



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Πιθανοθεωρητική θεώρηση «Κριτηρίου Καιρού» ευστάθειας πλοίων

Θάνου Αγορίτσα-Αγγελική

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: Κ.ΣΠΥΡΟΥ

Αθήνα 2010

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες.....	5
Περίληψη	7
Abstract.....	9
Κεφάλαιο 1 - Εισαγωγή	11
Κεφάλαιο 2 – Στόχοι	13
Κεφάλαιο 3 – Ιστορική Αναδρομή στους Κανονισμούς Άθικτης ευστάθειας πλοίων από το 1957 έως και σήμερα	15
Κεφάλαιο 4 – Πλαίσιο πιθανοθεωρητικής διερεύνησης	41
Κεφάλαιο 5 – Παρουσίαση των υπολογισμών	51
Κεφάλαιο 6 – Συμπεράσματα.....	103
Βιβλιογραφία	105
Παράρτημα Α	107

Ευχαριστίες

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους όσους συνέβαλαν στην ολοκλήρωση της διπλωματικής μου εργασίας. Ευχαριστώ θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή Κ^ο Κ. Σπύρου για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγησή του κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της εργασίας.

Επίσης θέλω να ευχαριστήσω ειλικρινά τον Κ^ο Ν. Θεμελή για τη συνεχή ακούραστη και πολύτιμη βοήθεια του καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της παρούσας εργασίας.

Περίληψη

Αφορμή για την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, στάθηκε το γεγονός ότι το Κριτήριο Καιρού δεν παρέχει σαφείς πληροφορίες για την ασφάλεια των πλοίων. Στόχος αυτής της εργασίας είναι η ποσοτικοποίηση του Κριτηρίου Καιρού ως προς τα επίπεδα ασφάλειας που παρέχει αυτό, με βάση τις συνθήκες ανέμου και κυματικού περιβάλλοντος που προϋποθέτει. Ειδικότερα, στο πρώτο επίπεδο της διερεύνησης, γίνεται μια απλή πιθανοθεωρητική θεώρηση του Κριτηρίου Καιρού, για να βρούμε την πιθανότητα συνάντησης δυσμενέστερων καιρικών συνθηκών από αυτές που υποθέτει το κριτήριο. Στο δεύτερο επίπεδο, γίνεται μια δυναμική διερεύνηση του προβλήματος μέσω ενός μαθηματικού μοντέλου προσομοίωσης της κίνησης διατοιχισμού του πλοίου, λαμβάνοντας υπόψη την επίδραση ανέμου και κυματισμών στην κίνηση του πλοίου, με στόχο να υπολογίσουμε την συνολική πιθανότητα ανατροπής του. Τέλος, εξάγουμε κάποια συμπεράσματα από την εκάστοτε ανάλυση και πραγματοποιούμε μία σύγκριση των αποτελεσμάτων της απλής πιθανοθεωρητικής θεώρησης και της δυναμικής ανάλυσης.

Abstract

The reason of the present thesis is the fact that the Weather Criterion does not provide explicit information on the safety of ships. The aim of this project is to quantify the Weather Criterion, as for the levels of safety that provides, with base the conditions of wind and sea environment that it presupposes. Specifically, in the first level of investigation, a simple probabilistic analysis of Weather Criterion is proposed in order to find the possibility of meeting worse weather conditions from those that are proposed by the criterion. In the second level, a dynamic investigation of problem is applied via a mathematic model of simulation of rolling, taking into consideration the effect of wind and beam waves in the movement of ship, in order to calculate the total possibility of subversion of the ship. Finally, we export certain conclusions from each analysis and compare the results of simple probabilistic analysis and dynamic investigation.

Κεφάλαιο 1 - Εισαγωγή

Το ζήτημα της ευστάθειας, ιδιαίτερα η αποφυγή ανατροπής σε έντονο κυματικό περιβάλλον, αποτελεί θεμελιώδη απαίτηση κατά τον σχεδιασμό ενός πλοίου. Η προσπάθεια για την θέσπιση κριτηρίων ευστάθειας των πλοίων αρχικά ξεκίνησε σε μεμονωμένες χώρες όπως στην τέως Σοβιετική Ένωση στις ΗΠΑ και στην Ιαπωνία. Ειδικά μετά από την έκδοση των μελετών των E.Pierrottet και J.Rahola -τα έτη 1935 και 1939 αντίστοιχα- σχετικά με την αξιολόγηση της ευστάθειας των πλοίων σε άθικτη μορφή, εκδηλώθηκε ιδιαίτερο ενδιαφέρον στον ναυπηγικό χώρο και παρουσιάστηκαν ποικίλες προτάσεις για την σύσταση κάποιου κατάλληλου πρακτικού κριτηρίου.

Το λεγόμενο «Κριτήριο Καιρού» θεσπίστηκε από τον Διεθνή Ναυτιλιακό Οργανισμό (IMO) στα μέσα της δεκαετίας του '80 και αποτελεί και σήμερα, με κάποιες τροποποιήσεις, το βασικό κριτήριο άθικτης ευστάθειας των πλοίων.

Ωστόσο, τα τελευταία χρόνια υπάρχει μία τάση συνολικής αναθεώρησης του Κριτηρίου Καιρού, καθώς αυξάνονται οι αντιρρήσεις για το κατά πόσον το δεδομένο κριτήριο καλύπτει τις ανάγκες των σύγχρονων πλοίων. Το υφιστάμενο κριτήριο άθικτης ευστάθειας βασίστηκε σε αποτελέσματα πειραμάτων και ερευνών για πλοία τα οποία σχεδιάστηκαν και κατασκευάστηκαν χρόνια πριν. Η ανάλυση, στην οποία βασίστηκε το κριτήριο έχει κάπως απλοποιημένο χαρακτήρα, διότι δεν λαμβάνει υπόψη τις διαφορετικές συνθήκες κυμάτων και ανέμου στις οποίες λειτουργεί το εκάστοτε πλοίο και δεν εισάγεται κανένας εσωτερικός βαθμός ελευθερίας (μετακίνηση φορτίου, νερό στο κατάστρωμα, κτλ.). Ακόμη οι αντιρρήσεις για το Κριτήριο Καιρού εντείνονται, καθώς σήμερα οι επιστήμονες έχουν στην διάθεση τους τεχνολογικά μέσα για την προσομοίωση οποιουδήποτε περιβάλλοντος λειτουργίας του πλοίου, μελετώντας έτσι την απόκριση σε συγκεκριμένα περιβάλλοντα χωρίς καν τα πλοία να υπάρχουν. Επιπλέον είναι δυνατή η αξιοποίηση πιθανοθεωρητικών μοντέλων και μεθοδολογιών ανάλυσης διακινδύνευσης για την εκτίμηση της ευστάθειας των πλοίων και η εξαγωγή αποτελεσμάτων, που ποσοτικοποιούν την ασφάλεια των πλοίων. Είναι αναμενόμενο η εφαρμογή τέτοιων σύγχρονων μεθόδων να οδηγήσει στην ανάπτυξη βελτιωμένων κριτηρίων.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία παρουσιάζεται μία πιθανοθεωρητική θεώρηση του «Κριτηρίου Καιρού» ευστάθειας πλοίων. Στόχος μας είναι να ποσοτικοποιήσουμε την ασφάλεια που παρέχει το Κριτήριο Καιρού, με τις συνθήκες που προϋποθέτει, στα πλοία.

Ειδικότερα, σε πρώτη φάση, εφαρμόζουμε το Κριτήριο Καιρού σε ένα επιβατηγό πλοίο τύπου ROPAX FERRY, που χρησιμοποιήθηκε σε όλους τους υπολογισμούς, τα χαρακτηριστικά του οποίου δίνονται στο αντίστοιχο 5^ο κεφάλαιο των υπολογισμών. Στη συνέχεια, γίνεται μία πιθανοθεωρητική ανάλυση των συνθηκών

του περιβάλλοντος στο οποίο τοποθετούμε το πλοίο μας, υποθέτοντας ότι είναι εξίσου δυσμενείς ή δυσμενέστερες αυτών που υποθέτει το «Κριτήριο Καιρού».

Στα πλαίσια της εκτίμησης της ασφάλειας που παρέχει το Κριτήριο Καιρού πραγματοποιούμε μία παραμετροποίηση του κριτηρίου ως προς τις συνθήκες της ριπής ανέμου και του πλάτους διατοιχισμού, ώστε να προσδιορίσουμε οριακές καταστάσεις για το πλοίο μας, όσον αφορά την εφαρμογή του κριτηρίου και να εκτιμήσουμε την πιθανότητα ανατροπής του πλοίου.

Στο τελευταίο στάδιο των υπολογισμών γίνεται μία δυναμική προσέγγιση του προβλήματος μέσω ενός μαθηματικού μοντέλου προσομοίωσης της κίνησης διατοιχισμού του πλοίου, για την εκτίμηση της πιθανότητας ανατροπής του πλοίου υπό την επίδραση πλευρικού ανέμου και κύματος.

Τέλος συγκρίνουμε τα αποτελέσματα της πιθανοθεωρητικής και της δυναμικής προσέγγισης όσον αφορά τις πιθανότητες ανατροπής του πλοίου, ώστε να καταλήξουμε σε κάποια συμπεράσματα αναφορικά με το πόσο συντηρητικό είναι το Κριτήριο Καιρού ως προς τις συνθήκες καιρού, που υποθέτει και γενικά να αποκτήσουμε μια εικόνα για το επίπεδο ασφάλειας, που παρέχει στο πλοίο.

Τα κεφάλαια της παρούσας διπλωματικής εργασίας διαμορφώνονται ως εξής:

- **2^ο Κεφάλαιο:** Σε αυτό το κεφάλαιο παρατίθενται οι στόχοι της παρούσας εργασίας.
- **3^ο Κεφάλαιο:** Στο κεφάλαιο αυτό δίνεται μία ιστορική αναδρομή των Κριτηρίων Ευστάθειας πλοίων από το 1957 έως σήμερα.
- **4^ο Κεφάλαιο:** Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται το πλαίσιο της πιθανοθεωρητικής θεώρησης, στο οποίο βασίζεται η διπλωματική.
- **5^ο Κεφάλαιο:** Στο κεφάλαιο αυτό παρατίθενται τα αποτελέσματα των υπολογισμών.
- **6^ο Κεφάλαιο:** Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται ο σχολιασμός των αποτελεσμάτων.

Στη συνέχεια παρατίθεται η σχετική βιβλιογραφία στην οποία βασίστηκε η συγκεκριμένη διπλωματική εργασία, καθώς και ένα παράρτημα με τα λεπτομερή αποτελέσματα των υπολογισμών.

Κεφάλαιο 2 – Στόχοι

Οι στόχοι της μελέτης της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι οι εξής:

- Κριτική ανασκόπηση κριτηρίου Καιρού και διερεύνηση του Ιστορικού υποβάθρου.
- Διερεύνηση του Κριτηρίου Καιρού ως προς τις συνθήκες κύματος και ανέμου, που προϋποθέτει.
- Ποσοτικοποίηση του Κριτηρίου Καιρού ώστε να αποκτήσουμε πληροφορίες για τα περιθώρια ασφαλείας που παρέχει.

Κεφάλαιο 3 – Ιστορική Αναδρομή στους Κανονισμούς Άθικτης ευστάθειας πλοίων από το 1957 έως και σήμερα

Αρχικά, η προσπάθεια για θέσπιση κριτηρίων ευστάθειας έγινε σε μεμονωμένες χώρες. Σε αυτό το κεφάλαιο παρατίθενται τα αποτελέσματα των προσπαθειών αυτών ανά χώρα.

- **Ιαπωνία**

Σημαντικές έρευνες όσον αφορά την ευστάθεια των πλοίων διεξήχθησαν στην Ιαπωνία από τους Y.Watanabe, H.Kato, καθώς και από άλλους ερευνητές. Ωστόσο, θεωρήθηκε κάπως πρόωμη η θέσπιση κάποιου κριτηρίου για την ευστάθεια των πλοίων παρόλο που ήταν δυνατή η εφαρμογή ορισμένων αποτελεσμάτων των ερευνών στον σχεδιασμό των πλοίων.

Μερικά χρόνια αργότερα, τον Μάιο του 1953 συστάθηκε από το Υπουργείο Μεταφορών της Ιαπωνίας μία επιτροπή υπό την προεδρία του M.Yamagata με στόχο την θέσπιση ενός «Κριτηρίου Ευστάθειας» για τα πλοία. Στο ερευνητικό έργο συμμετείχαν ακόμη, οι Y.Watanabe, H.Kato, καθώς και άλλοι Γιαπωνέζοι ερευνητές, που είχαν μελετήσει το θέμα της ευστάθειας. Στις έρευνες τους περιλαμβάνεται και η ανασκόπηση των παρελθοντικών ερευνών, που διεξήχθησαν σε άλλες χώρες καθώς και το δικό τους ερευνητικό και πειραματικό υλικό. Όλα τα συμπεράσματα των ερευνών τους, καθώς και το Κριτήριο Ευστάθειας για επιβατηγά πλοία που συστάθηκε τελικά βασίστηκαν σε καταγεγραμμένα στοιχεία και διαγράμματα ήδη υπάρχοντων επιβατηγών πλοίων, που είχαν υποστεί σοβαρά ατυχήματα.

Αυτό το κριτήριο αποτελεί την πρώτη ολοκληρωμένη προσπάθεια σύστασης κριτηρίου ευστάθειας πλοίων. Νομοθετήθηκε τον Φεβρουάριο του 1957 και υιοθετήθηκε στους «Κανονισμούς Ευστάθειας των Πλοίων» στην Ιαπωνία.

Η εφαρμογή του Ιαπωνικού Κριτηρίου, ευστάθειας πλοίων έθετε σε ισχύ τα εξής:

- a. Όλα τα επιβατηγά πλοία, που εκτελούσαν διεθνή ταξίδια όφειλαν να έχουν μαζί τους όλες τις δοκιμές ευστάθειας που έγιναν κατά την ναυπήγηση.
- b. Βασιζόμενοι στα αποτελέσματα των δοκιμών ευστάθειας όλα τα επιβατηγά πλοία όφειλαν να πληρούν το Ιαπωνικό Κριτήριο, όπως θα περιγραφεί έπειτα.
- c. Οι Ναυτικές αρχές όφειλαν να παρέχουν στον καπετάνιο του πλοίου μία αναφορά σχετικά με την ευστάθεια του πλοίου και ο καπετάνιος έπρεπε να τηρεί τις απαιτήσεις ευστάθειας που επισημαίνονται στην εν λόγω αναφορά.
- d. Ο πλοιοκτήτης όφειλε να παρέχει στον καπετάνιο τις απαραίτητες πληροφορίες, ώστε να μπορεί να γνωρίζει τα χαρακτηριστικά της ευστάθειας του πλοίου και να δύναται να εξασφαλίσει επαρκή ευστάθεια για το πλοίο.

Επιστημονικό υπόβραθο του Κριτηρίου Καιρού που υιοθετήθηκε από την Ιαπωνία το έτος 1957 για τα επιβατηγά πλοία

Standard of Stability adopted in Japan,(YAMAGATA, 1959)

Όλα οι πίνακες και τα σχετικά διαγράμματα, που εμφανίζονται στην ανάλυση του Ιαπωνικού κριτηρίου προέρχονται από το σχετικό κριτήριο *Standard of Stability adopted in Japan,(YAMAGATA, 1959)*.

Αρχικά έγινε μια κατηγοριοποίηση των πλοίων σε πέντε κλάσεις για την εφαρμογή των κριτηρίων ευστάθειας ανάλογα με τα ταξίδια, που πραγματοποιούν και το μέγεθος των πλοίων. Οι κλάσεις φαίνονται στον πίνακα 3.1:

Classification	GM-Standard		S _d -Standard	GZ _m -Standard
	For small craft	General		
Small Craft	O	—	—	—
Smooth Water	—	O	—	—
Coasting-II	—	O	O	O
Coasting-I	—	O	O	O
Ocean-going	—	O	O	O

Πίνακας 3.1

Ακόμη, για τον άνεμο έγινε ένας διαχωρισμός σε ορισμένα επίπεδα ανάλογα με την ένταση του ανέμου και την κατηγορία πλοίων, που συναντά το δεδομένο άνεμο. Τα επίπεδα φαίνονται στον πίνακα 3.2:

Cause of type of wind	Average Velocity of trailing steady wind (m/sec)	Maximum wind velocity at centre (m/sec)	Applicable class of ships
Barometric Gradient	10	—	Small Craft
Front	15	—	Smooth Water and Coasting-II
Low	15	32	Coasting-I
Typhoon	20	50	Ocean-going

Πίνακας 3.2

Κατά τον σχεδιασμό ενός πλοίου η ευστάθεια κατέχει πολύ σημαντικό ρόλο. Στην ευστάθεια των πλοίων λαμβάνονται πολλά μεγέθη υπόψη, ώστε να διασφαλιστεί επαρκής ευστάθεια για το πλοίο, όπως:

- Μετακεντρικό ύψος - GM
- Δυναμική ευστάθεια - S_d
- Μοχλοβραχίονας επαναφοράς του πλοίου - GZ
- Γωνία απώλειας ευστάθειας - θ_c

Οι Ιάπωνες συνέταξαν κριτήρια ευστάθειας για τα τρία πρώτα μεγέθη, τα οποία έπρεπε να πληροί κάθε πλοίο.

Ακόμη στα κριτήρια αυτά έγινε σύνδεση, κατά τον βέλτιστο τρόπο για την εποχή, των ανωτέρω μεγεθών με τις εξωτερικές δυνάμεις που επιδρούν στην ευστάθεια του πλοίου, όπως:

- Άνεμος
- Κύματα
- Μετακίνηση βαρών και επιβατών στο πλοίο
- Πηδαλιουχία κ.τ.λ.

Ακολούθως παρουσιάζονται συνοπτικά τα τρία κριτήρια ευστάθειας και οι βασικές εξισώσεις που τα διέπουν.

A. GM-Standard

Το μετακεντρικό ύψος πρέπει να ικανοποιεί την ακόλουθη εξίσωση:

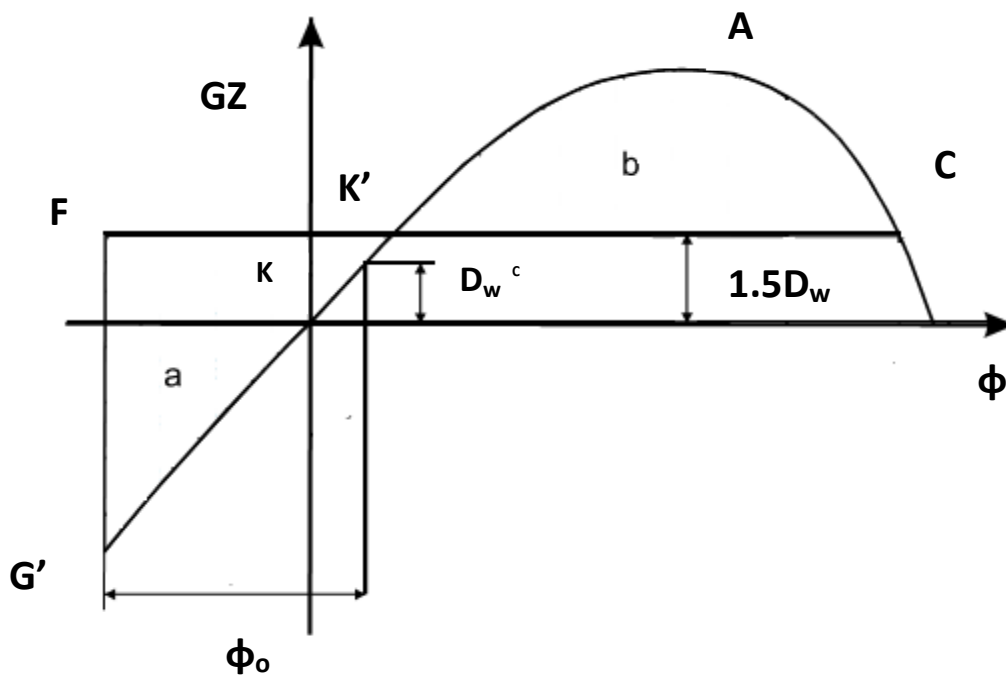
$$GM \geq [1.07AH + 0.134 \sum \left(7 - \frac{n}{a}\right) n\bar{B}] \cdot \frac{B}{100} fW \quad (1)$$

Όπου:

- A = προβεβλημένη πλευρική επιφάνεια του πλοίου και του καταστρώματος, πάνω από την ίσαλο επιφάνεια πλεύσης.
- H = κατακόρυφη απόσταση του κέντρου της επιφάνειας A έως το κέντρο της πλευρικής επιφάνειας του πλοίου, που βρίσκεται κάτω από την ίσαλο επιφάνεια πλεύσης.
- n = αριθμός επιβατών σε κάθε χώρο στέγασης.
- \bar{B} = μεση εγκάρσια απόσταση, στην οποία είναι ελεύθεροι οι επιβάτες να κινούνται σε κάθε χώρο στέγασης.
- B = πλάτος του πλοίου
- f = ύψος εξάλων
- W = εκτόπισμα

Όταν το ύψος εξάλων f υπερβαίνει την τιμή $B/5$ θα λαμβάνεται ίσο με $B/5$

B. S_d-Standard



Σχήμα 3.1

Στο σχήμα 3.1 θα πρέπει το εμβαδόν b να είναι μεγαλύτερο από το a και συνδέονται με την ακόλουθη σχέση:

(2)

Ακόμη ο μοχλοβραχίονας ανέμου σταθερής έντασης D_w και το πλάτος διατοιχισμού ϕ_0 υπολογίζονται από τους ακόλουθους τύπους:

(3)

όπου: $k = 0.0514$: Ocean – going
 $k = 0.0274$: Coasting – I
 $k = 0.0171$: Coasting – II

$$\phi_0 = \sqrt{138\gamma\delta/N} \quad (4)$$

όπου: $\gamma = 0,73 + 0,60 \cdot \frac{OG}{d} \quad (5)$

$$\delta = p - qT_s \quad (6)$$

$$0.100 \geq \delta \geq 0,035$$

$$p = 0,151 \quad q = 0.0072 : \text{Ocean – going}$$

$$p = 0,153 \quad q = 0.0100 : \text{Ocean – going}$$

$$p = 0,155 \quad q = 0.0130 : \text{Ocean – going}$$

Ανάλυση των μεγεθών, που εμφανίζονται στις ανωτέρω εξισώσεις:

- γ = κλίση κύματος
- δ = wave steepness
- N = συντελεστής απόσβεσης Bertin
- OG = απόσταση του κέντρου βάρους και της ισάλου πλεύσης (+ εάν το κέντρο βάρους είναι πάνω από την WL, - εάν είναι κάτω από την WL)
- d = μέσο βύθισμα πλοίου
- T_s = ιδιοπερίοδος ταλάντωσης του πλοίου

Ο συντελεστής απόσβεσης Bertin N λαμβάνει την τιμή 0.02, για κανονικά πλοία με παρατροπίδια.

C. GZ_m -Standard

Ο μέγιστος μοχλοβραχίονας επαναφοράς θα πρέπει να ικανοποιεί τις ακόλουθες εξισώσεις:

$$GZ_m \geq 0.0215B \quad (7)$$

$$GZ_m \geq 0.275 (m) \quad (8)$$

Βασικές Αρχές που διέπουν τα ανωτέρω τρία κριτήρια.

A. GM-Standard

Αυτό το κριτήριο καθορίζει την αρχική ευστάθεια των πλοίων, δηλαδή το ελάχιστο επιτρεπόμενο μετακεντρικό ύψος. Λαμβάνεται υπόψη τόσο η ροπή λόγω ανέμου αλλά και λόγω μετακίνησης των επιβατών στο πλοίο. Το κριτήριο αυτό βασίζεται στην υπόθεση, ότι το πλοίο πρέπει να έχει ένα περιθώριο ύψους εξάλων ακόμη και όταν υπόκειται σε αυτές τις δύο ροπές. Ειδικότερα το πλοίο δεν θα πρέπει να αποκτά εγκάρσια κλίση μεγαλύτερη της γωνίας ανατροπής φ_c υπό την επίδραση των εξωτερικών δυνάμεων, δηλαδή:

$$GM \geq (M_w + M_p)W \tan \varphi_c \quad (9)$$

Όπου:

- M_w = ροπή λόγω ανέμου σταθερής έντασης
- M_p = ροπή λόγω μετακίνησης επιβατών

Ακόμη στο κριτήριο αυτό θεωρήθηκε ότι η μέγιστη γωνία εγκάρσιας κλίσης περιορίζεται στο 80% του ύψους εξάλων, αφήνοντας ένα περιθώριο τόσο για κύματα όσο και για άλλα φαινόμενα. Συνεπώς ισχύει:

$$\tan \varphi_c = \frac{2(0.8f)}{B} = 1.6fB \quad (10)$$

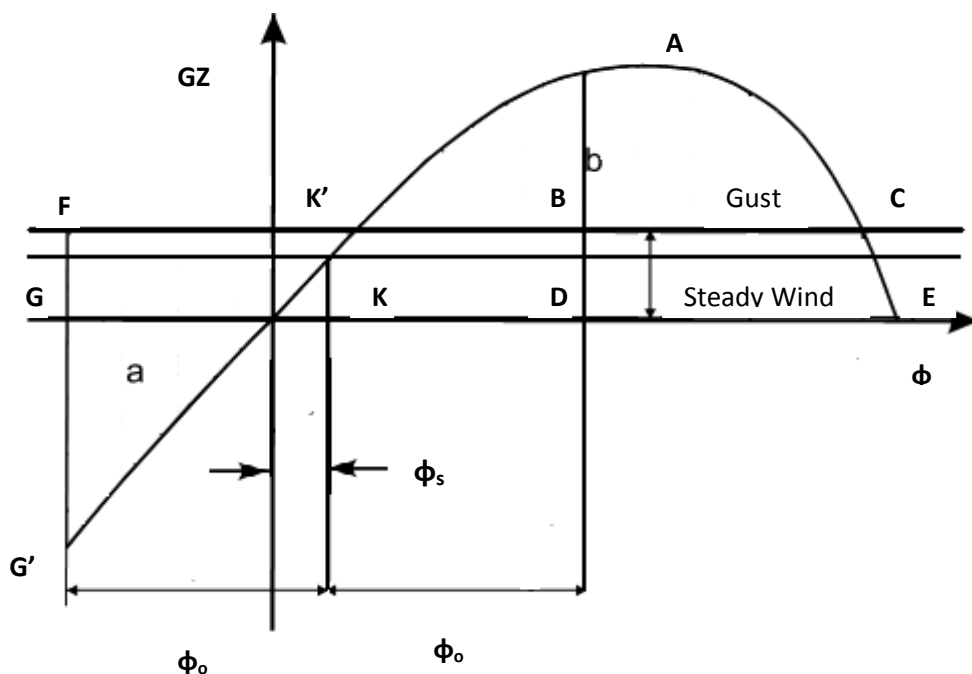
Σε όλα τα πλοία θα πρέπει να αποφεύγονται οι ιδιαίτερα μεγάλες γωνίες εγκάρσιας κλίσης όσο περιθώριο και αν υπάρχει όσον αφορά το ύψος εξάλων. Το ύψος εξάλων δίνεται από τους ακόλουθους τύπους:

$$f \leq \frac{1}{2} B \tan 20^\circ \quad (11)$$

$$f \leq \frac{B}{5} \quad (12)$$

B. S_d -Standard

Αυτό το κριτήριο ευστάθειας καθορίζει την δυναμική ευστάθεια των πλοίων, πρόκειται για ένα ενεργειακό ισοδύναμο και θεωρεί ότι το πλοίο υπόκειται στην επίδραση ανέμου και κυματισμού δυσμενέστερων συνθηκών αυτών που κανονικά συναντά.



Σχήμα 3.2

Σύμφωνα με το σχήμα 3.2, αρχικά το πλοίο υπόκειται σε πλάγιο άνεμο σταθερής έντασης ανεξάρτητο από την γωνία εγκάρσιας κλίσης. Το πλοίο υπό την επίδραση του ανέμου αποκτά τελικά μια θέση ισορροπίας που αντιστοιχεί σε γωνία κλίσης ϕ_s . Το πλοίο από τη θέση ισορροπίας ϕ_s , υπό την επίδραση πλευρικού κύματος εκτελεί ελεύθερα, κίνηση διατοιχισμού σε μία νέα γωνία κλίσης ϕ_o . Όταν το πλοίο βρίσκεται στη θέση ϕ_o προσήνεμα δέχεται μία ριπή ανέμου.

Για να έχει λοιπόν επαρκή ευστάθεια και να μην ανατραπεί θα πρέπει να πληρούνται οι ακόλουθες ανισότητες εμβαδών :

$$ABC > BFGD$$

ή

$$AK'C > K'FG'$$

$$\text{Θέτουμε } AK'C = b \text{ και } K'FG' = a \text{ και } C = \frac{b}{a} \quad (13)$$

Συνεπώς θα πρέπει η σταθερά C να είναι μεγαλύτερη της μονάδος για να μην ανατραπεί το πλοίο. Ο συντελεστής C προσδιορίστηκε εμπειρικά από ήδη υπάρχοντα στοιχεία βυθισμένων και υπαρχόντων πλοίων.

- **Περιγραφή καιρικών συνθηκών που θεωρήθηκαν στο συγκεκριμένο κριτήριο.**

Πλευρικός άνεμος σταθερής έντασης

Όπως έχουμε ήδη αναφέρει έγινε διαχωρισμός των ανέμων, που συναντούν τα πλοία σε τέσσερις κατηγορίες, τις ακόλουθες:

- a. Barometric gradients
- b. Fronts
- c. Lows
- d. Typhoons

Όταν ένας τυφώνας περάσει από τη θέση ενός πλοίου, αρχικά στο κέντρο του τυφώνα η ένταση του ανέμου είναι πολύ ισχυρή και προκαλεί μη κανονικά κύματα, συνεπώς η κίνηση διατοιχισμού δεν είναι τόσο έντονη, λόγω τυχαίων κυματισμών. Όμως κατά την απομάκρυνση του τυφώνα η ταχύτητα του ανέμου μειώνεται σταδιακά και έτσι τα κύματα αρχίζουν να αποκτούν μια σχετική κανονικότητα, με αποτέλεσμα να έχουμε πιο έντονη κίνηση διατοιχισμού. Τέλος, στο πλοίο επιδρά άνεμος σχεδόν σταθερής έντασης με αποτέλεσμα να έχουμε αρμονικούς κυματισμούς και έντονη κίνηση διατοιχισμού, ενώ η ταχύτητα ανέμου εξακολουθεί να μειώνεται.

Με κύριο στόχο του κριτηρίου αυτού να ληφθούν υπόψη οι δυσμενέστερες συνθήκες ανέμου που είναι δυνατόν να συναντήσουν τα πλοία καθώς και από δεδομένα πλοία που συγκεντρώθηκαν σε πίνακες και διαγράμματα τελικά θεωρήθηκε ότι ο άνεμος σταθερής έντασης έχει ταχύτητα 26m/sec για την κατηγορία Ocean-going, 19m/sec για την κατηγορία Coasting-I και 15m/sec για την κατηγορία Coasting-II.

Επίδραση ριπής ανέμου

Όπως ήδη αναφέραμε το κριτήριο θεωρεί ότι το πλοίο δέχεται τη ριπή ανέμου όταν βρίσκεται στην ακραία θέση ταλάντωσης προσήνεμα. Ο προσδιορισμός του βαθμού διακύμανσης στην ταχύτητα ανέμου ή gustiness έγινε μέσω ενός διαγράμματος του gustiness συναρτήσει της μέσης ταχύτητας ανέμου, που υπάρχει στο σχετικό Ιαπωνικό Κριτήριο.

Θεωρήθηκε, λοιπόν, για τον βαθμό διακύμανσης ένας μέσος όρος των τιμών που αντιστοιχούν σε τυφώνες, διότι οι τιμές αυτές αντιστοιχούν σε κυματισμούς σχετικά μεγάλης διάρκειας. Ενώ στην πραγματικότητα οι κυματισμοί που οδηγούν στην ανατροπή τα πλοία είναι αυτοί που αντιστοιχούν στο μισό της ιδιοπεριόδου διατοιχισμού του πλοίου περίπου 3 με 8 sec. Έτσι η ριπή έλαβε την τιμή $1.23 = \sqrt{1.5}$ (η μέγιστη τιμή του διαγράμματος είναι στο 1.7), δηλαδή η ταχύτητα ριπής ανέμου είναι κατά $\sqrt{1.5}$ μεγαλύτερη της ταχύτητας σταθερού ανέμου. Έτσι προκύπτει ο μοχλοβραχίονας ριπής ανέμου $1.5D_w$.

Κυματικό περιβάλλον

Ο Yamagata εξέφρασε το εύρος της κίνησης διατοιχισμού σε συντονισμό συναρτήσει:

- της κλίσης κύματος «γ»
- του wave steepness «δ»
- και του συντελεστή απόσβεσης του Bertin «N»

Έστω το πλοίο δέχεται την επίδραση κυμάτων που προκλήθηκαν από άνεμο συγκεκριμένης ταχύτητας και εκτελεί κίνηση διατοιχισμού. Θεωρείται ότι το πλοίο βρίσκεται σε συντονισμό με το κυματικό περιβάλλον, δηλαδή η ιδιοπερίοδος του πλοίου ταυτίζεται με την περίοδο των κυματισμών, έτσι το πλοίο θα έχει τη μέγιστη απόκριση σε διατοιχισμό.

Το Ιαπωνικό κριτήριο για τον υπολογισμό του wave steepness βασίστηκε στη σχέση που συνδέει τα μεγέθη «δ» και «β», η οποία δόθηκε στην γνωστή εργασία των Sverdrup και Munk, (Sverdrup&Munk, H.O. Pub601).

Όπου β είναι ένας συντελεστής που εκφράζει την διάρκεια του κύματος και δίνεται από την ακόλουθη σχέση: wave age=wave velocity/wind velocity.

Για δεδομένη ταχύτητα ανέμου, 26 m/sec σε αυτή την περίπτωση, το wave steepness δίνεται από μία εξίσωση συναρτήσει της περιόδου του κύματος μέσω της ακόλουθης σχέσης, που συνδέει την ταχύτητα του κύματος και συνεπώς την διάρκεια του κύματος με την περίοδο κύματος:

$$\text{Wave velocity} = C = \sqrt{\frac{g}{2\pi} \lambda} = \frac{g}{2\pi} T \quad (14)$$

Η σχέση που συνδέει το wave steepness με την περίοδο του κύματος είναι η ακόλουθη:

$$s = 0.151 - 0.0072T \quad (15)$$

Η δυσμενέστερη κατάσταση για την κίνηση διατοιχισμού του πλοίου υφίσταται όταν έχουμε κατάσταση συντονισμού για το πλοίο και το κυματικό περιβάλλον. Συνεπώς για την κίνηση διατοιχισμού σε κατάσταση συντονισμού το wave steepness υπολογίζεται από τη φυσική περίοδο διατοιχισμού του πλοίου σύμφωνα με τον αντίστοιχο πίνακα που συνδέει T και δ. Οι σχετικοί πίνακες και διαγράμματα υπάρχουν στο Ιαπωνικό κριτήριο.

Πλάτος διατοιχισμού σε συντονισμό με κανονικούς κυματισμούς

Η γωνία εγκάρσιας κλίσης, λόγω κίνησης διατοιχισμού σε κανονικούς κυματισμούς σε κατάσταση συντονισμού δίνεται από τον ακόλουθο τύπο:

$$\varphi_{\text{syn}} = \sqrt{\frac{\pi\gamma H_w}{2N}} \quad (16)$$

Η κλίση του κύματος «γ» προσδιορίζεται σύμφωνα με την εξίσωση της μελέτης του Y.Watanabe (σχέση 5, σελίδα 10). Σύμφωνα με στοιχεία υπαρχόντων πλοίων ή βυθισμένων ο συντελεστής απόσβεσης Bertin θεωρήθηκε 0.02, διότι δεν υπήρχε κατάλληλη φόρμουλα που να συνδέει την απόσβεση με τα χαρακτηριστικά του εκάστοτε πλοίου.

Το συγκεκριμένο κριτήριο υποθέτει ότι το πλοίο δέχεται κανονικούς κυματισμούς, ενώ οι πραγματικοί θαλάσσιοι κυματισμοί είναι τυχαίοι. Συνεπώς το θαλάσσιο περιβάλλον που υποθέτει είναι δυσμενέστερο από το αντίστοιχο πραγματικό κυματικό περιβάλλον, λόγω της περιοδικότητας στη διέγερση. Υιοθετήθηκε, λοιπόν η άποψη στο Ιαπωνικό Κριτήριο, ότι το εύρος διατοιχισμού πρέπει να μειωθεί στο 70% του εύρους που θα αντιστοιχούσε σε διέγερση από αρμονικό κυματισμό φ_{syn} . Βάσει μελέτης (Nissei Maru, 1954) αυτό αντιστοιχίστηκε με τη μέγιστη τιμή της κλίσης του πλοίου στη διάρκεια 50 κύκλων τυχαίων κυματισμών. Το πλάτος διατοιχισμού υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$\varphi_o = 0.7 \cdot \varphi_{\text{syn}} = \sqrt{\frac{138\gamma\delta}{N}} \quad (17)$$

C. GZ_m-Standard

Το συγκεκριμένο κριτήριο καθορίζει την ευστάθεια μέσω του μέγιστου μοχλοβραχίονα επαναφοράς και εφαρμόζεται στα ακτοπλοϊκά πλοία και σε πλοία ανώτερης κατηγορίας.

Ο υπολογισμός του GZ_m λαμβάνοντας υπόψη την επίδραση των εξωτερικών δυνάμεων δεν είναι ιδιαίτερος εύκολος. Ωστόσο συνυπολογίζεται η επίδραση της ροπής λόγω μετακίνησης βαρών στο πλοίο.

