25	4.125	1.16E-07	1.00E-04	0.003739	0.035081	0.125766	0.200631	0.146533	0.046521	0.005714	0.000227	2.30E-06	4.32E-09	1.01E-12	1.81E-17	0	0	0	0.564314
4.25 - 4.5	4.375	9.90E-09	1.15E-05	0.000584	0.007717	0.041262	0.106419	0.139845	0.091655	0.02764	0.003352	0.000135	1.41E-06	2.76E-09	6.74E-13	0	0	0	0.418622
4.5 - 4.75	4.625	8.18E-10	1.21E-06	7.95E-05	0.001384	0.010194	0.038639	0.081437	0.095889	0.060008	0.018097	0.002273	9.76E-05	1.11E-06	2.39E-09	0	0	0	0.3081
4.75 - 5	4.875	6.63E-11	1.21E-07	9.68E-06	0.00021	0.001989	0.010209	0.031269	0.058709	0.065989	0.041541	0.013144	0.001795	8.65E-05	1.13E-06	0	0	0	0.224953
5 - 5.25	5.125	5.33E-12	1.15E-08	1.08E-06	2.77E-05	0.000319	0.002064	0.008435	0.02278	0.040592	0.045851	0.030421	0.010584	0.001654	9.47E-05	0	0	0	0.162821
5.25 - 5.5	5.375	4.27E-13	1.05E-09	1.12E-07	3.26E-06	4.32E-05	0.000332	0.001684	0.005982	0.015163	0.026944	0.031957	0.023338	0.009354	0.001763	0	0	0	0.116564
5.5 - 5.75	5.625	3.43E-14	9.44E-11	1.10E-08	3.50E-07	5.11E-06	4.42E-05	0.00026	0.001123	0.003684	0.009179	0.016926	0.021905	0.01834	0.00887	0	0	0	0.080338
5.75 - 6	5.875	2.78E-15	8.30E-12	1.03E-09	3.46E-08	5.36E-07	4.98E-06	3.22E-05	0.000158	0.000617	0.001947	0.004939	0.009761	0.014251	0.014204	0	0.018973	0	0.064888
6 - 6.25	6.125	2.28E-16	7.23E-13	9.32E-11	3.22E-09	5.10E-08	4.88E-07	3.29E-06	1.73E-05	7.47E-05	0.000273	0.000856	0.002265	0.004917	0.008322	0.025795	0	0	0.042524
6.25 - 6.5	6.375	1.90E-17	6.26E-14	8.20E-12	2.83E-10	4.46E-09	4.24E-08	2.86E-07	1.52E-06	6.82E-06	2.68E-05	9.40E-05	0.000296	0.00083	0.00201	0	0	0	0.003266
6.5 - 6.75	6.625	1.60E-18	5.41E-15	7.07E-13	2.39E-11	3.64E-10	3.32E-09	2.16E-08	1.11E-07	4.86E-07	1.91E-06	6.90E-06	2.34E-05	7.46E-05	0.000222	0	0	0.014113	0.014443
Total		1.534077	4.789198	3.580618	2.231892	1.355464	0.832354	0.522036	0.335072	0.219956	0.147445	0.100755	0.070067	0.049508	0.035487	0.025795	0.018973	0.014113	15.86281



**Εικόνα 4.8** Καμπύλες ίσης πυκνότητας για τα ζεύγη τιμών  $H_s$ ,  $T_m$  για βαθιά ύδατα που προέκυψαν από τα συνδυασμένα ανεμολογικά των περιοχών Λήμιος-Αλεξανδρούπολη-Καβάλα (α) Καμπύλες ίσης πυκνότητας με εφαρμογή μοντέλου δεσμευμένης πιθανότητας (Conditional model) με λογαριθμική κατανομή για  $T_m/H_s$  και κατανομή Weibull για το  $H_s$  (β) Καμπύλες ίσης πυκνότητας με εφαρμογή μοντέλου δεσμευμένης πιθανότητας (Conditional model) με λογαριθμική κατανομή για  $T_m/H_s$  και  $H_s$ , σχετίζοντας τις παραμέτρους της λογαριθμικής κατανομής με το ύψος χαρακτηριστικό  $H_s$

Παρατηρώντας τις παραπάνω εικόνες, αρχικά διαπιστώνουμε πως όπως και πριν το μοντέλο δεσμευμένης πιθανότητας με χρήση λογαριθμοκανονικής κατανομής για το  $H_s$  και την  $T_m|H_s$  έχει μικρότερο σφάλμα απ' ότι με χρήση της κατανομής Weibull για το  $H_s$  και λογαριθμικής για την  $T_m|H_s$ . Δεύτερον και σημαντικό είναι ότι και για τις δυο περιπτώσεις κατανομών το μοντέλο δεσμευμένης πιθανότητας με συσχέτιση των παραμέτρων της λογαριθμοκανονικής κατανομής με το χαρακτηριστικό ύψος κύματος, έχει μεγαλύτερο σφάλμα σε σχέση με τα αποτελέσματα των εικόνων 4.4 (α) (β). Ειδικότερα για τη λογαριθμοκανονική κατανομή για το  $H_s$  και την  $T_m|H_s$ , το σφάλμα από 0.0019 (εικόνα 4.4(α)) που ήταν πριν, τώρα είναι 0.0045, δηλαδή παραπάνω από το διπλάσιο. Οι διαφορές των σφαλμάτων οφείλονται κυρίως στο στην εκθετική συνάρτηση που συσχετίζει την παράμετρο  $\beta$  με το χαρακτηριστικό ύψος, καθώς όπως προαναφέραμε δεν έχει απόλυτα καλή εφαρμογή. Παρόλα αυτά παρατηρείται ότι οι καμπύλες είναι πιο ομοιόμορφες σε σχέση με εκείνες των εικόνων 4.4 (α),(β), ενώ ως προς το μέγιστο χαρακτηριστικό ύψος παρατηρούμε ότι για τιμή πυκνότητας  $0.005 m^{-1} s^{-1}$  το μέγιστο ύψος της εικόνας 4.8 (α) είναι 3.06 m, περίπου ίδιο δηλαδή με της αντίστοιχης εικόνας 4.4(α) που ήταν 3.01 m ενώ για την εικόνα 4.8 (β) το μέγιστο ύψος είναι 4.3 m, ίδιο δηλαδή με της αντίστοιχης εικόνας 4.4 (β). Όσον αφορά τη μέγιστη μέση περίοδο παρατηρούμε ότι η καμπύλη ίσης

πυκνότητας  $0.005m^{-1} s^{-1}$  στην εικόνα 4.8 (α) είναι μετατοπισμένη ελαφρώς προς τα αριστερά, δηλαδή η μέγιστη μέση περίοδος είναι μικρότερη (5.77 s) απ' ό τι στην εικόνα 4.4 (α) (μοντέλο δεσμευμένης πιθανότητα χωρίς συσχέτιση των παραμέτρων με το ύψος κύματος) όπου η μέγιστη περίοδος είναι 6 s, ενώ τέλος στην εικόνα 4.8 (β). η μέγιστη μέση περίοδος που αντιστοιχεί είναι 7 s, δηλαδή μεγαλύτερη σε σχέση με την εικόνα 4.4 (β) όπου η μέγιστη τιμή ήταν 6.75 s.

Το μοντέλο δεσμευμένης πιθανότητας με συσχέτιση της λογαριθμοκανονικής κατανομής με το ύψος κύματος εφαρμόστηκε και στις υπόλοιπες περιπτώσεις των ανεμολογικών δεδομένων. Ωστόσο λόγω του ότι τα αποτελέσματα ήταν σε γενικές γραμμές παρόμοια και τα συμπεράσματα ήταν ίδια με τα παραπάνω κρίθηκε προτιμότερο να μην παρουσιαστούν.

#### 4.4 Αποτελέσματα για το βάθος $d=7.5$ m έπειτα από την εφαρμογή του μοντέλου δεσμευμένης πιθανότητας

Για το βάθος των 7.5 m ο αρχικός πίνακας των από κοινού συχνοτήτων στον οποίο εφαρμόστηκε το μοντέλο δεσμευμένης πιθανότητας είναι ο πίνακας 3.32 του κεφαλαίου 3. Όπως εξεξηγήθηκε και στο κεφάλαιο 3 για την κατασκευή του χρησιμοποιήθηκαν μόνο οι κυματισμοί οι οποίοι έχουν κατεύθυνση προς το έργο καθώς ένα από τα αντικείμενα της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι και η ενσωμάτωση του φαινομένου της διάθλασης στην παραγωγή των πιθανοτικών εικόνων. Συνεπώς ελήφθησαν υπόψη μόνο οι συχνότητες του Νότιου, Νοτιοανατολικού και του Νοτιοδυτικού ανέμου, όπως αυτές προκύπτουν από τα ανεμολογικά δεδομένα της Λήμνου, που βρίσκεται Νότια του σημείου μελέτης.

Παρακάτω παρατίθεται οι πίνακες με τα αποτελέσματα έπειτα από την εφαρμογή του μοντέλου δεσμευμένης πιθανότητας και ακολουθεί η διαγραμματική απεικόνιση με κατάλληλους σχολιασμούς. Τέλος παρουσιάζονται και τα αποτελέσματα μετά την εφαρμογή του μοντέλου όπου έγινε συσχέτιση των παραμέτρων της λογαριθμοκανονικής κατανομής με το χαρακτηριστικό ύψος, η αντίστοιχη διαδικασία που έγινε δηλαδή και για τα βαθιά ύδατα.

Να σημειωθεί ότι οι καμπύλες των από κοινού κατανομών δεν μπορούν να συγκριθούν με τις καμπύλες στα βαθιά ύδατα, καθώς αναφέρονται σε διαφορετικό δειγματικό χώρο, αφού στην περίπτωση των βαθέων υδάτων ο συνολικός αριθμός κυματισμών είναι 1000, ενώ στην προκειμένη περίπτωση είναι 255. Ουσιαστικά σύμφωνα με την μεθοδολογία που εφαρμόστηκε ώστε να ληφθεί υπόψη και το φαινόμενο της διάθλασης, το σύνολο των κυματισμών στο βάθος των 7,5 m αποτελεί ένα υποσύνολο του δειγματικού χώρου των βαθέων υδάτων. Επίσης δεν μπορεί να πραγματοποιηθεί σύγκριση ούτε με τα αποτελέσματα που βασίζονται στα δεδομένα πραγματικών μετρήσεων καθώς για τη διόδευση τους στα ενδιάμεσα ύδατα λαμβάνεται υπόψη

μόνο το φαινόμενο της ρήγωσης καθώς δεν είναι γνωστή η διεύθυνση των κυματισμών που μετρούνται.