- **Ρωσία**

Στην Ρωσία τον Φεβρουάριο του 1982, IMCO Stab27/5/3,[USSR,1982] προτάθηκε ένας εναλλακτικός τρόπος υπολογισμού του εύρους διατοιχισμού. Αυτή η μέθοδος περιλήφθηκε στο «Rules of the Register of Shipping of the USSR». Η προσέγγιση της μεθόδου έγινε μέσω υπολογισμών του εύρους διατοιχισμού σε θάλασσες με μη κανονικούς κυματισμούς για διάφορους τύπους πλοίων. Οι υπολογισμοί βασίστηκαν σε θεμελιώδεις εξισώσεις κίνησης με τους συντελεστές που λήφθηκαν από πειραματικά δεδομένα. Σε αντίθεση με το Ιαπωνικό Κριτήριο αυτή η μέθοδος λαμβάνει υπόψη την εξάρτηση του συντελεστή απόσβεσης, που εμφανίζεται στην κίνηση διατοιχισμού λόγω της μορφής της γάστρας του πλοίου, καθώς και την ύπαρξη παρατροπιδίων και τέλος βασίζεται σε πραγματικά δεδομένα και συνυπολογίζει την επίδραση του μετακεντρικού ύψους. Ο τύπος υπολογισμού του εύρους διατοιχισμού είναι ο ακόλουθος:

$$\varphi_1 = k \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot Y \quad (18)$$

Όπου:

- οι συντελεστές k , X_1 , X_2 είναι αδιάστατοι συντελεστές και δίνονται από πινάκες 3.3, 3.4 και 3.5 αντίστοιχα.
- και ο Y μετράτε σε μοίρες σύμφωνα με τον ακόλουθο πίνακα 3.6.

$\frac{A_k \cdot 100}{L \cdot B}$	k
0	1.0
1.0	0.98
1.5	0.95
2.0	0.88
2.5	0.79
3.0	0.74
3.5	0.72
≥ 4.0	0.70

Πίνακας 3.3

B/d	X_1
≤ 2.4	1.0
2.5	0.98
2.6	0.96
2.7	0.95
2.8	0.93
2.9	0.91
3.0	0.90
3.1	0.88
3.2	0.86
3.4	0.82
≥ 3.5	0.80

Πίνακας 3.4

C_B	X_2
≤ 0.45	0.75
0.50	0.82
0.55	0.89
0.60	0.95
0.65	0.97
≥ 0.70	1.0

Πίνακας 3.5

$\frac{\sqrt{GM}}{B}$	Y
≤ 0.04	24.0
0.05	24.0
0.06	27.0
0.07	29.0
0.08	30.7
0.09	32.0
0.10	33.4
0.11	34.4
0.12	35.3
≥ 0.13	36.0

Πίνακας 3.6

Όπου: A_k = συνολική επιφάνεια παρατροπιδίων, τρόπιδας

- **ΗΠΑ**

Ανάλογες έρευνες με αυτές των ανωτέρω χωρών διεξήχθησαν και στο Ναυτικό των ΗΠΑ, για τα πολεμικά πλοία. Καθοριστική περίοδο για τα Κριτήρια Άθικτης Ευστάθειας των πλοίων αποτέλεσε ο δεύτερος Παγκόσμιος Πόλεμος, καθώς πολλά πλοία καταστράφηκαν. Έως και πριν τον πόλεμο μέτρο της ευστάθειας των πλοίων αποτελούσε ο μοχλοβραχίονας επαναφοράς και το μετακεντρικό ύψος των πλοίων.

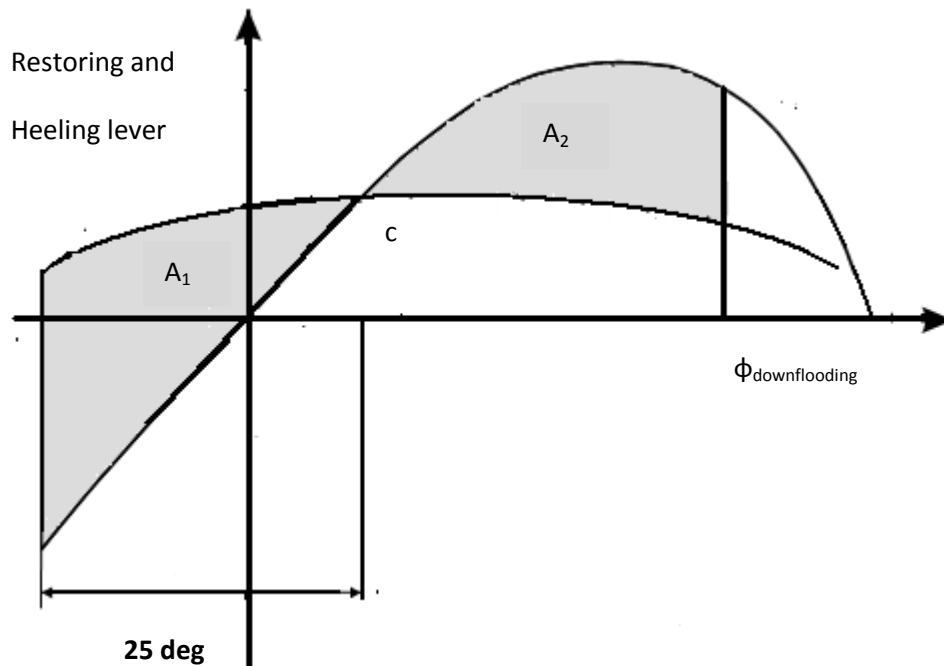
Για όλα τα πλοία που καταστράφηκαν έγινε συλλογή στοιχείων. Ακόμη, χρήσιμα στοιχεία για την άθικτη ευστάθεια των πλοίων συγκεντρώθηκαν μετά τον τυφώνα τον Δεκέμβριο του 1944.

Το έτος 1946 συγκεντρώθηκαν όλα τα στοιχεία από τις καταστροφές των πλοίων. Η νέα μεταβλητή, που αναλύθηκε για τα νέα κριτήρια ήταν η ταχύτητα του ανέμου, όπως προέκυψε από τον τυφώνα. Έπειτα μελετήθηκε ο μοχλοβραχίονας επαναφοράς των πλοίων και η δυναμική τους ευστάθεια.

Όσον αφορά την ταχύτητα του ανέμου, λόγω των στοιχείων, που συγκεντρώθηκαν κατά τον τυφώνα, θεωρήθηκε λογικό κριτήριο επιβίωσης σε τροπική καταιγίδα μία ταχύτητα ανέμου 90 knots. Συνεπώς η ελάχιστη ταχύτητα ανέμου, που προτάθηκε για ήδη υπάρχοντα πλοία ήταν 90 knots. Και νέα σχέδια πλοίων ήταν 100 knots.

- **Sarchin & Goldberg, 1962**

Το 1962 οι Sarchin & Goldberg έκαναν μια τροποποίηση του Κριτηρίου Καιρού γνωστή ως «The naval version of the weather criterion». Η νέα αυτή εκδοχή αφορούσε στα πολεμικά πλοία και ήταν πιο αυστηρή απ' το Ιαπωνικό κριτήριο, ωστόσο εμμένει στην ίδια αρχή με ορισμένες διαφορές.



Σχήμα 3.3

- Η ταχύτητα ανέμου ορίζεται στους 90kn και η ροπή ανέμου δεν είναι ευθεία παράλληλη στον άξονα της γωνίας εγκάρσιας κλίσης, αλλά μεταβάλλεται με το τετράγωνο της γωνίας όπως φαίνεται στο σχήμα 3.3.
- Ακόμη το εύρος διατοιγισμού μετά την επίδραση πλευρικού κύματος θεωρείται 25degrees. Συνεπώς αναιρούνται τα χαρακτηριστικά απόσβεσης του σκάφους που θεωρεί ο Yamagata και ο IMO.
- Επίσης η νέα γωνία ισορροπίας, δηλαδή η γωνία στο σημείο c δεν πρέπει να υπερβαίνει τις 20 degrees και ο μοχλοβραχίονας επαναφοράς στο σημείο αυτό πρέπει να είναι μικρότερος από το 60% του μέγιστου μοχλοβραχίονα επαναφοράς.
- Τέλος θα πρέπει $A_2 \geq 1.4A_1$.

IMO – Κριτήρια ευστάθειας

Για την αποφυγή πιθανών ανατροπών πλοίων ο IMO, από την δεκαετία του '50 όρισε ορισμένα Κριτήρια για την άθικτη ευστάθεια των πλοίων. Αυτά τα κριτήρια άθικτης ευστάθειας καλύπτουν διάφορους τύπους πλοίων και αποτελούν κανονισμούς τους οποίους πρέπει να πληρούν τα πλοία ταυτόχρονα. Κάθε ένας από τους ακόλουθους κανονισμούς έχει συμβάλει αδιαμφισβήτητα στην ασφαλέστερη ναυπήγηση των πλοίων. Οι κανονισμοί είναι οι ακόλουθοι:

➤ **IMO RES.A167(“STATISTICAL CRITERION”) 1968**

Ο συγκεκριμένος κανονισμός προήρθε από τις μελέτες του J.Rahola,1939 και αναπτύχθηκε λαμβάνοντας υπόψη το αρχικό μετακεντρικό ύψος, τον βραχίονα στατικής και τον βραχίονα δυναμικής ευστάθειας, τα οποία έπρεπε να πληρούν ορισμένα πρότυπα που λαμβάνονται εμπειρικά από τις στατιστικές των ατυχημάτων. Είναι απλός στην εφαρμογή, αλλά δεν περιέχει μοντελοποίηση είτε ανέμου είτε κυματικού περιβάλλοντος. Ακόμη το επίπεδο ασφαλείας είναι άγνωστο.

➤ **IMO RES.A562 (“WEATHER CRITERION”) 1985**

Το κριτήριο καιρού, γνωστό ως «Severe Wind and Rolling Criterion», που εφαρμόζουμε ακόμη και σήμερα ως μέτρο για την ασφάλεια των πλοίων, όπως προαναφέραμε, προέκυψε από τον συγκερασμό βασικών αρχών του Ιαπωνικού Κριτηρίου 1957 και αυτών που θεώρησε η Ρωσία το 1982, κυρίως σε ότι αφορά το πλάτος διατοιχισμού και το συντελεστή απόσβεσης λόγω παρατροπιδίων και τρόπιδας. Στο κριτήριο καιρού λαμβάνεται υπόψη και η επίδραση εξωτερικών δυνάμεων που μπορεί να οδηγήσουν σε μη επιτρεπτές γωνίες εγκάρσιας κλίσης και σε ανατροπή του πλοίου.

➤ **MSC CIRCULAR 707 OF 1995**

Η εγκύκλιος αυτή δίνει οδηγίες για την αποφυγή επικίνδυνων φαινομένων λόγω διαμήκων ή υπό γωνία κυματισμών στο πλοίο. Δεν αφορά τόσο την ευστάθεια και πρωτεύων μέλημα είναι η ασφάλεια στο δεδομένο κυματικό περιβάλλον. Είναι εύκολη η εφαρμογή της, αλλά δεν περιέχει καμία πρόβλεψη σχετικά με πρότυπα ευστάθειας ή ικανότητας ελιγμών.

IMO RES.A562 (“WEATHER CRITERION”) 1985

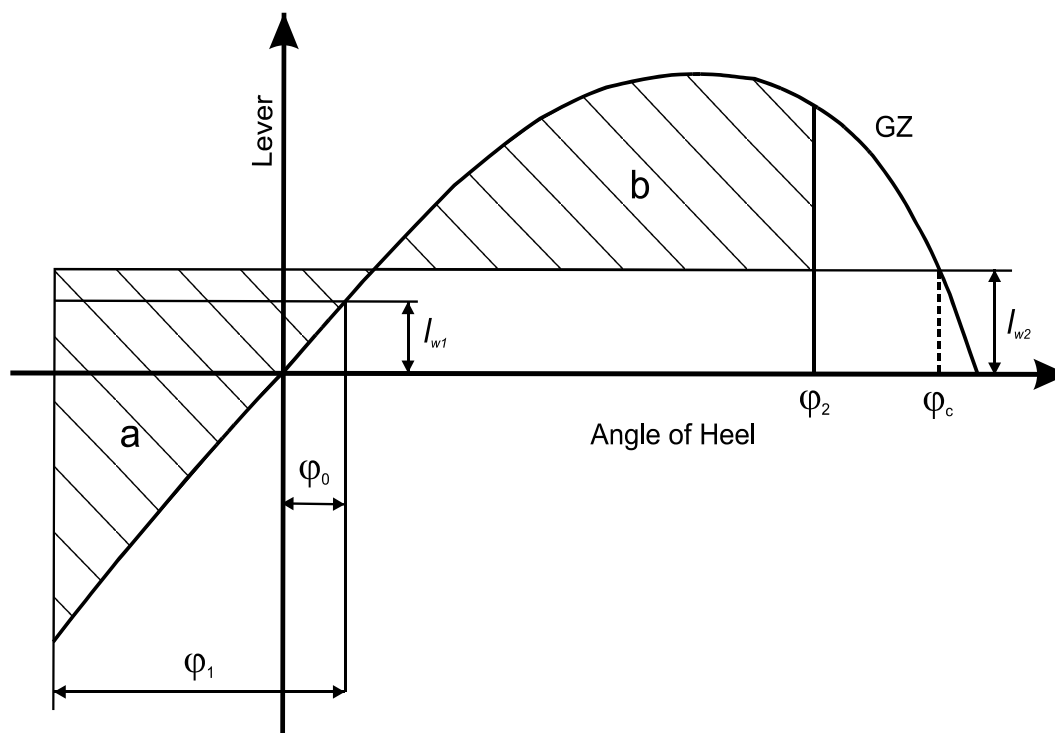
Το κριτήριο καθορίζει την ικανότητα ενός πλοίου να αντέχει ισχυρούς ανέμους και την κίνηση διατοιχισμού, λόγω κυματισμών σε ένα μέγιστο πλάτος συγκρίνοντας την ροπή επαναφοράς του πλοίου με την ροπή λόγω εξωτερικών δυνάμεων. Στο κριτήριο καιρού, όπως και στο Ιαπωνικό κριτήριο, λαμβάνονται υπόψη κατά το βέλτιστο δυνατό τρόπο οι εξωτερικές δυνάμεις, ωστόσο έχουν γίνει ορισμένες απλουστεύσεις όσον αφορά τη φυσική του πλοίου κατά την κίνηση στην θάλασσα, για παράδειγμα οι ροπές επαναφοράς υπολογίζονται σε ήρεμο νερό.

Βασικές αρχές του Κριτηρίου Καιρού (severe wind and rolling criterion)

Οι βασικές αρχές του Κριτηρίου Καιρού όσον αφορά:

- a. στην κίνηση του πλοίου
- b. στην ταχύτητα ανέμου σταθερής έντασης
- c. στους πλευρικούς κυματισμούς που δέχεται το πλοίο
- d. στις εξωτερικές δυνάμεις
- e. και στην ριπή ανέμου

έμειναν ίδιες με αυτές που είχαν θεωρηθεί στο Ιαπωνικό Κριτήριο Άθικτης ευστάθειας το 1957(YAMAGATA,1957), με ορισμένες αλλαγές όσον αφορά το πλάτος διατοιχισμού του πλοίου και τον υπολογισμό της ιδιοπεριόδου του πλοίου, οι οποίες θα αναλυθούν στην συνέχεια.



Σχήμα 3.4

1. Αρχικά το πλοίο υπόκειται σε πλάγιο άνεμο σταθερής έντασης. Αυτός ο άνεμος αντιστοιχεί σε ένα μοχλοβραχίονα σταθερό και ίσο με I_{w1} , ανεξάρτητο από την γωνία εγκάρσιας κλίσης. Το πλοίο υπό την επίδραση του ανέμου αποκτά τελικά μια θέση ισορροπίας που αντιστοιχεί σε γωνία κλίσης φ_0 .
2. Έπειτα το πλοίο από τη θέση ισορροπίας φ_0 εκτελεί ελεύθερα, κίνηση διατοιχισμού υπό την επίδραση πλευρικού κύματος σε μία νέα γωνία κλίσης φ_1 , προσήνεμα.
3. Όταν το πλοίο βρίσκεται στη θέση φ_1 δέχεται μία ριπή ανέμου, η οποία αντιστοιχεί σε ένα μοχλοβραχίονα ανέμου I_{w2} .
4. Πρέπει το εμβαδόν b να είναι μεγαλύτερο ή ίσο του a .
5. Θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη οι επιδράσεις ελευθέρων επιφανειών στις βασικές καταστάσεις φόρτωσης.
6. Η γωνία κλίσης φ_0 πρέπει να περιοριστεί στις 16° ή στο 80% της γωνίας βύθισης καταστρώματος, όποια από τις δύο είναι μικρότερη επιλέγεται.

Προσδιορισμός των γωνιών του διαγράμματος:

φ_0 = γωνία ευσταθούς ισορροπίας μετά την επίδραση σταθερού ανέμου.

φ_1 = γωνία εγκάρσιας κλίσης -προσήνεμα- μετά το διατοιχισμό υπό την επίδραση κύματος και ανέμου.

φ_2 = γωνία κατάκλισης φ_f ή 50° ή γωνία ανατροπής φ_c , όποια είναι μικρότερη.

φ_f = γωνία κατάκλισης, στην οποία ανοίγματα στη γάστρα, στις υπερκατασκευές, τα οποία δεν κλείνουν υδατοστεγώς κατακλύζονται.

Στο κριτήριο καιρού υποθέτουμε, ότι αφήνοντας το πλοίο ελεύθερο να εκτελέσει κίνηση διατοιχισμού από την εκτός ισορροπίας θέση φ_1 , με μηδενική αρχική γωνιακή ταχύτητα, δεν θα υπερβεί την περιοριστική γωνία φ_2 κατά τη διάρκεια του ακόλουθου μισού κύκλου. Συνεπώς όσον αφορά το ενεργειακό ισοδύναμο το πλοίο πρέπει να έχει επαρκή δυναμική ενέργεια ώστε να αποτρέψει περιστροφή με γωνία κλίσης μεγαλύτερη από την περιοριστική γωνία στην υπήνεμη πλευρά φ_2 .

Παρόλο που η ενέργεια κυματισμού λαμβάνεται υπόψη για τον υπολογισμό της φ_1 , η επίδραση του κυματισμού κατά την υπήνεμη πλευρά δεν λαμβάνεται υπόψη για την τελική μισή περιστροφή έτσι θεωρούμε ότι το πλοίο αφήνεται σε ήρεμο νερό από την εκτός ισορροπίας θέση φ_1 . Επομένως μόνο οι δυναμικές ενέργειες στην αρχική και τελική θέση συνυπολογίζονται στο ενεργειακό ισοδύναμο.

Ορισμός βασικών μεγεθών που υπεισέρχονται στο Κριτήριο Καιρού

Ορισμός των μοχλοβραχιόνων ανέμου l_{w1} και l_{w2} :

$$l_{w1} = \frac{P \cdot A \cdot Z}{1000 \cdot g \cdot \Delta} (m) \quad (19)$$

$$l_{w2} = 1.5l_{w1} \quad (20)$$

Όπου:

- $P = 504 \text{ N/m}^2$ σταθερή πίεση ανέμου
- $A =$ προβεβλημένη πλευρική επιφάνεια του πλοίου και του καταστρώματος, πάνω από την ίσαλο επιφάνεια πλεύσης.
- $Z =$ κατακόρυφη απόσταση του κέντρου της επιφάνειας A έως το κέντρο της πλευρικής επιφάνειας του πλοίου, που βρίσκεται κάτω από την ίσαλο επιφάνεια πλεύσης.
- $\Delta =$ εκτόπισμα
- $g = 9.81 \text{ m/s}^2$

Ορισμός της γωνίας εγκάρσιας κλίσης φ_1 (roll back angle)

Ο τύπος υπολογισμού προέρχεται από τον συνδυασμό των υπολογιστικών μεθόδων που προτάθηκαν από την Ιαπωνία και την USSR, και βασίζονται στις εργασίες του Yamagata (1959) και του Lugovski (1963).

$$\varphi_1 = 109 \cdot k \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot \sqrt{r \cdot s}$$

Ο τύπος με βάση τον οποίο προκύπτει το εύρος διατοιχισμού (21), προκύπτει από τη μόνιμη λύση της απόκρισης σε διατοιχισμό για την κατάσταση συντονισμού, με βάση την ακόλουθη εξίσωση διατοιχισμού:

$$\ddot{\theta} + \beta\dot{\theta}|\dot{\theta}| + \omega_0^2\theta = rAk\omega_0^2 \cos(\omega t) \quad (22)$$

Η εξίσωση αυτή χρησιμοποιεί ως βάση την απόλυτη γωνία διατοιχισμού θ και στο δεξιό μέλος εμφανίζεται το τετράγωνο της ιδιοσυχνότητας αντί της συχνότητας διέγερσης, διότι σύμφωνα με το Κριτήριο Καιρού το πλοίο βρίσκεται σε συντονισμό με το κυματικό περιβάλλον. Ακόμη, ο όρος της απόσβεσης είναι τετραγωνικός σύμφωνα με την αντίληψη ότι η δύναμη ή η ροπή αντίστασης κατά την κίνηση σε υγρό είναι ανάλογη του τετραγώνου της ταχύτητας και η ροπή επαναφοράς είναι γραμμική.

Ο συντελεστής r ονομάζεται συντελεστής δρώσας κλίσης κύματος και περιλαμβάνει το λόγο των ροπών αδρανείας αλλά και υδροδυναμικές επιδράσεις λόγω του πεπερασμένου μεγέθους (ως προς το πλάτος και το βύθισμα) του πλοίου, δεδομένου ότι η βάση της εξίσωσης 22 ήταν η υπόθεση του Froude για πολύ μικρών διαστάσεων στερεό που ακολουθεί την κίνηση των μορίων του νερού. Ο Yamagata είχε θεωρήσει σταθερό τον συντελεστή απόσβεσης Bertin ίσο με 0.02 για μέσο πλάτος διατοιχισμού ίσο με 20° .

Ο Lugovskii έσχηματίσθη στην διαδικασία υπολογισμού του πλάτους διατοιχισμού τους συντελεστές απόσβεσης \mathbf{k} , \mathbf{X}_1 , \mathbf{X}_2 , οι οποίοι συνδέουν την απόκριση κάθε πλοίου με την γεωμετρία του. Ο πρώτος συντελεστής περιλαμβάνει την επίδραση στην απόσβεση του λόγου του πλάτους προς το βύθισμα $-\mathbf{B}/\mathbf{d}$, ο δεύτερος την επίδραση του συντελεστή γάστρας $-\mathbf{C}_B$, και ο συντελεστής \mathbf{k} είναι ο αντίστοιχος συντελεστής απόσβεσης για τα παρατροπίδια.

Οι πίνακες για τον υπολογισμό των συντελεστών X_1, X_2 δίνονται στις σελίδες 18 και 19 από τους πίνακες 3.4 και 3.5, αντίστοιχα από τις θεωρήσεις για την ευστάθεια της Ρωσίας. Ο συντελεστής k δίνεται από τον πίνακα 3.3 στη σελίδα 18 για πλοία με παρατροπίδια και τρόπια. Ενώ:

- ✓ $k=1.0$ για πλοίο χωρίς παρατροπίδια και χωρίς τρόπια
- ✓ $k=0.7$ για πλοίο με αιχμηρά ύφαλα

- Ο συντελεστής r –κλίση κύματος- δίνεται από τον ακόλουθο τύπο:

$$r = 0.73 \pm 0.6 \frac{OG}{d} \quad (23)$$

- OG = απόσταση του κέντρου βάρους και της ισάλου πλευσης (+ εάν το κέντρο βάρους είναι πάνω από την WL , - εάν είναι κάτω από την WL)
- d = μέσο βύθισμα του πλοίου

- Ο συντελεστής s –wave steepness- δίνεται από τον πίνακα 3.7 συναρτήσει της ιδιοπεριόδου ταλάντωσης του πλοίου. Η ιδιοπερίοδος ταλάντωσης του πλοίου εξαρτάται από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του πλοίου, και υπολογίζεται από τον ακόλουθο τύπο, που προτάθηκε το 1981 από τον IMO Stab/95(Ιαπωνία, 1981):

$$T = \frac{2 \cdot C \cdot B}{\sqrt{GM}} \quad (24)$$

$$C = 0.373 + 0.023 \frac{B}{d} - 0.043 \frac{L}{100} \quad (25)$$

GM = είναι το μετακεντρικό ύψος του πλοίου

T	s
≤6	0.100
7	0.098
8	0.093
12	0.065
14	0.053
16	0.044
18	0.038
20	0.035

Πίνακας 3.7

Η αρχική θεώρηση του Κριτηρίου Καιρού βασίζεται σε πλοία με τα εξής χαρακτηριστικά:

- $B/d \leq 3.5$ (26)
- $-0.3 \leq (KG/d-1) \leq 0.5 \rightarrow r \leq 1$ (27)
- $T \leq 20 \text{sec}$ (28)
- $0.45 \leq C_B \leq 0.70$ (29)

➤ **Τροποποιήσεις «Κριτηρίου Καιρού» στην σύνοδο SLF48 (2005)**

Από την θέσπιση του «Κριτηρίου Καιρού» το έτος 1985 από τον IMO έως το έτος 2005 καμία τροποποίηση του δεν πραγματοποιήθηκε. Ο A.Francescutto (2002) κάνοντας μία κριτική ανασκόπηση του Κριτηρίου Καιρού επισήμανε, πως η εφαρμογή του κριτηρίου καθίσταται προβληματική, διότι λαμβάνει υπόψη μόνο την επίδραση πλευρικών ανέμων και κυματισμών, ενώ δεν υπάρχει κανένας εσωτερικός βαθμός ελευθερίας (κίνηση φορτίου, υποβατών κτλ.). Ακόμη επισήμανε ότι τα επίπεδα ασφαλείας που παρέχει δεν είναι γνωστά. Επίσης, ο Κ. Σπύρου (2002), έκανε μία ανασκόπηση του κριτηρίου και πρότεινε την ριζική αλλαγή του. Ειδικότερα πρότεινε την σύσταση ενός εναλλακτικού κριτηρίου, που θα λαμβάνει υπόψη του την μη γραμμικότητα των δυναμικών συστημάτων και θα βασίζεται σε εξελιγμένες τεχνικές δυναμικής ανάλυσης, σε αντίθεση με το δεδομένο κριτήριο που βασίζεται σε εμπειρικές διαδικασίες.

Στη σύνοδο SLF45 το 2002 ορισμένες χώρες εξέφρασαν τις ενστάσεις τους αναφορικά με το σχετικό Κριτήριο και την εφαρμογή του στα σύγχρονα πλοία. Ειδικότερα η Γερμανία και η Ιταλία υποστήριξαν ότι το Κριτήριο Καιρού είναι αρκετά περιοριστικό όσον αφορά τον σχεδιασμό των Ro-Pax ferries και των μεγάλων επιβατηγών πλοίων. Οι Ηνωμένες Πολιτείες (2002) ανέφεραν ότι τα Panamax Containerships που πληρούν τα κριτήρια άθικτης ευστάθειας υφίστανται καταστροφή φορτίου, λόγω παραμετρικού διατοιχισμού. Αυτές οι κατηγορίες πλοίων λόγω της μεγάλης προβεβλημένης πλευρικής επιφάνειας τους έχουν αρκετά ψηλά το κέντρο βαρύτητας τους, και αντιμετωπίζουν ανέμους υψηλής εντάσεως. Συνεπώς το Κριτήριο Καιρού (IMO, 1985) δεν συμβαδίζει με τις νέες τάσεις στον σχεδιασμό των πλοίων και οδηγεί σε αυστηρές προβλέψεις, διότι οι συντελεστές που υπεισέρχονται στο κριτήριο έχουν προκύψει από στατιστικές αναλύσεις πλοίων παλιάς κατασκευής και δεν είναι εφαρμόσιμοι σε αυτούς τους τύπους πλοίων.

Στα πλαίσια, λοιπόν αυτών των υποδείξεων ο IMO άρχισε να σκέφτεται την τροποποίηση του κώδικα άθικτης ευστάθειας των πλοίων και δημιούργησε μία ομάδα υπό την προεδρία του καθηγητή A.Francescutto. Η Γερμανία, η Δανία και η Αυστραλία πρότειναν την αντικατάσταση του Κριτηρίου Καιρού με κριτήρια βασισμένα σε πειράματα με τη χρήση μοντέλων και αριθμητικών προσομοιώσεων, ώστε να ανταποκρίνονται στα σύγχρονα πλοία. Η Ιταλία πρότεινε να τροποποιήσει τους εμπειρικούς συντελεστές που χρησιμοποιούνται στο Κριτήριο Καιρού. Όσον αφορά την Ιαπωνία, υποστήριξε ότι το Κριτήριο Καιρού διασφαλίζει την ευστάθεια των συμβατικών πλοίων και η εφαρμογή του είναι απαραίτητη.

Τα επόμενα χρόνια ο IMO προχώρησε μέσω συνόδων της επιτροπής SLF στην αναθεώρηση του Κριτηρίου Καιρού. Με την συμφωνία του IMO πραγματοποιήθηκαν έρευνες και πειράματα από την Ιαπωνία και την Ιταλία αναφορικά με τον τρόπο υπολογισμού του μοχλοβραχίονα ανέμου σταθερής έντασης $-I_{w1}$ - και του πλάτους διατοιχισμού $-\phi_1$ -, που υποθέτει το Κριτήριο Καιρού (IMO, 1985). Στη σύνοδο SLF48 το 2005, με την εναρμόνιση των αποτελεσμάτων των ερευνών της Ιαπωνίας και της Ιταλίας, οριστικοποιήθηκαν οι πρότυπες οδηγίες δοκιμών για τον υπολογισμό των I_{w1} και ϕ_1 . Κατά συνέπεια, η αναθεώρηση του Κριτηρίου Καιρού, που επιτρέπει τη χρήση των πρότυπων δοκιμών για τον υπολογισμό των I_{w1} και ϕ_1 συμφωνήθηκε στην SLF. Αυτές οι πρότυπες δοκιμές για τον υπολογισμό των μεγεθών, που προαναφέραμε υιοθετήθηκαν ως χωριστό όργανο, δηλ., MSC.1/Circ. 1200, Μάιος 2006.

SLF48 (2005) – Αναθεωρημένο Κριτήριο Καιρού

Οι βασικές αρχές του Κριτηρίου Καιρού διατηρήθηκαν ίδιες όπως αναφέρονται στις σελίδες: 22-25 (IMO RES.A562 (“WEATHER CRITERION”) 1985) με ορισμένες τροποποιήσεις όσον αφορά:

- i. τον υπολογισμό του μογλοβραχίονα ριπής ανέμου I_{w1}
- ii. τον υπολογισμό του πλάτους διατοιχισμού ϕ_1
- iii. τον υπολογισμό της κλίσης κύματος r
- iv. το wave steepness

ειδικά για πλοία, που δεν συμμορφώνονται με τις παραμέτρους B/T, (KG/d-1) , Roll period, σχέσεις 26, 27, 28 και 29 αντίστοιχα.

- **Μογλοβραχίονας ριπής ανέμου I_{w1}**

Για τον προσδιορισμό του I_{w1} μπορούν να γίνουν αποδεκτά εναλλακτικά μέσα, κατά την κρίση της Αρχής, ως ισοδύναμο του τύπου 19 στην σελίδα 23. Όταν διεξάγονται πειραματικές δοκιμές για τον υπολογισμό του μογλοβραχίονα ανέμου, πρέπει να γίνονται αναφορές στο σχετικό Παράρτημα 1 - Interim Guidelines for alternative assessment of the weather criterion- του SLF48(2005). Η ταχύτητα ανέμου, που χρησιμοποιείται στις δοκιμές είναι 26m/sec. Όσον αφορά πλοία που υπόκεινται σε περιορισμούς υπηρεσιών μπορεί να μειωθεί κατά την κρίση της Αρχής.

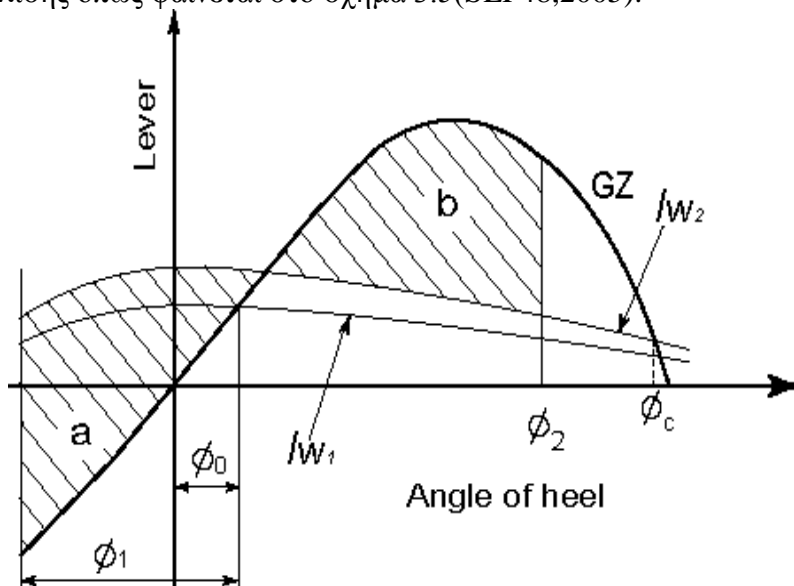
- **Πλάτος διατοιχισμού ϕ_1**

Για πλοία με παραμέτρους εκτός των προαναφερθέντων ορίων το πλάτος διατοιχισμού μπορεί να προσδιορίζεται με πειραματικές δοκιμές για το πλοίο, όπως αυτές περιγράφονται στο Παράρτημα 1- Interim Guidelines for alternative assessment of the weather criterion- του SLF48(2005). Επιπλέον, η αρχή μπορεί να δεχθεί τέτοιους εναλλακτικούς προσδιορισμούς για κάθε πλοίο εφόσον το κρίνει σκόπιμο.

Στο Παράρτημα 1 του SLF48(2005) παρουσιάζονται οι πρότυπες δοκιμές για τον υπολογισμό των μεγεθών I_{w1} και ϕ_1 . Για τον υπολογισμό αυτών των μεγεθών με εναλλακτικά μέσα ελέγχεται και εγκρίνεται το πρόγραμμα δοκιμής από την Αρχή εκ των προτέρων. Οι δοκιμές πρέπει να τεκμηριωθούν με τη βοήθεια μιας έκθεσης και ενός βίντεο ή άλλων οπτικών αρχείων που περιέχουν όλες τις σχετικές πληροφορίες για το μοντέλο, τη διαδικασία και τα αποτελέσματα των δοκιμών, οι οποίες πρόκειται να εγκριθούν από την Αρχή. Οποιαδήποτε διαδικασία υπολογισμού διαφορετική από αυτές που παρέχονται στις οδηγίες του Παραρτήματος 1 έγκειται στην κρίση της Αρχής.

Οδηγίες για τον πειραματικό υπολογισμό του μοχλοβραχίονα ανέμου I_{w1}

Οι οδηγίες που παρέχονται για τον προσδιορισμό του I_{w1} έχουν ως σκοπό να εξασφαλιστεί η ομοιόμορφη εφαρμογή των πρότυπων δοκιμών στους υπολογισμούς στα διάφορα πλοία. Στην διαδικασία που περιγράφεται στο σχετικό παράρτημα του SLF48(2005) ο μοχλοβραχίονας ανέμου υπολογίζεται συναρτήσει της γωνίας εγκάρσιας κλίσης όπως φαίνεται στο σχήμα 3.5(SLF48,2005).



Σχήμα 3.5 Κριτήριο Καιρού, όταν ο μοχλοβραχίονας ανέμου εξαρτάται από την γωνία εγκάρσιας κλίσης

Η τυποποιημένη πρότυπη διαδικασία δοκιμής αποτελείται από δύο μέρη:

Το πρώτο μέρος είναι μια διαδικασία για τον υπολογισμό της ροπής λόγω ανέμου σταθερής έντασης σε «σήραγγα ανέμου». Ο ανεμιστήρας μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως εναλλακτική εφόσον η ταχύτητα ανέμου είναι συγκρίσιμη.

Στο δεύτερο μέρος υπολογίζεται η ροπή λόγω ρυμούλκησης του μοντέλου σε μία δεξαμενή με σταθερή ταχύτητα.

Ακόμη για την εφαρμογή της πρότυπης διαδικασίας παρέχονται πληροφορίες:

- για τα χαρακτηριστικά του μοντέλου, που πρέπει να χρησιμοποιηθεί σε κάθε μέρος της διαδικασίας
- για τα χαρακτηριστικά του ανέμου, καθώς και περιγραφή της διαδικασίας υπολογισμού της ροπής λόγω ανέμου
- για τη διαδικασία υπολογισμού της ροπής λόγω ρυμούλκησης του μοντέλου στην δεξαμενή.

Οδηγίες για τον πειραματικό υπολογισμό του πλάτους διατοιχισμού ϕ_1

Όπως ήδη έχουμε αναφέρει το πλάτος διατοιχισμού στο Κριτήριο Καιρού υπολογίζεται σε κατάσταση συντονισμού, κυματικού περιβάλλοντος και πλοίου, και θεωρούμε ότι οι κυματισμοί είναι αρμονικοί. Ακόμη με τους συντελεστές απόσβεσης k , X_1 , X_2 , που υπεισέρχονται στον υπολογισμό του ϕ_1 λαμβάνεται υπόψη η μη κανονικότητα των κυματισμών, που συναντά το πλοίο στην πραγματικότητα (μείωση του πλάτους διατοιχισμού σύμφωνα με το Ιαπωνικό Κριτήριο σελίδα 16).

Στις πρότυπες διαδικασίες για τον υπολογισμό του πλάτους διατοιχισμού ϕ_1 θεωρούμε κανονικούς κυματισμούς. Η χρήση εναλλακτικών διαδικασιών επιτρέπεται, εφόσον παρέχεται επαρκής αιτιολόγηση σχετικά με την επιλεγμένη διαδικασία.

Στο σχετικό παράρτημα του SLF48(2005) παρουσιάζονται τρεις εναλλακτικές διαδικασίες για τον υπολογισμό του πλάτους διατοιχισμού:

- I.** Στην πρώτη διαδικασία γίνεται απευθείας μέτρηση του πλάτους διατοιχισμού. Σε αυτή την περίπτωση απαιτείται η δημιουργία απότομων κυμάτων. Κύματα με μεγάλο steepness πολλές φορές δύσκολα σπάνε σε μικρότερα κοντά στον κυματιστή. Ακόμη πρέπει να γίνονται μετρήσεις για το πλάτος διατοιχισμού σε τακτά χρονικά διαστήματα πριν το σύστημα ισορροπήσει (steady state), διότι το ϕ_1 μπορεί να λάβει κάποια ακραία τιμή στα ενδιάμεσα στάδια, η οποία οδηγεί σε ανατροπή. Η μεθοδολογία αυτή δεν επιτρέπει διορθώσεις κλίμακας όσον αφορά την απόσβεση και έτσι προτιμούνται μεγάλα μοντέλα για απευθείας μετρήσεις του πλάτους διατοιχισμού.
- II.** Στην δεύτερη διαδικασία το πλάτος διατοιχισμού υπολογίζεται σε τρία βήματα και είναι η απλούστερη όλων. Χρησιμοποιήθηκε και στο αρχικό Κριτήριο Καιρού και επιτρέπει διορθώσεις κλίμακας όσον αφορά την απόσβεση. Ακόμη είναι αρκετά ευαίσθητη ως προς την ποιότητα των δοκιμών που εκτελούνται και την ανάλυση της κίνησης διατοιχισμού. Συνεπώς, η διαδικασία αυτή επιτρέπει την εκτέλεση δοκιμών για τον καθορισμό της κλίσης του κύματος r με χαμηλό σχετικά wave steepness, απλουστεύοντας τις δοκιμές.
- III.** Στην τρίτη διαδικασία «PIT» το πλάτος διατοιχισμού υπολογίζεται λαμβάνοντας υπόψη τη μη γραμμικότητα της ροπής απόσβεσης και του επαναφοράς, και παρέχει τα μέσα για την σύνδεση της συχνότητας με την κλίση του κύματος. Η μεθοδολογία αυτή επιτρέπει διορθώσεις κλίμακας όσον αφορά την απόσβεση. Όταν πραγματοποιείται μία σειρά δοκιμών για τον υπολογισμό του πλάτους διατοιχισμού πρέπει να μειώνεται ο αριθμός των ελευθέρων παραμέτρων, ώστε να διασφαλίζεται η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων. Η μέθοδος μπορεί να λάβει σημαντικά πλεονεκτήματα ως προς την ακρίβεια και την αξιοπιστία, από την εκτέλεση μίας σειράς δοκιμών για διάφορες τιμές wave steepness, για το λόγο αυτό συνίσταται η χρήση δύο τουλάχιστον διαφορετικών wave steepness. Για την ορθή εφαρμογή της μεθόδου απαιτείται επαρκής εκπαίδευση προσωπικού σχετικά με το θεωρητικό υπόβαθρο της μεθόδου.

Από τον πίνακα 3.8 (SLF48,2005) βρίσκουμε το wave steepness συναρτήσει της ιδιοπεριόδου του πλοίου.

Ship Roll Period T_ϕ [s]	Wave Steepness $s = H / \lambda$
<6	0.100
6	0.100
7	0.098
8	0.093
12	0.065
14	0.053
16	0.044
18	0.038
20	0.032
22	0.028
24	0.025
26	0.023
28	0.021
30	0.020
>30	0.020

Πίνακας 3.8

Η εφαρμογή κάθε μίας από τις τρεις μεθόδους περιγράφεται αναλυτικά στο Παράρτημα 1(SLF48,2005) καθώς και όλα τα μεγέθη και οι αρχικές συνθήκες που υπεισέρχονται στους υπολογισμούς. Ακόμη διαφοροποιείται και η κλίση του κύματος r οι σχετικές διευκρινήσεις, για τον υπολογισμό του r δίνονται στο Παράρτημα 1 (SLF48,2005).

Κριτήριο Καιρού για αλιευτικά πλοία

Όσον αφορά τα αλιευτικά πλοία η Αρχή μπορεί να εφαρμόσει το Κριτήριο Καιρού όπως έχει αναλυθεί ήδη (SLF,2005) εάν το μήκος του πλοίου είναι άνω των 45 μέτρων.

Για μήκος πλοίου μεταξύ 24 και 45 μέτρων, η Αρχή μπορεί να εφαρμόσει το Κριτήριο Καιρού όπως έχει ήδη αναλυθεί, αλλά οι τιμές της πίεσης ανέμου μπορούν να ληφθούν από τον πίνακα 3.9 (SLF48,2005):

h (m)	1	2	3	4	5	≥ 6
P (Pa)	316	386	429	460	485	504

Πίνακας 3.9

Όπου: h = η κάθετη απόσταση του κέντρου της προβεβλημένης πλευρικής επιφάνειας του πλοίου και του καταστρώματος από την ίσαλο επιφάνεια πλεύσης.

Κεφάλαιο 4 – Πλαίσιο πιθανοθεωρητικής διερεύνησης

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται το θεωρητικό πλαίσιο και οι εξισώσεις στις οποίες βασίστηκε η εργασία. Ειδικότερα, στην παρούσα διπλωματική εργασία γίνεται μία διερεύνηση του Κριτηρίου Καιρού ευστάθειας πλοίων με στόχο να διερευνήσουμε τις συνθήκες ανέμου και κύματος, που προϋποθέτει το υφιστάμενο κριτήριο και να καταλήξουμε σε κάποια συμπεράσματα για το επίπεδο ασφαλείας που παρέχει το δεδομένο κριτήριο.

Για να επιτύχουμε το στόχο μας η προσέγγιση του προβλήματος γίνεται με δύο τρόπους, τους εξής:

- Πιθανοθεωρητική θεώρηση του Κριτηρίου καιρού ευστάθειας πλοίων.
- Δυναμική προσέγγιση του προβλήματος, μέσω ενός μαθηματικού μοντέλου προσομοίωσης της κίνησης διατοιχισμού του πλοίου.

4.1 Απλή πιθανοθεωρητική θεώρηση του Κριτηρίου καιρού ευστάθειας πλοίων

Μέσω της πιθανοθεωρητικής θεώρησης του κριτηρίου με τη χρήση κατάλληλων πιθανοθεωρητικών μοντέλων τόσο για τις συνθήκες ανέμου όσο και για τις συνθήκες κυματικού περιβάλλοντος, που προϋποθέτει αυτό, γίνεται μια προσπάθεια ποσοτικοποίησης του κριτηρίου και εύρεσης της συνολικής πιθανότητας ανατροπής του πλοίου.

4.1.1 Εισαγωγή ανέμου και κυματισμών στους υπολογισμούς

Η ένταξη του ανέμου στους υπολογισμούς έγινε με τον προσδιορισμό της πιθανότητας εμφάνισης ανέμου συγκεκριμένου εύρους εντάσεων, με τη χρήση κατάλληλων συναρτήσεων πυκνότητας πιθανότητας (Blendermann,2004).

Η ένταξη των κυματισμών στους υπολογισμούς μας έγινε μέσω της μεθόδου που προτείνεται στην εργασία των THEMELIS & SPYROU,2007 και αφορά την εκτίμηση εμφάνισης αστάθειας υπό την επίδραση αποκλειστικά κυματισμών. Η κεντρική ιδέα της μεθόδου είναι η εξής: « η πιθανότητα εμφάνισης κάποιας μορφής αστάθειας μπορεί να θεωρηθεί ίση με την πιθανότητα συνάντησης της «κρίσιμης» (ή δυσμενέστερης) ομάδας κύματος η οποία μπορεί να προκαλέσει την αστάθεια αυτή». Σύμφωνα με την εργασία των THEMELIS & SPYROU, 2007 στην παρούσα εργασία χρησιμοποιούμε τα «χαρακτηριστικά ομάδος» που παρουσιάζουν οι μεγάλοι θαλάσσιοι κυματισμοί και οι οποίοι είναι υπεύθυνοι για την εμφάνιση φαινομένων αστάθειας, τα οποία με τη σειρά τους μπορεί να οδηγήσουν σε μεγάλες αποκρίσεις ή ακόμα και σε ανατροπή.

Ειδικότερα για να προσεγγίσουμε την πιθανότητα να συναντήσουμε το κυματικό περιβάλλον που προϋποθέτει το Κριτήριο Καιρού υποθέτουμε ότι αντιστοιχεί σε ομάδες κύματος με n αριθμό κυμάτων. Όσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός των κυμάτων κάθε ομάδας που υποθέτουμε, τόσο καλύτερα προσεγγίζουμε την κανονικότητα των κυματισμών που υποθέτει το Κριτήριο Καιρού. Κάθε ομάδα κυμάτων έχει περίοδο κύματος κοντά στην ιδιοπερίοδο του πλοίου, ώστε το πλοίο και το κυματικό περιβάλλον να βρίσκονται σε συντονισμό, όπως προϋποθέτει το κριτήριο και ύψος κύματος μεγαλύτερο από το κρίσιμο ύψος που λαμβάνεται από την εφαρμογή του κριτηρίου. Ακόμη πραγματοποιείται μία παραμετροποίηση του κριτηρίου ως προς το κρίσιμο ύψος κύματος για να λάβουμε υπόψη τη μη κανονικότητα των κυματισμών, που αντιστοιχούν στο πραγματικό κυματικό περιβάλλον. Ο υπολογισμός των πιθανοτήτων συνάντησης των ομάδων κύματος γίνεται σύμφωνα με την εργασία Probabilistic assessment of ship stability (N.Themelis & K.Spyrou,2007), όπου συνδέεται η κίνηση του πλοίου με το κυματικό περιβάλλον.

4.1.2 Περιγραφή της Πιθανοθεωρητικής θεώρησης

Στο στάδιο αυτό της μελέτης στόχος μας είναι:

- Να υπολογίσουμε την πιθανότητα να συναντήσει το πλοίο δυσμενέστερες καιρικές συνθήκες από αυτές που υποθέτει το Κριτήριο Καιρού.
- Να υπολογίσουμε τις πιθανότητες να συναντήσει το πλοίο οριακές συνθήκες ως προς τον άνεμο και το κύμα. Με τον όρο «οριακές συνθήκες» εννοούμε τους συνδυασμούς κρίσιμου ύψους κύματος και ταχύτητας ριπής ανέμου για τα οποία το Κριτήριο Καιρού ικανοποιείται οριακά.

Σε πρώτη φάση γίνεται μια διερεύνηση του Κριτηρίου Καιρού ως προς τις συνθήκες κύματος και ανέμου. Αρχικά, εφαρμόζουμε το Κριτήριο Καιρού σε ένα συγκεκριμένο πλοίο τύπου Rorax-ferries, όπως έχουμε ήδη αναφέρει και στην εισαγωγή, και υπολογίζουμε τις πιθανότητες να αντιμετωπίσει το πλοίο μας δυσμενέστερες συνθήκες ανέμου και κυματικού περιβάλλοντος από αυτές που υποθέτει το Κριτήριο Καιρού. Με τον όρο δυσμενέστερες συνθήκες ανέμου, εννοούμε η ταχύτητα ριπής ανέμου να είναι μεγαλύτερη από την ταχύτητα ριπής που προϋποθέτει το κριτήριο, για όση ώρα διαρκεί το φαινόμενο.

Ακολουθεί μία ανάλυση της ευαισθησίας του υπολογισμού συνάντησης κρίσιμων ομάδων κύματος, ως προς το κρίσιμο ύψος κύματος της κάθε ομάδας κυμάτων, που συναντά το πλοίο. Επιλέγουμε δηλαδή ορισμένες τιμές για το κρίσιμο ύψος κύματος και υπολογίζουμε τις πιθανότητες συνάντησης κρίσιμων ομάδων κύματος.

Στη συνέχεια υπολογίζουμε τις πιθανότητες εμφάνισης συγκεκριμένης κατάστασης θάλασσας στην περιοχή λειτουργίας του πλοίου. Αυτό πραγματοποιείται

με τη χρήση κατάλληλων συναρτήσεων πυκνότητας πιθανότητας που έχουν προκύψει από στατιστική ανάλυση δεδομένων που έχουν καταγραφεί κατά καιρούς από διάφορους ερευνητές, αφορούν συγκεκριμένες περιοχές και περιγράφουν την κατάσταση της θαλάσσιας επιφάνειας για μεγάλα χρονικά διαστήματα. Τα στατιστικά αυτά δεδομένα είναι ουσιαστικά πολλές μεμονωμένες παρατηρήσεις καταστάσεων θάλασσας - πιθανότητες εμφάνισης συγκεκριμένων καταστάσεων θάλασσας-. Έπειτα υπολογίζουμε τη συνολική πιθανότητα συνάντησης κατάστασης θάλασσας με χαρακτηριστικά (H_s, T_p) και κρίσιμων ομάδων κύματος με σημαντικό ύψος κύματος μεγαλύτερο από το εκάστοτε H_{cr} , που προκύπτει από την ανάλυση της ευαισθησίας των υπολογισμών.

Στο επόμενο στάδιο, γίνεται μία παραμετροποίηση του Κριτηρίου Καιρού ως προς τον μοχλοβραχίονα ανέμου I_{w2} (**1^η περίπτωση**) και ως προς το πλάτος διατοιχισμού ϕ_1 (**2^η περίπτωση**), έτσι ώστε να πληρείται οριακά το ενεργειακό ισοδύναμο που υποθέτει το κριτήριο, δηλαδή $\mathbf{a}=\mathbf{b}$ (βλέπε σχήμα 3.2). Θέλουμε να υπολογίσουμε την μέγιστη ταχύτητα ανέμου, στην οποία μπορεί να ανταπεξέλθει το πλοίο μας, καθώς επίσης και το μέγιστο πλάτος διατοιχισμού, που μπορεί να αντέξει, ώστε να εκτιμήσουμε την ασφάλεια που παρέχει το Κριτήριο Καιρού, με τις συνθήκες που προϋποθέτει, στο πλοίο μας. Έπειτα, αυξάνουμε την γωνία και επαναλαμβάνουμε τους υπολογισμούς και για τις δύο περιπτώσεις

Τέλος, χρησιμοποιώντας την ίδια οριακή συνθήκη τήρησης του κριτηρίου, δηλαδή $\mathbf{a}=\mathbf{b}$, μεταβάλλουμε το πλάτος διατοιχισμού του πλοίου σε ένα εύρος τιμών, εφαρμόζουμε το Κριτήριο Καιρού για κάθε τιμή και υπολογίζουμε τον μοχλοβραχίονα ριπής ανέμου, την ταχύτητα ριπής ανέμου και το αντίστοιχο κρίσιμο ύψος κύματος κάθε περίπτωσης. Από τους υπολογισμούς αυτούς προκύπτει μια οριακή καμπύλη για τους συνδυασμούς H_{cr} και U_{gust} . Οι συνδυασμοί αυτοί, που βρίσκονται οριακά εκτός της καμπύλης αντιστοιχούν σε ανατροπή του πλοίου. Συνεπώς, υπολογίζοντας τις επιμέρους πιθανότητες συνάντησης δυσμενέστερων συνθηκών ανέμου και κύματος από αυτές τις καμπύλης $H_{cr}-U_{gust}$ και αθροίζοντας κατάλληλα τις πιθανότητες προσδιορίζουμε την πιθανότητα ανατροπής του πλοίου.

4.1.3 Περιγραφή των Πιθανοθεωρητικών μοντέλων που χρησιμοποιήθηκαν

4.1.3.1 Πιθανότητες Έντασης Ανέμου

Στην παρούσα εργασία, όπως έχουμε αναφέρει, η εισαγωγή του ανέμου γίνεται με τον υπολογισμό πιθανοτήτων εμφάνισης ανέμου με συγκεκριμένο εύρος ταχύτητας, μέσω κατάλληλων συναρτήσεων πυκνότητας πιθανότητας.

Ο προσδιορισμός των πιθανοτήτων αυτών γίνεται ολοκληρώνοντας την συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της κατανομής Rayleigh για την ταχύτητα του ανέμου. Σύμφωνα με την εργασία του Blendermann, 2004 η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της ταχύτητας ανέμου είναι:

$$f(U) = \frac{U}{U_{mode}^2} \cdot e^{\left(\frac{1}{2} \cdot \frac{U^2}{U_{mode}^2}\right)} \quad (30)$$

$$\text{όπου: } U_{mode} = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \cdot E(U) \quad (31)$$

Η ταχύτητα U_{mode} ονομάζεται «τυπική» ταχύτητα – modal - και αποτελεί την πιο πιθανή ταχύτητα ανέμου που μπορεί να εμφανιστεί για την δεδομένη κατανομή. Η ταχύτητα U είναι η στιγμιαία ταχύτητα ανέμου και η ταχύτητα $E(U)$ είναι η μέση ταχύτητα ανέμου και ταυτίζεται με την ταχύτητα ανέμου \bar{U}_W που την οποία έχουμε αναφέρει και παραπάνω. Για να συνδέσουμε το κυματικό περιβάλλον με τον άνεμο θα χρησιμοποιήσουμε μια σχέση που συνδέει το σημαντικό ύψος κύματος H_s με την ταχύτητα ανέμου $E(U)$. Η σχέση αυτή αναφέρεται στην εργασία των PAROKA & UMEDA, 2006 και παρατίθεται στο 5^ο κεφάλαιο με τους υπολογισμούς. Ο αριθμητικός υπολογισμός των πιθανοτήτων ανέμου γίνεται ως εξής:

Για κάθε ταχύτητα ριπής ανέμου, που υπολογίζουμε στην εκάστοτε περίπτωση, ολοκληρώνουμε την σχέση 30 με όρια ολοκλήρωσης τα όρια του εκάστοτε υποδιαστήματος της έντασης ανέμου που υποθέτουμε κάθε φορά. Ο τύπος της πιθανότητας ανέμου για το κάθε υποδιάστημα διαμορφώνεται ως εξής:

$$P_{Wind}(U_W) = \int_{U_A}^{U_B} f(U) dU \quad (31)$$

Όπου U_A, U_B τα άκρα των εκάστοτε υποδιαστημάτων του εύρους έντασης του ανέμου και $U_A - U_B = \delta U_W$, που έχουμε θεωρήσει για το εύρος της ταχύτητας του ανέμου.

4.1.3.2 Πιθανότητες συνάντησης κρίσιμων ομάδων κύματος σε συγκεκριμένη κατάσταση θάλασσας

Το κριτήριο καιρού υποθέτει ότι το πλοίο δέχεται κανονικούς κυματισμούς με κρίσιμο ύψος κύματος αυτό που υπολογίσαμε στην εφαρμογή του Κριτηρίου Καιρού. Για να προσεγγίσουμε λοιπόν στους υπολογισμούς μας αντίστοιχο κυματικό περιβάλλον, δηλαδή κανονικούς κυματισμούς, χρησιμοποιούμε τις ομάδες κύματος με n αριθμό κυμάτων. Υποθέτουμε ομάδες κύματος με σχετικά μεγάλο αριθμό κυμάτων, οι οποίες βρίσκονται σε συντονισμό με το πλοίο, όπως υποθέτει το κριτήριο και έχουν ύψος κύματος μεγαλύτερο από το κρίσιμο ύψος κύματος που υπολογίζεται μετά την εφαρμογή του κριτηρίου, μέσω της ιδιοσυχνότητας του πλοίου και του wave steepness.

Ως ομάδα κυμάτων σύμφωνα με τους MASSON & CHANDLER, 1993 ορίζεται μία αλληλουχία κυμάτων που το ύψος τους ξεπερνά μία δεδομένη τιμή και οι περίοδοι τους είναι σχεδόν ίσες μεταξύ τους.

Ο υπολογισμός των πιθανοτήτων συνάντησης κρίσιμων ομάδων κύματος γίνεται για ένα συνδυασμό τιμών του σημαντικού ύψους κύματος H_s [m] και της περιόδου κορυφής T_p [sec]. Οι κρίσιμες ομάδες κύματος καθορίζονται από το κρίσιμο ύψος κύματός τους H_{cr} , από τον αριθμό κυμάτων n της κάθε ομάδας και από την

περίοδο T_w των κυμάτων, η οποία βρίσκεται πολύ κοντά στην ιδιοπερίοδο του πλοίου, όπως ήδη έχουμε αναφέρει, -κατάσταση συντονισμού-. Ο υπολογισμός των πιθανοτήτων συνάντησης κρίσιμων ομάδων κύματος γίνεται σύμφωνα με την διαδικασία υπολογισμού, που περιγράφεται στην εργασία Probabilistic assessment of ship Stability (N.Themelis & K.Spyrou,2007).

Στις ομάδες κύματος σύμφωνα με τον KIMURA, 1980 μία ακολουθία κυμάτων θεωρείται ως μία αλυσίδα Markov, δηλαδή ουσιαστικά κάθε κύμα επηρεάζεται μόνο από το αμέσως προηγούμενό του. Οι κρίσιμες ομάδες κύματος έχουν ορισμένα χαρακτηριστικά:

- Οι ομάδες αποτελούνται από n διαδοχικά κύματα.
- Τα κύματα κάθε ομάδας έχουν περίπου την ίδια περίοδο και κυμαίνονται σε ένα εύρος $[0.9T_0, 1.1T_0]$, όπου T_0 είναι η ιδιοπερίοδος ταλάντωσης του πλοίου.
- Τα ύψη κύματός τους υπερβαίνουν το κρίσιμο ύψος κύματος, δηλαδή $H_n > H_{cr}$.

4.1.3.3 Υπολογισμός πιθανοτήτων εμφάνισης ζεύγους τιμών σημαντικού ύψους κύματος – μέσης περιόδου μηδενικής υπέρβασης για την περιοχή λειτουργίας του πλοίου

Για να προσδιορίσουμε τις πιθανότητες εμφάνισης ζεύγους τιμών (H_s, T_p) στην περιοχή λειτουργίας του πλοίου χρησιμοποιούμε στατιστικά δεδομένα που έχουν καταγραφεί από διάφορους ερευνητές. Τα δεδομένα αυτά έχουν καταγραφεί σε συγκεκριμένες περιοχές και περιγράφουν την κατάσταση της θαλάσσιας επιφάνειας για μεγάλα χρονικά διαστήματα. Η περιγραφή και η αξιοποίηση των στατιστικών αυτών δεδομένων που αφορούν το κυματικό περιβάλλον – «κλίμα» - μίας συγκεκριμένης περιοχής γίνεται μέσω του σημαντικού ύψους κύματος H_s και της μέσης περιόδου μηδενικής υπέρβασης T_z με δεδομένο κάποιο φάσμα, το σημαντικό ύψος κύματος μας δίνει μια επαρκή περιγραφή για την οξύτητα της καταστάσεως της θάλασσας και η μέση περίοδος μηδενικής υπέρβασης μας δίνει τη δυνατότητα αξιοποίησης στοιχείων που έχουν να κάνουν με την ευαισθησία του υπό μελέτη συστήματος σε φαινόμενα αστάθειας, όπως ο συντονισμός που εξετάζουμε στην παρούσα εργασία.

Η χρησιμοποίηση της μέσης περιόδου μηδενικής υπέρβασης T_z για τον προσδιορισμό των πιθανοτήτων καταστάσεων θάλασσας για την περιοχή λειτουργίας, αντί της περιόδου κορυφής T_p γίνεται με την βοήθεια της σχέσης που παρατίθεται στην εργασία των MATHIESEN & BITNER-GREGERSEN, 1990 και η οποία, υπό την παραδοχή της χρησιμοποίησης του φάσματος Pierson-Moskowitz, συνδέει εμπειρικά τα δύο αυτά μεγέθη μεταξύ τους ως εξής:

$$T_z = \frac{T_p}{1.4} \quad (32)$$

Η σύνδεση των δύο μεγεθών είναι επιτακτική για να επιτευχθεί η ομοιομορφία αποτελεσμάτων μεταξύ των πιθανοτήτων για συγκεκριμένη κατάσταση θάλασσας και

πιθανοτήτων καταστάσεων θάλασσας για την περιοχή λειτουργίας του πλοίου (κοινά ζεύγη (H_s, T_p)).

Τα στατιστικά δεδομένα προκύπτουν από πολλές μεμονωμένες παρατηρήσεις καταστάσεων θάλασσας – πιθανότητες εμφάνισης – μεμονωμένων ζευγών (H_s, T_z) . Η αξιοποίηση των στατιστικών αυτών δεδομένων γίνεται μέσω της προσομοίωσης και προσέγγισης τους με τη χρησιμοποίηση κάποιων κατανομών πιθανοτήτων «μακροπρόθεσμης» εκτίμησης («Long Term») ζεύγους τιμών (H_s, T_z) . Μέσω αυτών των κατανομών είμαστε σε θέση να υπολογίσουμε αριθμητικά την πιθανότητα εμφάνισης μίας κατάστασης θάλασσας σε μία συγκεκριμένη περιοχή. Στην εργασία των MATHIESEN & BITNER-GREGERSEN, 1990 για την αναπαράσταση – προσομοίωση τέτοιων στατιστικών δεδομένων προτείνεται η χρησιμοποίηση μιας από κοινού κατανομής η οποία συνδυάζει την οριακή τριών παραμέτρων Weibull (Marginal3-parameter Weibull) κατανομή για το σημαντικό ύψος κύματος H_s , με την δεσμευμένη λογαριθμική-κανονική (conditional log-normal) κατανομή για την μέση περίοδο μηδενικής υπέρβασης T_z .

Χρησιμοποιούμε την κατανομή αυτή για την εύρεση των πιθανοτήτων καταστάσεων θάλασσας για την περιοχή λειτουργίας, για ορισμένα ζεύγη τιμών (H_s, T_p) . Η σχέση που περιγράφει την από κοινού κατανομή που χρησιμοποιούμε είναι η εξής (MATHIESEN & BITNER-GREGERSEN, 1990):

$$f_{T_z, H_s}(T_z, H_s; \alpha, \beta, \gamma, a_1, a_2, a_3, b_1, b_2, b_3) = \frac{1}{T_z \sqrt{2\pi} \cdot \varepsilon_{T_z}(H_s)} \cdot e^{-\left\{ \frac{(\ln T_z - \xi_{T_z}(H_s))^2}{2\varepsilon_{T_z}^2(H_s)} \right\}} \cdot \frac{\beta(H_s - \gamma)^{\beta-1}}{\alpha^\beta} \cdot e^{-\left\{ \left(\frac{H_s - \gamma}{\alpha} \right)^\beta \right\}} \quad (33)$$

$$\text{με } \xi_{T_z}(H_s) = a_1 + a_2 H_s^{a_3}, \varepsilon_{T_z}(H_s) = b_1 + b_2 e^{(b_3 H_s)}$$

Τα μεγέθη α, β, γ είναι παράμετροι της οριακής Weibull κατανομής για το σημαντικό ύψος κύματος, τα οποία αντίστοιχα είναι η κλίμακα, η κλίση και η οριακή παράμετρος. Οι παράμετροι αυτές υπολογίζονται με την χρήση της μεθόδου των ελαχίστων τετραγώνων. Τα μεγέθη $\xi_{T_z}(H_s)$ και $\varepsilon_{T_z}(H_s)$, είναι παράμετροι της λογαριθμικής – κανονικής κατανομής που υπολογίζονται συναρτήσει του σημαντικού ύψους κύματος. Τέλος οι παράμετροι $a_1, a_2, a_3, b_1, b_2, b_3$ υπολογίζονται με τη χρήση της μεθόδου των μη γραμμικών ελαχίστων τετραγώνων όταν αυτή εφαρμοστεί στα εκάστοτε στατιστικά στοιχεία. Ο αριθμητικός υπολογισμός των πιθανοτήτων για κάθε ζεύγος τιμών (H_s, T_p) που έχουμε επιλέξει γίνεται με την ολοκλήρωση της σχέσης 32. Ο τύπος της πιθανότητας είναι:

$$P_L(T_z, H_s) = \int_{T_A}^{T_B} \int_{H_A}^{H_B} f(T_z, H_s) dT_z dH_s$$

Με $H_s \in [H_A, H_B]$ και $T_z \in [T_A, T_B]$ για κάθε ζεύγος τιμών (H_s, T_p)

4.2 Δυναμική θεώρηση

Στη δυναμική προσέγγιση του προβλήματος επιλέγουμε ένα συγκεκριμένο μαθηματικό μοντέλο για την προσομοίωση της κίνησης διατοιχισμού του πλοίου. Στόχος μας και σε αυτό το στάδιο είναι να υπολογίσουμε την συνολική πιθανότητα ανατροπής του πλοίου και να συγκρίνουμε τα αποτελέσματα με τα αποτελέσματα της πιθανοθεωρητικής θεώρησης του Κριτηρίου Καιρού. Το Κριτήριο Καιρού βασίζεται σε πειραματικές διαδικασίες και λαμβάνει υπόψη του την απόσβεση στην κίνηση διατοιχισμού του πλοίου, την επίδραση των κυματισμών και του ανέμου. Ωστόσο με την εφαρμογή του κριτηρίου θεωρούμε ότι κάθε κρίσιμη ομάδα κύματος έχει το ίδιο κρίσιμο ύψος κύματος ανεξάρτητα από τον αριθμό των κυμάτων. Στην δυναμική προσέγγιση μέσω της εξίσωσης διατοιχισμού του πλοίου βρίσκουμε το κρίσιμο ύψος κύματος, που αντιστοιχεί σε κάθε ταχύτητα ριπής ανέμου, για κάθε ομάδα κύματος θέτοντας ένα όριο για την μέγιστη απόκριση της κίνησης διατοιχισμού -γωνία ανατροπής-. Έτσι η προσέγγιση του κυματικού περιβάλλοντος είναι πιο ρεαλιστική. Στην κίνηση του πλοίου λαμβάνονται υπόψη η επίδραση ανέμου και η επίδραση κυματισμών.

4.2.1 Εισαγωγή της επίδρασης του ανέμου

Η εισαγωγή της επίδρασης του ανέμου στην εξίσωση κίνησης του πλοίου που επιλέγουμε γίνεται με τη μορφή μιας επιπλέον ροπής. Με αυτόν τον τρόπο το μοντέλο της κίνησης του διατοιχισμού εκτός από την επίδραση των απλών κάθετων αρμονικών κυματισμών περιέχει πλέον και την επίδραση του πλάγιου ανέμου στην πλευρική επιφάνεια του πλοίου.

4.2.2 Περιγραφή της διαδικασίας

Αρχικά επιλέγουμε ένα πολυώνυμο, που περιγράφει τη σχέση του μοχλοβραχίονα επαναφοράς του πλοίου με την γωνία εγκάρσιας κλίσης. Έπειτα επιλύουμε την εξίσωση διατοιχισμού σε κατάσταση συντονισμού και βρίσκουμε το κρίσιμο ύψος κύματος για την καθεμία τιμή της ταχύτητας ριπής ανέμου για κάθε ομάδα κυμάτων. Στη συνέχεια υπολογίζουμε τις πιθανότητες συνάντησης κρίσιμων ομάδων κύματος για τα H_{cr} που έχουμε υπολογίσει. Έπειτα υπολογίζουμε τις επιμέρους συνολικές πιθανότητες συνάντησης κρίσιμων ομάδων κύματος και τέλος υπολογίζουμε την συνολική πιθανότητα ανατροπής του πλοίου για διάφορες τιμές απόσβεσης. Η συνολική πιθανότητα ανατροπής του πλοίου υπολογίζεται συναρτήσει του σημαντικού ύψους κύματος αθροίζοντας κατάλληλα τα γινόμενα των πιθανοτήτων κύματος και ανέμου.

4.2.2.1 Μοντελοποίηση της κίνησης διατοιχισμού του πλοίου υπό την επίδραση κανονικών κυματισμών

Για την μοντελοποίηση της κίνησης διατοιχισμού του πλοίου στην περιοχή συντονισμού υπό την επίδραση κάθετων κανονικών κυματισμών χρησιμοποιήσαμε την ακόλουθη διαφορική εξίσωση:

$$\ddot{\varphi}(t) + \mathbf{b}_1 \cdot \dot{\varphi}(t) + \omega_0^2 \cdot \mathbf{GZ}[\varphi(t)] = \mu \cdot \mathbf{A} \cdot \mathbf{k} \cdot \omega^2 \cdot \cos(\omega t) \quad (35)$$

Όπου:

- ω_0 = η ιδιοσυχνότητα του πλοίου
- ω = η συχνότητα διέγερσης, δηλαδή η συχνότητα των κυμάτων
- φ = είναι η σχετική γωνία διατοιχισμού, δηλαδή η διαφορά μεταξύ της απόλυτης γωνίας διατοιχισμού και της κλίσης του κύματος.
- $\dot{\varphi}$ = είναι η γωνιακή ταχύτητα
- $\ddot{\varphi}$ = είναι η γωνιακή επιτάχυνση
- \mathbf{b}_1 = είναι ο σχετικός συντελεστής απόσβεσης
- \mathbf{GZ} = είναι ο μοχλοβραχίονας επαναφοράς του πλοίου και προσδιορίζεται στο 5^ο κεφάλαιο.
- $\mathbf{A} \cdot \mathbf{k}$ = είναι η κλίση του κύματος, όπου « \mathbf{A} » είναι το πλάτος του κύματος και « \mathbf{k} » είναι ο κυματαριθμός.
- $\mu = \frac{I}{I + \delta I}$, όπου « $I + \delta I$ » η ροπή αδράνειας διατοιχισμού του πλοίου συμπεριλαμβανομένης της πρόσθετης υδροδυναμικής ροπής αδράνειας σε διατοιχισμό.

Εμάς μας ενδιαφέρει να εξετάσουμε την περίπτωση συντονισμού της κίνησης του πλοίου με το κυματικό περιβάλλον, διότι κοντά στη ιδιοσυχνότητα του πλοίου έχουμε την μεγαλύτερη απόκριση. Συνεπώς η εξίσωση κίνησης είναι η ακόλουθη:

$$\ddot{\varphi}(t) + \mathbf{b}_1 \cdot \dot{\varphi}(t) + \omega^2 \cdot \mathbf{GZ}[\varphi(t)] = \mu \cdot \mathbf{A} \cdot \mathbf{k} \cdot \omega^2 \cdot \cos(\omega t) \quad (36)$$

4.2.2.2 Μοντελοποίηση της ροπής ανέμου

Για να εντάξουμε στην κίνηση διατοιχισμού του πλοίου την επίδραση του ανέμου, προσθέτουμε μία ροπή για τον άνεμο στην σχέση 36. Η ροπή λόγω ανέμου δίνεται από τον εξής τύπο:

$$M_{\text{wind}} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_D \cdot k^2 \cdot U^2 \cdot A_W \cdot Z_W$$

ρ είναι η πυκνότητα του αέρα (σε 20°C και στο ύψος της επιφάνειας της θάλασσας η τιμή της είναι περίπου 1.2 kg/m³ και φτάνει την τιμή 1.3 kg/m³ όταν η θερμοκρασία πέσει στους 0°C)

C_D είναι ο αδιάστατος συντελεστής αντίστασης της επιφάνειας A_W

U_W είναι η ταχύτητα ριπής ανέμου A_W είναι η πλευρική προβεβλημένη επιφάνεια του πλοίου πάνω από το νερό

Z_W είναι η απόσταση μεταξύ του κέντρου της επιφάνειας A_W και του σημείου όπου ασκείται η πλευρική δύναμη υδροδυναμικής αντίδρασης

Στους υπολογισμούς που ακολουθούν θεωρήσαμε ότι το γινόμενο $k^2 \cdot C_D$ έχει την τιμή 1.22 όπως υποθέτει και ο IMO στο Κριτήριο Καιρού. Ο συντελεστής k είναι διορθωτικός, εξαρτάται από τον τύπο του πλοίου και αποτελεί διόρθωση για τη διαφορά μεταξύ κέντρου πίεσης ανέμου και του γεωμετρικού κέντρου επιφανείας.

Συνεπώς η εξίσωση διατοιχισμού λαμβάνοντας υπόψη την επίδραση ανέμου και κύματος είναι η εξής:

$$\ddot{\varphi}(t) + \mathbf{b}_1 \cdot \dot{\varphi}(t) + \omega_0^2 \cdot \mathbf{GZ}[\varphi(t)] = \mu \cdot \mathbf{A} \cdot \mathbf{k} \cdot \omega^2 \cdot \cos(\omega t) + M_{\text{wind}}$$

4.2.2.3 Υπολογισμός των κρίσιμων ομάδων κύματος υπό την επίδραση ανέμου

Από την διαφορική εξίσωση 38, που περιγράφει την κίνηση του πλοίου γίνεται ο προσδιορισμός των κρίσιμων ομάδων κύματος, που οδηγούν σε γωνία εγκάρσιας κλίσης μεγαλύτερης από αυτήν που έχουμε ορίσει ως κρίσιμη γωνία από το κριτήριο καιρού. Προσδιορίζουμε το κρίσιμο ύψος κύματος H_{cr} για κάθε ομάδα κύματος, που θεωρούμε, με τη βοήθεια του προγράμματος Mathematica. Τα βήματα για τον υπολογισμό του H_{cr} είναι τα εξής:

- Αρχικά θεωρούμε ότι η συχνότητα των κυμάτων ταυτίζεται με την ιδιοσυχνότητα διατοιχισμού του πλοίου.
- Επιλέγουμε ταχύτητες ανέμου μεγαλύτερης έντασης από αυτές, που υποθέτει το Κριτήριο Καιρού U_w και η διαμέριση γίνεται σε υποδιαστήματα σταθερού βήματος.(όπως περιγράφηκαν στο τελευταίο στάδιο της πιθανοθεωρητικής θεώρησης)
- Επιλέγουμε τον αριθμό κυμάτων n της κάθε ομάδας.
- Επιλύουμε αριθμητικά την διαφορική εξίσωση έχοντας ορίσει τα παραπάνω μεγέθη για ένα συγκεκριμένο κρίσιμο ύψος κύματος και ελέγχουμε αν υπερβαίνει η απόκριση του πλοίου την κρίσιμη γωνία που έχουμε θεωρήσει.
- Επαναλαμβάνουμε την επίλυση για την επιλογή του κατάλληλου H_{cr} , ώστε να γίνει η απόκριση του πλοίου ίση με την κρίσιμη γωνία διατοιχισμού που έχουμε ορίσει.
- Οι υπολογισμοί επαναλαμβάνονται για όλους τους συνδυασμούς ταχύτητας ανέμου και αριθμού κυμάτων.

Κεφάλαιο 5 – Παρουσίαση των υπολογισμών

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται αναλυτικά όλοι οι υπολογισμοί που αναφέραμε στο 4^ο κεφάλαιο για ένα συγκεκριμένο πλοίο. Στην κίνηση του πλοίου γενικά λαμβάνουμε υπόψη την επίδραση πλευρικού κάθετου ανέμου και πλευρικών κανονικών κυματισμών, όπως υποθέτει και το Κριτήριο Καιρού. Ακόμη το πλοίο μας βρίσκεται σε συντονισμό με το κυματικό περιβάλλον, οπότε οι υπολογισμοί μας γίνονται σε ένα εύρος συχνοτήτων πολύ κοντά στην ιδιοσυχνότητα ταλάντωσης του πλοίου.