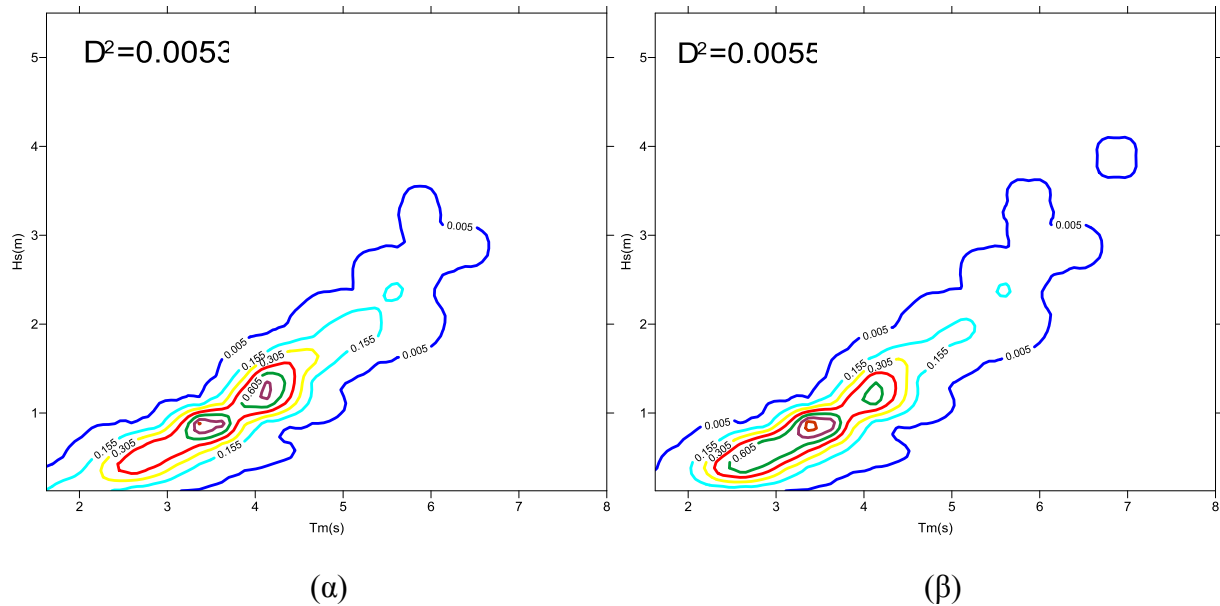
**Πίνακας 4.13** Μακροχρόνια από κοινού πυκνότητα πιθανότητας του χαρακτηριστικού ύψους κύματος  $H_s$  και της μέσης περιόδου  $T_m$  με εφαρμογή του μοντέλου δεσμευμένης πιθανότητας θεωρώντας κατανομή Weibull για το  $H_s$  (περιθώρια) και λογαριθμική κατανομή για την  $T_m | H_s$ , στο βάθος  $d = 7.5m$

Κλάσεις περιόδου $T_m$	Κεντρικές Τιμές	Κλάσεις Ύψους κύματος $H_s$															Total	
		0 - 0.25	0.25 - 0.5	0.5 - 0.75	0.75 - 1	1 - 1.25	1.25 - 1.5	1.5 - 1.75	1.75 - 2	2 - 2.25	2.25 - 2.5	2.5 - 2.75	2.75 - 3	3 - 3.25	3.25 - 3.5	3.5 - 3.75		3.75 - 4
		0.125	0.375	0.625	0.875	1.125	1.375	1.625	1.875	2.125	2.375	2.625	2.875	3.125	3.375	3.625		3.875
1.5 - 1.75	1.625	0.161666	0.001739	7.49E-05	1.21E-22	8.47E-36	1.16E-61	1.35E-48	6.09E-61	1.66E-79	0	1.39E-212	0	0	0	0	0	0.16348
1.75 - 2	1.875	0.29181	0.035334	0.003235	4.10E-15	1.09E-25	1.26E-44	3.84E-36	8.14E-47	1.51E-61	0	1.01E-166	0	0	0	0	0	0.330379
2 - 2.25	2.125	0.257274	0.201437	0.037947	8.02E-10	2.93E-18	5.17E-32	8.49E-27	5.06E-36	9.20E-48	2.22E-290	3.27E-131	3.3386605	0	0	0	0	0.496658
2.25 - 2.5	2.375	0.139085	0.469964	0.176468	3.92E-06	9.26E-13	1.34E-22	1.05E-19	1.18E-27	5.11E-37	3.89E-227	2.89E-103	1.69E-255	0	0	0	0	0.785521
2.5 - 2.75	2.625	0.053355	0.573768	0.416711	0.001253	1.06E-08	1.44E-15	2.66E-14	4.13E-21	1.46E-28	6.78E-177	5.07E-81	1.03E-205	0	0	0	0	1.045087
2.75 - 3	2.875	0.016014	0.433176	0.591702	0.05064	9.73E-06	2.30E-10	3.44E-10	5.70E-16	7.21E-22	1.05E-136	3.47E-63	3.53E-165	0	0	0	0	1.091542
3 - 3.25	3.125	0.004024	0.227392	0.569264	0.413851	0.001235	1.38E-06	4.32E-07	6.17E-12	1.44E-16	1.88E-104	7.80E-49	5.71E-132	0	0	0	0	1.215767
3.25 - 3.5	3.375	0.000888	0.09033	0.404668	0.962438	0.03274	0.000612	8.42E-05	8.71E-09	2.22E-12	1.43E-78	2.79E-37	1.15E-104	0	0	0	0	1.491761
3.5 - 3.75	3.625	0.000178	0.028906	0.226681	0.82217	0.246284	0.033107	0.003649	2.35E-06	4.23E-09	6.95E-58	5.23E-28	3.40E-82	0	0	0	0	1.360978
3.75 - 4	3.875	3.34E-05	0.007811	0.105059	0.31336	0.664443	0.323167	0.046245	0.000162	1.45E-06	1.76E-41	1.28E-20	1.01E-63	0	0	0	0	1.460282
4 - 4.25	4.125	5.95E-06	0.001847	0.041827	0.061944	0.771467	0.769363	0.211998	0.003624	0.000118	1.19E-28	8.46E-15	1.35E-48	0	0	0	0	1.862195
4.25 - 4.5	4.375	1.02E-06	0.000393	0.014731	0.007148	0.445161	0.567119	0.41618	0.031344	0.002916	7.98E-19	2.66E-10	2.68E-36	0	0	0	0	1.484992
4.5 - 4.75	4.625	1.72E-07	7.71E-05	0.004697	0.000529	0.14323	0.156675	0.400567	0.121651	0.025997	1.50E-11	6.29E-07	2.08E-26	0	0	0	0	0.853422
4.75 - 5	4.875	2.84E-08	1.41E-05	0.001381	2.71E-05	0.028202	0.018934	0.210941	0.238738	0.097473	1.88E-06	0.000164	1.38E-18	0	0	0	0	0.595875
5 - 5.25	5.125	4.67E-09	2.46E-06	0.00038	1.02E-06	0.003667	0.001136	0.066492	0.261301	0.173867	0.003145	0.006369	1.51E-12	0	0	0	0	0.51636
5.25 - 5.5	5.375	7.64E-10	4.12E-07	9.92E-05	2.97E-08	0.000335	3.75E-05	0.013513	0.173003	0.16343	0.126457	0.047889	4.63E-08	0	0	0	0	0.524763
5.5 - 5.75	5.625	1.25E-10	6.68E-08	2.48E-05	6.99E-10	2.27E-05	7.45E-07	0.001884	0.074154	0.088179	0.199226	0.086269	6.33E-05	0	0	0	0	0.449823
5.75 - 6	5.875	2.06E-11	1.06E-08	5.97E-06	1.37E-11	1.19E-06	9.56E-09	0.00019	0.021787	0.02935	0.01858	0.044632	0.005643	0.049993	0.023328	0	0	0.19351
6 - 6.25	6.125	3.42E-12	1.65E-09	1.40E-06	2.32E-13	4.99E-08	8.42E-11	1.44E-05	0.004605	0.006406	0.000146	0.007735	0.045401	0	0	0	0	0.064308
6.25 - 6.5	6.375	5.72E-13	2.53E-10	3.20E-07	3.45E-15	1.73E-09	5.36E-13	8.59E-07	0.00073	0.000966	1.29E-07	0.000512	0.043621	0	0	0	0	0.04583
6.5 - 6.75	6.625	9.68E-14	3.85E-11	7.21E-08	4.62E-17	5.12E-11	2.59E-15	4.14E-08	8.98E-05	0.000105	1.68E-11	1.45E-05	0.006366	0	0	0	0	0.006576
6.75 - 7	6.875	1.66E-14	5.84E-12	1.60E-08	5.66E-19	1.32E-12	9.78E-18	1.66E-09	8.86E-06	8.61E-06	4.01E-16	1.94E-07	0.000174	0	0	0	0.004316	0.004507
Total		0.924336	2.072191	2.594958	2.633366	2.336796	1.870152	1.371756	0.931199	0.588817	0.347555	0.193586	0.101268	0.049993	0.023328	0	0.004316	16.04362



**Πίνακας 4.14** Μακροχρόνια από κοινού πυκνότητα πιθανότητας του χαρακτηριστικού ύψους κύματος  $H_s$  και της μέσης περιόδου  $T_m$  με εφαρμογή του μοντέλου δεσμευμένης πιθανότητας θεωρώντας λογαριθμοκανονική κατανομή για το  $H_s$  (περιθώρια) για την  $T_m|H_s$ , στο βάθος  $d = 7.5m$

Κλάσεις περιόδου $T_m$	Κεντρικές Τιμές	Κλάσεις Ύψους κύματος $H_s$															Total	
		0 - 0.25	0.25 - 0.5	0.5 - 0.75	0.75 - 1	1 - 1.25	1.25 - 1.5	1.5 - 1.75	1.75 - 2	2 - 2.25	2.25 - 2.5	2.5 - 2.75	2.75 - 3	3 - 3.25	3.25 - 3.5	3.5 - 3.75		3.75 - 4
		0.125	0.375	0.625	0.875	1.125	1.375	1.625	1.875	2.125	2.375	2.625	2.875	3.125	3.375	3.625		3.875
1.5 - 1.75	1.625	0.031146	0.002237	9.84E-05	1.31E-22	7.50E-36	8.92E-62	9.72E-49	4.44E-61	1.32E-79	0	1.65E-212	0	0	0	0	0	0.033481
1.75 - 2	1.875	0.056219	0.045452	0.00425	4.42E-15	9.62E-26	9.73E-45	2.77E-36	5.94E-47	1.20E-61	0	1.21E-166	0	0	0	0	0	0.105922
2 - 2.25	2.125	0.049566	0.259119	0.049862	8.65E-10	2.59E-18	3.98E-32	6.12E-27	3.69E-36	7.33E-48	2.09E-290	3.89E-131	5.4177134	0	0	0	0	0.358547
2.25 - 2.5	2.375	0.026796	0.604539	0.231877	4.23E-06	8.20E-13	1.04E-22	7.55E-20	8.59E-28	4.07E-37	3.65E-227	3.44E-103	2.74E-255	0	0	0	0	0.863216
2.5 - 2.75	2.625	0.010279	0.738068	0.547553	0.00135	9.42E-09	1.11E-15	1.92E-14	3.01E-21	1.17E-28	6.36E-177	6.05E-81	1.67E-205	0	0	0	0	1.297251
2.75 - 3	2.875	0.003085	0.557217	0.777489	0.054582	8.61E-06	1.77E-10	2.48E-10	4.16E-16	5.74E-22	9.84E-137	4.13E-63	5.73E-165	0	0	0	0	1.392382
3 - 3.25	3.125	0.000775	0.292506	0.748005	0.446067	0.001093	1.06E-06	3.11E-07	4.50E-12	1.15E-16	1.76E-104	9.30E-49	9.27E-132	0	0	0	0	1.488448
3.25 - 3.5	3.375	0.000171	0.116196	0.531729	1.037357	0.028991	0.000471	6.07E-05	6.35E-09	1.77E-12	1.34E-78	3.33E-37	1.86E-104	0	0	0	0	1.714976
3.5 - 3.75	3.625	3.43E-05	0.037183	0.297856	0.88617	0.218081	0.025497	0.00263	1.71E-06	3.37E-09	6.53E-58	6.23E-28	5.52E-82	0	0	0	0	1.467455
3.75 - 4	3.875	6.43E-06	0.010047	0.138046	0.337753	0.588357	0.248888	0.033335	0.000118	1.15E-06	1.65E-41	1.53E-20	1.64E-63	0	0	0	0	1.356552
4 - 4.25	4.125	1.15E-06	0.002376	0.05496	0.066766	0.683126	0.592526	0.152818	0.002642	9.43E-05	1.12E-28	1.01E-14	2.19E-48	0	0	0	0	1.55531
4.25 - 4.5	4.375	1.97E-07	0.000506	0.019356	0.007705	0.394185	0.436767	0.300003	0.022853	0.002323	7.50E-19	3.17E-10	4.35E-36	0	0	0	0	1.183699
4.5 - 4.75	4.625	3.31E-08	9.91E-05	0.006172	0.00057	0.126828	0.120663	0.288748	0.088698	0.020715	1.41E-11	7.50E-07	3.37E-26	0	0	0	0	0.652495
4.75 - 5	4.875	5.48E-09	1.82E-05	0.001815	2.92E-05	0.024972	0.014582	0.152057	0.174069	0.077671	1.77E-06	0.000195	2.24E-18	0	0	0	0	0.44541
5 - 5.25	5.125	8.99E-10	3.17E-06	0.0005	1.10E-06	0.003247	0.000875	0.04793	0.19052	0.138545	0.002954	0.007589	2.44E-12	0	0	0	0	0.392165
5.25 - 5.5	5.375	1.47E-10	5.30E-07	0.00013	3.21E-08	0.000297	2.89E-05	0.009741	0.12614	0.130229	0.118781	0.057061	7.52E-08	0	0	0	0	0.442408
5.5 - 5.75	5.625	2.41E-11	8.59E-08	3.26E-05	7.54E-10	2.01E-05	5.74E-07	0.001358	0.054067	0.070266	0.187133	0.102793	0.000103	0	0	0	0	0.415773
5.75 - 6	5.875	3.97E-12	1.36E-08	7.85E-06	1.48E-11	1.05E-06	7.36E-09	0.000137	0.015885	0.023388	0.017452	0.053181	0.009157	0.118341	0.086102	0	0	0.323651
6 - 6.25	6.125	6.58E-13	2.12E-09	1.84E-06	2.50E-13	4.42E-08	6.48E-11	1.04E-05	0.003358	0.005105	0.000137	0.009216	0.073673	0	0	0	0	0.091501
6.25 - 6.5	6.375	1.10E-13	3.25E-10	4.21E-07	3.72E-15	1.54E-09	4.13E-13	6.19E-07	0.000532	0.00077	1.21E-07	0.00061	0.070784	0	0	0	0	0.072697
6.5 - 6.75	6.625	1.86E-14	4.95E-11	9.47E-08	4.98E-17	4.54E-11	1.99E-15	2.98E-08	6.55E-05	8.38E-05	1.58E-11	1.73E-05	0.01033	0	0	0	0	0.010497
6.75 - 7	6.875	3.19E-15	7.51E-12	2.10E-08	6.10E-19	1.17E-12	7.54E-18	1.19E-09	6.46E-06	6.86E-06	3.76E-16	2.31E-07	0.000282	0	0	0	0.046928	0.047223
Total		0.17808	2.665568	3.409743	2.838354	2.069208	1.440299	0.988829	0.678958	0.469197	0.32646	0.230663	0.16433	0.118341	0.086102	0	0.046928	15.71106