5.1 Αποτελέσματα υπολογισμών απλής πιθανοθεωρητικής θεώρησης Κριτηρίου Καιρού

5.1.1 Εφαρμογή Κριτηρίου Καιρού και υπολογισμός πιθανοτήτων συνάντησης δυσμενέστερων συνθηκών από αυτές που υποθέτει το Κριτήριο Καιρού

Το Κριτήριο Καιρού, όπως έχουμε ήδη αναφέρει, αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα κριτήρια που έχουν θεσπιστεί από το Διεθνή Ναυτιλιακό Οργανισμό (IMO) για την ευστάθεια των πλοίων και εξετάζει την ευστάθεια των πλοίων για συγκεκριμένες συνθήκες ανέμου και κυματικού περιβάλλοντος. Στο παρόν υποκεφάλαιο γίνεται εφαρμογή του Κριτηρίου Καιρού σε ένα συγκεκριμένο πλοίο και στη συνέχεια υπολογίζονται οι πιθανότητες να συναντήσει το πλοίο δυσμενέστερες καιρικές συνθήκες από αυτές που υποθέτει το κριτήριο καιρού. Ειδικότερα υπολογίζονται οι πιθανότητες να συναντήσει το πλοίο άνεμο εντάσεως μεγαλύτερης από 31.84 m/s και κανονικούς κυματισμούς με ύψος κύματος μεγαλύτερο μιας τιμής Κρίσιμου Ύψους κύματος που προκύπτει από το Κριτήριο Καιρού.

5.1.1.1 Εφαρμογή Κριτηρίου Καιρού

Στους υπολογισμούς που γίνονται στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε ένα συγκεκριμένο επιβατηγό πλοίο τύπου ROPAX Ferry, του οποίου τα στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν παρουσιάζονται στον ακόλουθο πίνακα:

Τύπος Πλοίου	Ferry
Μήκος μεταξύ καθέτων L_{PP}	157.00 [m]
Πλάτος Πλοίου B	26.2 [m]
Βύθισμα d	6.2 [m]
Συντελεστής γάστρας C_B	0.626
Βάρος Εκτοπίσματος Δ	16308 [t]
Μετακεντρικό Ύψος GM	2.129 [m]
Γωνία απώλειας ευστάθειας φ_v	63.2 [degrees]
Ιδιοπερίοδος διατοιχισμού T_0	15.26 [s]
Πλευρική προβεβλημένη επιφάνεια A_w	3663.31 [m ²]
Απόσταση μεταξύ του κέντρου της επιφάνειας A_w και του κέντρου της προβεβλημένης επιφάνειας του βυθισμένου τμήματος του πλοίου κατά το διάμηκες Z_w	14.625 [m]
« $I+\delta I$ » η ροπή αδράνειας διατοιχισμού του πλοίου συμπεριλαμβανομένης της πρόσθετης υδροδυναμικής ροπής αδράνειας σε διατοιχισμό.	$1.9 \cdot 10^6$ [m ⁴]

Η εφαρμογή του Κριτηρίου Καιρού στο πλοίο μας έγινε με τη χρήση του προγράμματος Hydromax Professional. Τα στοιχεία του πλοίου που χρησιμοποιήθηκαν τα έχουμε αναφέρει παραπάνω. Υπολογίζουμε τα μεγέθη:

α) εύρος διατοιχισμού -roll back angle- φ_1

β) γωνία κατάκλισης φ_f ,

που είναι απαραίτητα για την εφαρμογή του Κριτηρίου Καιρού στο Hydromax Professional. Ο υπολογισμός τους φαίνεται παρακάτω. Έχουμε:

Υπολογισμός του εύρους διατοιχισμού « φ_1 »

Ο υπολογισμός της γωνίας φ_1 γίνεται από την σχέση 21 και οι συντελεστές X_1 , X_2 , k και s υπολογίζονται με γραμμική παρεμβολή από τους αντίστοιχους πίνακες που ισχύουν για το Κριτήριο Καιρού.

- $\frac{B}{d} = \frac{26.2}{6.2} = 4.23 \Rightarrow X_1 = 0.8$
- $C_B = 0.626 \Rightarrow X_2 = 0.96$
- $T_0 = 15.26 \text{ sec} \Rightarrow s = 0.0473$
- $r = 0.73 + 0.6 \cdot \frac{OG}{d} \Rightarrow r = 1.3612$

Όμως σύμφωνα με το κριτήριο καιρού είναι $r \leq 1$ συνεπώς θέτουμε $r=1$.

Όπου: OG είναι η απόσταση του κέντρου βάρους και της ισάλου πλευσης (+ εάν το κέντρο βάρους είναι πάνω από την WL, - εάν είναι κάτω από την WL)

$$\begin{aligned} \bullet \quad A_k &= (12.78 + 48.12) \cdot 0.26 = 15.834m^2 \\ \frac{A_k \cdot 100}{L \cdot B} &= \frac{15.834 \cdot 100}{157 \cdot 26.2} = 0.385 \Rightarrow k = 0.9923 \end{aligned}$$

Με εφαρμογή των αποτελεσμάτων αυτών στην σχέση 21 υπολογίζουμε την φ_1 :

$$\varphi_1 = 109 \cdot 0.9923 \cdot 0.8 \cdot 0.96 \cdot \sqrt{1.0 \cdot 0.0473} \Rightarrow \varphi_1 = \mathbf{18.07 \text{ degrees}}$$

Υπολογισμός της γωνίας κατάκλισης « φ_f »:

Η γωνία κατάκλισης υπολογίζεται γεωμετρικά, από την μέση τομή του πλοίου, έτσι έχουμε:

$$\tan \varphi_f = \frac{D - d}{B/2} = \frac{14.84 - 6.2}{13.1} = 0.6595 \Rightarrow \varphi_f = 0,583 \Rightarrow \varphi_f = \mathbf{33.4 \text{ degrees}}$$

Αριθμητικά δεδομένα Κριτηρίου Καιρού:

Τα δεδομένα που εισάγουμε στο πρόγραμμα Hydromax Professional και πραγματοποιεί τους υπολογισμούς και τον έλεγχο για το κριτήριο καιρού είναι:

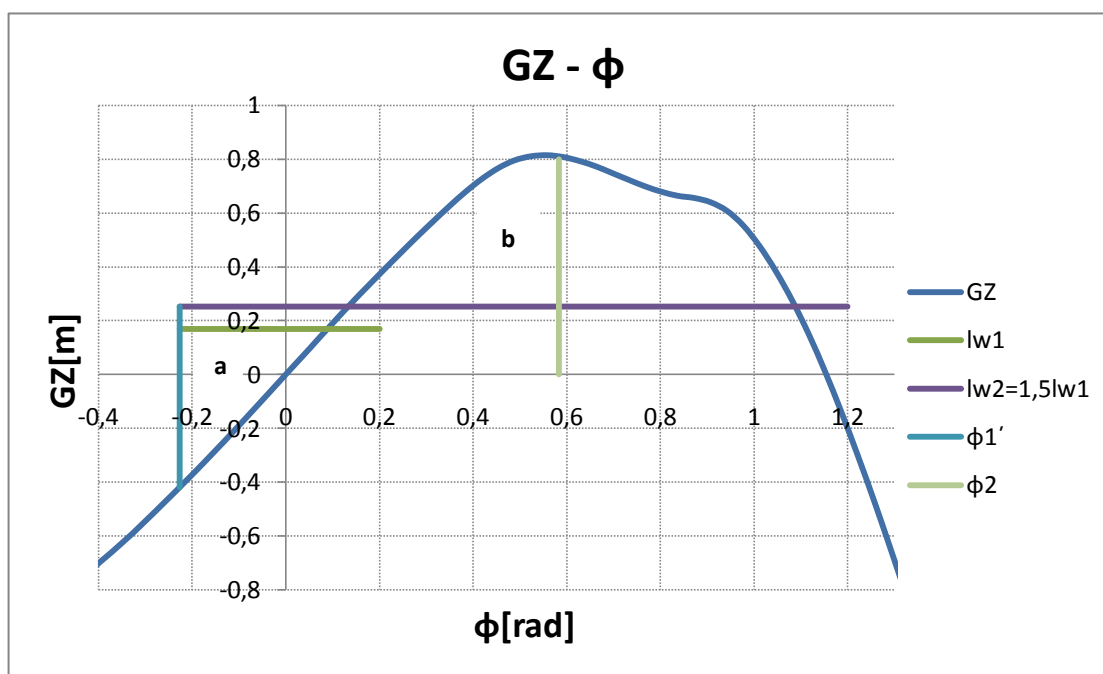
- $P = 504 \text{ N/m}^2$
- $A_W = 3663.31 \text{ m}^2$
- $Z_W = 14.625 \text{ m}$
- $g = 9.81 \text{ m/s}^2$
- $\Delta = 16308 \text{ t}$
- $\varphi_1 = 0.3153 \text{ rad}$
- $\varphi_2 = 0.5829 \text{ rad}$

Αριθμητικά αποτελέσματα Κριτηρίου Καιρού:

- $l_{w1} = 0,168784m$
- $l_{w2} = 0.253175m$
- $\varphi_0 = 5.1 \text{ degrees}$ ή $\varphi_0 = 0.089 \text{ rad}$
- $\varphi_0' = 7.7 \text{ degrees}$ ή $\varphi_0' = 0.1344 \text{ rad}$
- *Angle of max GZ = 31.5 degrees*
- Εμβαδόν $\mathbf{b} = \int_{7,7}^{33,4} (GZ - l_{w2}) d\varphi = 9.094 \text{ m. deg}$
- Εμβαδόν $\mathbf{a} = \int_{-13}^{7,7} (l_{w2} - GZ) d\varphi = 7.025 \text{ m. deg}$

Ισχύει λοιπόν: $\mathbf{b} > \mathbf{a}$.

Συνεπώς το κριτήριο καιρού επαληθεύεται για το συγκεκριμένο πλοίο. Ακολουθεί το διάγραμμα του μοχλοβραχίονα επαναφοράς συναρτήσει της γωνίας κλίσης όπως προέκυψε με τη χρήση του προγράμματος Mathematica (οι τιμές του διαγράμματος είναι οι προαναφερθείσες):



Σχήμα 5.1. Μοχλοβραχίονας επαναφοράς συναρτήσει της γωνίας κλίσης με Εφαρμογή του Κριτηρίου Καιρού

Υπολογισμός του Κρίσιμου ύψους κύματος H_{cr}

Στόχος μας είναι η εύρεση του κρίσιμου ύψους κύματος και του μήκους κύματος, που υποθέτει το Κριτήριο Καιρού. Το κρίσιμο ύψος κύματος και το μήκος κύματος συνδέονται μέσω της οξύτητας του κύματος s όπως φαίνεται παρακάτω. Η οξύτητα του κύματος s υπολογίζεται μέσω του Κριτηρίου Καιρού υποθέτοντας κατάσταση συντονισμού.

Η ιδιοπερίοδος του πλοίου είναι: $T_0 = 15.26 \text{ sec}$

Ακόμη η ιδιοσυχνότητα υπολογίζεται από τους εξής τύπους:

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \quad (39)$$

Το μήκος κύματος υπολογίζεται με τη χρήση της σχέσης διασποράς:

$$\omega^2 = k \cdot g \quad (40)$$

και όπου:

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (41)$$

Συνεπώς αντικαθιστώντας στην σχέση (41) την συχνότητα από τη σχέση (40) έχουμε:

$$\omega^2 = k \cdot g \Rightarrow \left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot g \Rightarrow \lambda = \frac{T^2 \cdot g}{2\pi} \Rightarrow \lambda = \mathbf{363,76m}$$

Όμως η οξύτητα του κύματος είναι: $s = \frac{H}{\lambda} \Rightarrow H_{cr} = s \cdot \lambda = 0.0473 \cdot 363.76 \Rightarrow$

$$\mathbf{H_{cr} = 17.21m}$$

5.1.1.2 Πιθανότητες Έντασης Ανέμου

Ο προσδιορισμός των πιθανοτήτων να συναντήσει το πλοίο μας άνεμο με ταχύτητα μεγαλύτερη από $\sqrt{1,5} \cdot 26 = 31,84 \text{ m/s}$, γίνεται από την σχέση 14 του 4^{ου} κεφαλαίου.

Εισαγωγή Κυματικού περιβάλλοντος

Η σύνδεση του κυματικού περιβάλλοντος με τον άνεμο, όπως έχουμε ήδη αναφέρει στο 4^ο κεφάλαιο γίνεται μέσω της σχέσης, που αναφέρεται στην εργασία των PAROKA & UMEDA, 2006. Ο εμπειρικός τύπος προέρχεται από τον Παγκόσμιο Μετεωρολογικό Οργανισμό και μας δίνει μία σχέση που συνδέει το σημαντικό ύψος κύματος H_S με την μέση ταχύτητα ανέμου \bar{U}_W είναι η εξής:

$$\mathbf{H_S = -2 \cdot 10^{-5} \cdot \bar{U}_W^3 + 8.2 \cdot 10^{-3} \cdot \bar{U}_W^2 + 0.1456 \cdot \bar{U}_W - 0.159} \quad (42)$$

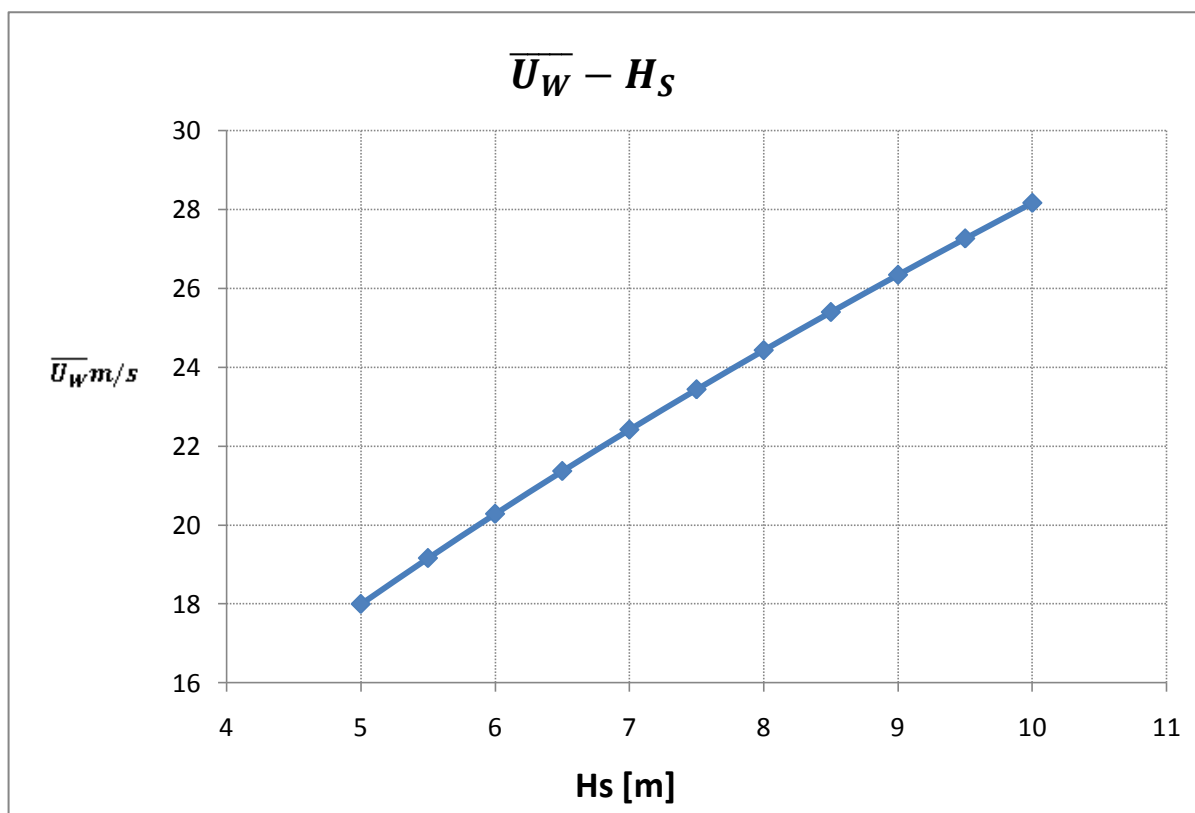
Η μέση ταχύτητα ανέμου $E(U)$ της σχέσης 30 ταυτίζεται με την ταχύτητα ανέμου \bar{U}_W .

Ο αριθμητικός υπολογισμός των πιθανοτήτων να συναντήσει το πλοίο μας άνεμο με ταχύτητα μεγαλύτερη από 31,84 m/s γίνεται με την χρήση της σχέσης 31, έτσι έχουμε:

$$P_{\text{Wind}}(U_W) = \int_{31,84}^{\infty} f(U) dU \quad (43)$$

,όπου U_W είναι η ταχύτητα ριπής (gust) ανέμου

Όλες οι πιθανότητες θα υπολογιστούν για διάφορες καιρικές συνθήκες (H_s, T_p). Αρχικά επιλύουμε την σχέση (42) για την εύρεση των ταχυτήτων ανέμου, οι οποίες αντιστοιχούν στις διακριτές τιμές σημαντικού ύψους κύματος που εμείς έχουμε επιλέξει. Τα αποτελέσματα της επίλυσης φαίνονται στο σχήμα 5.2.

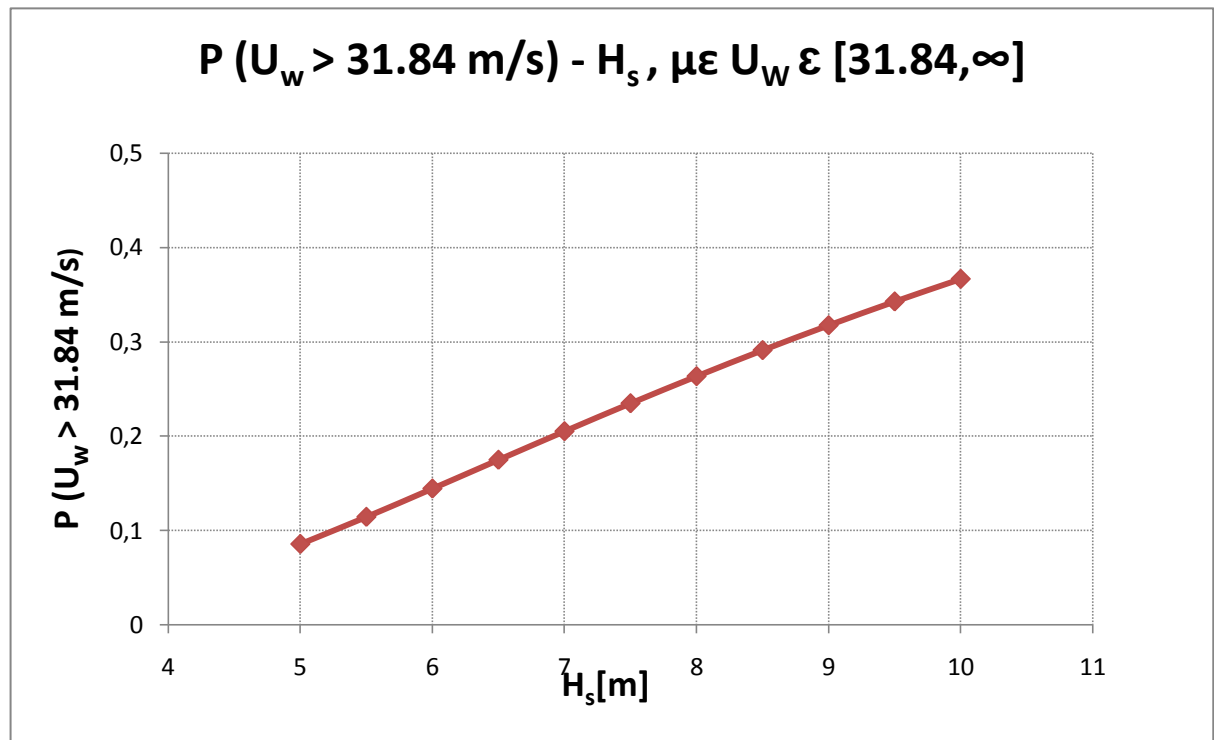


Σχήμα 5.2. Μέση ταχύτητα ανέμου συναρτήσει του σημαντικού ύψους κύματος

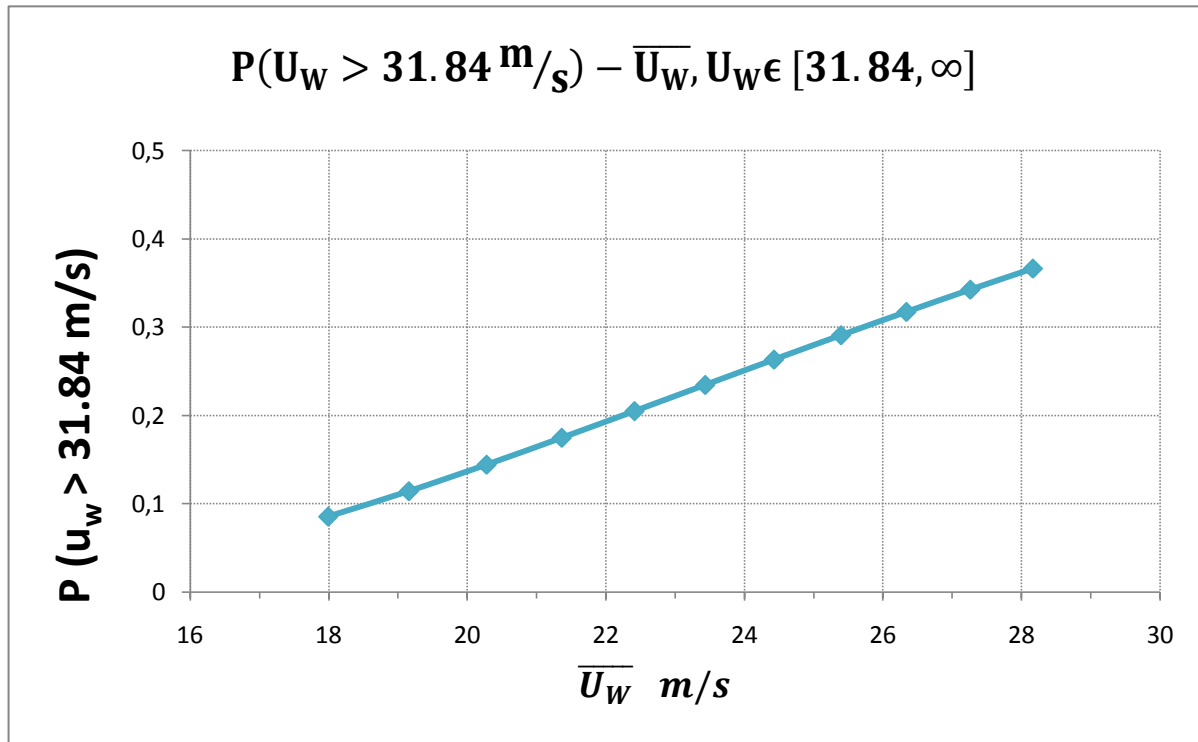
Έχοντας λοιπόν υπολογίσει τις τιμές για την μέση ταχύτητα ανέμου \bar{U}_W μέσω του σημαντικού ύψους κύματος υπολογίζουμε:

- τις αντίστοιχες τιμές για την τυπική ταχύτητα ανέμου U_{mode} από την σχέση 33.
- και τέλος ολοκληρώνουμε την σ.π.π κατανομή Rayleigh όπως αναφέραμε παραπάνω και βρίσκουμε τις αντίστοιχες πιθανότητες από την σχέση (43).

Οι υπολογισμοί έγιναν με την χρήση του προγράμματος Mathematica και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στα ακόλουθα σχήματα:



Σχήμα 5.3. Πιθανότητες ριπής ανέμου μεγαλύτερης από 31,84 m/s συναρτήσει του σημαντικού ύψους κύματος.



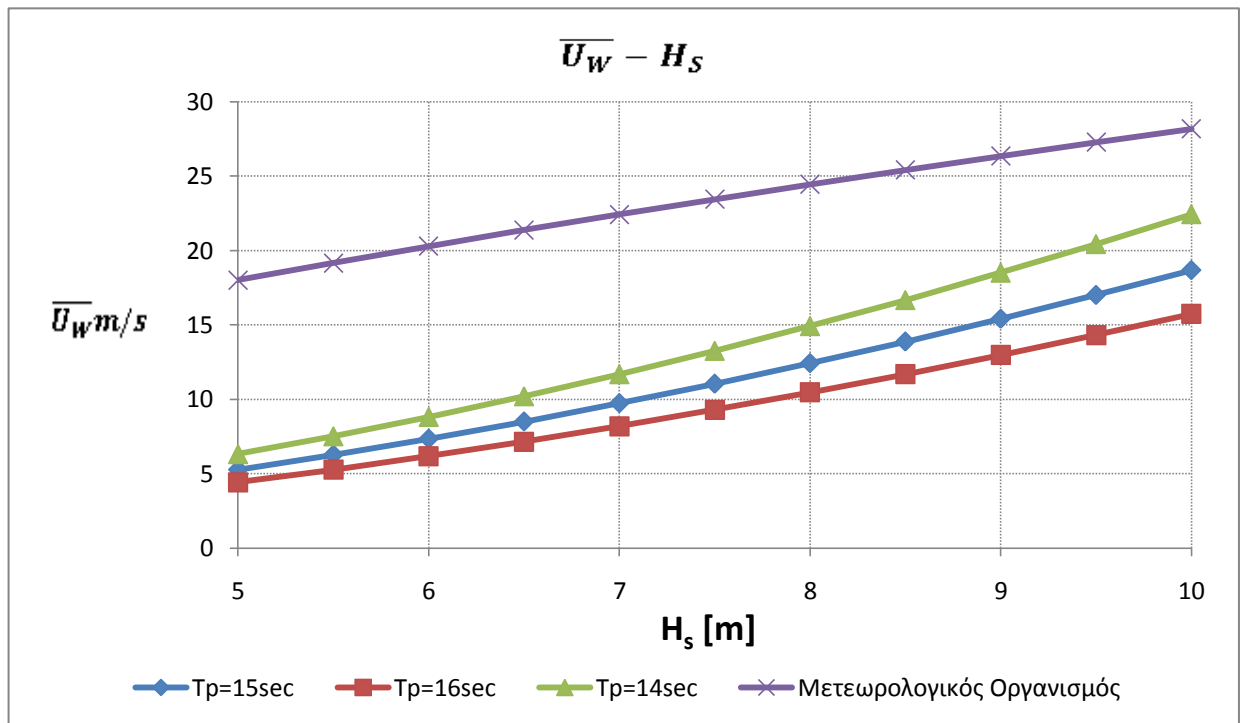
Σχήμα 5.4. Πιθανότητες ριπής ανέμου μεγαλύτερης από 31,84 m/s συναρτήσει της μέσης ταχύτητας ανέμου.

5.1.1.3 Υπολογισμός των πιθανοτήτων έντασης ανέμου μέσω της σχέσης Kruseman

Ακόμη υπολογίσαμε τη μέση ταχύτητα ανέμου από τη σχέση «Kruseman», που συνδέει το σημαντικό ύψος κύματος H_s και την περίοδο κορυφής T_p με τη μέση ταχύτητα ανέμου \bar{U}_W . Η σχέση αυτή είναι η εξής:

$$\bar{U}_W = 372 \cdot (H_s)^{1.829} \cdot (T_p)^{2.66} \text{ m/s} \quad (44)$$

Στη συνέχεια επιλύουμε την σχέση (44) για την εύρεση των ταχυτήτων ανέμου, οι οποίες αντιστοιχούν στις διακριτές τιμές σημαντικού ύψους κύματος και περιόδου κορυφής που εμείς έχουμε επιλέξει. Τα αποτελέσματα της επίλυσης φαίνονται στο ακόλουθο σχήμα:



Σχήμα 5.5. Συγκριτική παρουσίαση των αποτελεσμάτων για την μέση ταχύτητα ανέμου συναρτήσει του σημαντικού ύψους κύματος όπως υπολογίστηκαν από την εξίσωση «Kruseman» και από τον εμπειρικό τύπο του Μετεωρολογικού Οργανισμού.

Παρατηρούμε ότι για το ίδιο εύρος σημαντικού ύψους κύματος ο εμπειρικός τύπος του Μετεωρολογικού Οργανισμού μας δίνει πολύ μεγαλύτερη εκτίμηση για την μέση ταχύτητα ανέμου συγκριτικά με τον τύπο του Kruseman.

5.1.1.4 Υπολογισμός πιθανοτήτων συνάντησης κρίσιμων ομάδων κύματος

Όπως έχουμε αναφέρει και στο 4^ο κεφάλαιο το κριτήριο καιρού υποθέτει ότι το πλοίο δέχεται κανονικούς κυματισμούς με κρίσιμο ύψος κύματος αυτό που υπολογίσαμε στην εφαρμογή του Κριτηρίου Καιρού, των οποίων η προσέγγιση γίνεται μέσω κρίσιμων ομάδων κύματος.

Στο στάδιο αυτό εξετάζουμε συνθήκες δυσμενέστερες από αυτές του Κριτηρίου Καιρού γι' αυτό θεωρούμε ότι οι κρίσιμες ομάδες κύματος έχουν ύψος κύματος μεγαλύτερο από το $H_{cr} = 17.21 \text{ m}$ που υπολογίσαμε στην εφαρμογή του Κριτηρίου Καιρού.

Στην θάλασσα, όμως οι κυματισμοί είναι τυχαίοι και όχι κανονικοί όπως θεωρεί το Κριτήριο Καιρού. Συνεπώς το θαλάσσιο περιβάλλον που υποθέτει είναι δυσμενέστερο από το αντίστοιχο πραγματικό κυματικό περιβάλλον. Γι' αυτό θα εξετάσουμε και ομάδες κυμάτων, που το ύψος κύματος είναι μεγαλύτερο από $H_{cr1} = 12.047 \text{ m}$.

Θεωρούμε κατάσταση συντονισμού για το πλοίο και το κυματικό περιβάλλον, συνεπώς η περίοδος των κυμάτων βρίσκεται πολύ κοντά στην ιδιοπερίοδο του πλοίου. Συγκεκριμένα:

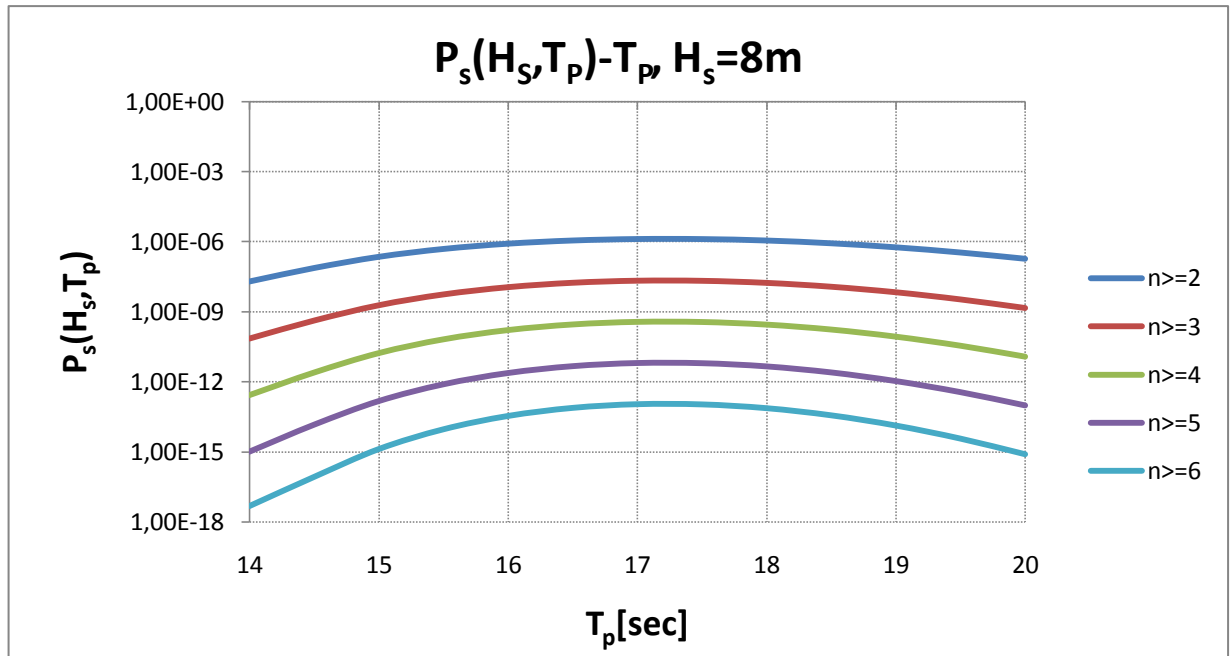
$$T_0 = 15.26 \text{ sec και } T_W \in [0.9T_0, 1.1T_0].$$

Ακόμη οι κρίσιμες ομάδες αποτελούνται από $n=2,3,4,5,6$ διαδοχικά κύματα και έχουν ύψος κύματος μεγαλύτερο από H_{cr} και H_{cr1} . Θα υπολογίσουμε πιθανότητες συνάντησης κρίσιμων ομάδων κύματος με αριθμό κυμάτων μεγαλύτερο ή ίσο του n για δύο περιπτώσεις συνδυασμών H_S και T_P , υποθέτοντας ότι έχουμε μόνο την επίδραση των κυμάτων ενώ δεν ασκείται άνεμος.

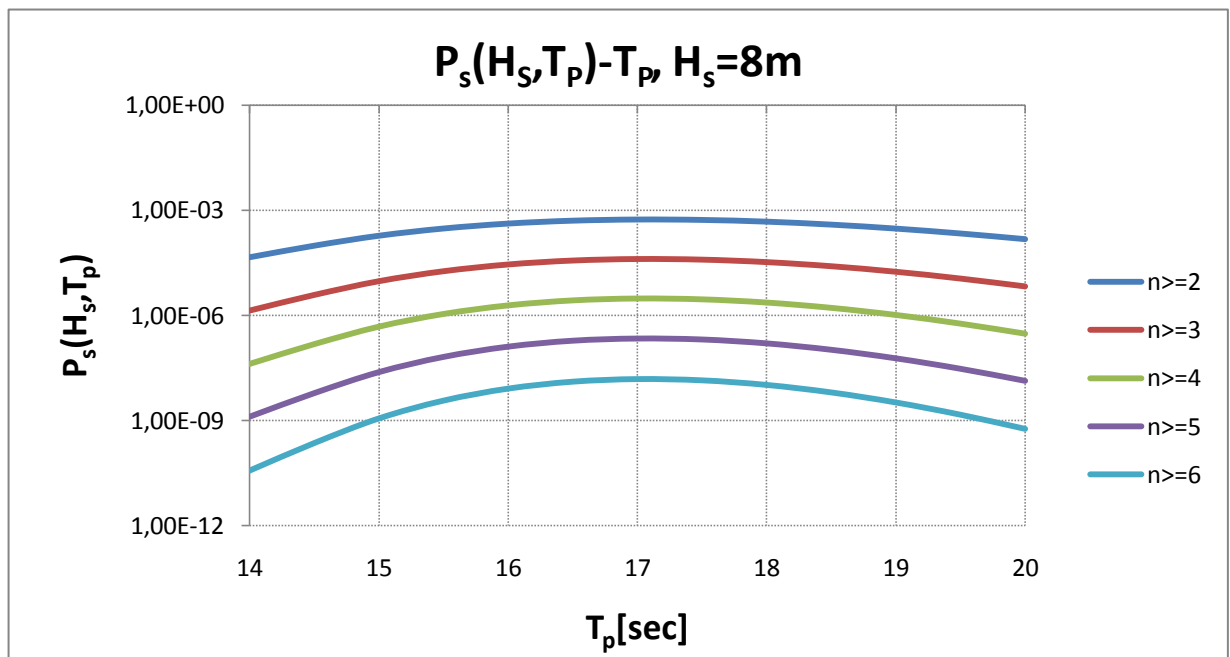
Οι υπολογισμοί έγιναν με τη χρήση του προγράμματος Mathematica και σε όλα τα διαγράμματα που ακολουθούν οι κλίμακες των κατακόρυφων αξόνων, που αφορούν πιθανότητες είναι λογαριθμικές με βάση το 10.

- **1^η Περίπτωση:** Επιλέγουμε σταθερό σημαντικό ύψος κύματος και εύρος τιμών για την περίοδο κορυφής T_W [sec] : $T_W \in [14 - 20]$. Για τον υπολογισμό των πιθανοτήτων $P_S(H_S, T_P)$ θεωρούμε ότι κάθε διακριτό ζεύγος τιμών (H_S, T_P) προκύπτει με H_S σταθερό και με βήμα **0.5 sec** για την περίοδο κορυφής του κύματος. Τα σχήματα 5.6 και 5.7 περιέχουν τις τιμές των υπολογισμών των αντίστοιχων πιθανοτήτων.

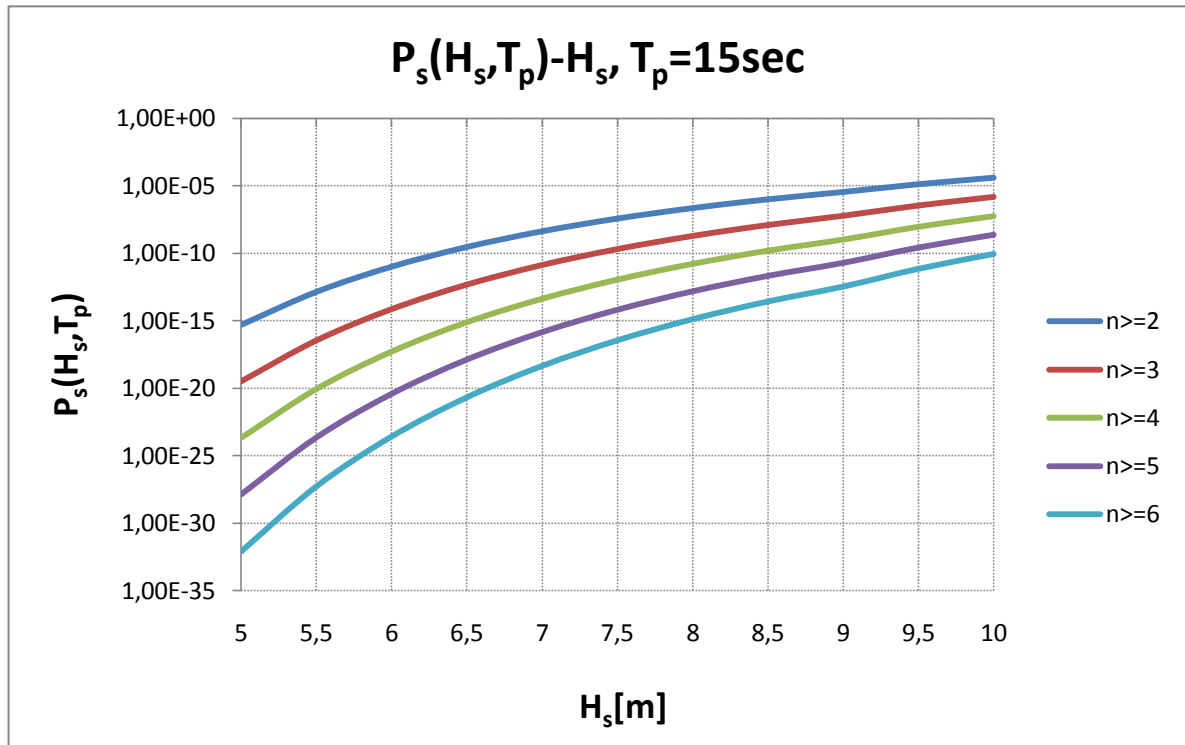
- **2^η Περίπτωση:** Επιλέγουμε σταθερή περίοδο κορυφής και εύρος τιμών για το σημαντικό ύψος κύματος H_S [m] : $H_S \in [5 - 10]$. Για τον υπολογισμό των πιθανοτήτων $P_S(H_S, T_P)$ θεωρούμε ότι κάθε διακριτό ζεύγος τιμών (H_S, T_P) προκύπτει με T_P σταθερό και με βήμα **0.5 sec** για το σημαντικό ύψος κύματος. Τα σχήματα 5.8 και 5.9 περιέχουν τις τιμές των υπολογισμών των αντίστοιχων πιθανοτήτων.



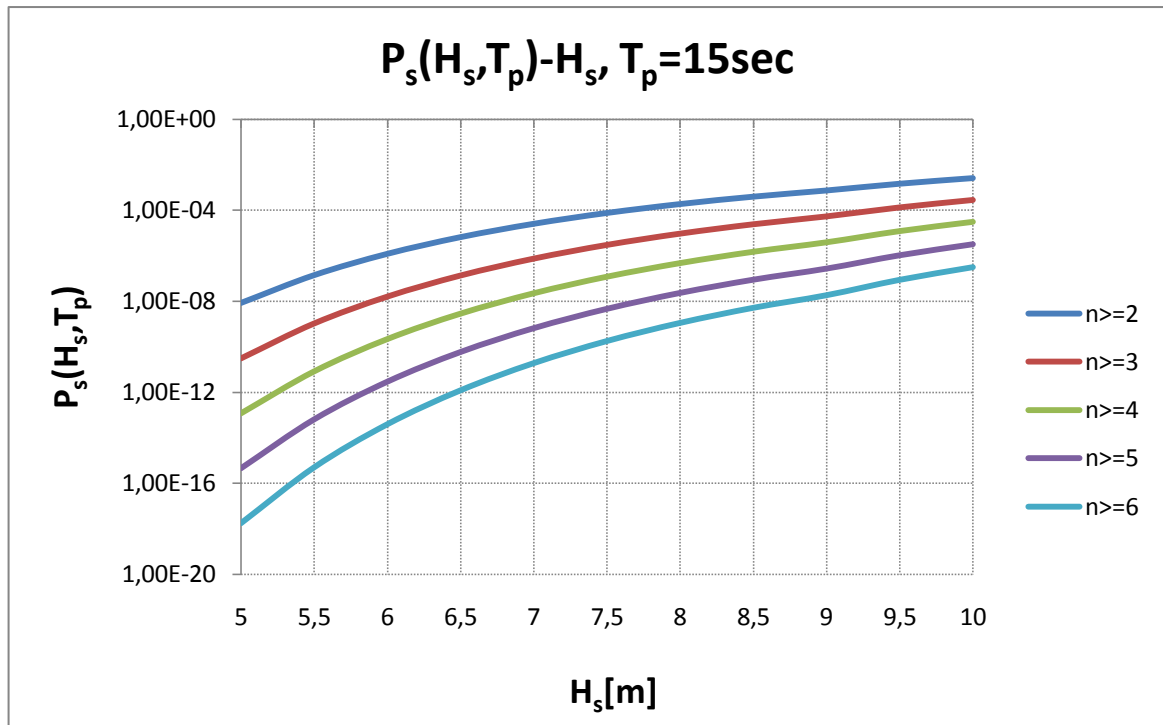
Σχήμα 5.6. Πιθανότητες συνάντησης κρίσιμων ομάδων κύματος με ύψος κύματος μεγαλύτερο του κρίσιμου ύψους $H_{cr}=17.21m$, $H_S=8m$.



Σχήμα 5.7. Πιθανότητες συνάντησης κρίσιμων ομάδων κύματος με ύψος κύματος μεγαλύτερο του κρίσιμου ύψους $H_{cr}=12.047m$, $H_S=8m$.



Σχήμα 5.8. Πιθανότητες συνάντησης κρίσιμων ομάδων κύματος με ύψος κύματος μεγαλύτερο του κρίσιμου ύψους $H_{cr}=17.21m$, $T_p=15sec$.



Σχήμα 5.9. Πιθανότητες συνάντησης κρίσιμων ομάδων κύματος με ύψος κύματος μεγαλύτερο του κρίσιμου ύψους $H_{cr}=12.047m$, $T_p=15sec$.

- **Χρόνος παρατήρησης της θάλασσας ίσος με μία ώρα:** Υπολογισμός των πιθανοτήτων για σταθερή περίοδο κορυφής $T_P=15\text{sec}$ και εύρος τιμών για το σημαντικό ύψος κύματος H_S [m] : $H_S \in [5 - 10]$. Για τον υπολογισμό των πιθανοτήτων $P_S(H_S, T_P)$ θεωρούμε ότι κάθε διακριτό ζεύγος τιμών (H_S, T_P) προκύπτει με T_P σταθερό και με βήμα **0.5 sec** για το σημαντικό ύψος κύματος. Τα σχήματα 5.10 και 5.11 περιέχουν τις τιμές των υπολογισμών των αντίστοιχων πιθανοτήτων.

Για $T_P=15\text{sec}$ η περίοδος μηδενικής υπέρβασης για την περιοχή λειτουργίας του πλοίου υπολογίζεται ίση με:

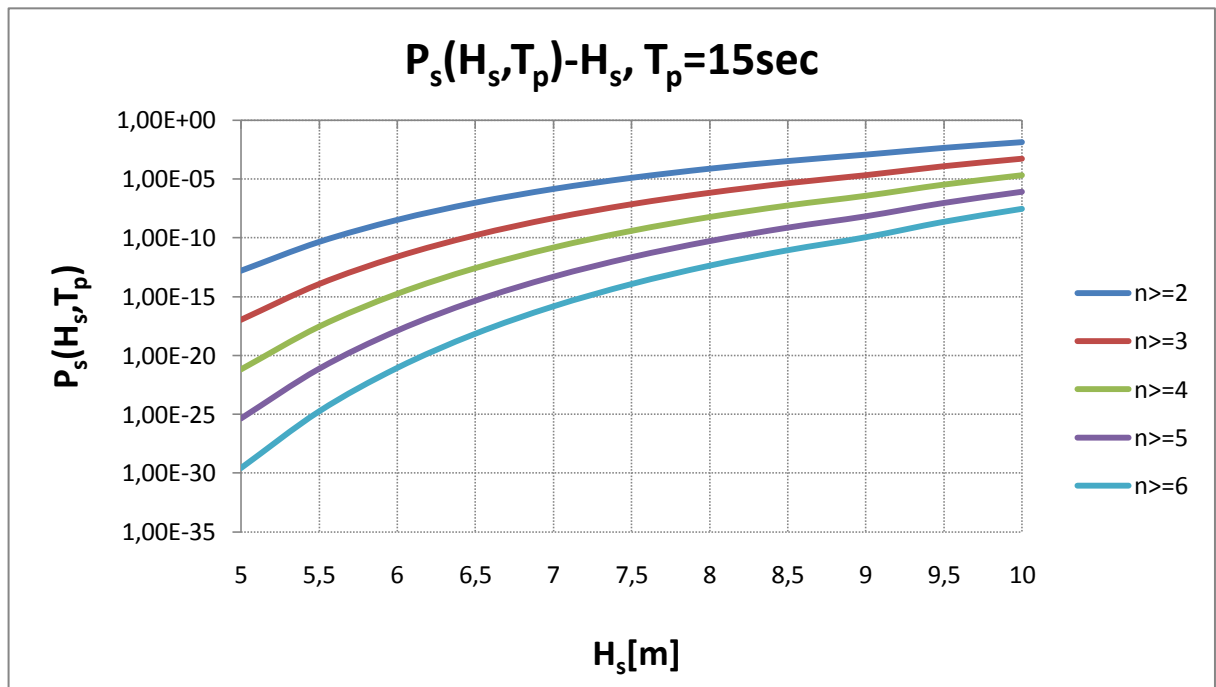
$$T_Z = 10.66 \text{ sec}$$

Για χρόνο παρατήρησης ίσο με 3600 sec πολλαπλασιάζουμε όλες τις πιθανότητες που υπολογίσαμε στην 1^η περίπτωση που εξετάσαμε με τον μέσο αριθμό κυμάτων «N» που συναντάμε σε μία ώρα.

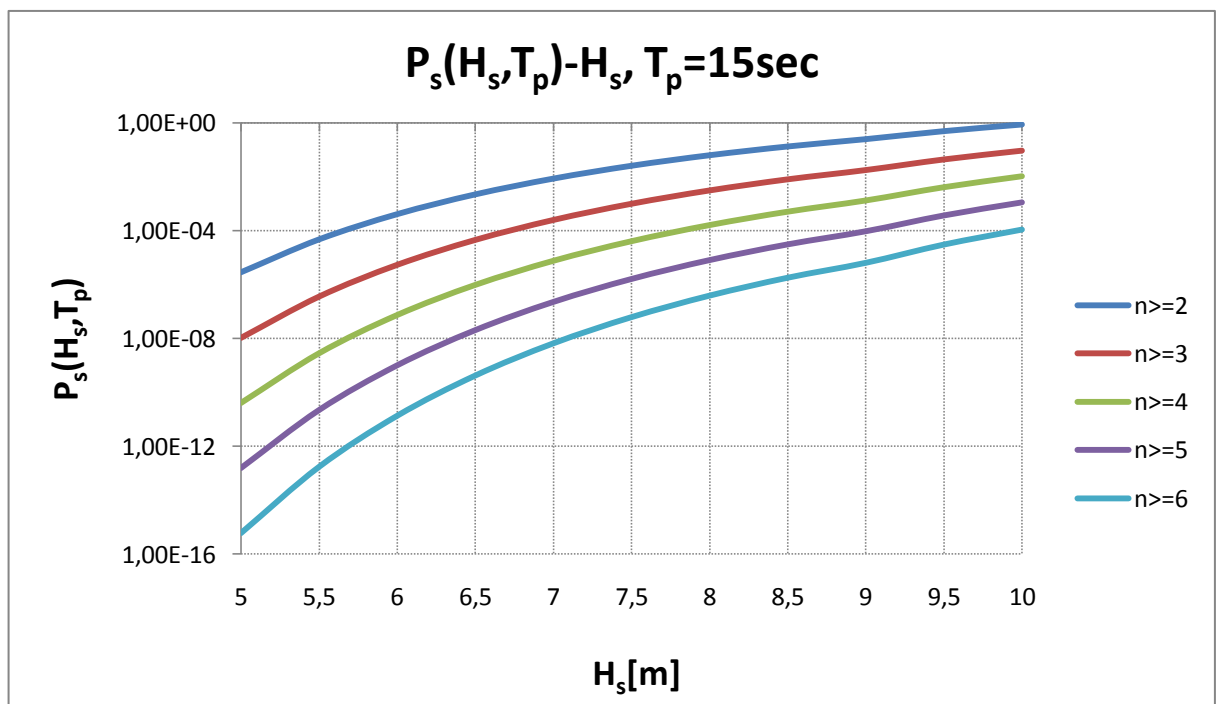
Όπου:

$$N = \frac{3600}{T_Z} = 338$$

και υπολογίζουμε τις πιθανότητες να συναντήσουμε τις αντίστοιχες ομάδες κυμάτων σε μία ώρα.



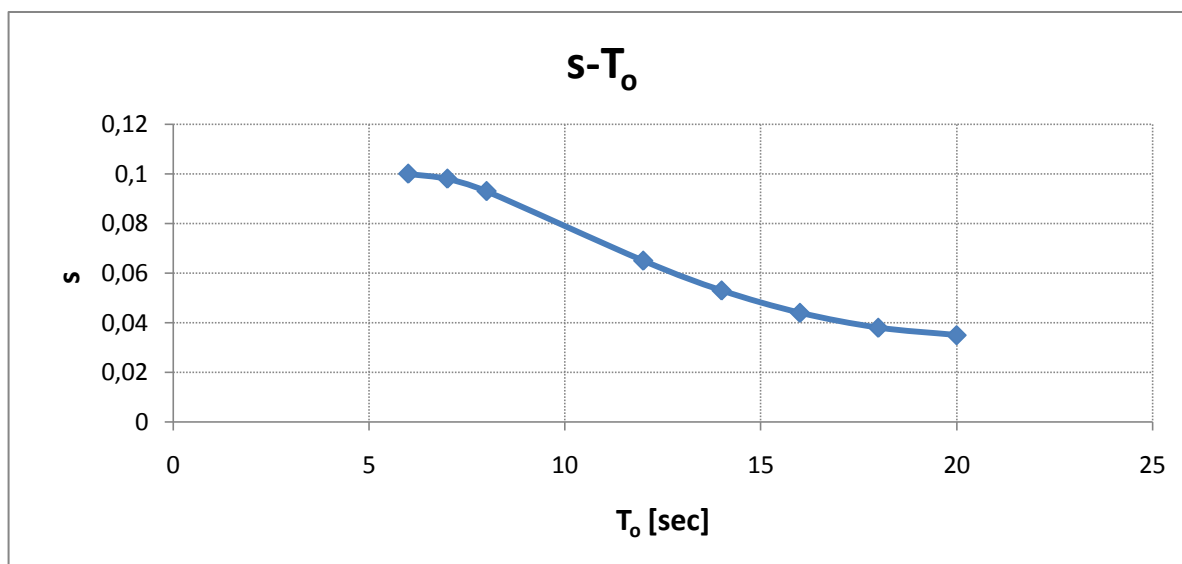
Σχήμα 5.10. Πιθανότητες συνάντησης κρίσιμων ομάδων κύματος με ύψος κύματος μεγαλύτερο του κρίσιμου ύψους $H_{cr}=17.21m$, $T_p=15sec$, για χρόνο παρατήρησης της θάλασσας μία ώρα.



Σχήμα 5.11. Πιθανότητες συνάντησης κρίσιμων ομάδων κύματος με ύψος κύματος μεγαλύτερο του κρίσιμου ύψους $H_{cr}=12.047m$, $T_p=15sec$, για χρόνο παρατήρησης της θάλασσας μία ώρα.

5.1.2 Ανάλυση ευαισθησίας των υπολογισμών ως προς το κρίσιμο ύψος κύματος H_{cr} των κυμάτων στην κάθε ομάδα.

Το κρίσιμο ύψος κύματος εξαρτάται από την οξύτητα του κύματος s . Η οξύτητα του κύματος s υπολογίζεται μέσω του «Κριτηρίου Καιρού» από έναν πίνακα συναρτήσεως της ιδιοπεριόδου ταλάντωσης του πλοίου, η οποία εξαρτάται από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του. Ακολουθεί το διάγραμμα που προκύπτει για την οξύτητα του κύματος από το «Κριτήριο Καιρού»:



Σχήμα 5.12. Οξύτητα κύματος συναρτήσεως της ιδιοπεριόδου του πλοίου

Στη συνέχεια θα θεωρήσουμε ορισμένες διακριτές τιμές για το s για να δούμε πως μεταβάλλεται το κρίσιμο ύψος κύματος H_{cr} : $s = [0.6s_0, 0.7s_0, 0.8s_0, 0.9s_0, s, 1.1s_0]$, όπου s_0 είναι η οξύτητα του κύματος, που αντιστοιχεί στη ιδιοπερίοδο ταλάντωσης του πλοίου $T_0=15.26\text{sec}$.

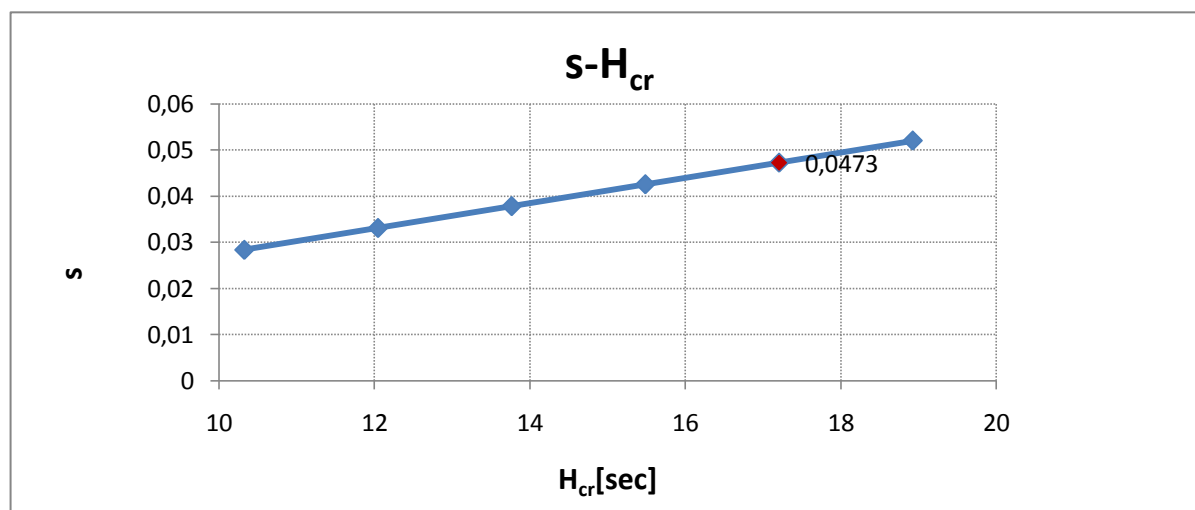
Οι υπολογισμοί του H_{cr} έγιναν στο πρόγραμμα Mathematica, με τη χρήση των τύπων 39, 40, 41, που έχουμε αναφέρει στην σελίδα 46.

Συνεπώς, με αντικατάσταση στην σχέση 41 έχουμε:

$$\omega^2 = k \cdot g \Rightarrow \left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot g \Rightarrow \lambda = \frac{T^2 \cdot g}{2\pi}$$

Το κρίσιμο ύψος κύματος υπολογίζεται ως εξής: $s = \frac{H}{\lambda} \Rightarrow H_{cr} = s \cdot \lambda$

Τα αποτελέσματα των υπολογισμών φαίνονται στο ακόλουθο σχήμα:



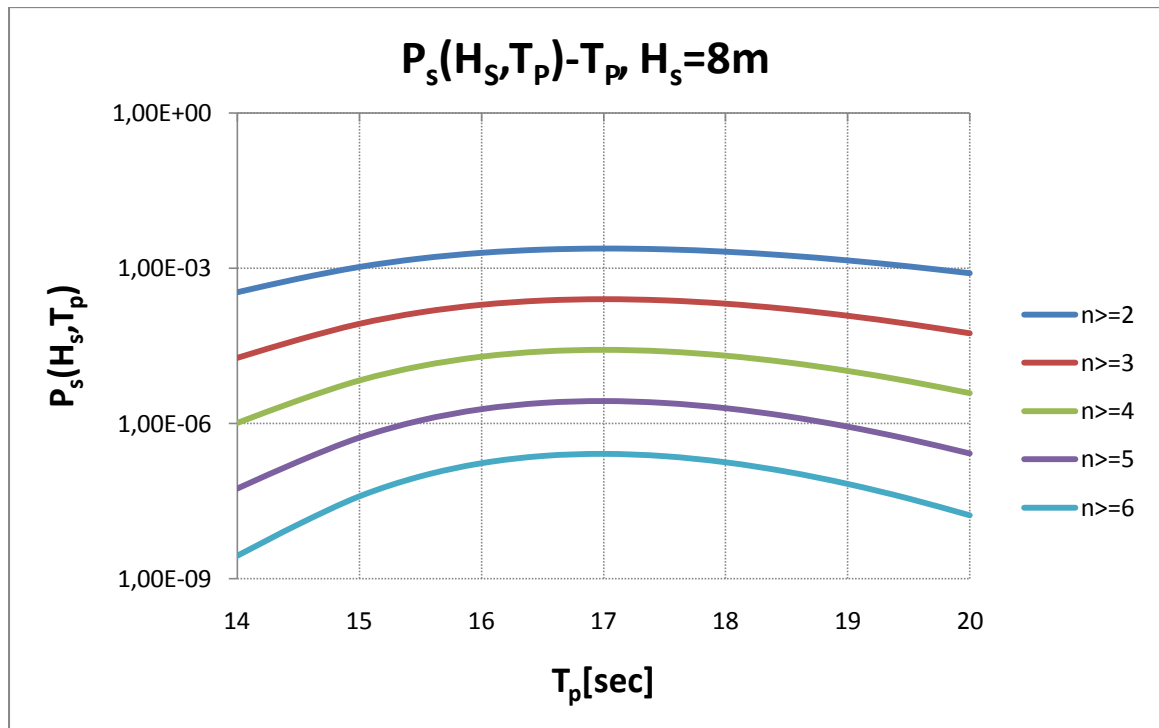
Σχήμα 5.13. Οξύτητα κύματος συναρτήσει του Κρίσιμου ύψους κύματος H_{cr} . (Το σημείο με $s=0.0473$ αντιστοιχεί στην ιδιοπερίοδο ταλάντωσης του πλοίου μας.)

5.1.2.1 Υπολογισμός πιθανοτήτων συνάντησης κρίσιμων ομάδων κύματος

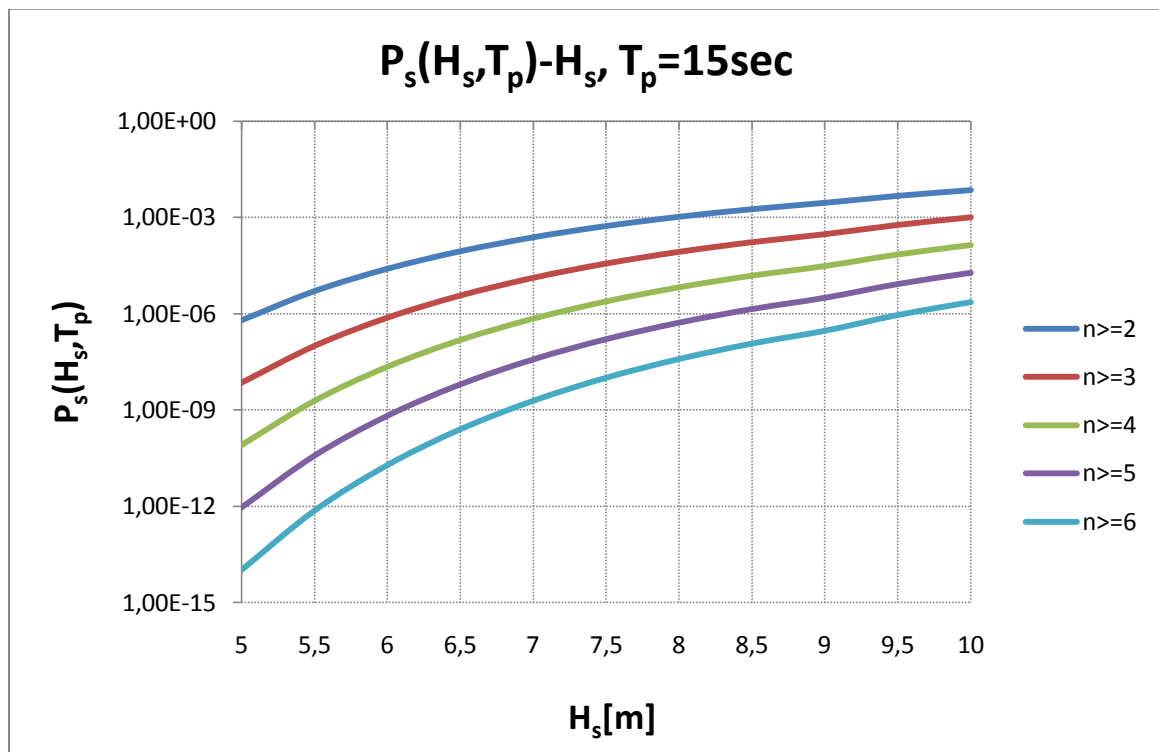
Θα επαναλάβουμε τους υπολογισμούς των πιθανοτήτων συνάντησης κρίσιμων ομάδων κύματος και για τις 3 περιπτώσεις συνδυασμών (H_s, T_p) για τα H_{cr} που αντιστοιχούν στις διακριτές τιμές του s που έχουμε επιλέξει (εκτός από τα διαγράμματα που αντιστοιχούν στο s και στο $0.7s$, που παρουσιάστηκαν πιο πάνω: σχήματα 5.6 έως 5.9). Οι υπολογισμοί έγιναν με τη χρήση του προγράμματος Mathematica και σε όλα τα διαγράμματα που ακολουθούν οι κλίμακες των κατακόρυφων αξόνων, που αφορούν πιθανότητες είναι λογαριθμικές με βάση το 10.

- **1^η Περίπτωση:** Επιλέγουμε σταθερό σημαντικό ύψος κύματος και εύρος τιμών για την περίοδο κορυφής T_w [sec] : $T_w \in [14 - 20]$. Για τον υπολογισμό των πιθανοτήτων $P_S(H_S, T_P)$ θεωρούμε ότι κάθε διακριτό ζεύγος τιμών (H_S, T_P) προκύπτει με H_S σταθερό και με βήμα **0.5 sec** για την περίοδο κορυφής του κύματος. Το σχήμα 5.14 περιέχει τις τιμές των υπολογισμών των αντίστοιχων πιθανοτήτων για το $H_{cr1} = 0.6 * H_{cr}$.
- **2^η Περίπτωση:** Επιλέγουμε σταθερή περίοδο κορυφής και εύρος τιμών για το σημαντικό ύψος κύματος H_S [m] : $H_S \in [5 - 10]$. Για τον υπολογισμό των πιθανοτήτων $P_S(H_S, T_P)$ θεωρούμε ότι κάθε διακριτό ζεύγος τιμών (H_S, T_P) προκύπτει με T_P σταθερό και με βήμα **0.5 sec** για το σημαντικό ύψος κύματος. Το σχήμα 5.15 περιέχει τις τιμές των υπολογισμών των αντίστοιχων πιθανοτήτων για το $H_{cr1} = 0.6 * H_{cr}$.
- **3^η Περίπτωση:** Στα σχήματα 5.16 και 5.17 παρουσιάζονται συγκριτικά οι πιθανότητες για όλα τα H_{cr} συναρτήσει της περιόδου κορυφής και του σημαντικού ύψους κύματος, αντίστοιχα, για ομάδα κυμάτων με $n \geq 3$.

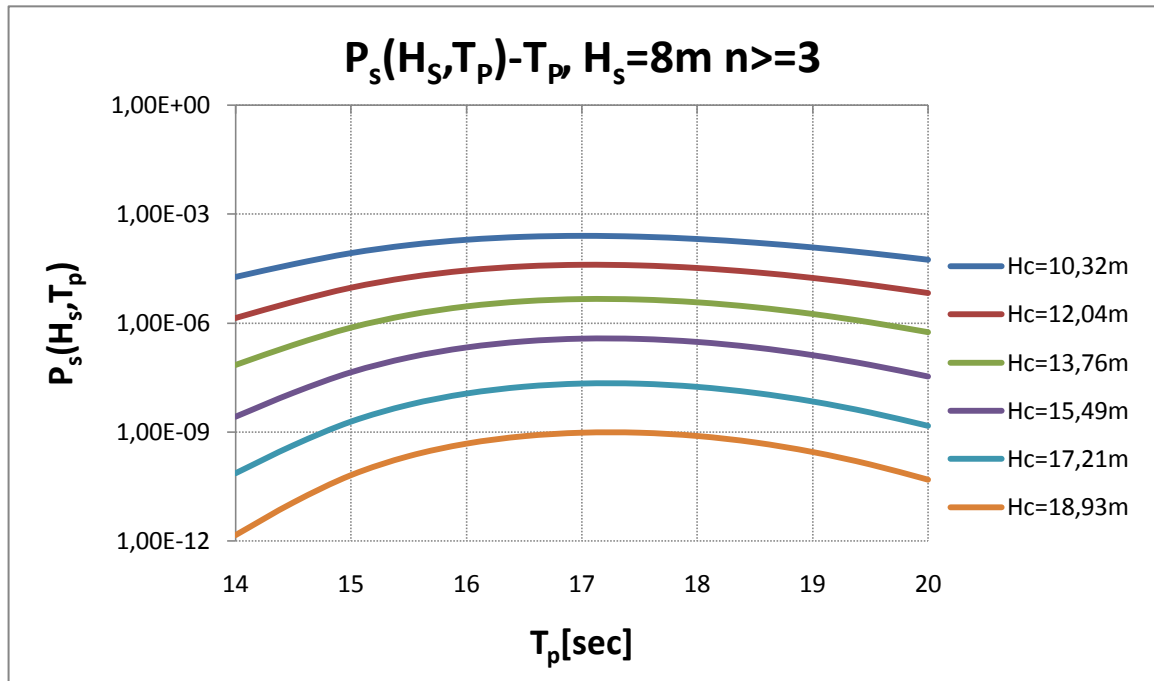
Οι πιθανότητες για τα υπόλοιπα H_{cr} παρατίθενται στο Παράρτημα Α.



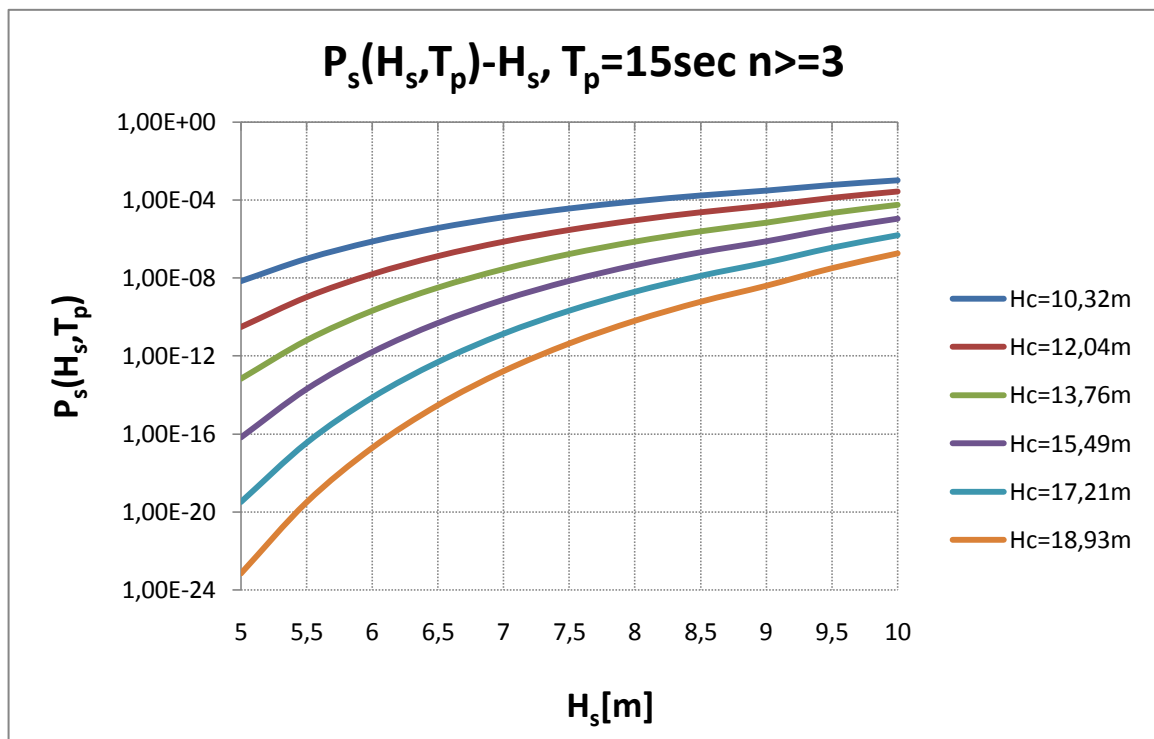
Σχήμα 5.14. Πιθανότητες συνάντησης κρίσιμων ομάδων κύματος με ύψος κύματος μεγαλύτερο του κρίσιμου ύψους $H_{cr} = 0,6H_s = 10,32, H_s = 8m$.



Σχήμα 5.15. Πιθανότητες συνάντησης κρίσιμων ομάδων κύματος με ύψος κύματος μεγαλύτερο του κρίσιμου ύψους $H_{cr} = 0,6H_s = 10,32, T_p = 15sec$.



Σχήμα 5.16. Σύγκριση των πιθανοτήτων συνάντησης κρίσιμων ομάδων κύματος με $n \geq 3$ και ύψος κύματος μεγαλύτερο από $0.6H_{cr}$, $0.7H_{cr}$, $0.8H_{cr}$, $0.9H_c$, H_{cr} και $1.1H_{cr}$ αντίστοιχα.



Σχήμα 5.17. Σύγκριση των πιθανοτήτων συνάντησης κρίσιμων ομάδων κύματος με $n \geq 3$ και ύψος κύματος μεγαλύτερο από $0.6H_{cr}$, $0.7H_{cr}$, $0.8H_{cr}$, $0.9H_{cr}$, H_{cr} και $1.1H_{cr}$ αντίστοιχα.

- **Χρόνος παρατήρησης της θάλασσας ίσος με μία ώρα:** Υπολογισμός των πιθανοτήτων για σταθερή περίοδο κορυφής $T_P=15\text{sec}$ και εύρος τιμών για το σημαντικό ύψος κύματος H_S [m] : $H_S \in [5 - 10]$. Για τον υπολογισμό των πιθανοτήτων $P_S(H_S, T_P)$ θεωρούμε ότι κάθε διακριτό ζεύγος τιμών (H_S, T_P) προκύπτει με T_P σταθερό και με βήμα **0.5 sec** για το σημαντικό ύψος κύματος.

Για $T_P=15\text{sec}$ η περίοδος μηδενικής υπέρβασης για την περιοχή λειτουργίας του πλοίου υπολογίζεται ίση με:

$$T_Z = 10.66 \text{ sec}$$

Για χρόνο παρατήρησης ίσο με 3600 sec πολλαπλασιάζουμε όλες τις πιθανότητες που υπολογίσαμε στην 1^η περίπτωση που εξετάσαμε με τον μέσο αριθμό κυμάτων «N» που συναντάμε σε μία ώρα.

Όπου:

$$N = \frac{3600}{T_Z} = 338$$

και υπολογίζουμε τις πιθανότητες να συναντήσουμε τις αντίστοιχες ομάδες κυμάτων σε μία ώρα. **Τα σχήματα με τα σχετικά αποτελέσματα των υπολογισμών παρατίθενται στο παράρτημα Α.**

5.1.2.2 Υπολογισμός πιθανοτήτων εμφάνισης ζεύγους τιμών σημαντικού ύψους κύματος – μέσης περιόδου μηδενικής υπέρβασης για την περιοχή λειτουργίας του πλοίου

Χρησιμοποιούμε την κατανομή Weibull για την εύρεση των πιθανοτήτων καταστάσεων θάλασσας για την περιοχή λειτουργίας, για ορισμένα ζεύγη τιμών (H_S, T_P) . Η σχετική θεωρία έχει αναφερθεί στο κεφάλαιο 4 και οι υπολογισμοί μας γίνονται με τις σχέσεις 32, 33 και 34.

Συγκεκριμένα, στους υπολογισμούς μας τα όρια ολοκλήρωσης για αυτές τις πιθανότητες είναι για το σημαντικό ύψος γύρω από κάθε διακριτή τιμή, που εξετάζουμε, δηλαδή $H_S \pm 0.25[m]$ και για την περίοδο μηδενικής υπέρβασης γύρω από κάθε διακριτή τιμή, που εξετάζουμε, δηλαδή $T_Z \pm 0.25[s]$ για κάθε ζεύγος τιμών (H_S, T_P) . Οι πιθανότητες αυτές δεν υπολογίζονται για διακριτές τιμές συνδυασμών H_S και T_Z , αλλά για μία περιοχή λειτουργίας γύρω από αυτές τις τιμές.

π.χ. Για σημαντικό ύψος κύματος και περίοδο κύματος ίσα με: $H_S=5.5$ m και $T_P = 15$ sec αντίστοιχα, η περίοδος μηδενικής υπέρβασης είναι:

$$T_Z = 10.71sec$$

Τα όρια ολοκλήρωσης για την εύρεση της πιθανότητας είναι:

$H_S \in [5.25, 5.75]$ και $T_Z \in [10.46, 10.96]$, θα έχουμε:

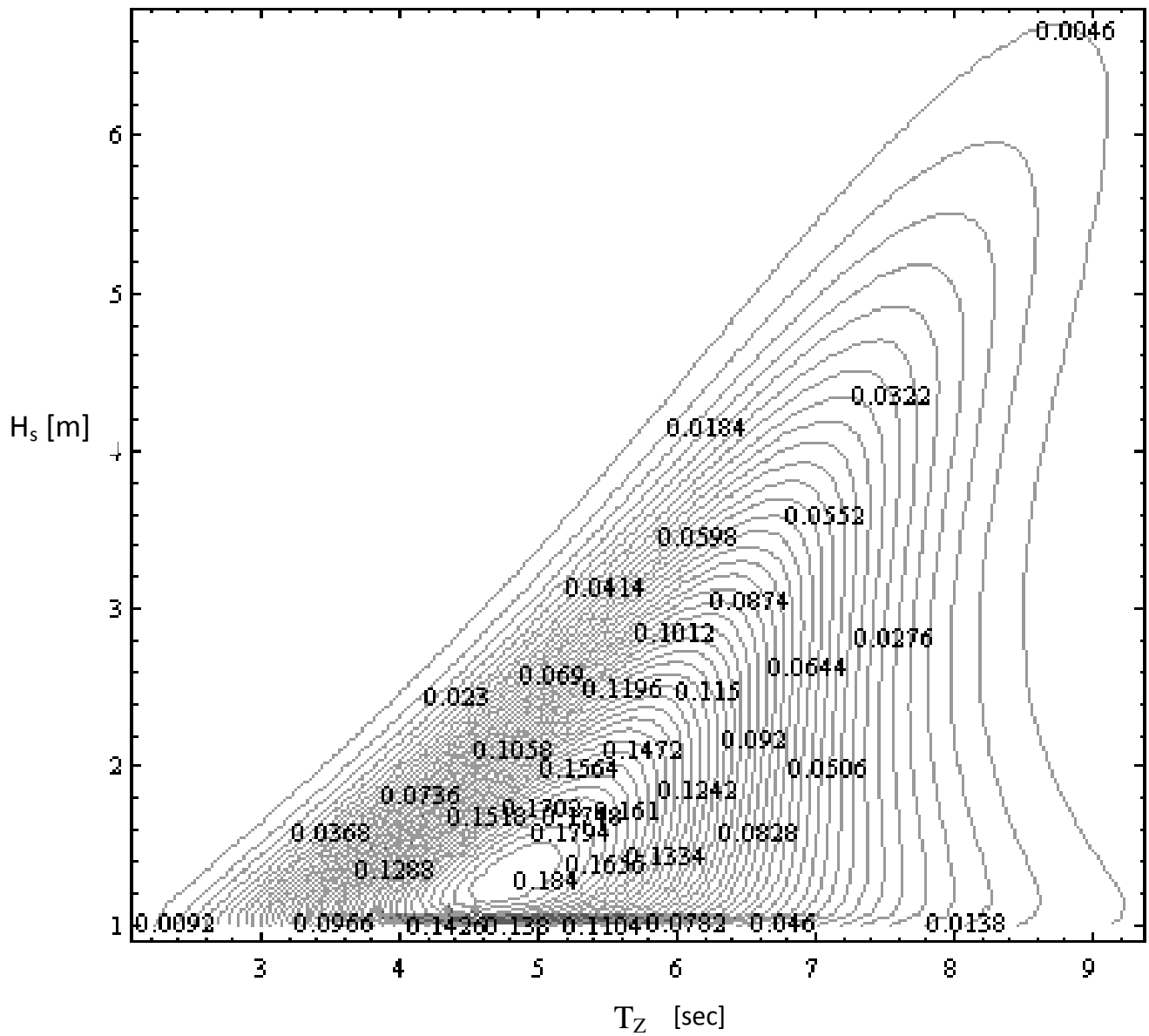
$$P_L(H_S, T_Z) = \int_{5.25}^{5.75} \int_{10.46}^{10.96} f(H_S, T_Z) dH_S dT_Z$$

Στον υπολογισμό όπως έχουμε προαναφέρει θεωρούμε ότι ισχύει $T_Z=T_P/1.4$.