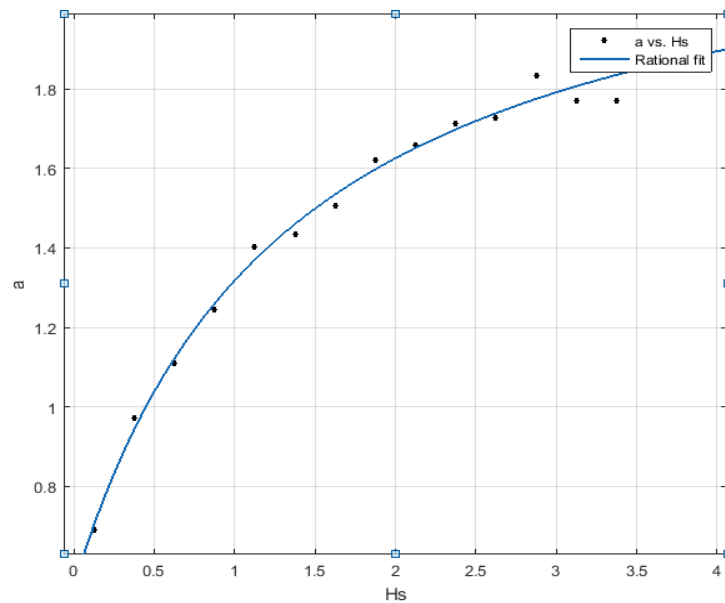
**Εικόνα 4.9** Από κοινού κατανομή πυκνότητας πιθανότητας των  $H_s$ ,  $T_m$  για το βάθος  $d = 7.5$  m (α) Καμπύλες ίσης πυκνότητας με εφαρμογή μοντέλου δεσμευμένης πιθανότητας (Conditional model) με λογαριθμική κατανομή για  $T_m/H_s$  και κατανομή Weibull για το  $H_s$  (β) Καμπύλες ίσης πυκνότητας με εφαρμογή μοντέλου δεσμευμένης πιθανότητας (Conditional model) με λογαριθμική κατανομή για  $T_m/H_s$  και  $H_s$

Από τα σχήματα 4.9 (α) (β) παρατηρείται τα αποτελέσματα των δυο περιπτώσεων του μοντέλου δεσμευμένης πιθανότητας, δηλαδή λογαριθμοκανονικής κατανομής για τα  $H_s$  και  $T_m|H_s$  και για την περίπτωση κατανομής Weibull για το  $H_s$  και λογαριθμοκανονικής για την  $T_m|H_s$ , μοιάζουν πολύ, κάτι που αντικατοπτρίζεται και από το σφάλμα του που είναι σχεδόν ίδιο σφάλμα: 0.0053 και 0.0055 αντίστοιχα. Επίσης παρατηρείται ότι η εφαρμογή του μοντέλου με προσαρμογή της κατανομής Weibull  $H_s$  δεν υποεκτιμά το μέγιστο ύψος κύματος που αντιστοιχεί στην ορισμένη πυκνότητα  $0.005 m^{-1} s^{-1}$ , στον ίδιο βαθμό που το υποεκτιμούσε στις περιπτώσεις των βαθέων υδάτων. Πιο συγκεκριμένα με βάση τα δυο σχήματα για την ελάχιστη πυκνότητα  $0.005 m^{-1} s^{-1}$  στην εικόνα 4.9(α) αντιστοιχεί μέγιστο ύψος 3.56 m, ενώ στην εικόνα 4.9(β) το μέγιστο ύψος είναι 4.1m. Οι μέγιστες περιόδους είναι: 6.7 s και 7.1 s αντίστοιχα. Για τις πιο μικρές πυκνότητες παρατηρείται γενικά ίδια κατανομή στα δύο σχήματα με τα ύψη να κυμαίνονται μεταξύ υψών από 0.17-2.46 m και περιόδων από 2.2-5.7 s με εξαίρεση την πυκνότητα  $0.155 m^{-1} s^{-1}$  όπου στην περίπτωση της κατανομής Weibull για το  $H_s$  και λογαριθμοκανονικής για την  $T_m|H_s$  η καμπύλη 'κόβεται στον άξονα των περιόδων.

Όπως και για τα βαθειά ύδατα έτσι για το βάθος των 7.5 m επιλέχθηκαν η κλασματική και η εκθετική συνάρτηση) για τη συσχέτιση των παραμέτρων  $\alpha, \beta$  αντίστοιχα της

λογαριθμοκανονικής κατανομής με το χαρακτηριστικό ύψος και στη συνέχεια με βάση τις παραμέτρους αυτές εφαρμόστηκε το μοντέλο δεσμευμένης πιθανότητας. Παρακάτω φαίνεται η προσαρμογή των συναρτήσεων στις αρχικές τιμές των παραμέτρων όπως είχαν υπολογιστεί από τις εξισώσεις 2.64, 2.65.

### Παράμετρος $a$



**Εικόνα 4.10** Συσχέτιση της παραμέτρου  $a$  της λογαριθμοκανονικής κατανομής με το χαρακτηριστικό ύψος κύματος με τη βοήθεια της κλασματικής συνάρτησης, για το βάθος  $d = 7.5 \text{ m}$

$$f(Hs) = (p1 * Hs + p2) / (Hs + q1)$$

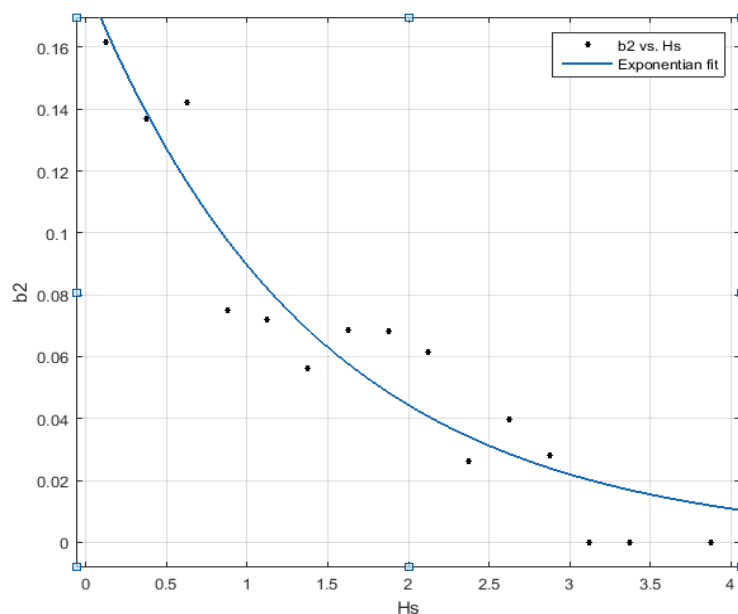
$$p1 = 2.343$$

$$p2 = 0.7307$$

$$q1 = 1.333$$

$$\text{R-square: } 0.991$$

## Παράμετρος b



**Εικόνα 4.11** Συσχέτιση της παραμέτρου  $\beta$  της λογαριθμοκανονικής κατανομής με το χαρακτηριστικό ύψος κύματος με τη βοήθεια της εκθετικής συνάρτησης για το βάθος  $d = 7.5 \text{ m}$

$$f(H_s) = a * \exp(b * H_s)$$

$$a = 0.1805$$

$$b = -0.7014$$

$$R\text{-square: } 0.9067$$

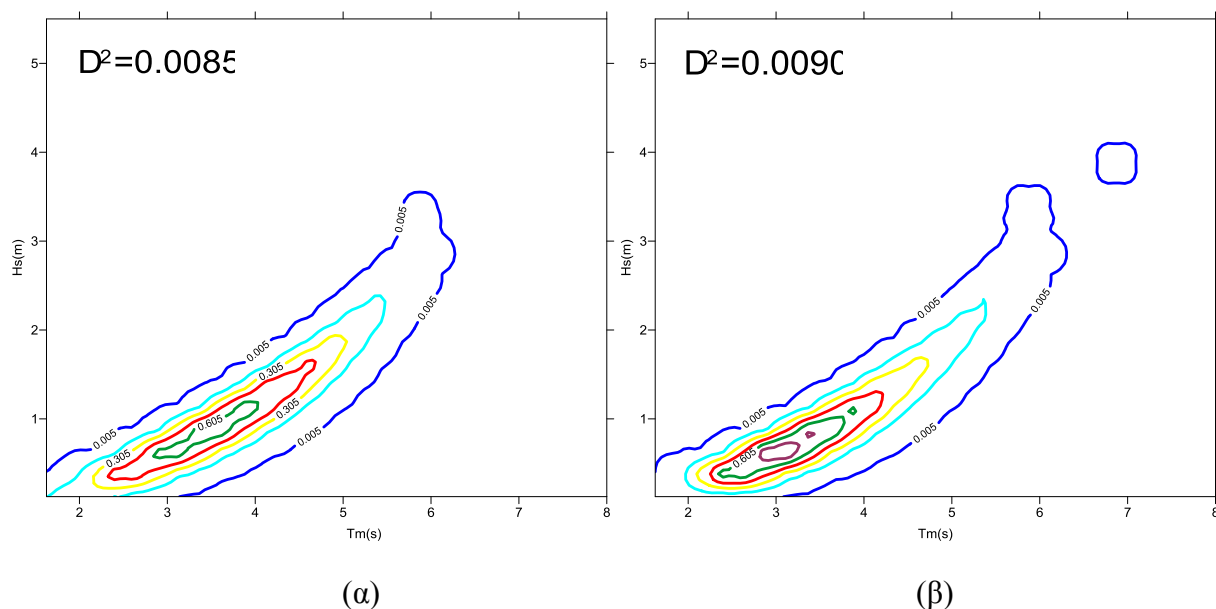
Από τα σχήματα φαίνεται ότι οι συναρτήσεις έχουν πολύ καλή προσαρμογή στις παραμέτρους, με τετραγωνική απόκλιση 0.991 για την κλασματική συνάρτηση που συσχετίζει την παράμετρο  $a$  με το  $H_s$ , και 0.9067 για την εκθετική που χρησιμοποιείται για τη συσχέτιση της παραμέτρου  $\beta$ . Μάλιστα συγκριτικά με τα βαθιά ύδατα η προσαρμογή της εκθετικής συνάρτησης είναι πολύ καλύτερη ( η απόκλιση είναι 0.636, εικόνα 4.7) και αυτό οφείλεται στο ότι οι αρχικές τιμές της παραμέτρου  $\beta$  της λογαριθμοκανονικής κατανομής δεν είναι πολύ διάσπαρτες και έτσι μια πιο απλοποιημένη συνάρτηση μπορεί να έχει καλή προσαρμογή σε αυτές. Παρακάτω παρουσιάζονται οι πίνακες με τα αποτελέσματα των πυκνοτήτων και στη συνέχεια η απεικόνιση τους.