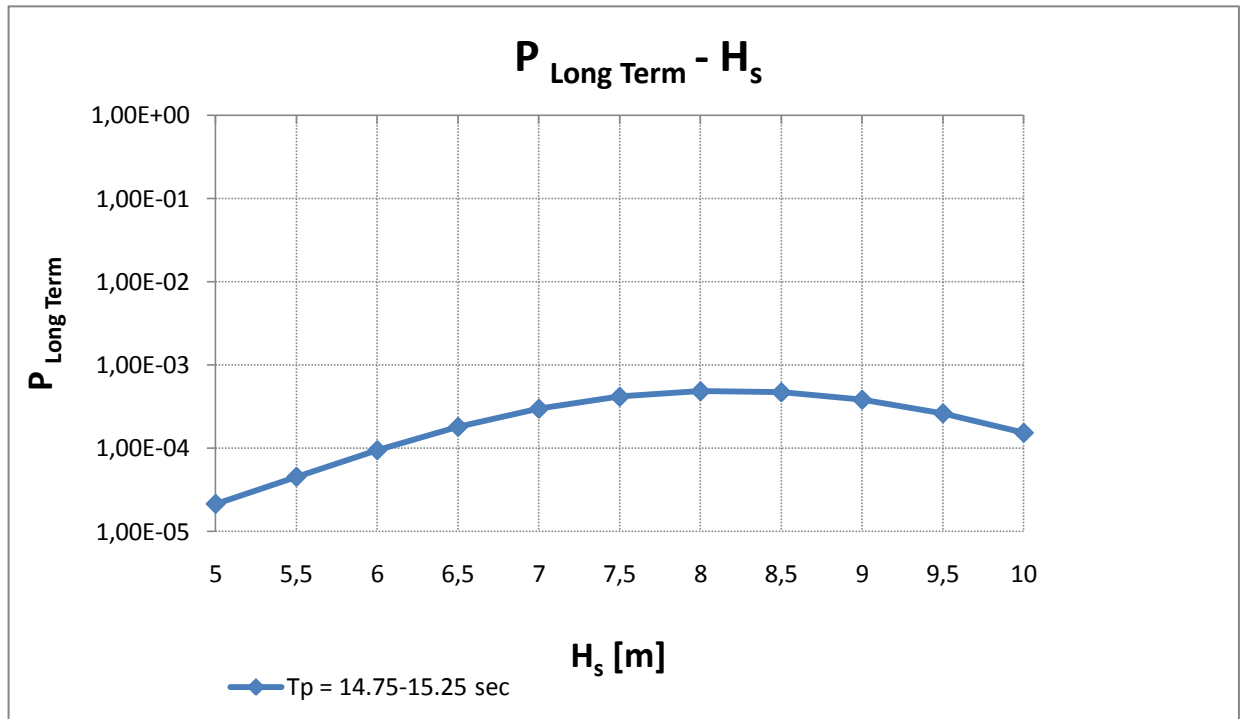
Οι τιμές που χρησιμοποιήθηκαν για τις παραμέτρους της κατανομής είναι οι εξής :

$\alpha = 1.41$, $\beta = 1.12$, $\gamma = 0.987$, $\alpha_1 = 1.24$, $\alpha_2 = 0.337$, $\alpha_3 = 0.538$, $b_1 = 0.0728$, $b_2 = 0.383$, $b_3 = -0.665$.

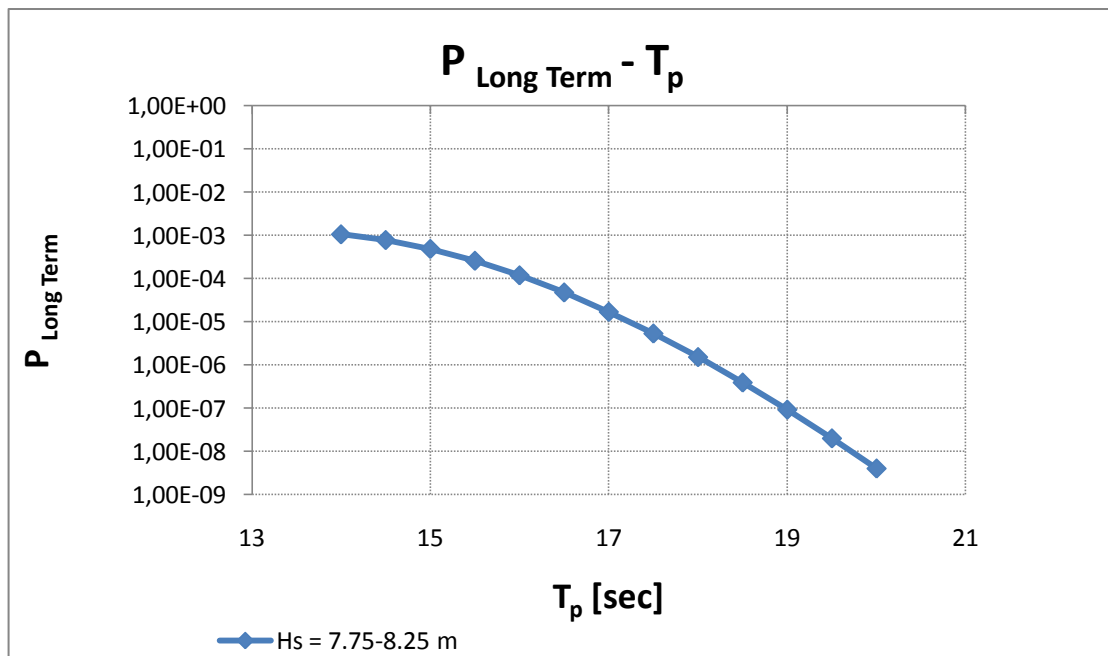
Το σχήμα 5.18 αναπαρίστανται οι ισοϋψείς καμπύλες των πιθανοτήτων εμφάνισης ζεύγους τιμών σημαντικού ύψους κύματος – περιόδου μηδενικής υπέρβασης για την περιοχή λειτουργίας του πλοίου, για την κατανομή που χρησιμοποιήσαμε. Τα σχήματα 5.19 και 5.20 περιέχουν τις υπολογισμένες πιθανότητες εμφάνισης ζεύγους (H_S, T_P) συναρτήσει του σημαντικού ύψους κύματος και της περιόδου κορυφής.



Σχήμα 5.18. Διάγραμμα ισοϋψών καμπύλων πιθανοτήτων, του σημαντικού ύψους συναρτήσει της περιόδου μηδενικής υπέρβασης με βάση επεξεργασία την από κοινού κατανομή, προτείνεται στην εργασία των MATHIESEN & BITNER-GREGERSEN, 1990.



Σχήμα 5.19. Πιθανότητες εμφάνισης ζεύγους τιμών σημαντικού ύψους κύματος – περιόδου μηδενικής υπέρβασης για την περιοχή λειτουργίας του πλοίου συναρτήσει του σημαντικού ύψους κύματος.



Σχήμα 5.20. Πιθανότητες εμφάνισης ζεύγους τιμών σημαντικού ύψους κύματος – περιόδου μηδενικής υπέρβασης για την περιοχή λειτουργίας του πλοίου συναρτήσει της περιόδου κορυφής.

5.1.2.3 Υπολογισμός της συνολικής πιθανότητας συνάντησης κατάστασης θάλασσας με χαρακτηριστικά (H_S, T_P) και κρίσιμων ομάδων κύματος με ύψος κύματος μεγαλύτερο από το εκάστοτε H_{cr}

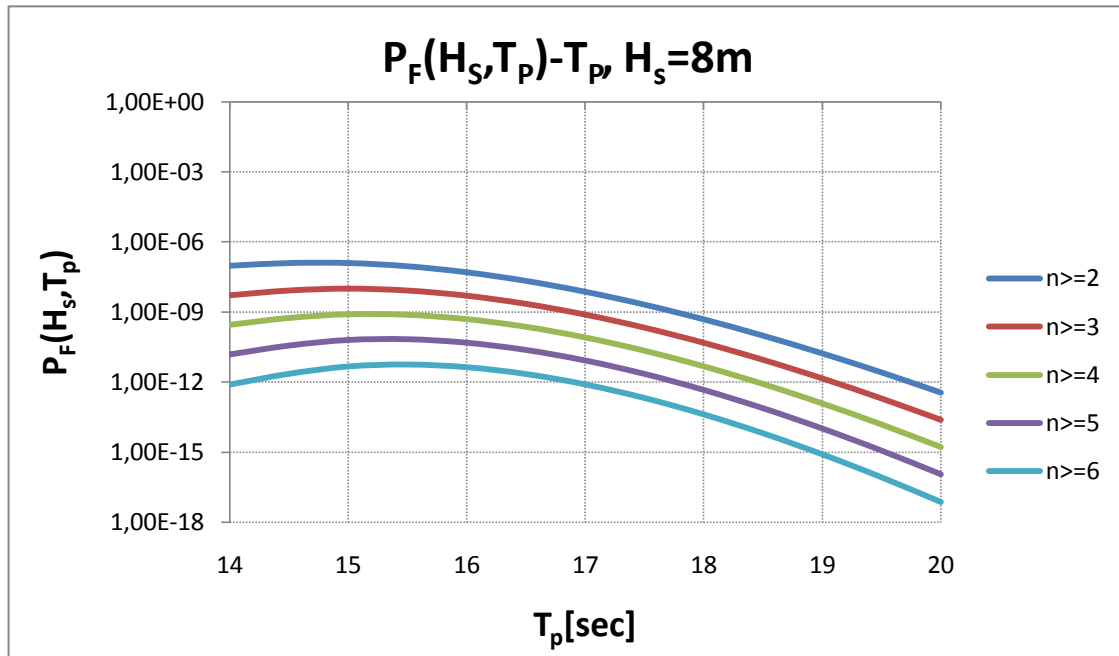
Οι συνολικές πιθανότητες προκύπτουν από το γινόμενο των πιθανοτήτων συνάντησης κρίσιμων ομάδων κύματος (P_S) με αριθμό κυμάτων $n \geq 2, 3, \dots, 6$ και των πιθανοτήτων εμφάνισης ζεύγους τιμών σημαντικού ύψους κύματος – περιόδου μηδενικής υπέρβασης (P_L) για την περιοχή λειτουργίας του πλοίου ως εξής:

$$P_F = P_S \cdot P_L$$

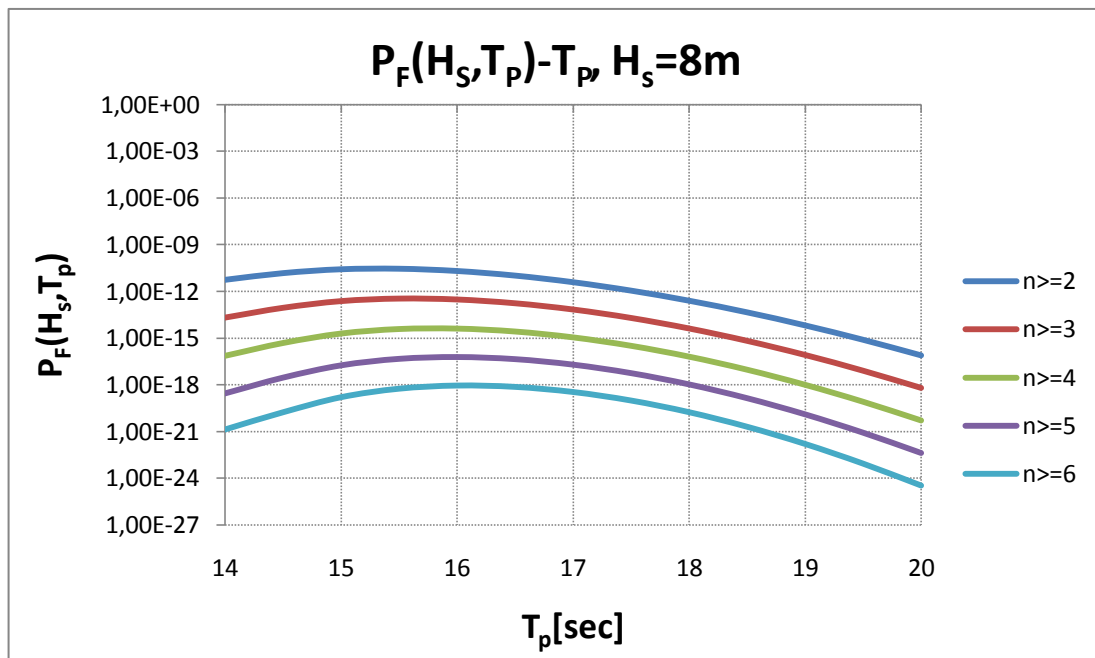
Οι υπολογισμοί των συνολικών πιθανοτήτων πραγματοποιούνται για τις 2 περιπτώσεις συνδυασμών (H_S, T_P) και για τα εξής κρίσιμα ύψη κύματος: $0.6H_{cr}$, $0.7 H_{cr}$, $0.8 H_{cr}$, $0.9 H_{cr}$, H_{cr} , $1.1 H_{cr}$. Σε όλα τα διαγράμματα που ακολουθούν οι κλίμακες των κατακόρυφων αξόνων, που αφορούν πιθανότητες, είναι λογαριθμικές με βάση το 10.

- **1^η Περίπτωση:** Επιλέγουμε σταθερό σημαντικό ύψος κύματος και εύρος τιμών για την περίοδο κορυφής T_W [sec] : $T_W \in [14 - 20]$. Για τον υπολογισμό των πιθανοτήτων $P_S(H_S, T_P)$ θεωρούμε ότι κάθε διακριτό ζεύγος τιμών (H_S, T_P) προκύπτει με H_S σταθερό και με βήμα **0.5 sec** για την περίοδο κορυφής του κύματος. Τα σχήματα 5.21, 5.22 περιέχουν τις τιμές των υπολογισμών των αντίστοιχων πιθανοτήτων για $H_{cr1}=0,6H_{cr}$ και για την τιμή του κρίσιμου ύψους κύματος που αντιστοιχεί στο κριτήριο καιρού, δηλαδή $H_{cr}=17.21m$.
- **2^η Περίπτωση:** Επιλέγουμε σταθερή περίοδο κορυφής και εύρος τιμών για το σημαντικό ύψος κύματος H_S [m] : $H_S \in [5 - 10]$. Για τον υπολογισμό των πιθανοτήτων $P_S(H_S, T_P)$ θεωρούμε ότι κάθε διακριτό ζεύγος τιμών (H_S, T_P) προκύπτει με T_P σταθερό και με βήμα **0.5 sec** για το σημαντικό ύψος κύματος. Τα σχήματα 5.23, 5.24 περιέχουν τις τιμές των υπολογισμών των αντίστοιχων πιθανοτήτων για $H_{cr1}=0,6H_{cr}$ και για την τιμή του κρίσιμου ύψους κύματος που αντιστοιχεί στο κριτήριο καιρού, δηλαδή $H_{cr}=17.21m$.

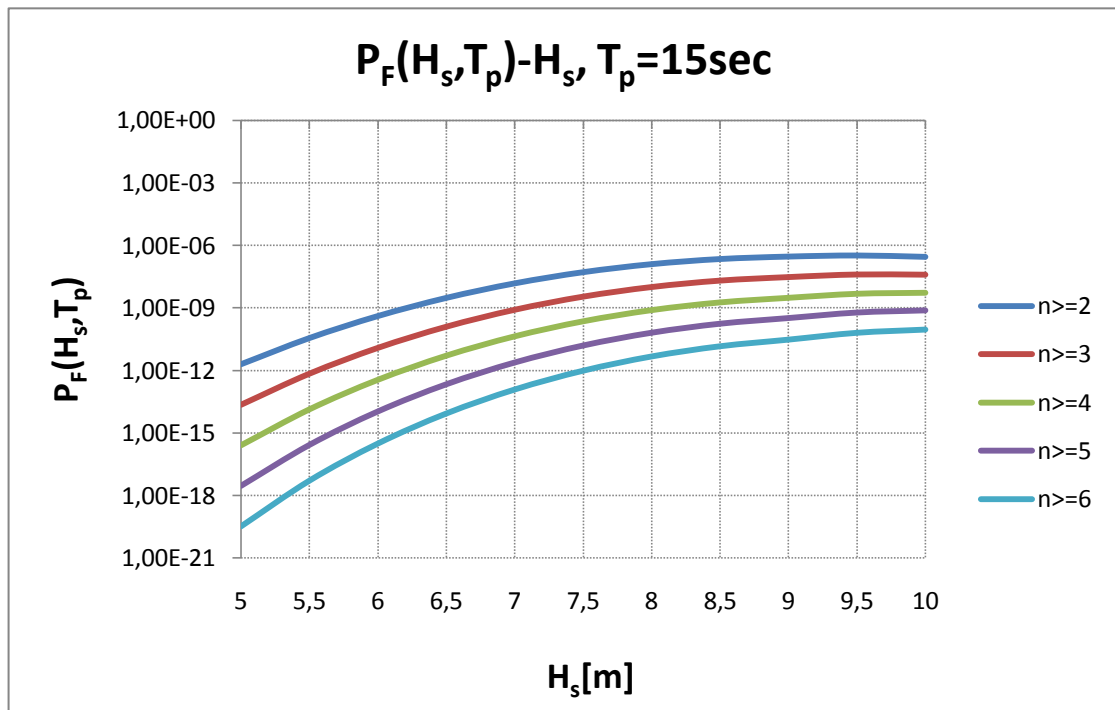
Τα σχήματα που παρουσιάζονται στις παραπάνω περιπτώσεις είναι ενδεικτικά και τα υπόλοιπα σχήματα με τα σχετικά αποτελέσματα βρίσκονται στο παράρτημα Α.



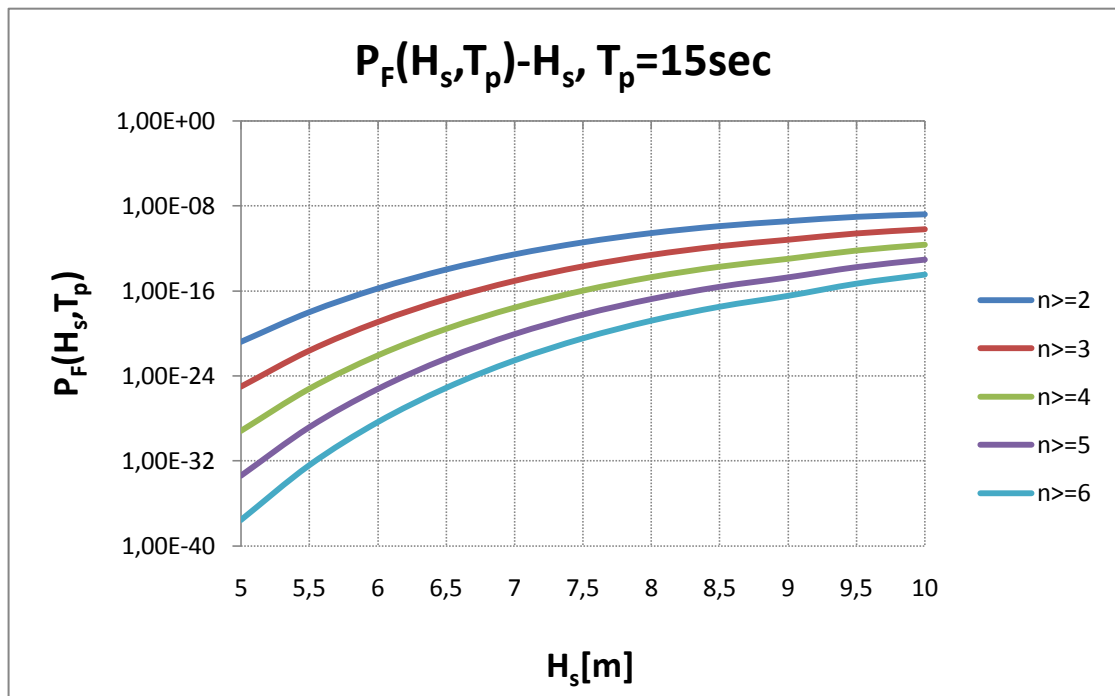
Σχήμα 5.21. Συνολικής πιθανότητα συνάντησης συγκεκριμένης κατάστασης θάλασσας και κρίσιμων ομάδων κύματος συναρτήσει της περιόδου κορυφής με $T_w \in [0.9T_0, 1.1T_0]$, $H_s = 8m$ και $H_{cr} = 0,6 H_{cr} = 10,326 m$



Σχήμα 5.22. Συνολικής πιθανότητα συνάντησης συγκεκριμένης κατάστασης θάλασσας και κρίσιμων ομάδων κύματος συναρτήσει της περιόδου κορυφής με $T_w \in [0.9T_0, 1.1T_0]$, $H_s = 8m$ και $H_{cr} = 17.21 m$

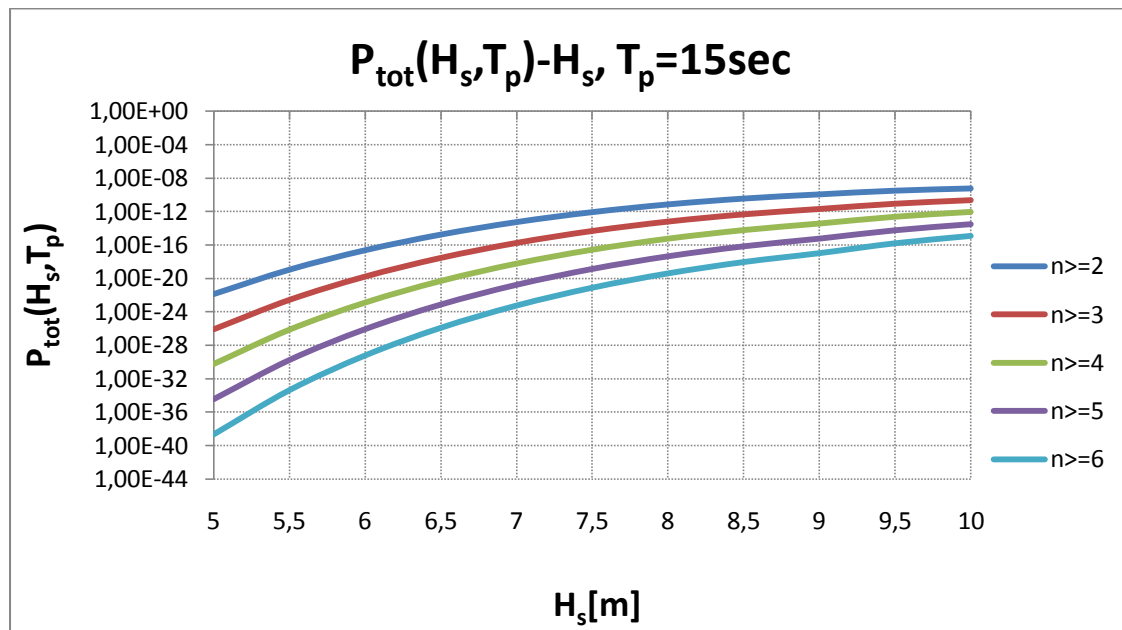


Σχήμα 5.23. Συνολική πιθανότητα συνάντησης συγκεκριμένης κατάστασης θάλασσας και κρίσιμων ομάδων κύματος συναρτήσεως του σημαντικού ύψους κύματος με $H_s \in [5, 10]$, $T_p = 15 \text{sec}$ και $H_{cr} = 0,6 H_{cr} = 10,326 \text{ m}$



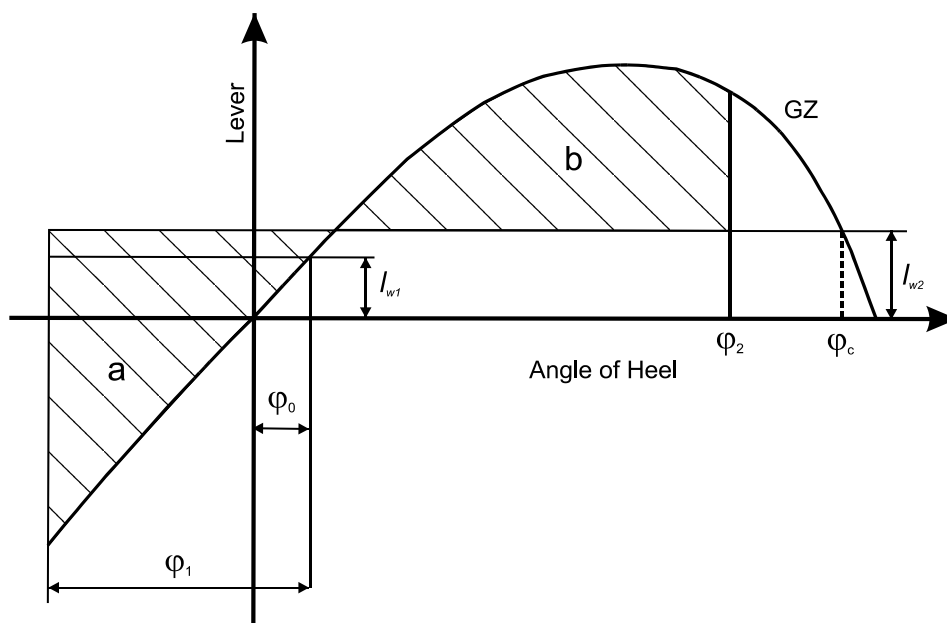
Σχήμα 5.24. Συνολική πιθανότητα συνάντησης συγκεκριμένης κατάστασης θάλασσας και κρίσιμων ομάδων κύματος συναρτήσεως του σημαντικού ύψους κύματος με $H_s \in [5, 10]$, $T_p = 15 \text{sec}$ και $H_{cr} = 17.21 \text{ m}$

Υπολογισμός πιθανοτήτων συνάντησης δυσμενέστερων καιρικών συνθηκών από αυτές, που προϋποθέτει το Κριτήριο Καιρού



Σχήμα 5.24α. Συνολική πιθανότητα συνάντησης συγκεκριμένης κατάστασης θάλασσας και κρίσιμων ομάδων κύματος συναρτήσει του σημαντικού ύψους κύματος με $H_s \in [5, 10]$, $T_p=15 \text{sec}$ και $H_{cr}=17.21 \text{ m}$

5.1.3 Παραμετροποίηση Κριτηρίου Καιρού



Σχήμα 5.25. Μοχλοβραχίονας επαναφοράς συναρτήσει της γωνίας εγκάρσιας κλίσης.

Στην παρούσα φάση της μελέτης μας θέλουμε να υπολογίσουμε οριακές καταστάσεις για το πλοίο μας, όσον αφορά την εφαρμογή του Κριτηρίου Καιρού. Μεταβάλλουμε συγκεκριμένα μεγέθη που υπεισέρχονται στο Κριτήριο Καιρού, ώστε να έχουμε ισότητα των δύο εμβαδών του ανωτέρω σχήματος, δηλαδή: **a=b**. Συγκεκριμένα, θέλουμε να υπολογίσουμε την μέγιστη ταχύτητα ανέμου, στην οποία μπορεί να ανταπεξέλθει το πλοίο μας, καθώς επίσης και το μέγιστο εύρος διατοιχισμού, που μπορεί να αντέξει. Στόχος μας είναι να εκτιμήσουμε την ασφάλεια που παρέχει το Κριτήριο Καιρού, με τις συνθήκες που προϋποθέτει, στο πλοίο μας. Οι περιπτώσεις που θα εξετάσουμε είναι οι ακόλουθες:

1^η περίπτωση: Θα υπολογίσουμε το μοχλοβραχίονα ανέμου I_{w2} , ώστε να ικανοποιείται το Κριτήριο Καιρού οριακά, δηλαδή να έχουμε ισότητα των δύο εμβαδών **a = b**.

2^η περίπτωση: Θα υπολογίσουμε το εύρος διατοιχισμού ϕ_1 , ώστε να ικανοποιείται το Κριτήριο Καιρού οριακά, δηλαδή να έχουμε ισότητα των δύο εμβαδών **a = b**.

Όλοι οι υπολογισμοί έγιναν στο πρόγραμμα Mathematica.

Στην 1^η περίπτωση ελέγξαμε εάν επαληθεύονται οι απαιτήσεις του Κριτηρίου Καιρού για τη νέα θέση ισορροπίας και για την γωνία ϕ_2 , δηλαδή:

- $\phi_0' \leq 16^\circ$
- $\phi_0' \leq 0.8 \cdot \phi_c$
- $\phi_2 = \min[\phi_f, 50, \phi_c]$

Αριθμητικά δεδομένα Κριτηρίου Καιρού:

Τα δεδομένα που εισάγονται στο πρόγραμμα Mathematica και γίνονται οι υπολογισμοί για το Κριτήριο Καιρού έχουν αναφερθεί στο σχετικό υπόκεφάλαιο 5.5.1 με την πρώτη εφαρμογή του Κριτηρίου Καιρού στο συγκεκριμένο πλοίο.

1^η περίπτωση: Αρχικά είναι άγνωστος ο μοχλοβραχίονας ανέμου l_{w2} και ο υπολογισμός του γίνεται χρησιμοποιώντας οριακή συνθήκη για τα δύο υπολογιζόμενα εμβαδά, δηλαδή $a=b$.

2^η περίπτωση: Έπειτα είναι άγνωστο το εύρος διατοιχισμού φ_1 και ο υπολογισμός του γίνεται χρησιμοποιώντας την ίδια οριακή συνθήκη με την 1^η περίπτωση.

Αριθμητικά αποτελέσματα Κριτηρίου Καιρού:

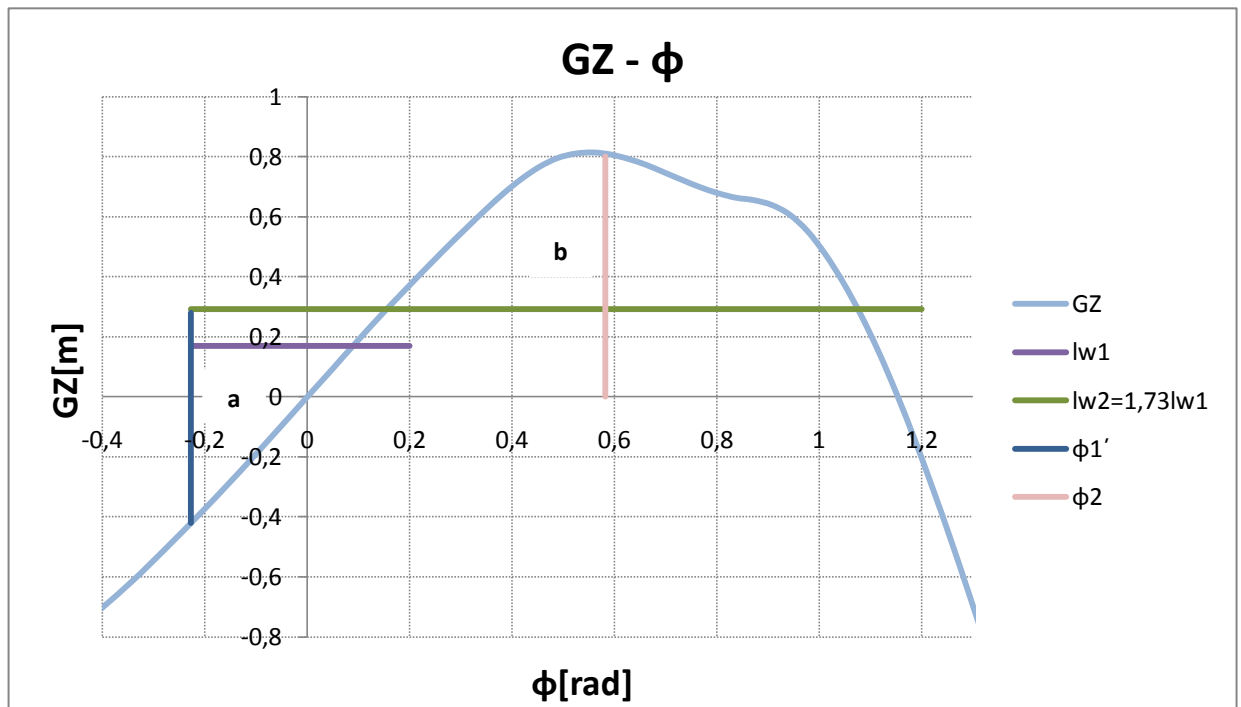
Επίλυση 1^{ου} προβλήματος (1^η περίπτωση):

- $l_{w2} = 1.73 * l_{w1}$ ή $l_{w2} = 0.29215 m$
- $U_{gust} = 34.20 m/s$
- $\varphi'_o = 8.29 degrees$ ή $0.1446 rad \leq 0.8 * \varphi_c = 0.8633 rad$
- $\varphi_2 = 33.4 degrees \leq 50 degrees \leq \varphi_c = 61.83 degrees$

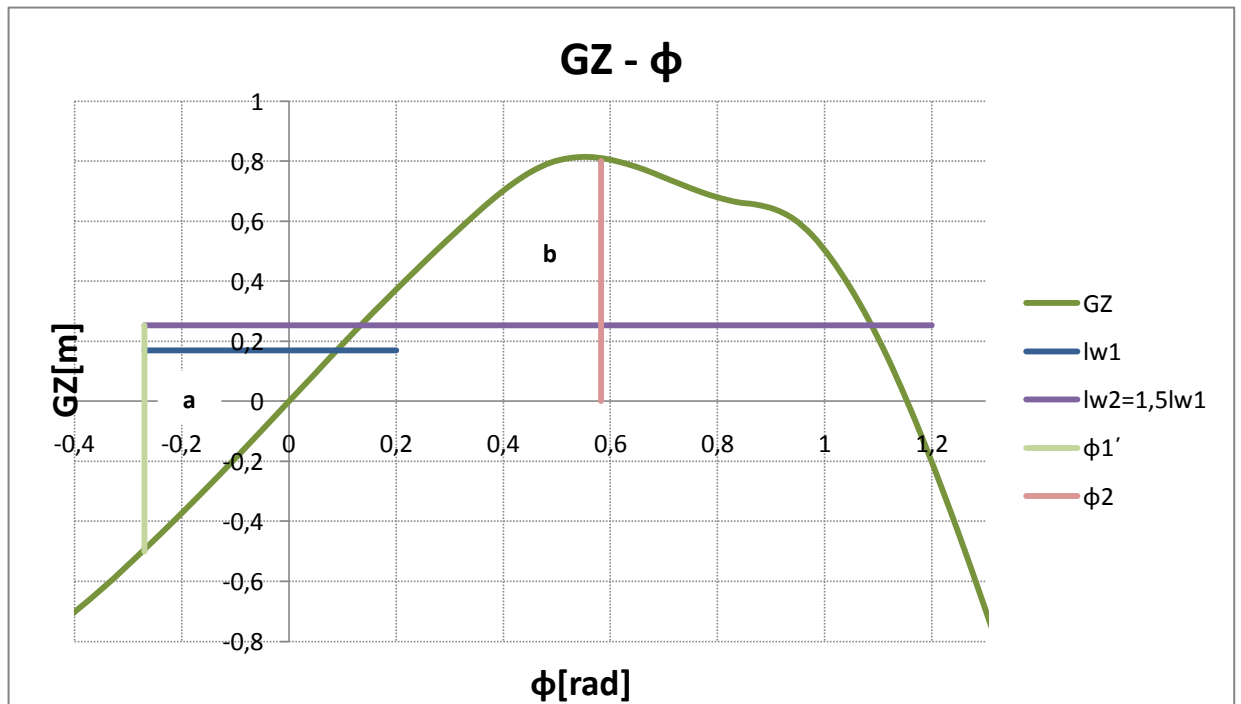
Επίλυση 2^{ου} προβλήματος (2^η περίπτωση):

- $\varphi_1 = 20.54 degrees$ ή $\varphi_1 = 0.3585 rad$

Ακολουθούν τα διαγράμματα του μοχλοβραχίονα επαναφοράς συναρτήσει της γωνίας κλίσης και για τις δύο περιπτώσεις. Σχήματα 5.26 και 5.27 αντίστοιχα:



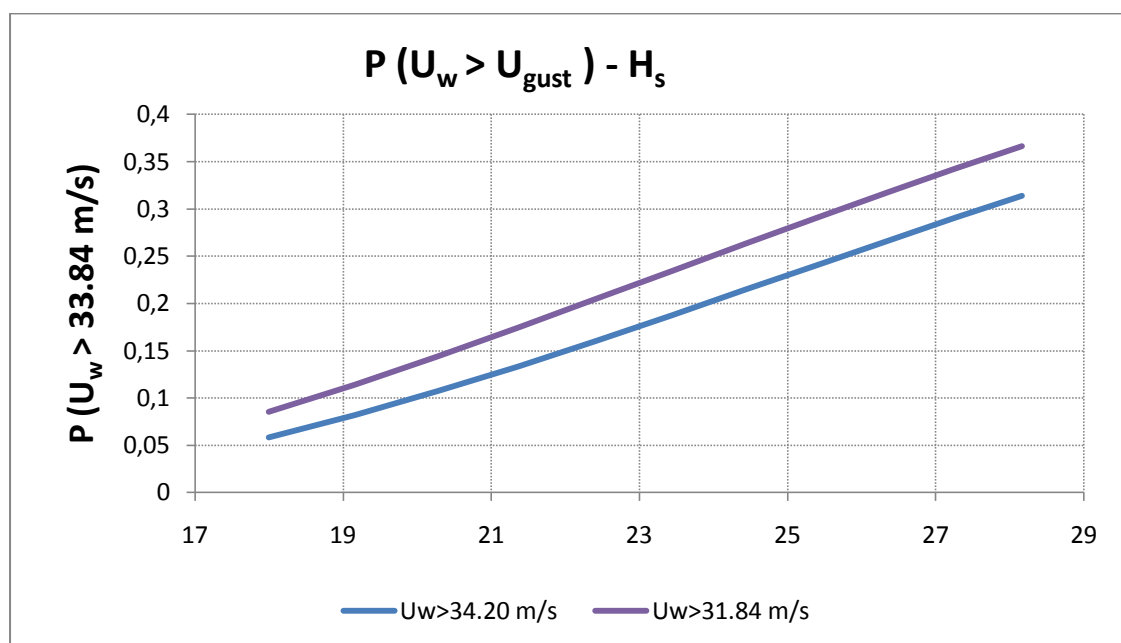
Σχήμα 5.26. Μοχλοβραχίονας επαναφοράς συναρτήσει της γωνίας κλίσης με Εφαρμογή του Κριτηρίου Καιρού, υποθέτοντας άγνωστο τον μοχλοβραχίονα επαναφοράς lw_2 (1^η περίπτωση).