**Πίνακας 4.15** Μακροχρόνια από κοινού πυκνότητα πιθανότητας του χαρακτηριστικού ύψους κύματος  $H_s$  και της μέσης περιόδου  $T_m$  με εφαρμογή του μοντέλου δεσμευμένης πιθανότητας θεωρώντας κατανομή Weibull για το  $H_s$  (περιθώρια) και λογαριθμική κατανομή για την  $T_m/H_s$ , και συσχετίζοντας τις παραμέτρους  $\alpha$ ,  $\beta$  της λογαριθμοκανονικής κατανομής με το χαρακτηριστικό ύψος  $H_s$  στο βάθος  $d = 7.5m$

Κλάσεις περιόδου $T_m$	Κεντρικές Τιμές	Κλάσεις Ύψους κύματος $H_s$																Total
		0-0.25	0.25-0.5	0.5-0.75	0.75-1	1-1.25	1.25-1.5	1.5-1.75	1.75-2	2-2.25	2.25-2.5	2.5-2.75	2.75-3	3-3.25	3.25-3.5	3.5-3.75	3.75-4	
		0.125	0.375	0.625	0.875	1.125	1.375	1.625	1.875	2.125	2.375	2.625	2.875	3.125	3.375	3.625	3.875	
1.5 - 1.75	1.625	0.150452	0.004069	4.64E-07	3.94E-14	9.90E-26	5.14E-44	3.45E-72	5.81E-115	3.15E-179	4.98E-275	0.00E+00	0	0	0	0	0	0.154521
1.75 - 2	1.875	0.278492	0.061758	1.55E-04	1.28E-09	2.78E-18	3.13E-32	4.90E-54	1.72E-87	3.65E-138	3.37E-214	0.00E+00	0.00E+00	0	0	0	0	0.340405
2 - 2.25	2.125	0.258243	0.27868	0.007222	1.93E-06	7.51E-13	1.83E-23	2.40E-40	1.44E-66	1.17E-106	2.95E-167	4.50E-258	0.00E+00	0	0	0	0	0.544146
2.25 - 2.5	2.375	0.149303	0.537155	0.083347	3.28E-04	7.12E-09	7.03E-17	6.81E-30	2.09E-50	4.12E-82	1.91E-130	2.23E-203	1.45887421	0	0	0	0	0.770132
2.5 - 2.75	2.625	0.06194	0.559778	0.345131	0.010956	5.60E-06	6.34E-12	7.27E-22	8.05E-38	8.38E-63	2.89E-101	9.21E-160	6.64E-248	0	0	0	0	0.977811
2.75 - 3	2.875	0.020259	0.370057	0.661488	0.107154	0.000659	3.23E-08	1.06E-15	5.47E-28	1.55E-47	5.52E-78	1.01E-124	1.14E-195	0	0	0	0	1.159618
3 - 3.25	3.125	0.005576	0.1736	0.702492	0.404638	0.017668	1.74E-05	5.38E-11	2.55E-20	1.89E-35	2.34E-59	1.87E-96	2.92E-153	0	0	0	0	1.303992
3.25 - 3.5	3.375	0.001352	0.062656	0.47109	0.722807	0.146864	0.001564	1.86E-07	2.20E-14	6.44E-26	1.82E-44	1.24E-73	9.27E-119	0	0	0	0	1.406334
3.5 - 3.75	3.625	2.99E-04	0.018467	0.219838	0.710787	0.476799	0.033303	7.31E-05	7.45E-10	1.85E-18	1.28E-32	2.98E-55	1.03E-90	0	0	0	0	1.459566
3.75 - 4	3.875	6.18E-05	0.004648	0.076845	0.431905	0.721197	0.218573	0.00484	1.77E-06	1.04E-12	2.80E-23	1.55E-40	5.27E-68	0	0	0	0	1.458073
4 - 4.25	4.125	1.21E-05	0.001034	0.021296	0.17735	0.582927	0.543355	0.073459	0.000463	2.23E-08	4.97E-16	6.98E-29	9.38E-50	0	0	0	0	1.399896
4.25 - 4.5	4.375	2.31E-06	2.09E-04	0.004891	0.052797	0.280526	0.60224	0.325514	0.019089	3.06E-05	1.53E-10	8.33E-20	2.90E-35	0	0	0	0	1.285299
4.5 - 4.75	4.625	4.28E-07	3.91E-05	0.000964	0.012051	0.087628	0.339131	0.511757	0.165158	0.004115	1.53E-06	6.45E-13	5.70E-24	0	0	0	0	1.120846
4.75 - 5	4.875	7.82E-08	6.89E-06	1.68E-04	0.002206	0.019051	0.107848	0.334324	0.379108	0.076221	0.000815	6.71E-08	2.05E-15	0	0	0	0	0.919748
5 - 5.25	5.125	1.41E-08	1.16E-06	2.64E-05	0.000336	0.003052	0.021119	0.103311	0.279732	0.258256	0.034904	0.000171	3.23E-09	0	0	0	0	0.70091
5.25 - 5.5	5.375	2.55E-09	1.88E-07	3.82E-06	4.39E-05	0.000377	0.002735	0.016809	0.077785	0.202297	0.169722	0.01758	4.60E-05	0	0	0	0	0.487399
5.5 - 5.75	5.625	4.60E-10	2.97E-08	5.15E-07	5.04E-06	3.75E-05	0.000249	0.001574	0.009309	0.044554	0.12474	0.110892	0.01084	0	0	0	0	0.302202
5.75 - 6	5.875	8.34E-11	4.60E-09	6.59E-08	5.19E-07	3.09E-06	1.67E-05	9.15E-05	0.000536	0.003253	0.017647	0.061027	0.070696	0.049993	0.023328	0	0	0.226592
6 - 6.25	6.125	1.52E-11	7.02E-10	8.05E-09	4.88E-08	2.17E-07	8.60E-07	3.52E-06	1.63E-05	9.06E-05	0.00059	0.003954	0.019726	0	0	0	0	0.024381
6.25 - 6.5	6.375	2.79E-12	1.06E-10	9.48E-10	4.25E-09	1.33E-08	3.54E-08	9.44E-08	2.85E-07	1.08E-06	5.55E-06	3.90E-05	0.000342	0	0	0	0	0.000388
6.5 - 6.75	6.625	5.18E-13	1.59E-11	1.08E-10	3.47E-10	7.22E-10	1.20E-09	1.85E-09	3.06E-09	6.17E-09	1.71E-08	7.28E-08	5.07E-07	0	0	0	0	6.1E-07
6.75 - 7	6.875	9.73E-14	2.39E-12	1.21E-11	2.69E-11	3.55E-11	3.41E-11	2.76E-11	2.14E-11	1.82E-11	1.96E-11	3.11E-11	8.49E-11	0	0	0	0.004316	0.004316
Total		0.925992	2.07216	2.594958	2.633366	2.336796	1.870152	1.371756	0.931199	0.58882	0.348425	0.193663	0.101651	0.049993	0.023328	0	0.004316	16.04657

**Πίνακας 4.16** Μακροχρόνια από κοινού πυκνότητα πιθανότητας του χαρακτηριστικού ύψους κύματος  $H_s$  και της μέσης περιόδου  $T_m$  με εφαρμογή του μοντέλου δεσμευμένης πιθανότητας θεωρώντας λογαριθμοκανονική κατανομή για το  $H_s$  (περιθώρια) για την  $T_m/H_s$ , και συσχετίζοντας τις παραμέτρους  $\alpha$ ,  $\beta$  της λογαριθμοκανονικής κατανομής με το χαρακτηριστικό ύψος  $H_s$  στο βάθος  $d = 7.5m$

Κλάσεις περιόδου $T_m$	Κεντρικές Τιμές	Κλάσεις Ύψους κύματος $H_s$																Total
		0 - 0.25	0.25 - 0.5	0.5 - 0.75	0.75 - 1	1 - 1.25	1.25 - 1.5	1.5 - 1.75	1.75 - 2	2 - 2.25	2.25 - 2.5	2.5 - 2.75	2.75 - 3	3 - 3.25	3.25 - 3.5	3.5 - 3.75	3.75 - 4	
		0.125	0.375	0.625	0.875	1.125	1.375	1.625	1.875	2.125	2.375	2.625	2.875	3.125	3.375	3.625	3.875	
1.5 - 1.75	1.625	0.028986	0.005235	6.09E-07	4.25E-14	8.76E-26	3.96E-44	2.49E-72	4.24E-115	2.51E-179	4.68E-275	0	0	0	0	0	0	0.034221
1.75 - 2	1.875	0.053654	0.079442	0.000203	1.37E-09	2.47E-18	2.41E-32	3.53E-54	1.26E-87	2.91E-138	3.16E-214	0	0	0	0	0	0	0.133299
2 - 2.25	2.125	0.049752	0.35848	0.00949	2.08E-06	6.65E-13	1.41E-23	1.73E-40	1.05E-66	9.35E-107	2.77E-167	5.36E-258	0	0	0	0	0	0.417724
2.25 - 2.5	2.375	0.028764	0.690971	0.109516	0.000353	6.31E-09	5.41E-17	4.91E-30	1.52E-50	3.28E-82	1.80E-130	2.66E-203	2.36734521	0	0	0	0	0.829604
2.5 - 2.75	2.625	0.011933	0.720072	0.453498	0.011809	4.96E-06	4.88E-12	5.24E-22	5.87E-38	6.68E-63	2.72E-101	1.10E-159	1.08E-247	0	0	0	0	1.197317
2.75 - 3	2.875	0.003903	0.476024	0.869188	0.115495	0.000584	2.49E-08	7.67E-16	3.99E-28	1.24E-47	5.19E-78	1.21E-124	1.85E-195	0	0	0	0	1.465193
3 - 3.25	3.125	0.001074	0.223311	0.923066	0.436136	0.015645	1.34E-05	3.88E-11	1.86E-20	1.50E-35	2.20E-59	2.23E-96	4.74E-153	0	0	0	0	1.599246
3.25 - 3.5	3.375	0.000261	0.080598	0.619006	0.779072	0.130047	0.001204	1.34E-07	1.60E-14	5.14E-26	1.71E-44	1.48E-73	1.50E-118	0	0	0	0	1.610188
3.5 - 3.75	3.625	5.76E-05	0.023755	0.288864	0.766116	0.422201	0.025648	5.27E-05	5.43E-10	1.48E-18	1.21E-32	3.56E-55	1.67E-90	0	0	0	0	1.526695
3.75 - 4	3.875	1.19E-05	0.00598	0.100974	0.465526	0.638612	0.168334	0.003489	1.29E-06	8.32E-13	2.63E-23	1.84E-40	8.55E-68	0	0	0	0	1.382928
4 - 4.25	4.125	2.34E-06	0.00133	0.027983	0.191155	0.516175	0.418466	0.052953	0.000338	1.78E-08	4.67E-16	8.31E-29	1.52E-49	0	0	0	0	1.208401
4.25 - 4.5	4.375	4.45E-07	0.000269	0.006427	0.056907	0.248403	0.463816	0.234646	0.013918	2.44E-05	1.44E-10	9.93E-20	4.71E-35	0	0	0	0	1.024411
4.5 - 4.75	4.625	8.25E-08	5.03E-05	0.001267	0.012989	0.077594	0.261182	0.368899	0.120421	0.003279	1.44E-06	7.68E-13	9.26E-24	0	0	0	0	0.845683
4.75 - 5	4.875	1.51E-08	8.86E-06	0.000221	0.002378	0.01687	0.083059	0.240997	0.276416	0.060736	0.000765	7.99E-08	3.33E-15	0	0	0	0	0.681451
5 - 5.25	5.125	2.73E-09	1.49E-06	3.47E-05	0.000362	0.002702	0.016265	0.074472	0.203959	0.205791	0.032786	0.000204	5.25E-09	0	0	0	0	0.536577
5.25 - 5.5	5.375	4.92E-10	2.42E-07	5.01E-06	4.73E-05	0.000334	0.002107	0.012117	0.056715	0.1612	0.15942	0.020947	7.46E-05	0	0	0	0	0.412967
5.5 - 5.75	5.625	8.87E-11	3.82E-08	6.77E-07	5.43E-06	3.32E-05	0.000191	0.001135	0.006787	0.035503	0.117169	0.132132	0.017591	0	0	0	0	0.310547
5.75 - 6	5.875	1.61E-11	5.91E-09	8.66E-08	5.59E-07	2.73E-06	1.28E-05	6.60E-05	0.000391	0.002592	0.016576	0.072715	0.11472	0.118341	0.086102	0	0	0.41152
6 - 6.25	6.125	2.93E-12	9.03E-10	1.06E-08	5.26E-08	1.92E-07	6.63E-07	2.54E-06	1.19E-05	7.22E-05	0.000554	0.004711	0.032009	0	0	0	0	0.037362
6.25 - 6.5	6.375	5.38E-13	1.36E-10	1.25E-09	4.58E-09	1.17E-08	2.73E-08	6.80E-08	2.08E-07	8.63E-07	5.22E-06	4.64E-05	0.000555	0	0	0	0	0.000608
6.5 - 6.75	6.625	9.99E-14	2.05E-11	1.42E-10	3.74E-10	6.39E-10	9.22E-10	1.33E-09	2.23E-09	4.91E-09	1.61E-08	8.67E-08	8.23E-07	0	0	0	0	9.36E-07
6.75 - 7	6.875	1.87E-14	3.07E-12	1.59E-11	2.89E-11	3.15E-11	2.63E-11	1.99E-11	1.56E-11	1.45E-11	1.85E-11	3.71E-11	1.38E-10	0	0	0	0.046928	0.046928
Total		0.178399	2.665528	3.409743	2.838354	2.069208	1.440299	0.988829	0.678959	0.469199	0.327277	0.230756	0.164951	0.118341	0.086102	0	0.046928	15.71287



**Εικόνα 4.12** Καμπύλες ίσης πυκνότητας για τα ζεύγη τιμών  $H_s$ ,  $T_m$  για το βάθος  $d = 7.5$  m (α) Καμπύλες ίσης πυκνότητας με εφαρμογή μοντέλου δεσμευμένης πιθανότητας (Conditional model) με λογαριθμική κατανομή για  $T_m/H_s$  και κατανομή Weibull για το  $H_s$  (β) Καμπύλες ίσης πυκνότητας με εφαρμογή μοντέλου δεσμευμένης πιθανότητας (Conditional model) με λογαριθμική κατανομή για  $T_m/H_s$  και  $H_s$ , σχετίζοντας τις παραμέτρους της λογαριθμικής κατανομής με το ύψος χαρακτηριστικό  $H_s$

Παρατηρώντας τις εικόνες παραπάνω διαπιστώνουμε πως και σε αυτήν την περίπτωση για το βάθος των 7.5 m το μοντέλο δεσμευμένη πιθανότητας με προσαρμογή της λογαριθμοκανονικής κατανομής στις περιθώριες συχνότητες του χαρακτηριστικού ύψους κύματος έχει μεγαλύτερο σφάλμα απ' ότι η προσαρμογή της κατανομής Weibull, ενώ και για τις δυο περιπτώσεις κατανομών το σφάλμα είναι μεγαλύτερο από τα αντίστοιχα των εικόνων 4.9 (α) (β), όπου το μοντέλο οι παράμετροι  $\alpha$ ,  $\beta$  της λογαριθμοκανονικής κατανομής υπολογίστηκαν με τον κλασικό τρόπο (σχέσεις 2.64, 2.65). Η εικόνα 4.12 (β) δίνει και πάλι μεγαλύτερο μέγιστο ύψος κύματος για την ελάχιστη πυκνότητα πιθανότητας  $0.005 m^{-1} s^{-1}$  κάτι που επαληθεύει άλλη μια φορά το ότι το μοντέλο δεσμευμένης πιθανότητας με λογαριθμοκανονική κατανομή και για το  $H_s$  και για την  $T_m/H_s$  υπερεκτιμά το μέγιστο ύψος κύματος σε σχέση με το μοντέλο με κατανομή Weibull για το χαρακτηριστικό ύψος κύματος. Σε σχέση με τις εικόνες 4.9 (α) (β) τα μέγιστα ύψη είναι σχεδόν ίδια (3.6 και 4.1 m), ενώ σχετικά με τις μέσες περιόδους υπάρχει μια μετατόπιση της καμπύλης προς τα αριστερά, όπως γίνεται και για βαθιά ύδατα όταν εφαρμόζεται το μοντέλο με τη συγκεκριμένη μέθοδο.

Ουσιαστικά και για τα βαθιά ύδατα και για το βάθος των 7.5, η εφαρμογή του μοντέλου δεσμευμένης πιθανότητας όπου οι παράμετροι  $\alpha, \beta$  υπολογίζονται σαν συναρτήσεις του  $H_s$

εξασφαλίζουν μια συνέχεια στην εξάρτηση του χαρακτηριστικού ύψους κύματος και της μέσης περιόδου(όχι μόνο των κεντρικών τιμών δηλαδή), αλλά έχει το μειονέκτημα ότι εμφανίζει μεγαλύτερα σφάλματα, και υποεκτιμά ελαφρώς τις τιμές της μέσης περιόδου.



## ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

### 5.1 Βασικά συμπεράσματα

Στην παρούσα διπλωματική εργασία έγινε μια προσπάθεια εκτίμησης της από κοινού πυκνότητας πιθανότητας του χαρακτηριστικού ύψους ( $H_s$ ) και της μέσης περιόδου ( $T_m$ ) των κυματισμών με βάση τα ανεμολογικά δεδομένα. Τα εν λόγω μεγέθη υπολογίστηκαν από τις εξισώσεις κυματισμού του CEM (Coastal Engineering Manual) και έγινε η παραδοχή ότι ένας κυματισμός που υπολογίζεται με βάση την ταχύτητα και τη διεύθυνση ενός ανέμου (η διεύθυνση εξαρτάται από το ποιο ανάπτυγμα πελάγους θα χρησιμοποιήσουμε στον υπολογισμό, Νότιο, Βόρειο κλπ) έχει συχνότητα εμφάνισης ίδια με αυτή του ανέμου. Με βάση την παραδοχή αυτή κατασκευάστηκαν πίνακες με κλάσεις ίσου πλάτους για το χαρακτηριστικό ύψος ( $H_s$ ) και τη μέση περίοδο ( $T_m$ ) με τις από κοινού συχνότητες εμφάνισης τους. Αντιπροσωπευτική τιμή κάθε κλάσης θεωρήθηκε η κεντρική τιμή της. Τα ανεμολογικά δεδομένα βάσει των οποίων χρησιμοποιήθηκαν οι συχνότητες για την κατασκευή των πινάκων ήταν της Λήμνου, τα συνδυασμένα Λήμνου-Αλεξανδρούπολης, και τα συνδυασμένα Λήμνου-Αλεξανδρούπολης-Καβάλας. Στη συνέχεια στους τρεις αυτούς πίνακες, αλλά και σε πίνακα πραγματικών μετρήσεων για το ίδιο σημείο που χρησιμοποιήθηκε από τον ηλεκτρονικό Άτλαντα Ανέμου και Κύματος της Μεσογείου (Wind and Wave Mediterranean Atlas), εφαρμόστηκε το μοντέλο δεσμευμένης πιθανότητας και έγινε σύγκριση των αποτελεσμάτων που βασίστηκαν στα ανεμολογικά δεδομένα και στις πραγματικές μετρήσεις πεδίου. Στη συνέχεια ο προσδιορισμός των από κοινού κατανομών των μεγεθών  $H_s$  και  $T_m$  πραγματοποιήθηκε και για το βάθος των 7,5 m, όπου για τη διόδευση των κυματισμών στο βάθος αυτό λάβαμε υπόψη το μετασχηματισμό λόγω ρήχωσης και διάθλασης.

Το βασικό συμπέρασμα που προκύπτει από την παρούσα διπλωματική εργασία είναι ότι η εκτίμηση της από κοινού πυκνότητας πιθανότητας του χαρακτηριστικού ύψους και της μέσης περιόδου με βάση τα ανεμολογικά δεδομένα, παρ' ό,τι βασίζεται σε εξισώσεις αριθμητικού μοντέλου για τον υπολογισμό των παραμέτρων αυτών, μπορεί να αποτελέσει μια αξιόπιστη μεθοδολογία για την απεικόνιση του κυματικού κλίματος. Αυτό μπορεί να διαπιστωθεί για τους παρακάτω λόγους.

Πρώτον, και σημαντικό, είναι ότι οι εξισώσεις υπολογισμού των μεγεθών  $H_s$  και  $T_m$  έχουν διαμορφωθεί έτσι ώστε να αφορούν μόνο ανεμογενείς κυματισμούς σε αντίθεση με τις μετρήσεις πεδίου, στις οποίες δεν υπάρχει διαχωρισμός των ανεμογενών κυματισμών και της αποθάλασσας. Για το λόγο αυτό, παρατηρούμε ότι στις εικόνες με τις από κοινού κατανομές στην περίπτωση της προτεινόμενης μεθοδολογίας μας, οι καμπύλες των κατανομών έχουν μια κλίση προς την κύρια διαγώνιο δηλαδή δεν παρατηρούνται μικρές τιμές του ύψους κύματος με μεγάλες περιόδους σε αντίθεση με την εικόνα που βασίζεται στις μετρήσεις, όπου παρατηρούμε

μια κλίση των καμπυλών προς τα δεξιά. Δηλαδή υπάρχει μια τάση μεγάλων περιόδων, παρά την εφαρμογή του κριτηρίου Thompson για το διαχωρισμό των κυματισμών swell.

Δεύτερον, αν εξετάσουμε τη μεθοδολογία της εργασίας από τη σκοπιά της <ασφάλειας>, συμπεραίνουμε ότι για πολύ μικρές πυκνότητες πιθανότητας τα μέγιστα ύψη που προκύπτουν από τα αποτελέσματα για τα ανεμολογικά δεδομένα δεν διαφέρουν από εκείνα των πραγματικών μετρήσεων. Εξαιρέση αποτελεί το μοντέλο δεσμευμένης πιθανότητας με κατανομή Weibull για το  $H_s$  και λογαριθμοκανονική για την  $T_m/H_s$ , όπου η εφαρμογή του στους πίνακες που βασίστηκαν στα ανεμολογικά δεδομένα υποεκτιμούν τη μέγιστη τιμή του  $H_s$ . Για το λόγο αυτό η συγκεκριμένη κατανομή δεν προτείνεται ως κατάλληλη. Σε γενικές γραμμές, όμως, οι πιο μεσαίες πυκνότητες πιθανότητας, έπειτα από την εφαρμογή του μοντέλου δεσμευμένης πιθανότητας στους πίνακες που βασίστηκαν στα ανεμολογικά δεδομένα, αντιστοιχούν σε μεγαλύτερα χαρακτηριστικά ύψη. Αυτό συνάγεται από το γεγονός ότι οι καμπύλες των από κοινού κατανομών των  $H_s$  και  $T_m$  είναι περισσότερο πυκνές μεταξύ τους για μεσαίες τιμές πυκνοτήτων, σε αντίθεση με τις εικόνες που προκύπτουν από την εφαρμογή του μοντέλου στον πίνακα των πραγματικών μετρήσεων, όπου οι καμπύλες στην περίπτωση αυτή είναι περισσότερο αραιές.

Ένα επιπλέον πολύ σημαντικό στοιχείο, το οποίο αφορά στη σύγκριση των αποτελεσμάτων που βασίζονται στα ανεμολογικά δεδομένα και σε πραγματικές μετρήσεις, είναι το γεγονός ότι τα ανεμολογικά δεδομένα αναφέρονται σε μια χρονική περίοδο μετρήσεων περί των 40 ετών, ενώ οι παρατηρήσεις πεδίου αφορούν σε μια χρονική περίοδο παρατηρήσεων, συνολικά 7 ετών. Το ανωτέρω καθιστά περισσότερο αξιόπιστη την μακροχρόνια μελέτη του κυματικού κλίματος, καθώς δίνει μια πιο αντικειμενική εικόνα των επικρατουσών συνθηκών.