Σχήμα 5.27. Μοχλοβραχίονας επαναφοράς συναρτήσει της γωνίας κλίσης με Εφαρμογή του Κριτηρίου Καιρού, υποθέτοντας άγνωστο το εύρος διατοιχισμού ϕ_1 (2^η περίπτωση).

5.1.3.1 Υπολογισμοί Ανέμου

Στη συνέχεια θα επαναλάβουμε τους υπολογισμούς της ενότητας I ώστε να βρούμε τις πιθανότητες να συναντήσει το πλοίο μας άνεμο με ένταση μεγαλύτερη από τις τιμές της ριπής ανέμου που υπολογίσαμε στην 1^η περίπτωση για τις διάφορες τιμές I_{w2} . Οι υπολογισμοί έγιναν με την χρήση του προγράμματος Mathematica, ακολουθούν τα διαγράμματα των πιθανοτήτων:



Σχήμα 5.28. Πιθανότητες συνάντησης ριπής ανέμου μεγαλύτερης από 31.84 m/s, 34.20 m/s αντίστοιχα, συναρτήσει της μέσης ταχύτητας ανέμου.

Το διάγραμμα συναρτήσει του σημαντικού ύψους κύματος βρίσκεται στο Παράρτημα Α.

5.1.4 Μεταβολή του πλάτους διατοιχισμού φ_1 και εύρεση του αντίστοιχου l_{w2} .

Στο στάδιο αυτό μεταβάλλουμε το πλάτος διατοιχισμού του πλοίου μας σε ένα εύρος τιμών επιλέγοντας ορισμένες διακριτές τιμές για αυτό και εφαρμόζουμε το Κριτήριο Καιρού στο πλοίο μας, για να υπολογίσουμε τον μοχλοβραχίονα ανέμου l_{w2} , λαμβάνοντας υπόψη από το ενεργειακό ισοδύναμο την ισότητα των δύο εμβαδών του Κριτηρίου Καιρού, δηλαδή $a=b$. Στόχος μας είναι να υπολογίσουμε για κάθε γωνία φ_1 την μέγιστη ένταση ριπής ανέμου, που μπορεί να δεχθεί το πλοίο μας, ώστε να ικανοποιεί οριακά το Κριτήριο Καιρού. Στη συνέχεια υπολογίζουμε τις πιθανότητες να συναντήσει το πλοίο μας συνθήκες ανέμου δυσμενέστερες από αυτές που υπολογίσαμε με την εφαρμογή του Κριτηρίου Καιρού ώστε να πληρείται η αρχική συνθήκη καθώς και τις πιθανότητες συνάντησης κρίσιμων ομάδων κύματος και τις συνολικές πιθανότητες.

5.1.4.1 Εφαρμογή Κριτηρίου Καιρού

Μεταβάλλουμε το πλάτος διατοιχισμού φ_1 σε ένα εύρος τιμών, $\varphi_1 \in [9, 20] \text{degrees}$. Επιλέγουμε ορισμένες διακριτές τιμές γι' αυτό και πραγματοποιούμε για κάθε μία από αυτές τους υπολογισμούς του Κριτηρίου Καιρού, ώστε να βρούμε τον μοχλοβραχίονα ανέμου l_{w2} , χρησιμοποιώντας την ακόλουθη εξίσωση:

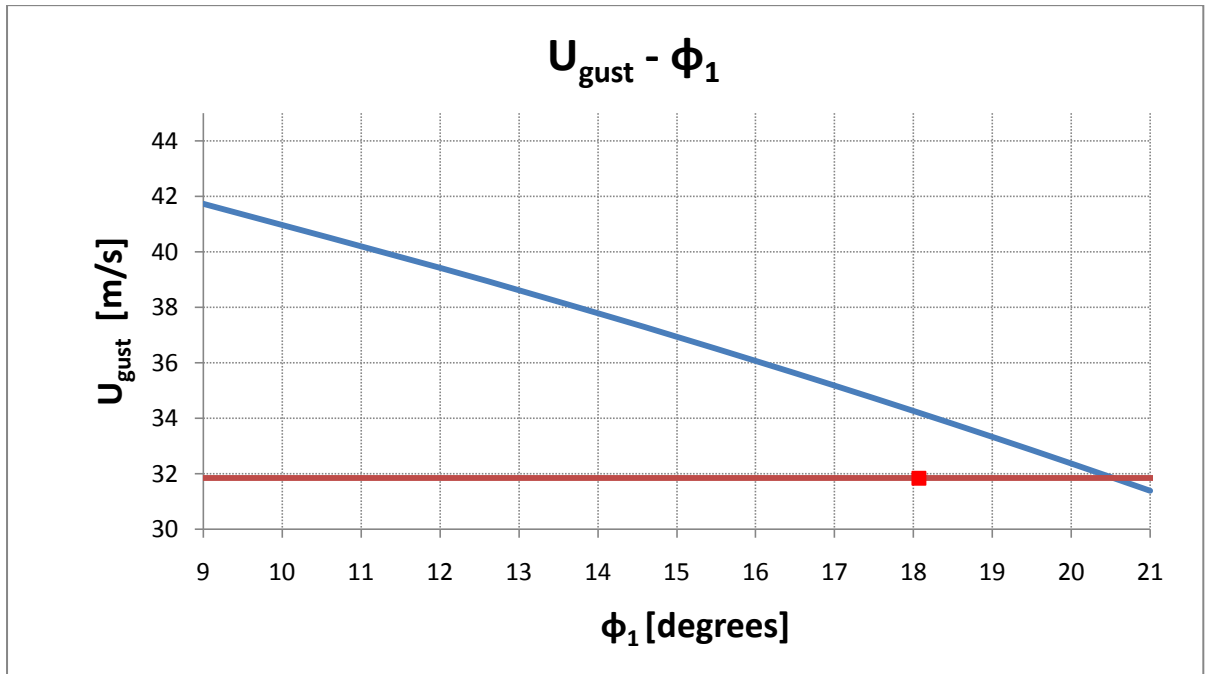
$$\bullet \quad a = b \Rightarrow \int_{(\varphi_0 - \varphi_1)}^{\varphi'_0} (l_{w2} - GZ) d\varphi = \int_{\varphi'_0}^{\varphi'_2} (GZ - l_{w2}) d\varphi$$

Έπειτα υπολογίζουμε τα Κρίσιμα Ύψη Κύματος H_{cr} , που αντιστοιχούν σε κάθε ένα πλάτος διατοιχισμού φ_1 . Όλοι υπολογισμοί πραγματοποιήθηκαν στο πρόγραμμα Mathematica.

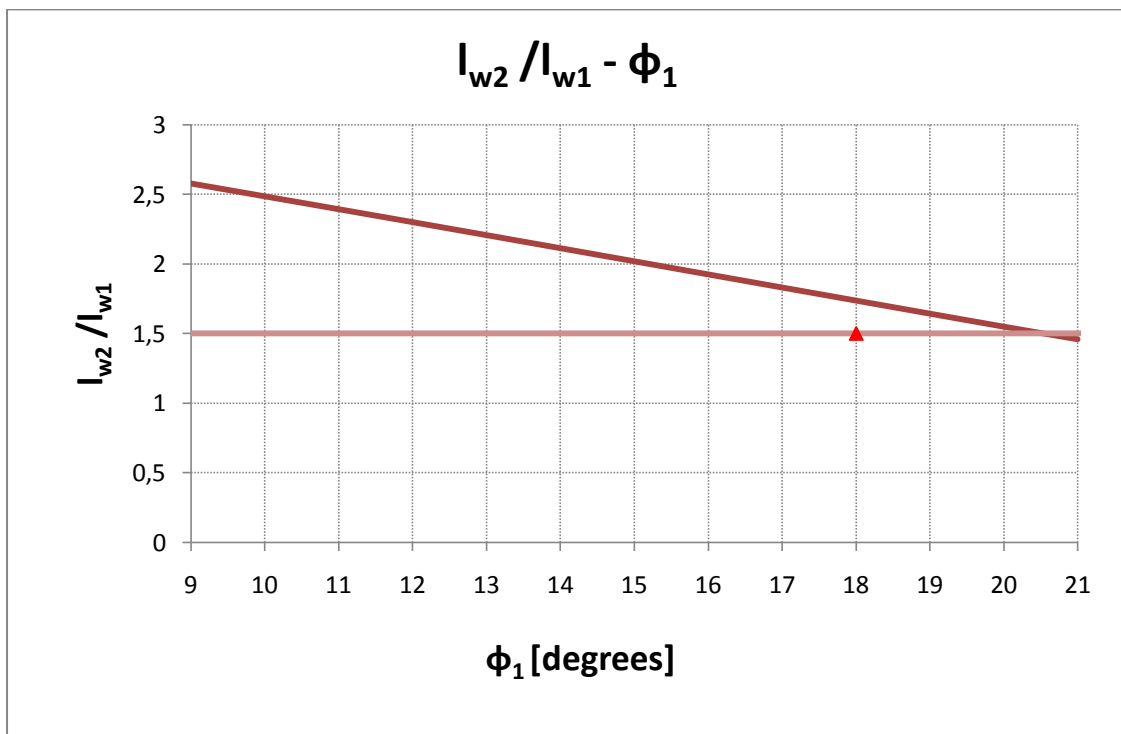
Αποτελέσματα εφαρμογής Κριτηρίου Καιρού

φ_1 [degrees]	φ_1 [rad]	l_{w1} [m]	l_{w2} [m]	l_{w2}/l_{w1}	U_{gust} [m/s]	H_{cr} [m]
9	0,157	0,169	0,435	2,58	41,73	4,27
12	0,209	0,169	0,388	2,30	39,43	7,59
14	0,244	0,169	0,357	2,11	37,79	10,33
15	0,262	0,169	0,341	2,02	36,94	11,86
16	0,279	0,169	0,325	1,92	36,07	13,50
17	0,297	0,169	0,309	1,83	35,18	15,24
18	0,314	0,169	0,293	1,74	34,27	17,08
19	0,332	0,169	0,277	1,64	33,33	19,03
20	0,349	0,169	0,262	1,55	32,37	21,09
21	0,366	0,169	0,246	1,46	31,39	23,25

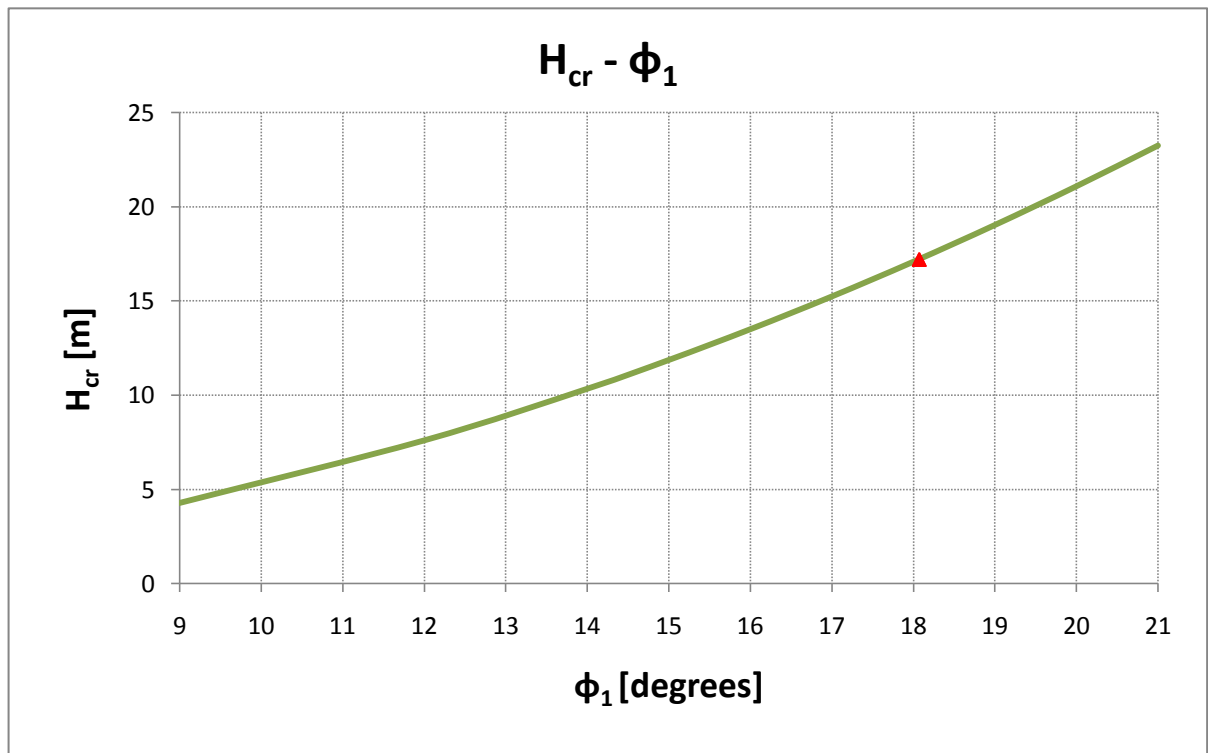
Πίνακας 5.1



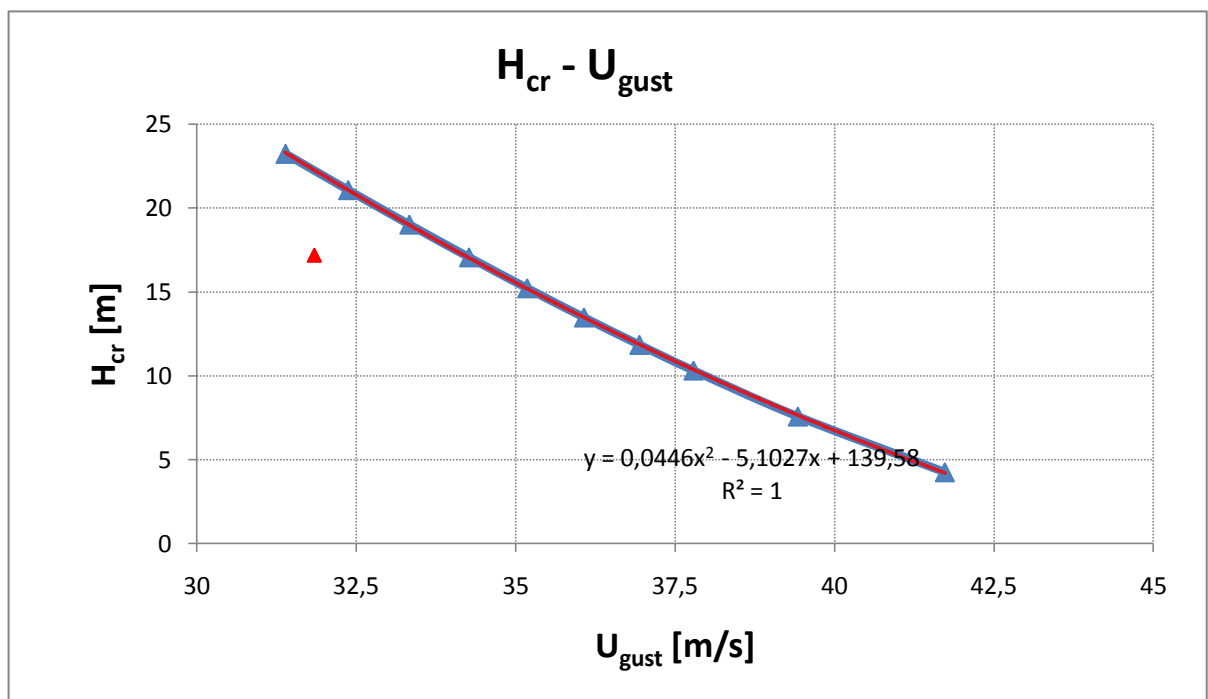
Σχήμα 5.29. Ταχύτητα ριπής ανέμου U_{gust} συναρτήσει του πλάτους διατοιχισμού ϕ_1 .



Σχήμα 5.30. Μοχλοβραχίονας ανέμου I_{w2} προς τον μοχλοβραχίονα ανέμου I_{w1} συναρτήσεις του πλάτους διατοιχισμού ϕ_1 .



Σχήμα 5.31. Κρίσιμο ύψος κύματος H_{cr} συναρτήσει του πλάτους διατοιχισμού ϕ_1 .



Σχήμα 5.32. Κρίσιμο ύψος κύματος H_{cr} συναρτήσει ης ταχύτητας ριπής ανέμου U_{gust} .

Η εξίσωση που περιγράφει την καμπύλη του ανωτέρω σχήματος είναι ένα πολυώνυμο 2^{ου} βαθμού:

$$y = 0.0446x^2 - 5.1027x + 139.58$$

Στόχος μας είναι να υπολογίσουμε την συνολική πιθανότητα Κρίσιμης κατάστασης - Ανατροπής του πλοίου μας. Ειδικότερα, θέλουμε να προσδιορίσουμε την συνολική πιθανότητα να έχουμε κρίσιμα ζεύγη τιμών κύματος και ανέμου, H_{cr} και U_{gust} αντίστοιχα. Τα κρίσιμα ζεύγη τιμών είναι αυτά που βρίσκονται επάνω στην καμπύλη του σχήματος 5.32, για τα οποία ικανοποιείται οριακά το Κριτήριο Καιρού. Συνεπώς για κάθε συνδυασμό, που βρίσκεται πάνω από την καμπύλη το πλοίο μας ανατρέπεται.

Για να υπολογίσουμε την πιθανότητα αυτή εφαρμόζουμε μια διαμέριση στο για την ταχύτητα ανέμου U_{gust} και οι υπολογισμοί των πιθανοτήτων μας γίνονται για όλα τα επιμέρους ζεύγη.

Το διάστημα, στο οποίο εφαρμόζουμε την διαμέριση για την ταχύτητα ανέμου U_{gust} είναι από 30 έως 42 m/sec και υπολογίζουμε από την εξίσωση της καμπύλης του σχήματος 5.32 τις αντίστοιχες τιμές για το Κρίσιμο ύψος κύματος, όπως φαίνεται στον ακόλουθο πίνακα.

Range [U_A, U_B]	U_{gust} [m/sec]	H_{cr} [m]
30-32	31	24,26
32-34	33	19,76
34-36	35	15,62
36-38	37	11,84
38-40	39	8,41
40-42	41	5,34

Πίνακας 5.2

Η διαδικασία του υπολογισμού της συνολικής πιθανότητας ανατροπής του πλοίου είναι η εξής:

- **1^ο βήμα:** Υπολογίζουμε τις πιθανότητες να συναντήσει το πλοίο μας άνεμο με ταχύτητα:

$$U_W \in [U_A, U_B]$$

Οι υπολογισμοί των πιθανοτήτων γίνονται όπως έχουμε αναφέρει στο 4^ο κεφάλαιο, ολοκληρώνοντας στα έξι διαστήματα του ανωτέρω πίνακα, ως εξής:

$$P_{Wind}(U_W) = \int_{U_A}^{U_B} f(U) dU$$

- **2^ο βήμα:** Υπολογίζουμε τις πιθανότητες συνάντησης κρίσιμων ομάδων κύματος με αριθμό κυμάτων μεγαλύτερο ίσο του n , για όλες τις τιμές κρίσιμου ύψους κύματος - H_{cr} , που έχουμε υπολογίσει στον παραπάνω πίνακα. Ο υπολογισμός αυτών των πιθανοτήτων γίνεται για κάθε συνδυασμό H_{cr} , H_s , n :
Για αριθμό κυμάτων: $n_i = 1, 2, \dots, 10$, όπου $i = 1, 2, \dots, 10$ έχουμε:

$$P_{Si}(H_S, T_P, n \geq n_i) = \sum_i^{10} P_S(H_S, T_P, n_i)$$

- **3^ο βήμα:** Υπολογίζουμε τις επιμέρους συνολικές πιθανότητες (για κάθε συνδυασμό H_s , H_{cr} , $n \geq n_i$) συνάντησης ανέμου με ένταση $U_{gust} \in [U_A, U_B]$ και κρίσιμων ομάδων κύματος με σημαντικό ύψος κύματος μεγαλύτερο από το εκάστοτε H_{cr} . Οι τιμές αυτές προκύπτουν από τον πολλαπλασιασμό των επιμέρους πιθανοτήτων συνάντησης κρίσιμων ομάδων κύματος $P_S(H_S, T_P, n \geq n_i)$ και των πιθανοτήτων συνάντησης ανέμου $P(U_W \in [U_A, U_B])$. Συνεπώς, έχουμε:

$$P_{Fi} = P_{Si}(H_S, T_P, n \geq n_i) \cdot P_{Wind}$$

- **4^ο βήμα:** Υπολογίζουμε την συνολική πιθανότητα ανατροπής του πλοίου για κάθε ένα n από 1 έως 10. Για κάθε τιμή σημαντικού ύψους κύματος H_s υπολογίζουμε τις τιμές των συνολικών πιθανοτήτων ανατροπής για όλα τα n , αθροίζοντας για κάθε ένα $n \geq 1, 2, \dots, 10$ τις επιμέρους πιθανότητες για όλα τα κρίσιμα ύψη κύματος H_{cr} . Ειδικότερα η συνολική πιθανότητα ανατροπής για κάθε n υπολογίζεται από τον ακόλουθο τύπο:

$$P_{Total}(n \geq n_i, H_S) = \sum_{j=1}^6 (P_F(U_W \in [U_{Aj}, U_{Bj}], H > H_{crj}))$$

Ενδεικτικά παρατίθεται ο πίνακας 5.3 με τον υπολογισμό της συνολικής πιθανότητας ανατροπής του πλοίου μας για ένα σημαντικό ύψος κύματος, έστω $H_s=3m$.

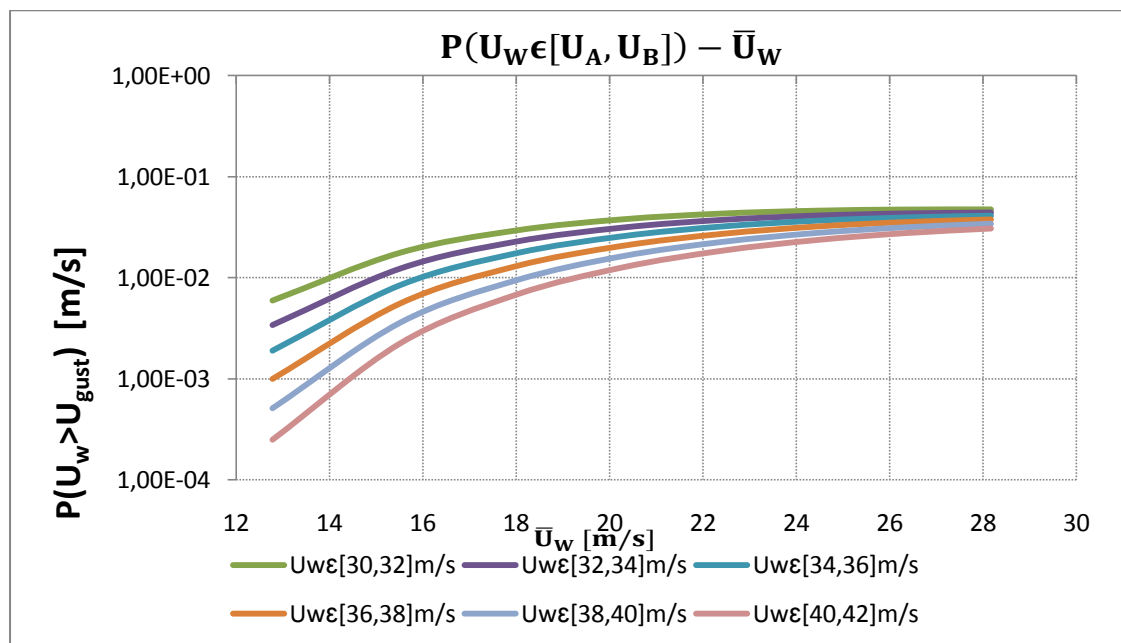
Hcr	P_{tot} ($n \geq 1$)	P_{tot} ($n \geq 2$)	P_{tot} ($n \geq 3$)	P_{tot} ($n \geq 4$)	P_{tot} ($n \geq 5$)	P_{tot} ($n \geq 6$)	P_{tot} ($n \geq 7$)	P_{tot} ($n \geq 8$)	P_{tot} ($n \geq 9$)	P_{tot} ($n \geq 10$)
Hcr=24,26m	7,13E-76	8,59E-81	1,23E-99	1,8E-118	2,2E-140	1,4E-159	9,1E-179	5,9E-198	3,8E-217	2,5E-236
Hcr=19,76m	7,29E-52	1,95E-55	2,44E-68	3,08E-81	2,38E-95	2,7E-108	3,1E-121	3,5E-134	4,0E-147	4,5E-160
Hcr=15,62m	3,72E-34	1,06E-36	3,67E-45	1,28E-53	4,45E-62	1,64E-70	6,95E-79	3,64E-87	1,7E-95	7,9E-104
Hcr=11,84m	1,15E-21	1,94E-23	1,08E-28	6,02E-34	3,36E-39	1,88E-44	1,07E-49	6,47E-55	4,95E-60	7,17E-65
Hcr=8,41m	2,18E-13	1,42E-14	1,31E-17	1,21E-20	1,11E-23	1,03E-26	9,47E-30	8,78E-33	8,28E-36	8,33E-39
Hcr=5,34m	2,03E-08	3,47E-09	8,84E-11	2,25E-12	5,75E-14	1,47E-15	3,74E-17	9,54E-19	2,44E-20	6,49E-22
Ptot	2,03E-08	3,47E-09	8,84E-11	2,25E-12	5,75E-14	1,47E-15	3,74E-17	9,54E-19	2,44E-20	6,49E-22

Πίνακας 5.3

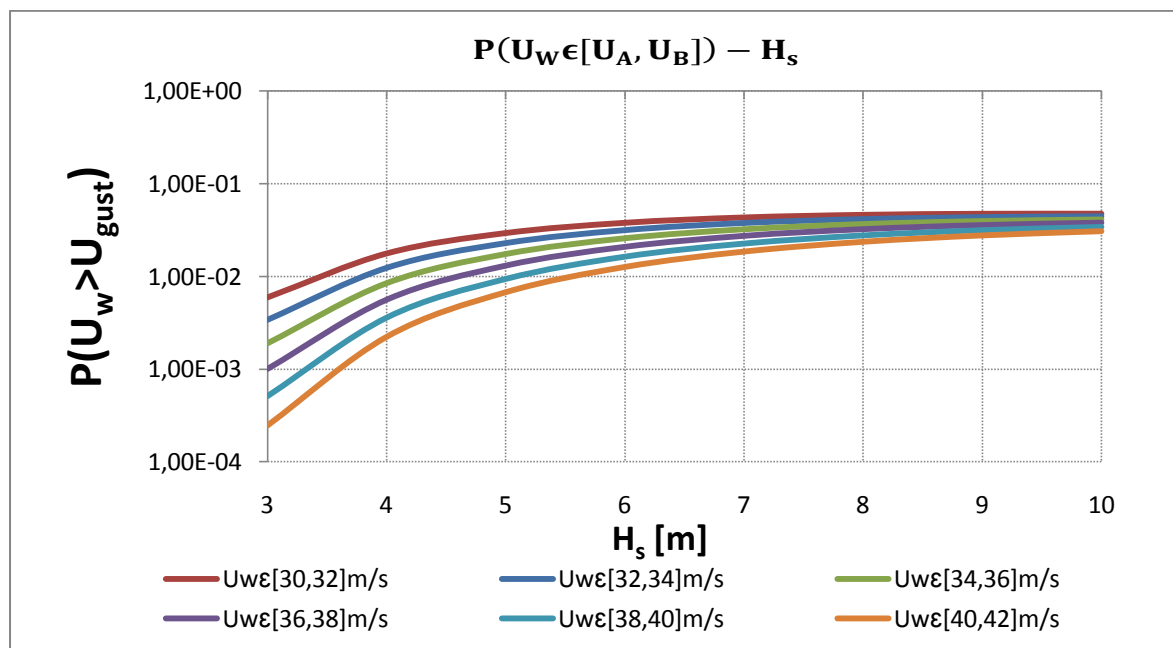
5.1.4.2 Υπολογισμοί Ανέμου

Σε όλα τα διαγράμματα που ακολουθούν οι κλίμακες των κατακόρυφων αξόνων, που αφορούν πιθανότητες, είναι λογαριθμικές με βάση το 10.

Οι υπολογισμοί έγιναν με την χρήση του προγράμματος Mathematica, ακολουθούν τα διαγράμματα των ανωτέρω πιθανοτήτων:



Σχήμα 5.33. Πιθανότητες συνάντησης ριπής ανέμου μεγαλύτερης των ταχυτήτων που αντιστοιχούν σε κάθε εύρος διατοιχισμού συναρτήσει της μέσης ταχύτητας ανέμου.



Σχήμα 5.34. Πιθανότητες συνάντησης ριπής ανέμου μεγαλύτερης των ταχυτήτων που αντιστοιχούν σε κάθε εύρος διατοιχισμού συναρτήσει του σημαντικού ύψους κύματος H_s .

5.1.3.1 Υπολογισμός πιθανοτήτων συνάντησης κρίσιμων ομάδων κύματος

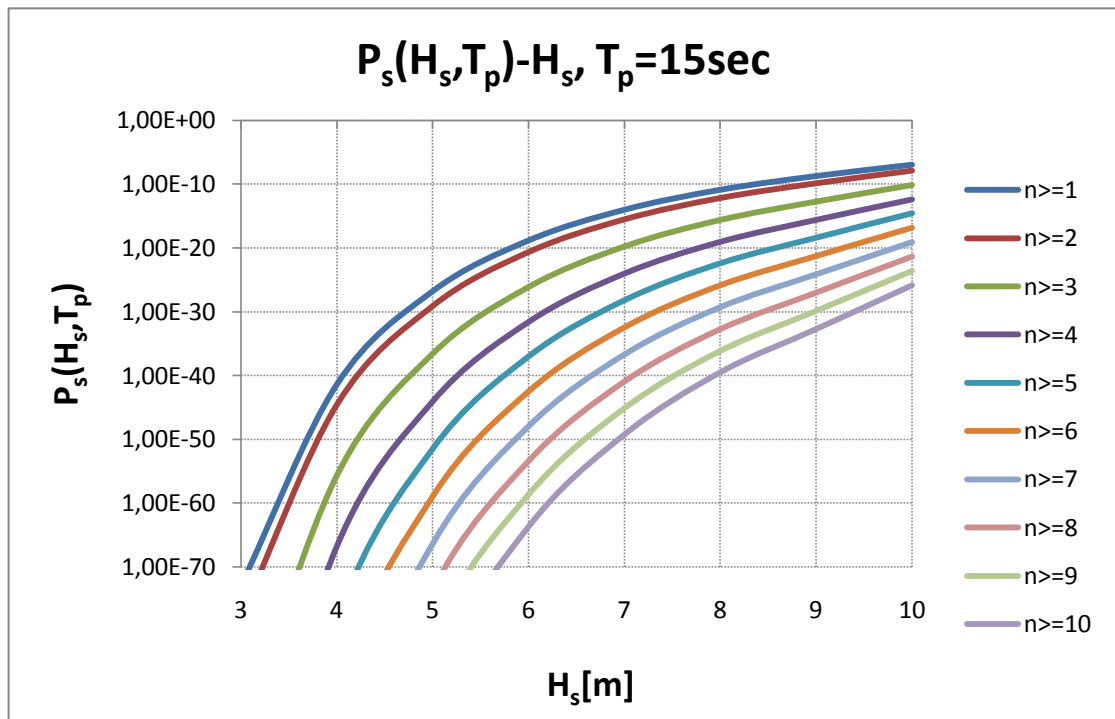
- Επιλέγουμε σταθερή περίοδο κορυφής και εύρος τιμών για το σημαντικό ύψος κύματος H_S [m] : $H_S \in [3 - 10]$. Για τον υπολογισμό των πιθανοτήτων $P_S(H_S, T_P)$ θεωρούμε ότι κάθε διακριτό ζεύγος τιμών (H_S, T_P) προκύπτει με T_P σταθερό, $T_P = 15 \text{ sec}$ και με βήμα 1 sec για το σημαντικό ύψος κύματος.

Οι υπολογισμοί έγιναν στο πρόγραμμα Mathematica για όλες τις τιμές των H_{cr} που φαίνονται στον πίνακα στην σελίδα 5.

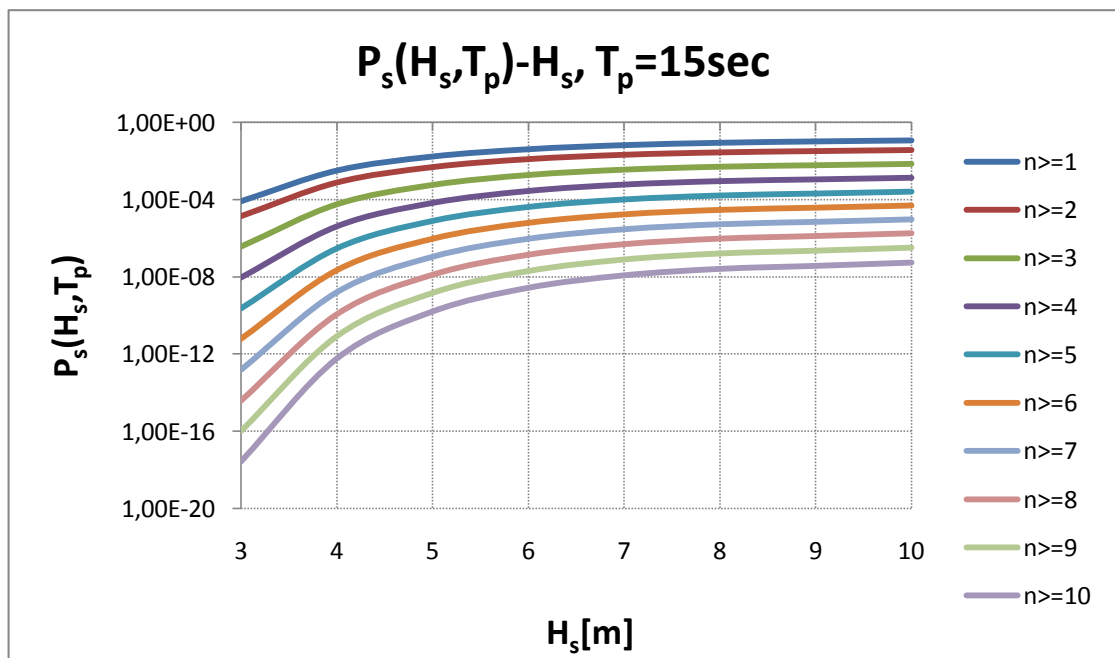
Στα σχήματα παρουσιάζονται συγκριτικά οι πιθανότητες για όλα τα H_{cr} για ομάδες κυμάτων με $n \geq n_i$ αντίστοιχα.

Σε όλα τα διαγράμματα που ακολουθούν οι κλίμακες των κατακόρυφων αξόνων, που αφορούν πιθανότητες, είναι λογαριθμικές με βάση το 10.

Τα σχήματα που παρουσιάζονται εδώ αφορούν τις δύο ακραίες τιμές του H_{cr} τα υπόλοιπα διαγράμματα παρατίθενται στο παράρτημα Α.



Σχήμα 5.35. Πιθανότητες συνάντησης κρίσιμων ομάδων κύματος με ύψος κύματος μεγαλύτερο του κρίσιμου ύψους $H_{cr} = 24.26 \text{ m}$, $T_p = 15 \text{sec}$

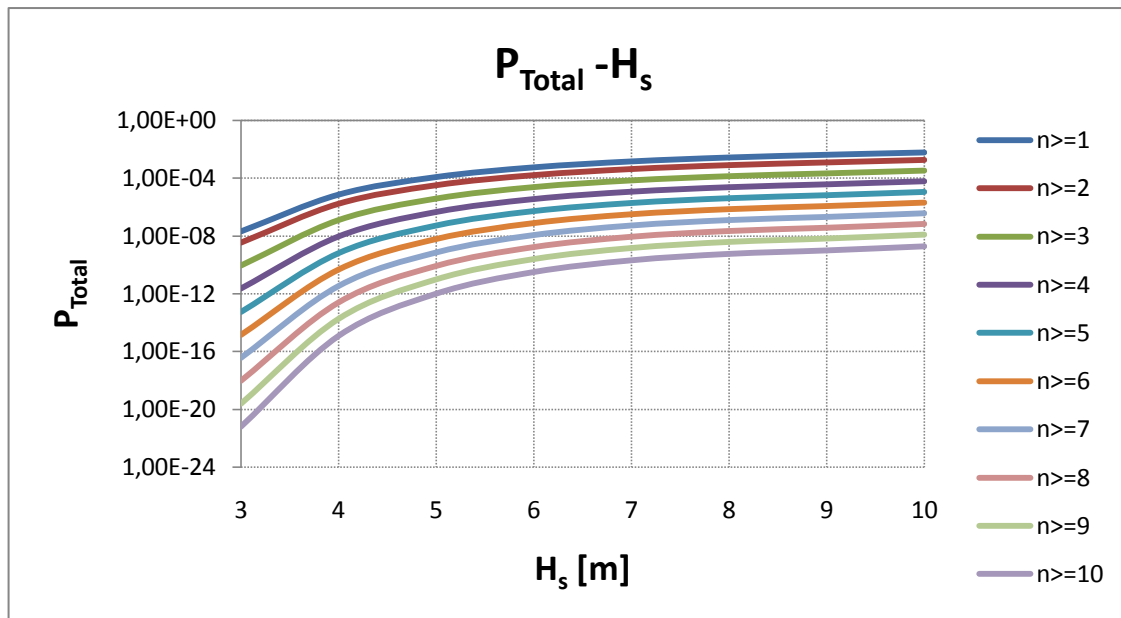


Σχήμα 5.36. Πιθανότητες συνάντησης κρίσιμων ομάδων κύματος με ύψος κύματος μεγαλύτερο του κρίσιμου ύψους $H_{cr} = 5.34 \text{ m}$, $T_p = 15 \text{sec}$

5.1.4.4 Υπολογισμός της συνολικής πιθανότητας ανατροπής του πλοίου, που εξετάζουμε.