Ακόμη, η προτεινόμενη μεθοδολογία παρέχει τη δυνατότητα να ληφθεί υπόψη κατά τη διόδευση των κυματισμών εντός τη παράκτιας ζώνης και ο μετασχηματισμός της διάθλασης, κάτι που αποτέλεσε και πρωτότυπο σημείο της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Αξίζει επίσης να σημειωθεί ότι βασικό πλεονέκτημα της προτεινόμενης μεθοδολογίας είναι και η ευκολία εφαρμογής της, σε σχέση με τη διεξαγωγή πραγματικών μετρήσεων πεδίου σε ένα σημείο του πελάγους. Η τελευταία αποτελεί μια ιδιαίτερα πολύπλοκη και χρονοβόρα διαδικασία και χρειάζονται μετρήσεις αρκετών ετών ώστε να εξαχθούν αξιόπιστα αποτελέσματα.

Όσον αφορά την εφαρμογή του μοντέλου δεσμευμένης πιθανότητας στους πίνακες των από κοινού συχνοτήτων που βασίστηκαν στα ανεμολογικά δεδομένα, προτείνεται τελικά η χρήση της περιθώριας λογαριθμοκανονικής κατανομής για το  $H_s$  και για την  $T_m/H_s$ , καθώς έχει καλύτερη προσαρμογή στα αρχικά δεδομένα απ' ότι η κατανομή Weibull και δίνει μικρότερα σφάλματα ( $D^2$ ). Αντιθέτως, στους πίνακες πραγματικών μετρήσεων πεδίου, προτείνεται η προσαρμογή του μοντέλου δεσμευμένης πιθανότητας με χρήση της περιθώριας κατανομής Weibull για το  $H_s$  καθώς παρουσιάζει ελαφρώς μικρότερο σφάλμα σε σχέση με την λογαριθμοκανονική.

Σχετικά με τα μέγιστα ύψη που αντιστοιχούν σε πολύ μικρές πιθανότητες, τόσο για τους πίνακες που βασίστηκαν στα ανεμολογικά δεδομένα όσο και για τους πίνακες πραγματικών μετρήσεων, το μοντέλο δεσμευμένης πιθανότητας με περιθώρια λογαριθμοκανονική για το  $H_s$  δίνει μεγαλύτερα μέγιστα απ' ότι η κατανομή Weibull. Αυτό μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η κατανομή Weibull που θεωρείται κατανομή ακραίων τιμών είναι ικανοποιητική για τις ακραίες τιμές όταν εφαρμόζεται σε περιθώριες συχνότητες μόνο. Όταν όμως εφαρμόζεται στα πλαίσια του μοντέλου δεσμευμένης πιθανότητας, όπου η περιθώρια πυκνότητα πιθανότητας ενός χαρακτηριστικού ύψους  $H_s$  πολλαπλασιάζεται με την δεσμευμένη (ως προς το συγκεκριμένο  $H_s$ ) πυκνότητα της μέσης περιόδου  $T_m/H_s$ , μπορεί να οδηγήσει σε υποεκτίμηση της ακραίας τιμής. Για το λόγο αυτό η κατανομή Lognormal η οποία υπερεκτιμά τις περιθώριες πυκνότητες των ακραίων  $H_s$  (όπως είδαμε και από τα γραφήματα στο κεφάλαιο 3) προκύπτει ότι είναι καταλληλότερη καθώς δίνει μεγαλύτερες πιθανότητες στα ακραία γεγονότα.

Για τα αβαθή ύδατα, τα σφάλματα για τις δυο περιθώριες κατανομές (Weibull, Lognormal) έχουν σχεδόν την ίδια τιμή (0.0053, 0.0055 αντίστοιχα), ενώ ως προς το μέγιστο ύψος κύματος που αντιστοιχεί σε μια πολύ μικρή ορισμένη πυκνότητα πιθανότητας 0.005, μεγαλύτερο μέγιστο  $H_s$  προκύπτει για την περίπτωση της προσαρμογής της λογαριθμοκανονικής κατανομής στις περιθώριες συχνότητες του  $H_s$ , κάτι που επαληθεύει και όσα αναφέραμε για τα βαθιά ύδατα σχετικά με την καταλληλότητα των κατανομών.

Τέλος, σχετικά με την εφαρμογή του μοντέλου δεσμευμένης πιθανότητας, όπου οι παράμετροι  $\alpha, \beta$  της λογαριθμοκανονικής κατανομής υπολογίζονται ως συνάρτηση του χαρακτηριστικού ύψους  $H_s$ , μέσα από την κλασματική και την εκθετική συνάρτηση αντίστοιχα, προέκυψε ότι τα σφάλματα είναι μεγαλύτερα σε σχέση με τον κλασικό τρόπο εφαρμογής του μοντέλου, όπου οι παράμετροι της υπολογίζονται με τη μέθοδο της μέγιστης πιθανοφάνειας. Αυτό ισχύει και για τα βαθιά ύδατα αλλά και για το βάθος των 7.5 m. Παρ' όλα αυτά, το γεγονός ότι δίνει τη δυνατότητα του υπολογισμού της πυκνότητας πιθανότητας της περιόδου ( $T_m$ ) ως προς οποιαδήποτε τιμή του χαρακτηριστικού ύψους ( $H_s$ ) και όχι μόνο ως προς τις κεντρικές τιμές των κλάσεων, καθιστά την εφαρμογή του μοντέλου με τον συγκεκριμένο τρόπο καταλληλότερη.

## 5.2 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

Η μεθοδολογία που εφαρμόστηκε στην περιοχή της Θάσου θα μπορούσε να εφαρμοσθεί και σε άλλες περιοχές όπου υπάρχουν και διαθέσιμες μετρήσεις έτσι ώστε να γίνει σύγκριση και να διαπιστωθεί η ορθότητά της και αν επαληθεύονται τα συμπεράσματά της.

Ως περαιτέρω έρευνα για τη βελτίωση της θα μπορούσε να προταθεί η εισαγωγή των όρων ανωτέρας τάξης στο μετασχηματισμό της ρήχωσης έτσι ώστε να ληφθούν υπόψη και οι μη γραμμικές αλληλεπιδράσεις οι οποίες ανταποκρίνονται περισσότερο στην πραγματικότητα. Θα

μπορούσε ο μετασχηματισμός της διάθλασης να ληφθεί υπόψη υπό πραγματικές συνθήκες , χωρίς να γίνεται κάποια απλοποιητική παραδοχή, όπως στην παρούσα εργασία.

Επιπλέον, προτείνεται η εφαρμογή της ίδιας μεθοδολογίας σε κάποιο σημείο ακόμα πιο αναλυτικά, χρησιμοποιώντας τις μηνιαίες συχνότητες των ανεμολογικών δεδομένων για κάθε έτος μέτρησης, έτσι ώστε γίνει ακόμα πιο ακριβής η πληροφορία που αφορά τις από κοινού συχνότητες εμφάνισης των  $H_s$  και  $T_m$ . Τέλος, πέραν του πιθανοτικού σχεδιασμού μπορούν να ερευνηθούν και θέματα ακτομηχανικής, όπως είναι η εκτίμηση της μακροπρόθεσμης στερεομεταφοράς, της εξέλιξης της ακτογραμμής κλπ., μέσω της αξιοποίησης των μακροπρόθεσμων από κοινού κατανομών χαρακτηριστικού ύψους και μέσης περιόδου κύματος.

## BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕ ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- Andrew, R. N. and W. G. Price, 1979. Applications of generalized gamma functions in ship dynamics. *Trans. Royal Inst. Naval Architects (RINA)*, 121, 137-43.
- Athanassoulis, G.A., E.K. Skarsoulis, and K.A. Belibassakis., 1994. Bivariate distributions with given marginals with an application to wave climate description, *Appl. Ocean Res.*, 16, 1-17
- A. Etemad-Shahidi, M.H. Kazeminehad and S.J. Mousavi, 2009. On the prediction of wave parameters using simplified methods. *Journal of Coastal Research*, SI 56 (Proceedings of the 10<sup>th</sup> International Coastal Symposium), 505-509, Lisbon, Portugal, ISSN 0749-0258
- BISHOP, C.T., 1983. Comparison of manual wave prediction models, *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, ASCE 109 (1), 1-17
- BOOIJ, N., RIS, R.C., and HOLTHUIJSEN, L.H., 1999. A third generation wave model for coastal regions. 1. Model description and validation. *Journal of Geophysical Research*, 104, 7649-7666
- BRETSCHNEIDER, CL., 1970. Wave forecasting relations for wave generation. Look Lab, Hawaii, 1 (3)
- Cartwright and Longuet-Higgins. The statistical distribution of the maxima of a random function. *Wormley*: National Institute of Oceanography, 1956
- Claudia Lucas, C. Guedes Soares, 2015. Bivariate Distribution Of Significant Wave and Mean Wave Period of Combined Sea States. Centre of Marine Technology and Ocean Engineering (CENTEC), Instituto Superior Technico, Universidade de Lisboa, Lisboa, Portugal
- Dacunha, N. M. C., M. Hogben, and K. S. Andrews, 1984. Wave climate synthesis worldwide. In *Proc. Int. Symp. on Wave and Wind Climatology Worldwide*, London, The Royal Institute of Naval Architects (RINA)
- Donelan, M.A., 1980. Similarity theory applied to the forecasting of wave heights, periods, and directions. *Proceedings of Canadian Coastal Conference*, National Research Council of Canada, pp. 47-61
- Fang, Z.S., and Hogben, N. 1982. "Analysis and prediction of long-term probability distributions of wave height and periods." Technical Report, National Maritime Institute, London.
- Hasselmann et al., 1973. Measurements of wind-wave growth and swell during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP).
- Haver, S., 1985. Wave climate off northern Norway, *Appl. Ocean Res.* 7 (2), 85-92

- Jan Mathisen and Elzbieta Bitner-Gregersen, 1990. Joint distributions for significant wave height and wave zero-upcrossing period. *Appl. Ocean Res.*, 12, 93-103.
- Jasper, N. H., 1956. Statistical distribution patterns of ocean waves and of wave-induced ship stresses and motions with engineering applications. *Trans. Soc. Naval Architects and Marine Eng.*, 64, 375-432
- Κωνσταντίνος Μέμος, 2008. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΑ ΛΙΜΕΝΙΚΑ ΕΡΓΑ.
- McCowan, J. (1891). "On the solitary wave." *Philosophical Magazine*, 32, 5th Series, 430-437.
- Michell, J.H. (1883). "On the highest waves in water." *Philosophical Magazine*, 36, 5th Series, 430-437.
- Nordenstrom, N., 1969. Methods for predicting long-term distributions of wave loads and probability of failure for ships, Part I: Environmental conditions and short term response. Tech. Rep. 69-21-S, Det Norske Veritas, Oslo
- Ochi, M.K. (1976). "Extreme values of surface effect ships (SES) responses in a seaway." Part I. Estimation of extreme values for SES design consideration, Tech. Rep. 690-01, DTNSRDC, Bethesda, MD, USA.
- Ochi, M.K., 1978. On long-term statistics for ocean and coastal waves, *Proceedings of the 16th Conference on Coastal Engineering*, 2, 59-75
- Papanikolaou, M.G., Malliouri, D.I., and Memos, C.D. (2016). "Wave climate description via long-term joint distributions of wave height and wave." In: *Proceedings of the 7th National Conference on Harbour Works*, Athens.
- Pierson, W.J., and Moskowitz, L.A. (1964). "Proposed spectral form for fully developed wind seas based on the similarity theory of S.A. Kitaigorodskii." *J. Geophys. Res.*, 69(24), 5181-5190.
- Lian Li, Zhen Gao, Torgeir Moan, 2013. Joint Environmental Data at Five European Offshore Sites for Design of Combined Wind and Wave Energy Devices. *Journal of offshore Mechanics and Arctic Engineering*
- Repko, A., Van Gelder, P.H.A.J.M., Voortman, H.G., Vrijling, J.K., 2004. Bivariate description of offshore wave conditions with physics-based extreme value statistics. *Appl. Ocean Res.* 26, 162–170.
- Soukissian T., M. Hatzinaki, G. Korres, A. Papadopoulos, G. Kallos, and E. Anadranistakis, 2007. *Wind and wave atlas of the Hellenic Seas*
- Thompson, W.C., Nelson, A.R., and Sedivy, D.G. (1984). "Wave group anatomy." In: *Proceedings of 19th conference on Coastal Eng.*, Vol. I, ASCE, 661–677.

U.S. Army, 1984. Shore Protection Manual. Washington, DC: U.S. Army Engineer Waterway Experiment Station, U.S. Government Printing Office

U.S. Army, 2006. Coastal Engineering Manual. Chapter II-2, Meteorology and Wave Climate. Washington, DC: Engineer Manual 1110-2-1100, U.S. Army Corps of Engineers

WILSON, B.W., 1965. Numerical prediction of ocean waves in the North Atlantic for December, 1959, Deutsche Hydrograph. Z, 18 (3), 114-130

Χ.Δαμνιανού, Ν.Παπαδάτος, Χ.Α. Χαραλαμπίδης 2003, Εισαγωγή στις πιθανότητες και τη στατιστική. Τμήμα Μαθηματικών Πανεπιστημίου Αθηνών





## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

### **A.1 Κώδικας σε Matlab για τη δημιουργία πινάκων με κλάσεις σταθερού εύρους για τα $H_s$ και $T_m$**

```
% Make classes of stable step

% Tpmin=1.9;
Tpmin=0.00;
Hmin=0.00;

% ni= arithmos grammon
% mj=arithmos sthlwn

ni=size(upTp,1);
mj=size(upHs,1);

% metatropi periodou aixmis Tp se mesi period Tm
for j=1:mj
    d(j)=upTp(j)/sqrt(upHs(j));
    if d(j)>=5
        g(j)=1;
        upTm1(j)=upTp(j)*(0.7303+0.04936*g(j)-
0.00655*g(j)^2+0.000361*g(j)^3);
    end
    if d(j)>=3.6 && d(j)<5
        g(j)=exp(5.75-1.15*d(j));
        upTm1(j)=upTp(j)*(0.7303+0.04936*g(j)-
0.00655*g(j)^2+0.000361*g(j)^3);
    end
    if d(j)<3.6
        g(j)=5;
        upTm1(j)=upTp(j)*(0.7303+0.04936*g(j)-
0.00655*g(j)^2+0.000361*g(j)^3);
    end
end
upTm=(upTm1)';

% Dimiourgia tixaion arithmon Hs kaiTm sto proto keli
a0=0.83*Tpmin;
Tmmin=a0;
b0=Hmin;

upH=upHs;
Hmax=upH(mj,1);

a1(1)=a0;
a2(1)=upTm(1,1);
ra1 = (a2(1)-a0).*rand(arelfreq(1,1),1) + a0;
b1(1)= b0;
```

```

b2(1) = upH(1,1);
rb1 = (b2(1)-b0).*rand(arelfreq(1,1),1) + b0;

for k=1:arelfreq(1,1)
    H(1,k)=rb1(k);
    T(1,k)=ra1(k);
End

% dimiourgia tixaion arithmon stin prota stili ektos tou protou keliou

a2i(1)=a2;
j=1;

for i=2:ni
    a1i(i)= a2i(i-1);
    a2i(i)= upTm(i);
    rai = (a2i(i)-a1i(i)).*rand(arelfreq(i,j),1) + a1i(i);

    bli(j)= b0;
    b2i(j) = upH(j,1);
    rbi = (b2i(j)-bli(j)).*rand(arelfreq(i,j),1) + bli(j);

    for k=1:arelfreq(i,j)
        Hi(i,j,k)=rbi(k);
        Ti(i,j,k)=rai(k);
    end
end

% dimiourgia tixaion arithmon stin prota grammi ektos tou protou keliou

b2j(1)=b2;
i=1;
for j=2:mj
    a1j(i)=a0;
    a2j(i)=upTm(i);
    raj = (a2j(i)-a1j(i)).*rand(arelfreq(i,j),1) + a1j(i);

    b1j(j)= b2j(j-1);
    b2j(j) = upH(j,1);
    rbj = (b2j(j)-b1j(j)).*rand(arelfreq(i,j),1) + b1j(j);

    for k=1:arelfreq(i,j)
        Hj(i,j,k)=rbj(k);
        Tj(i,j,k)=raj(k);
    end
end

% dimiourgia tixaion arithmon stis ipoloipes grammes kai stiles toy pinaka

a2ij(1)=upTm(1);
b2ij(1)=upH(1);

for i=2:ni
for j=2:mj

```

```

a1ij(i)= a2ij(i-1);
a2ij(i)= upTm(i);
raij = (a2ij(i)-a1ij(i)).*rand(arelfreq(i,j),1) + a1ij(i);

b1ij(j)= b2ij(j-1);
b2ij(j) = upH(j,1);
rbij = (b2ij(j)-b1ij(j)).*rand(arelfreq(i,j),1) + b1ij(j);

for k=1:arelfreq(i,j)
    Hij(i,j,k)=rbij(k);
    Tij(i,j,k)=raij(k);
end
end
end

%%% dimiourgia neon klaseon kai neon kentrikontimon gia a Hs kai Tm

nn=sum(arelfreq);
mm=sum(nn);

NewHmin=0.;

cH=0.25;

NewTmin=Tmmin;
NewTmax=upTm(ni,1);
kk1=(Hmax-NewHmin)/cH;
kk=ceil(kk1);
cT=0.25;
kkT1=((NewTmax-NewTmin)/cT);
kkT=ceil(kkT1);

for n=1:kk
    NewupH(n)=NewHmin+n*cH;
    NHcen(n,1)=(NewupH(1)+NewHmin)/2+(n-1)*cH;
end

for n=1:kkT
    NewupT(n)=NewTmin+n*cT;
    NTcen(n,1)=(NewupT(1)+NewTmin)/2+(n-1)*cT;
end
NewupTe=(NewupT)';

%%%

for k=1:arelfreq(1,1)

    if H(1,k)<NewupH(1) && H(1,k)>=0
        nH(1,1,k)=1;
    end
end

```

```

end

for n=2:kk-1
    if H(1,k)>=NewupH(n-1) && H(1,k)<NewupH(n)
        nH(1,1,k)=n;
    end
end
if H(1,k)>=NewupH(kk-1)
    nH(1,1,k)=kk;
end

if T(1,k)<NewupT(1) && T(1,k)>=a0
    nT(1,1,k)=1;
end
for n=2:kkT-1
    if T(1,k)>=NewupT(n-1) && T(1,k)<NewupT(n)
        nT(1,1,k)=n;
    end
end
if T(1,k)>=NewupT(kkT-1)
    nT(1,1,k)=kkT;
end
end

j=1;
for i=2:ni
    for k=1:arelfreq(i,j)

        if Hi(i,j,k)<NewupH(1) && Hi(i,j,k)>=0
            nHi(i,j,k)=1;
        end
        for n=2:kk-1
            if Hi(i,j,k)>=NewupH(n-1) && Hi(i,j,k)<NewupH(n)
                nHi(i,j,k)=n;
            end
        end
        if Hi(i,j,k)>=NewupH(kk-1)
            nHi(i,j,k)=kk;
        end
        if Ti(i,j,k)<NewupT(1) && Ti(i,j,k)>=a0
            nTi(i,j,k)=1;
        end
        for n=2:kkT-1
            if Ti(i,j,k)>=NewupT(n-1) && Ti(i,j,k)<NewupT(n)
                nTi(i,j,k)=n;
            end
        end
        if Ti(i,j,k)>=NewupT(kkT-1)
            nTi(i,j,k)=kkT;
        end
    end
end

end

i=1;

```

```

for j=2:mj
  for k=1:arelfreq(i,j)
    if Hj(i,j,k)<NewupH(1)  && Hj(i,j,k)>=0
      nHj(i,j,k)=1;
    end

    for n=2:kk-1
      if Hj(i,j,k)>=NewupH(n-1)  && Hj(i,j,k)<NewupH(n)
        nHj(i,j,k)=n;
      end
    end
    if Hj(i,j,k)>=NewupH(kk-1)
      nHj(i,j,k)=kk;
    end

    if Tj(i,j,k)<NewupT(1)  && Tj(i,j,k)>=a0
      nTj(i,j,k)=1;
    end
    for n=2:kkT-1
      if Tj(i,j,k)>=NewupT(n-1)  && Tj(i,j,k)<NewupT(n)
        nTj(i,j,k)=n;
      end
    end
    if Tj(i,j,k)>=NewupT(kkT-1)
      nTj(i,j,k)=kkT;
    end
  end
end

for i=2:ni
  for j=2:mj
    for k=1:arelfreq(i,j)
      if Hij(i,j,k)<NewupH(1)  && Hij(i,j,k)>=0
        nHij(i,j,k)=1;
      end

      for n=2:kk-1
        if Hij(i,j,k)>=NewupH(n-1)  && Hij(i,j,k)<NewupH(n)
          nHij(i,j,k)=n;
        end
      end
      if Hij(i,j,k)>=NewupH(kk-1)
        nHij(i,j,k)=kk;
      end
      if Tij(i,j,k)<NewupT(1)  && Tij(i,j,k)>=a0
        nTij(i,j,k)=1;
      end
      for n=2:kkT-1
        if Tij(i,j,k)>=NewupT(n-1)  && Tij(i,j,k)<NewupT(n)
          nTij(i,j,k)=n;
        end
      end
      if Tij(i,j,k)>=NewupT(kkT-1)
        nTij(i,j,k)=kkT;
      end
    end
  end
end

```

```

end
end

% nees sixnotites katanemimenes stis nees klaseis tou pinaka
new=zeros(kkT,kk);
for k=1:arelfreq(1,1)
    if nH(1,1,k)~=0
        jj=nH(1,1,k);
        ii=nT(1,1,k);
        new(ii,jj)=new(ii,jj)+1;
    end
end
snew=sum(new);
ssnew=sum(snew);
newi=zeros(kkT,kk);
j=1;
for i=2:ni
    for k=1:arelfreq(i,j)
        if nHi(i,j,k)~=0
            jj=nHi(i,j,k);
            ii=nTi(i,j,k);
            newi(ii,jj)=newi(ii,jj)+1;
        end
    end
end
snewi=sum(newi);
ssnewi=sum(snewi);

newj=zeros(kkT,kk);
i=1;
for j=2:mj
    for k=1:arelfreq(i,j)
        if nHj(i,j,k)~=0
            jj=nHj(i,j,k);
            ii=nTj(i,j,k);
            newj(ii,jj)=newj(ii,jj)+1;
        end
    end
end
snewj=sum(newj);
ssnewj=sum(snewj);

newij=zeros(kkT,kk);
for i=2:ni
    for j=2:mj
        for k=1:arelfreq(i,j)
            if nHij(i,j,k)~=0
                jj=nHij(i,j,k);
                ii=nTij(i,j,k);
                newij(ii,jj)=newij(ii,jj)+1;
            end
        end
    end
end
end

```

```

    end
end
snewij=sum(newij);
ssnewij=sum(snewij);
for ii=1:kkT
    for jj=1:kk
        num(ii,jj)=(new(ii,jj)+newi(ii,jj)+newj(ii,jj)+newij(ii,jj));
    end
end

total =sum(num);
sumtotal=sum(total);
sss=ssnew+ssnewi+ssnewj+ssnewij;

% ipologismos apo koinou piknotitas pithanotitas se kathe keli tou pinaka

for ii=1:kkT
    for jj=1:kk
        freq(ii,jj)=num(ii,jj)/10000;
        jointd(ii,jj)=freq(ii,jj)/cH/cT;
    end
end
%      %

% %
%Turn the nxm array into a column array    (dimensions)

    ni=size(NTcen,1);
for m=1:kk
for i=ni*(m-1)+1:m*ni
relfreq(i,1)=freq(i-ni*(m-1),m);
jd(i,1)=jointd(i-ni*(m-1),m);
end
end

% Turn the arrays Tm amd Hs into a column array    (dimensions (ni*mj)x1)
for m=1:kk
for i=ni*(m-1)+1:m*ni
NT(i,1)=NTcen(i-ni*(m-1),1);
end
end

for m=1:kk
for i=ni*(m-1)+1:m*ni
NH(i,1)=NHcen(m,1);
end
end

```

Σημείωση: Ο παραπάνω κώδικας χρησιμοποιήθηκε για κάθε άνεμο προκειμένου να μετατρέψει τους αρχικούς πίνακες των  $H_s$ - $T_m$  με τις από κοινού συχνότητες τους, σε πίνακες κλάσεων σταθερού πλάτους. Επίσης χρησιμοποιήθηκε και για τον αρχικό πίνακα των μετρήσεων που ήταν κλάσεων άνισου πλάτους. Τα δεδομένα που χρειάζεται για να εκτελεστεί ο κώδικας είναι οι αρχικές τιμές των υψών  $H_s$ , των περιόδων αιχμής  $T_m$  και οι από κοινού συχνότητες εμφάνισης τους

## A.2 Κώδικας σε Matlab για την περίπτωση μοντέλου δεσμευμένης πιθανότητας με λογαριθμοκανονική κατανομή για το $H_s$ και την $T_m|H_s$ για τα βαθιά ύδατα, εφαρμοσμένο στους πίνακες από κοινού συχνότητων βασισμένοι στα ανεμολογικά της Λήμνου.

```
%pologismos parametron lognormal gia Tm/Hs

for jj=1:17;
    ss=lognfit(Tm(1:22), [], [], freqTm(1:22, jj));
    a(jj,1)=ss(1);
    b1(jj,2)=ss(2);
    b2(jj)=b1(jj,2);
end
b=b2';
%prosarmogi katanomis longnormal gia tin Tm desmeumeni os pros to Hs

for jj=1:17;
    for ii=1:22;
        %pdfTm(ii,jj)=(1/(sqrt(2*pi*b(jj)*Tm(ii))))*exp(-
(1/(2*b(jj)^2))*(log(Tm(ii))-a(jj))^2);
        pdfTm(ii,jj)=(exp(-1/2/(b(jj)^2)*(log(Tm(ii))-
a(jj))^2))*((Tm(ii)*b(jj)*(2*pi)^0.5)^(-1));
        cdfTm(ii,jj)=(1/2)+(1/2)*erf((log(Tm(ii))-a(jj))/(2^0.5*b(jj)));
    end
end
%prosarmogi katanomis lognormal gia ta Hs
%ipologismos parametron a1 b1 lognormal
s=lognfit(Hs, [], [], freq);
a1=s(1);
b1=s(2);

for jj=1:17;
    pdfHs(jj)=(exp(-1/2/(b1^2)*(log(Hs(jj))-a1)^2))*
((b1*Hs(jj)*(2*pi)^0.5)^(-1));

    cdfHs(jj)=(1/2)+(1/2)*erf((log(Hs(jj))-a1)/(2^0.5*b1));
end

% stili 15 opou den prosarmozetai h katanomi
```



```

jj=15;
for ii=1:17;
    pdfTm(ii,jj)=0;
    cdfTm(ii,jj)=pdfTm(ii,jj)*0.25;
end
pdfTm(18,jj)=1/0.25;
cdfTm(18,jj)=pdfTm(18,jj)*0.25;

for ii=19:22;
    pdfTm(ii,jj)=0;
    cdfTm(ii,jj)=pdfTm(ii,jj)*0.25;
end

% stili 16 pou exoume midenika stoixeia

jj=16;
for ii=1:22;
    pdfTm(ii,jj)=0;
    cdfTm(ii,jj)=pdfTm(ii,jj)*0.25;
end

% stili 17 opou den prosarmozetai h katanomi

jj=17;
for ii=1:21;
    pdfTm(ii,jj)=0;
    cdfTm(ii,jj)=pdfTm(ii,jj)*0.25;
end
pdfTm(22,jj)=1/0.25;
cdfTm(22,jj)=pdfTm(22,jj)*0.25;

%apo koinou piknotita pithanotitas
for jj=1:17;
    for ii=1:22;
        jpdf(ii,jj)=pdfTm(ii,jj)*pdfHs(jj);
        jprob(ii,jj)=jpdf(ii,jj)*0.25*0.25;
    end
end
% sfalma D^2

DTm=0.25;
DHs=0.25;
%sinolikos arithmos paratiriseon
sumf=sum(freqTm);
sumol=sum(sumf);

% pinakas pithanotiton prin tin efarmogi katanomon
initialprob=freqTm/sumol;

D2=0;
for jj=1:17;
    for ii=1:22;

```

```

        diafora(ii,jj)=(jpdf(ii,jj)*DTm*DHs)-initialprob(ii,jj))^2;
        D2=D2+diafora(ii,jj);
    end
end

```

### A.3 Κώδικας σε Matlab για την περίπτωση μοντέλου δεσμευμένης πιθανότητας με κατανομή Weibull για το $H_s$ και την $T_m|H_s$ για τα βαθιά ύδατα, εφαρμοσμένο στους πίνακες από κοινού συχνοτήτων βασισμένοι στα ανεμολογικά της Λήμνου.

```

%pollogismos parametron lognormal gia Tm/Hs

for jj=1:17;
    ss=lognfit(Tm(1:22), [], [], freqTm(1:22, jj));
    a(jj,1)=ss(1);
    b1(jj,2)=ss(2);
    b2(jj)=b1(jj,2);
end
b=b2';
%prosarmogi katanomis longnormal gia tin Tm desmeumeni os pros to Hs

for jj=1:17;
    for ii=1:22;
        %pdfTm(ii,jj)=(1/(sqrt(2*pi*b(jj)*Tm(ii))))*exp(-
(1/(2*b(jj)^2))*(log(Tm(ii))-a(jj))^2);
        pdfTm(ii,jj)=(exp(-1/2/(b(jj)^2)*(log(Tm(ii))-
a(jj))^2))*((Tm(ii)*b(jj)*(2*pi)^0.5)^(-1));
        cdfTm(ii,jj)=(1/2)+(1/2)*erf((log(Tm(ii))-a(jj))/(2^0.5*b(jj)));
    end
end
%prosarmogi katanomis wibull gia ta Hs
%ipologismos parametron a1 b1 weibull
s=wblfit(Hs, [], [], freq);
a1=s(1);
b1=s(2);

for jj=1:17;
    pdfHs(jj)=(b1/a1)*((Hs(jj)/a1)^(b1-1))*exp(-(Hs(jj)/a1)^b1);
    cdfHs(jj)=1-exp(-((Hs(jj)/a1)^b1));
end

% stili 15 opou den prosarmozetai h katanomi

jj=15;
for ii=1:17;
    pdfTm(ii,jj)=0;

```

```

        cdfTm(ii,jj)=pdfTm(ii,jj)*0.25;
end
pdfTm(18,jj)=1/0.25;
cdfTm(18,jj)=pdfTm(18,jj)*0.25;

for ii=19:22;
    pdfTm(ii,jj)=0;
    cdfTm(ii,jj)=pdfTm(ii,jj)*0.25;
end

% stili 17 pou den prosarmozetai i katanomi

jj=17;
for ii=1:21;
    pdfTm(ii,jj)=0;
    cdfTm(ii,jj)=pdfTm(ii,jj)*0.25;
end
pdfTm(22,jj)=1/0.25;
cdfTm(22,jj)=pdfTm(22,jj)*0.25;

% stili 16 pou exoume midenika stoixeia

jj=16;
for ii=1:24;
    pdfTm(ii,jj)=0;
    cdfTm(ii,jj)=pdfTm(ii,jj)*0.25;
end

%apo koinou piknotita pithanotitas
for jj=1:17;
    for ii=1:22;
        jpdf(ii,jj)=pdfTm(ii,jj)*pdfHs(jj);
        jprob(ii,jj)=jpdf(ii,jj)*0.25*0.25;
    end
end
% sfalma D^2

DTm=0.25;
DHs=0.25;
%sinolikos arithmos paratiriseon
sumf=sum(freqTm);
sumol=sum(sumf);

% pinakas pithanotiton prin tin efarmogi katanomon
initialprob=freqTm/sumol;

D2=0;
for jj=1:17;
    for ii=1:22;
        diafora(ii,jj)=(jpdf(ii,jj)*DTm*DHs)-initialprob(ii,jj))^2;
    end
end

```

```

        D2=D2+diafora(ii,jj);
    end
end

```

Σημείωση: Οι κώδικες για τα συνδυασμένα ανεμολογικά Λήμνου-Αλεξανδρούπολης, Λήμνου Αλεξανδρούπολης-Καβάλας αλλά και για το βάθος των 7.5 m είναι απολύτως ανάλογος. Το μόνο που αλλάζει στην εισαγωγή των δεδομένων για την εκτέλεση των αλγορίθμων είναι αρχικός Πίνακας των από κοινού συχνοτήτων εμφάνισης (ως προς τα στοιχεία που περιλαμβάνει αλλά και ως προς τις διαστάσεις του: jjxkk) όπως έχουν διαμορφωθεί σε πίνακες κλάσεων σταθερού πλάτους για κάθε περίπτωση.

#### **A.4 Κώδικας σε Matlab για τη διόδευση των κυμάτων στο βάθος των 7.5 m, λαμβάνοντας υπόψη τους μετασχηματισμούς ρήγωσης και διάθλασης**

```

%%ipologismos ipsous kimatos sta vatheia
for i=1:22;
    Lo(i)=(9.81*(Tm(i)^2))/(2*pi);
    ko(i)=(2*pi)/Lo(i);
end

%%eksisosi diasporas

for i=1:22;
    k(i,1)=0;
    m=0;
    while m==0
        if abs(k(i,1)-(4*pi^2)/((9.81*(Tm(i).^2))*tanh(k(i,1)*7.5)))<0.0001;
            k(i,1)=k(i,1);
            m=1;
        end
        if m==0
            k(i,1)=k(i,1)+0.0001;
        end
    end
end

end
%%ipologiamos mikous kimatos se vathos 7.5m

for i=1:22;
    L(i)=(2*pi)/k(i);
end

%%ipologismos sintelesti n

for i=1:22;
    n(i)=0.5*(1+(2*k(i)*7.5)/sinh(2*k(i)*7.5));
end

%%ipologismos sintelesti rixosis

for i=1:22;

```

```

    Co(i)=Lo(i)/Tm(i);
    C(i)=L(i)/Tm(i);
    KS(i)=sqrt(Co(i)/(2*n(i)*C(i)));
end

%%DIATHLASI

%NOTIOS ANEMOS, KATHETI PROSPTOSI
Aso=0;
%notioditikos anemos arxiki gonia Aswo=45
    Aswo=pi/4;
%notioanatolikos anemos arxiki gonia Aseo=-45
    Aseo=-pi/4;
%anatolikos anemos arxiki gonia Ae0=-90
    Ae0=-pi/2;
%ditikos anemos arxiki gonia Awo=90
    Awo=pi/2;

%% nomos tou snell
for i=1:22
    SsAl(i)=(C(i)*sin(Aso))/Co(i);
    CsAl(i)=sqrt(1-SsAl(i)^2);

    SswAl(i)=(C(i)*sin(Aswo))/Co(i);
    CswAl(i)=sqrt(1-SswAl(i)^2);

    SseAl(i)=(C(i)*sin(Aseo))/Co(i);
    CseAl(i)=sqrt(1-SseAl(i)^2);

    SeAl(i)=(C(i)*sin(Ae0))/Co(i);
    CeAl(i)=sqrt(1-SeAl(i)^2);

    SwAl(i)=(C(i)*sin(Awo))/Co(i);
    CwAl(i)=sqrt(1-SwAl(i)^2);
end

%ipologismos sinteleston diathlasis

for i=1:22
    Krs(i)=sqrt(cos(Aso)/CsAl(i));
    Krsw(i)=sqrt(cos(Aswo)/CswAl(i));
    Krse(i)=sqrt(cos(Aseo)/CseAl(i));
    Kre(i)=sqrt(cos(Ae0)/CeAl(i));
    Krw(i)=sqrt(cos(Awo)/CwAl(i));
End

% kentrikes times meta ti rixosi kai diathlasi

for i=1:22;
    for j=1:17;
        HScentralnew(i,j)=Hs(j)*KS(i)*Krs(i);
    end
end

```

```
for i=1:17;
    for j=1:13;
        HSWcentralnew(i,j)=Hs(j)*KS(i)*Krsw(i);
    end
end

for i=1:18;
    for j=1:15;
        HSEcentralnew(i,j)=Hs(j)*KS(i)*Krse(i);
    end
end
```