Οι συνολικές πιθανότητες παρουσιάζονται στο ακόλουθο σχήμα.

Στο διάγραμμα που ακολουθεί η κλίμακα του κατακόρυφου άξονα, που αφορά πιθανότητες, είναι λογαριθμική με βάση το 10.



Σχήμα 5.37. Συνολική πιθανότητα ανατροπής του πλοίου συναρτήσει του σημαντικού ύψους κύματος με $H_s \in [3, 10]$, $T_P=15sec$ και αριθμό κυμάτων $n=1,2,\dots,10$.

5.2 Αποτελέσματα υπολογισμών δυναμικής θεώρησης

Στόχος μας σε αυτό το στάδιο της μελέτης είναι να επιλύσουμε την εξίσωση διατοιχισμού του πλοίου μας και με την διαδικασία που περιγράφεται ακολούθως να υπολογίσουμε την συνολική πιθανότητα ανατροπής του πλοίου μας και τέλος να συγκρίνουμε τα αποτελέσματα των υπολογισμών αυτών με τα αποτελέσματα που βρήκαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο, αρχίζοντας με την εφαρμογή του Κριτηρίου Καιρού στο πλοίο μας. Στην δυναμική προσέγγιση λαμβάνουμε υπόψη μας την μεταβολή του κρίσιμου ύψους κύματος ανάλογα με την ταχύτητα ριπής ανέμου και τον αριθμό κυμάτων κάθε ομάδας κυμάτων. Ενώ στην εφαρμογή του κριτηρίου θεωρούμε ότι κάθε κρίσιμη ομάδα κύματος έχει το ίδιο κρίσιμο ύψος κύματος ανεξάρτητα από τον αριθμό των κυμάτων. Συνεπώς σε αυτό το στάδιο η προσέγγιση του κυματικού περιβάλλοντος είναι πιο ρεαλιστική.

Τα βήματα που ακολουθήσαμε είναι τα εξής:

- **1^ο βήμα:** Αρχικά επιλέξαμε ένα πολυώνυμο 11^{ου} βαθμού, που περιγράφει τη σχέση του μοχλοβραχίονα επαναφοράς με την γωνία εγκάρσιας κλίσης σύμφωνα με τα στοιχεία που προκύψανε για το πλοίο μας, από την εφαρμογή του Κριτηρίου Καιρού στο πρόγραμμα Maxsurf. Έπειτα σχηματίσαμε την εξίσωση κίνησης διατοιχισμού για το πλοίο μας λαμβάνοντας υπόψη μας την επίδραση κύματος και ανέμου στην κίνηση του πλοίου μας.
- **2^ο βήμα:** Στη συνέχεια επιλύσαμε την εξίσωση αυτή με τη βοήθεια του προγράμματος Mathematica και υπολογίσαμε τα κρίσιμα ύψη κύματος H_{cr} για την εκάστοτε ταχύτητα ριπής ανέμου και για αριθμό κυμάτων $n=1,2,\dots,10$. Θεωρούμε, πως η περίοδος των κυμάτων βρίσκεται πολύ κοντά στην ιδιοπερίοδο του πλοίου. Δηλαδή θεωρούμε ότι το πλοίο μας βρίσκεται σε συντονισμό με το κυματικό περιβάλλον. Συγκεκριμένα:

$$T_0 = 15.26 \text{ sec και } T_w \in [0.9T_0, 1.1T_0].$$

Οι συνθήκες ανέμου είναι αυτές που περιγραφήκανε στο προηγούμενο κεφάλαιο και οι υπολογισμοί των αντίστοιχων πιθανοτήτων έχουν πραγματοποιηθεί σε αυτό (σχήματα 57 και 58).

- **3^ο βήμα:** Στην συνέχεια υπολογίσαμε τις πιθανότητες να συναντήσει το πλοίο μας Κρίσιμες Ομάδες Κύματος που αντιστοιχούν στα H_{cr} που υπολογίσαμε στο 2^ο βήμα.

- **4^ο βήμα:** Υπολογίζουμε τις επιμέρους συνολικές πιθανότητες για κάθε ένα από τα έξι διαστήματα ανέμου, που έχουμε ορίσει στο προηγούμενο κεφάλαιο, και για όλα τα n από 1 έως 10. Ειδικότερα, για κάθε συνδυασμό U_{gust} και n έχουμε υπολογίσει ένα Κρίσιμο ύψος κύματος H_{cr} , στο 2^ο βήμα. Επίσης έχουμε υπολογίσει για κάθε συνδυασμό H_s, H_{cr} , n τις πιθανότητες συνάντησης Κρίσιμων Ομάδων Κύματος στο 3^ο βήμα. Έτσι για κάθε διάστημα $U_{gust} \in [U_A, U_B]$ και για κάθε H_s αθροίζουμε τις πιθανότητες για όλα τα n. Συγκεκριμένα έχουμε:

$$P_{F(WAVES)}(H_s, U_{gust}) = \sum_{n=1}^{10} P(A_n) - \sum_{n=1}^9 \sum_{m=2}^{10} P[A_n A_m] \\ + \sum_{n=1}^8 \sum_{m=2}^9 \sum_{q=3}^{10} P[A_n A_m A_q] - \dots + (-1)^{10} P[A_n A_m A_q \dots A_{10}]$$

- **5^ο βήμα:** Υπολογίζουμε την συνολική πιθανότητα ανατροπής του πλοίου συναρτήσει του σημαντικού Ύψους Κύματος και της ταχύτητας ανέμου, για κάθε ένα από τα διαστήματα ανέμου που έχουμε ορίσει για όλα τα $n=1, \dots, 10$. Οι πιθανότητες αυτές προκύπτουν από το γινόμενο των ανωτέρω πιθανοτήτων του βήματος 4 και των πιθανοτήτων συνάντησης ανέμου $P(U_w \in [U_A, U_B])$.

$$P_{(Total)i}(H_s, U_w) = P_{F(WAVES)}(H_s, U_w) \cdot P_{Wind}(H_s, U_w)$$

Ο δείκτης i αναφέρεται στα διαστήματα ανέμου που έχουμε ορίσει πιο πάνω. Η συνολική πιθανότητα ανατροπής του πλοίου προκύπτει εν τέλει συναρτήσει μέσω του σημαντικού ύψους κύματος, αφού για κάθε H_s ανωτέρω πιθανότητες για όλα τα επιμέρους διαστήματα ανέμου. Έτσι, έχουμε:

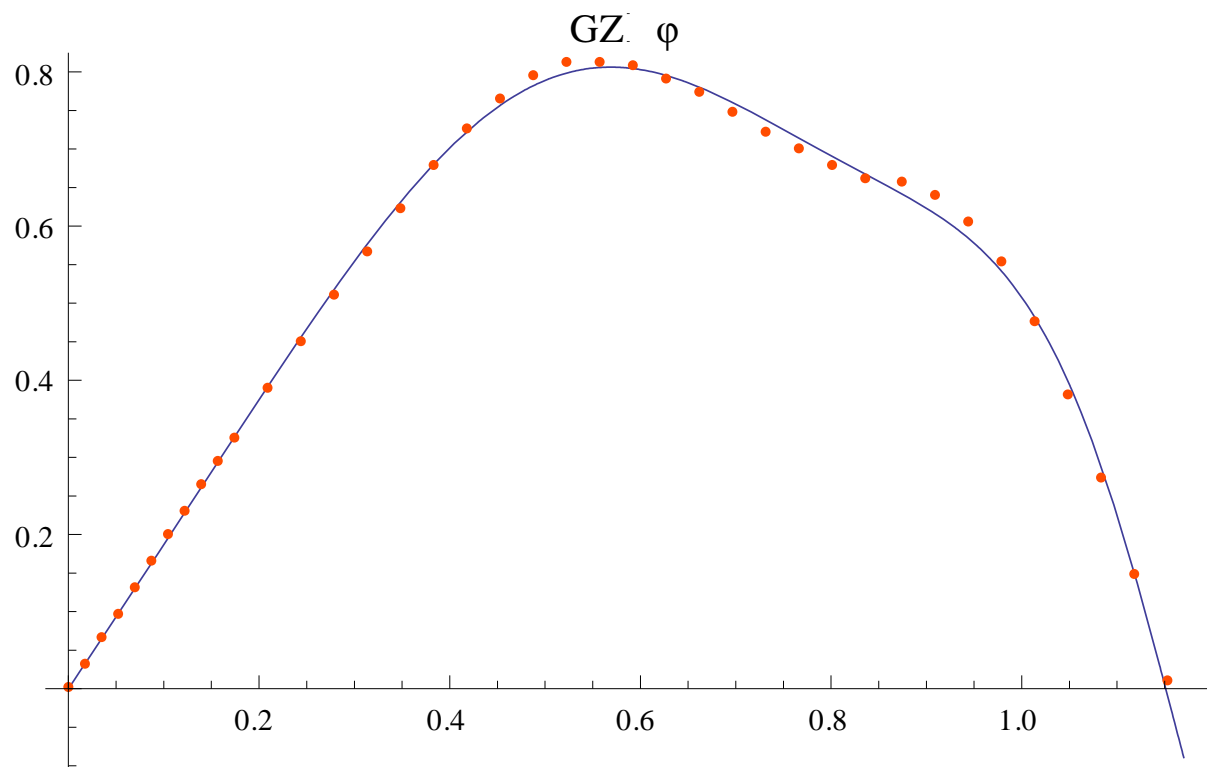
$$P_{Total}(H_s) = \sum_{i=1}^6 P_{(Total)i}(H_s, U_w)$$

5.2.1 Σχηματισμός της εξίσωσης διατοιχισμού του πλοίου.

Το πολυώνυμο που προσεγγίζει καλύτερα τα αντίστοιχα ζεύγη τιμών, όπως αυτά υπολογίστηκαν από την εφαρμογή του Κριτηρίου Καιρού στο πρόγραμμα Maxsurf, είναι το ακόλουθο:

$$GZ = 1,86 \cdot \varphi + 0,78 \cdot \varphi^3 - 12,08 \cdot \varphi^5 + 21,29 \cdot \varphi^7 - 15,10 \cdot \varphi^9 - 3,75 \cdot \varphi^{11} \quad (45)$$

Ακολουθούν οι καμπύλες «GZ – φ» για το πλοίο μας, πριν και μετά το fit. Τα στοιχεία για τον σχεδιασμό των καμπυλών προέκυψαν από τους υπολογισμούς στο πρόγραμμα Maxsurf.



Σχήμα 5.38. Μοχλοβραχίονας επαναφοράς συναρτήσει γωνίας εγκάρσιας κλίσης.

Η ακόλουθη εξίσωση, από την οποία υπολογίζουμε την απόκριση του πλοίου μας, λαμβάνει υπόψη την επίδραση του ανέμου και του κυματισμού στην κίνηση του πλοίου μας:

$$\ddot{\varphi}(t) + b_1 \cdot \dot{\varphi}(t) + \omega^2 \cdot GZ[\varphi(t)] = \mu \cdot A \cdot k \cdot \omega^2 \cdot \cos(\omega t) + M_{wind} \Rightarrow$$

$$\varphi''(t) + 0.02078 \cdot \varphi'(t) + \omega^2 \cdot [\varphi(t) + 0.42 \cdot \varphi^3(t) - 6.49 \cdot \varphi^5(t) + 11.45 \cdot \varphi^7(t) - 8.12 \cdot \varphi^9(t) + 2.02 \cdot \varphi^{11}(t)] = 0.9 \cdot A \cdot k \cdot \omega^2 \cdot \cos \omega t + M_{wind} \quad [46]$$

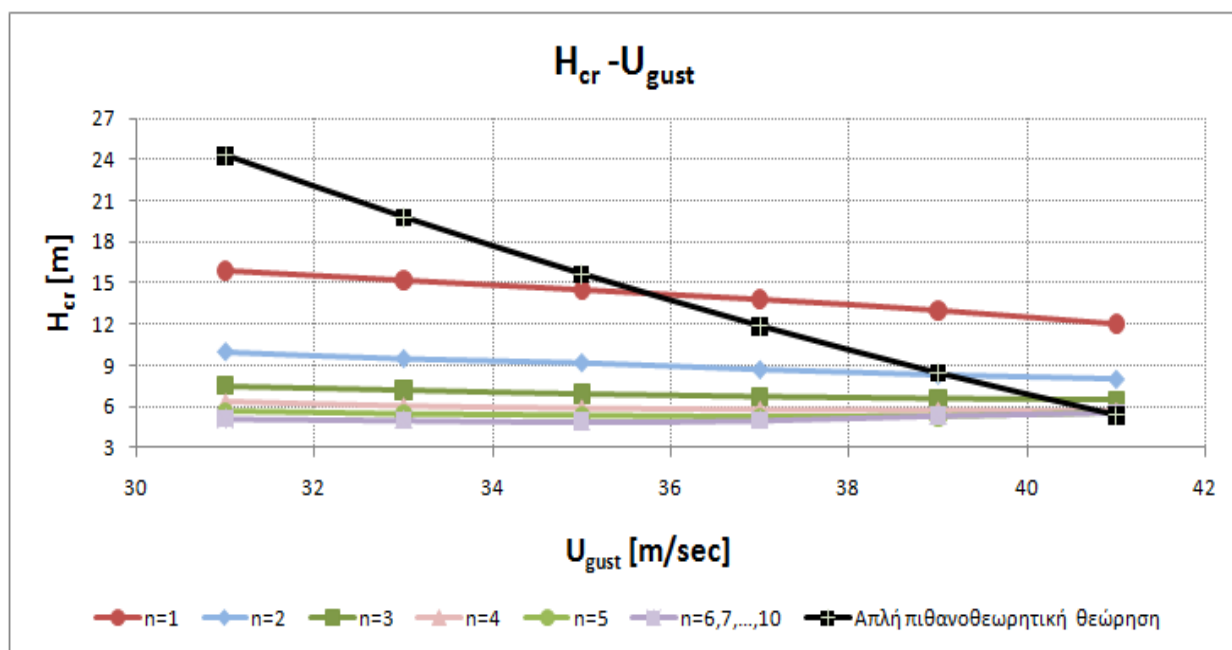
Η τιμή του συντελεστή απόσβεσης b_1 λαμβάνεται ίση με 0.02078sec^{-1} σύμφωνα με τους υπολογισμούς της εργασίας Probabilistic assessment of ship stability (N.Themelis & K.Spyrou,2007).

5.2.2 Υπολογισμός των κρίσιμων υψών κύματος με τη βοήθεια του προγράμματος Mathematica.

Υπολογίσαμε για ομάδες κύματος με αριθμό κυμάτων $n=1,2,\dots,10$ και για τις ταχύτητες ριπής ανέμου, που φαίνονται στον ακόλουθο πίνακα, τα Κρίσιμα Ύψη Κύματος κάθε συνδυασμού, ώστε η γωνία εγκάρσιας κλίσης που θα αποκτά το πλοίο μας σε κάθε περίπτωση κυματισμών να μην ξεπερνά τις 33.4° , δηλαδή υπολογίσαμε το μέγιστο ύψος κύματος, για το οποίο σε συνδυασμό με τον άνεμο το πλοίο δεν ανατρέπεται. Τα αποτελέσματα των υπολογισμών φαίνονται στον ακόλουθο πίνακα:

U_w [m/sec]	n=1	n=2	n=3	n=4	n=5	n=6,7,...,10
31	15,9	10	7,5	6,3	5,6	5,1
33	15,2	9,5	7,2	6	5,4	5
35	14,5	9,2	6,9	5,85	5,3	4,9
37	13,8	8,7	6,7	5,75	5,2	5
39	13	8,3	6,55	5,7	5,25	5,3
41	12	8	6,45	5,65	5,5	5,5

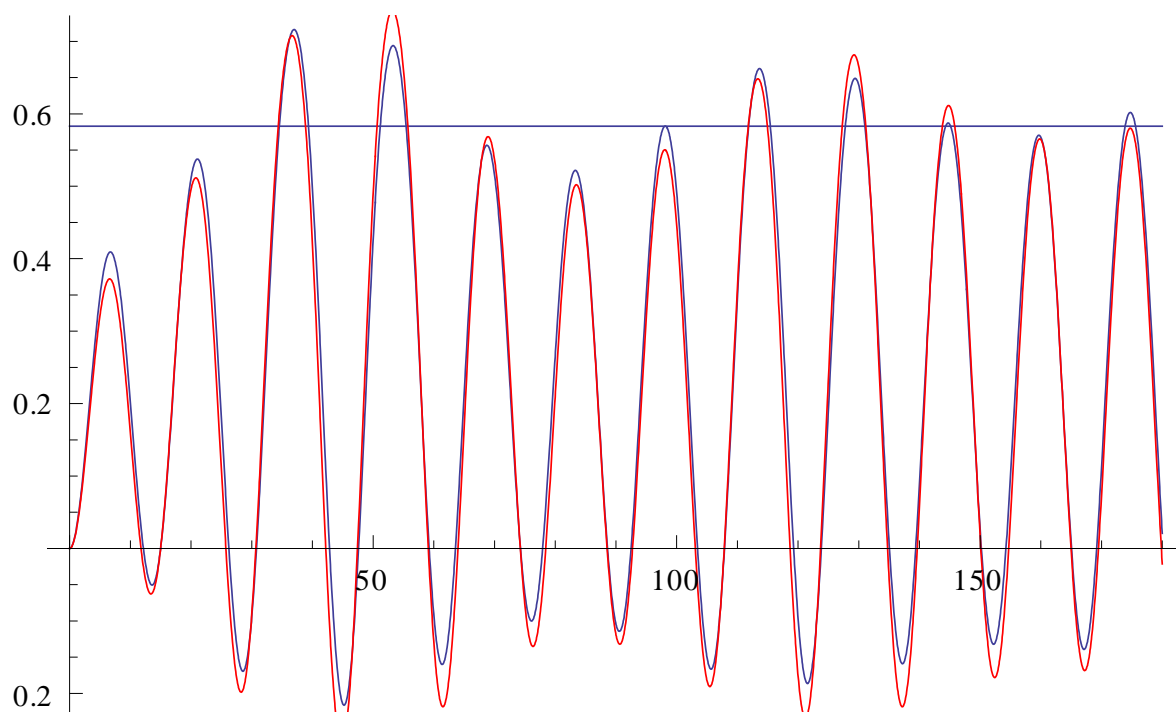
Πίνακας 5.4



Σχήμα 5.39. Κρίσιμο ύψος κύματος συναρτήσει ταχύτητας ριπής ανέμου

Από τον ανωτέρω πίνακα και από το διάγραμμα παρατηρούμε ότι για τις ομάδες κυμάτων με αριθμό κυμάτων $n=1, \dots, 4$ το Κρίσιμο ύψος κύματος - H_{cr} μειώνεται καθώς αυξάνεται η ταχύτητα ριπής ανέμου U_{gust} ενώ για τις ομάδες κυμάτων με αριθμό κυμάτων $n=5, \dots, 10$ το Κρίσιμο ύψος κύματος - H_{cr} μειώνεται για ταχύτητα ριπής ανέμου έως 37m/sec ενώ αυξάνεται για ταχύτητα από 39 έως 41 m/sec.

Στο ακόλουθο διάγραμμα φαίνεται πως μεταβάλλεται με το χρόνο η απόκριση του πλοίου μας στην επίδραση κύματος και ανέμου. Η κόκκινη καμπύλη αντιστοιχεί σε ταχύτητα ριπής ανέμου 39 m/sec και η μπλε καμπύλη σε 41 m/sec.



Σχήμα 5.40. Μεταβολή της απόκρισης του πλοίου σε συνάρτηση με το χρόνο υπό την επίδραση κύματος και ανέμου.

Στο ανωτέρω διάγραμμα παρατηρούμε πως από τα 80 sec και έπειτα και για γωνία εγκάρσιας κλίσης μεγαλύτερη από 0.55 rad έως 0.75rad περίπου, η απόκριση του πλοίου μας είναι μεγαλύτερη για ταχύτητα ριπής ανέμου 41 m/sec απ' ότι για 39 m/sec. Συνεπώς απαιτείται μεγαλύτερο Κρίσιμο Ύψος Κύματος για ταχύτητα ριπής ανέμου 41 m/sec απ' ότι για 39 m/sec για ομάδες κυμάτων με αριθμό κυμάτων $n=5, \dots, 10$.

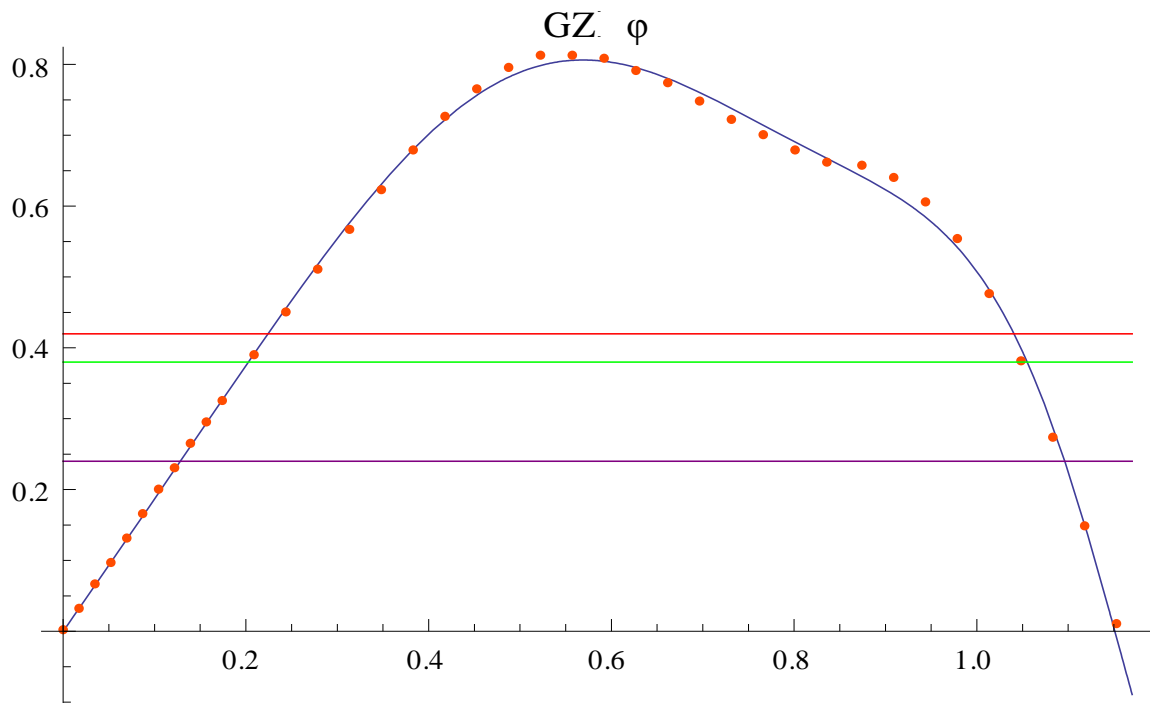
Ακολουθεί το διάγραμμα του μοχλοβραχίονα επαναφοράς του πλοίου συναρτήσει της γωνίας εγκάρσιας κλίσης. Στο ακόλουθο διάγραμμα οι οριζόντιες αντιστοιχούν στον μοχλοβραχίονα ριπής ανέμου για διάφορες ταχύτητες ανέμου. Η κόκκινη γραμμή αντιστοιχεί στα 41 m/sec η πράσινη γραμμή στα 39 m/sec και η μωβ γραμμή στα 31 m/sec.

Παρατηρούμε ότι για γωνία εγκάρσιας κλίσης μεγαλύτερη από 0.55 rad έως 0.65rad περίπου, η καμπύλη του μοχλοβραχίονα επαναφοράς εισέρχεται στη μη γραμμική περιοχή και αποκτά πολύ μικρή κλίση. Έπειτα η καμπύλη γίνεται σχεδόν

ευθεία γραμμή, δηλαδή το πλοίο έχει σχεδόν μηδενικό GM. Καθώς το GM μειώνεται ακολούθως μειώνεται και η ιδιοσυχνότητα του πλοίου, εφόσον δίνεται από τον ακόλουθο τύπο:

$$\omega_o = \sqrt{\frac{m \cdot g \cdot GM}{I + \delta I}} \quad (47)$$

Συνεπώς, η ιδιοσυχνότητα ταλάντωσης του πλοίου διαφέρει από την συχνότητα του κυματικού περιβάλλοντος, δηλαδή το πλοίο και το κυματικό περιβάλλον δεν βρίσκονται πλέον σε κατάσταση συντονισμού και το πλοίο δεν νιώθει έντονα την επίδραση των κυματισμών.



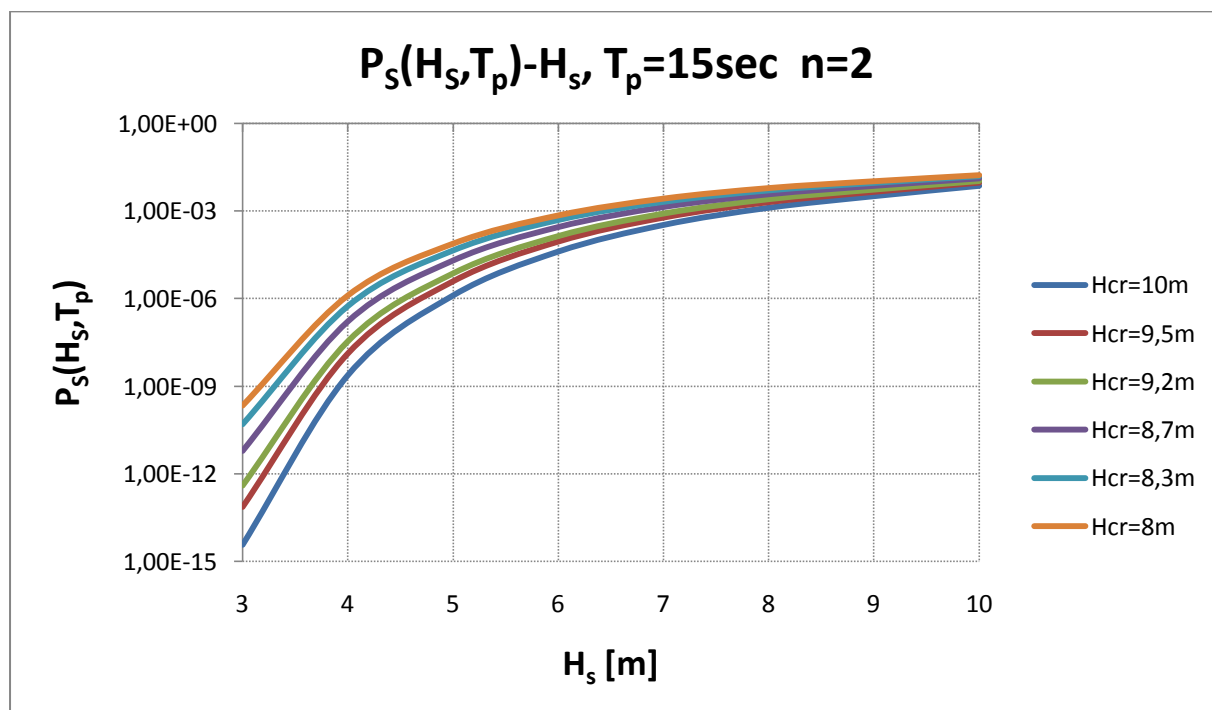
5.2.3 Υπολογισμός πιθανοτήτων συνάντησης κρίσιμων ομάδων κύματος

- Επιλέγουμε σταθερή περίοδο κορυφής και εύρος τιμών για το σημαντικό ύψος κύματος H_s [m] : $H_s \in [3 - 10]$. Για τον υπολογισμό των πιθανοτήτων $P_S(H_s, T_p)$ θεωρούμε ότι κάθε διακριτό ζεύγος τιμών (H_s, T_p) προκύπτει με T_p σταθερό, $T_p = 15 \text{ sec}$ και με βήμα 1 sec για το σημαντικό ύψος κύματος.

Οι υπολογισμοί έγιναν στο πρόγραμμα Mathematica για όλες τις τιμές των **Hcr** που φαίνονται στον πίνακα στην σελίδα 87.

Στο σχήμα 5.41 παρουσιάζονται συγκριτικά οι πιθανότητες για όλα τα H_{cr} για ομάδες κυμάτων με $n=2$ αντίστοιχα. Τα διαγράμματα για τις υπόλοιπες ομάδες κυμάτων βρίσκονται στο παράρτημα Α.

Σε όλα τα διαγράμματα που ακολουθούν οι κλίμακες των κατακόρυφων αξόνων, που αφορούν πιθανότητες, είναι λογαριθμικές με βάση το 10.

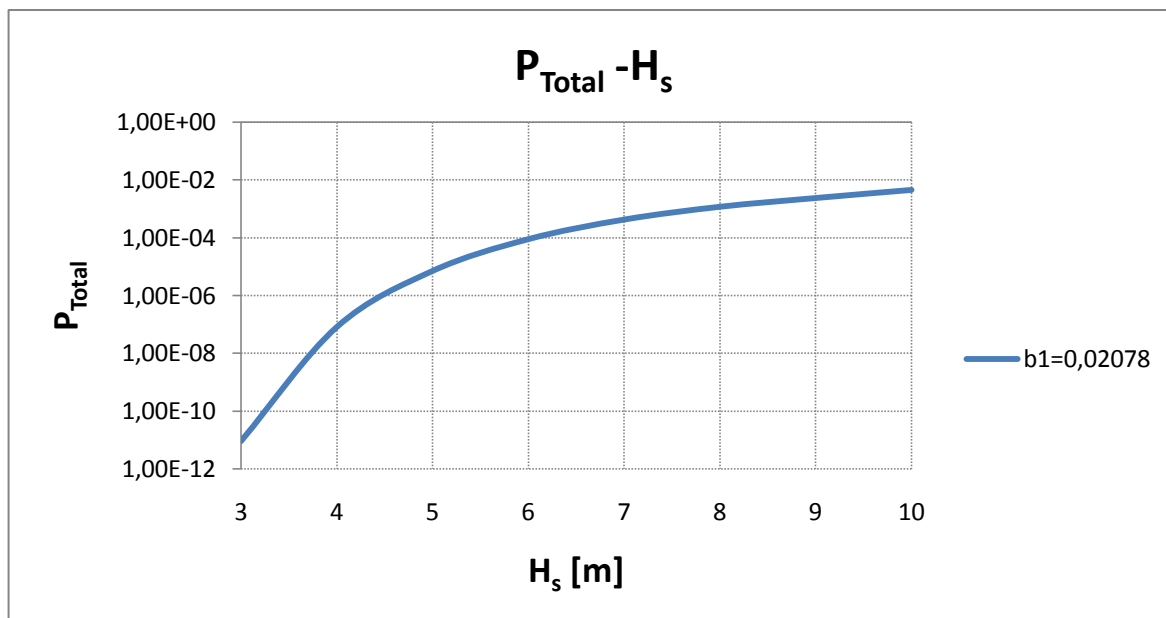


Σχήμα 5.41. Σύγκριση των πιθανοτήτων συνάντησης κρίσιμων ομάδων κύματος με $n=2$ και ύψος κύματος μεγαλύτερο από τα αντίστοιχα Κρίσιμα ύψη κύματος, που υπολογίσαμε για κάθε εύρος διατοιχισμού.

5.2.4 Υπολογισμός της συνολικής πιθανότητας ανατροπής του πλοίου.

Οι συνολικές πιθανότητες παρουσιάζονται στο ακόλουθο σχήμα.

Στο διάγραμμα που ακολουθεί η κλίμακα του κατακόρυφου άξονα, που αφορά πιθανότητες, είναι λογαριθμική με βάση το 10.

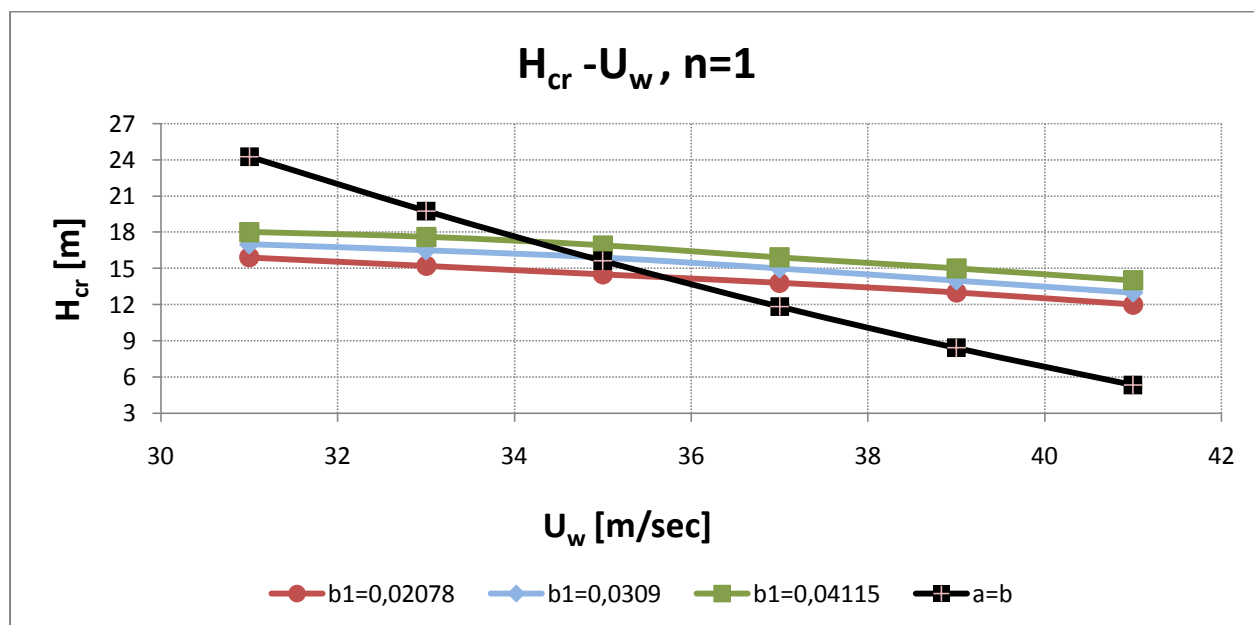


Σχήμα 5.42. Συνολική πιθανότητα ανατροπής του πλοίου συναρτήσει του σημαντικού ύψους κύματος με $H_s \in [3, 10]$, $T_p=15sec$, αριθμό κυμάτων $n=1,2,\dots,10$, $U_{gust} \in [30,42]$.

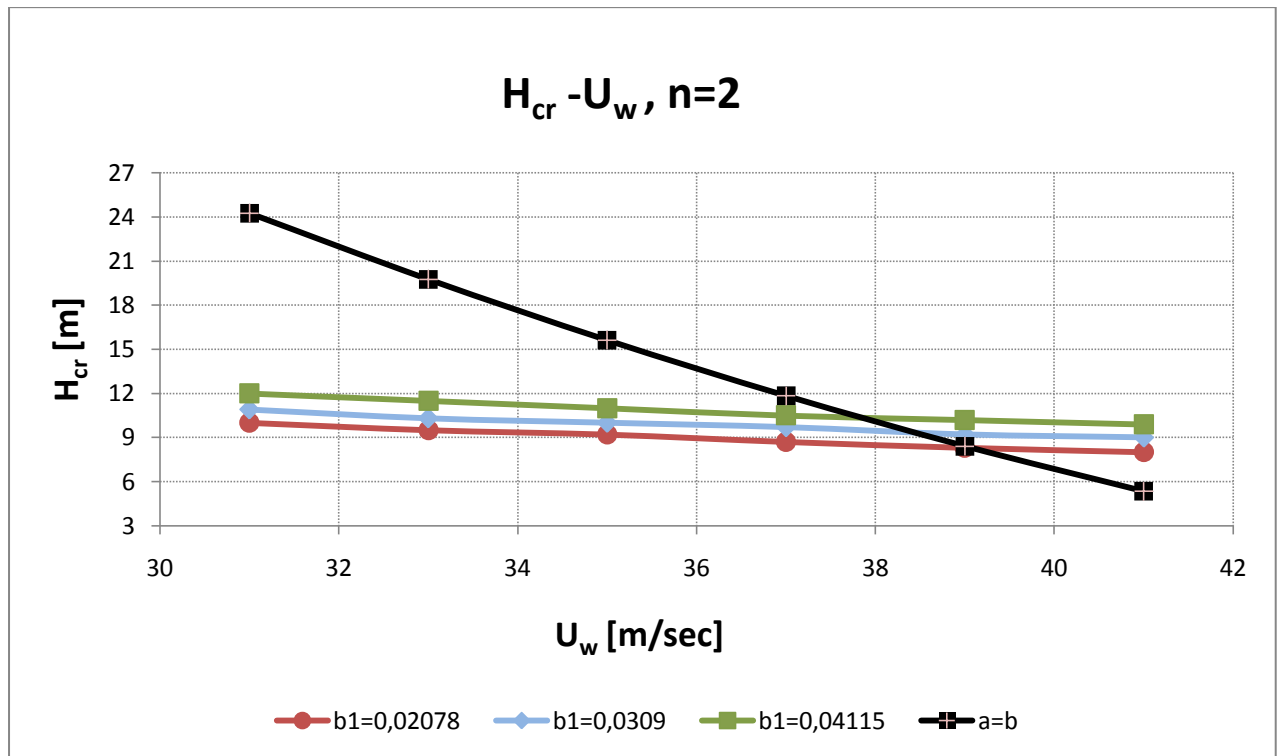
5.2.4.1 Επανάληψη των παραπάνω υπολογισμών για δύο διαφορετικές τιμές του συντελεστή απόσβεσης.

- $b_1 = 0.0309 \text{sec}^{-1}$
- $b_1 = 0.04115 \text{sec}^{-1}$

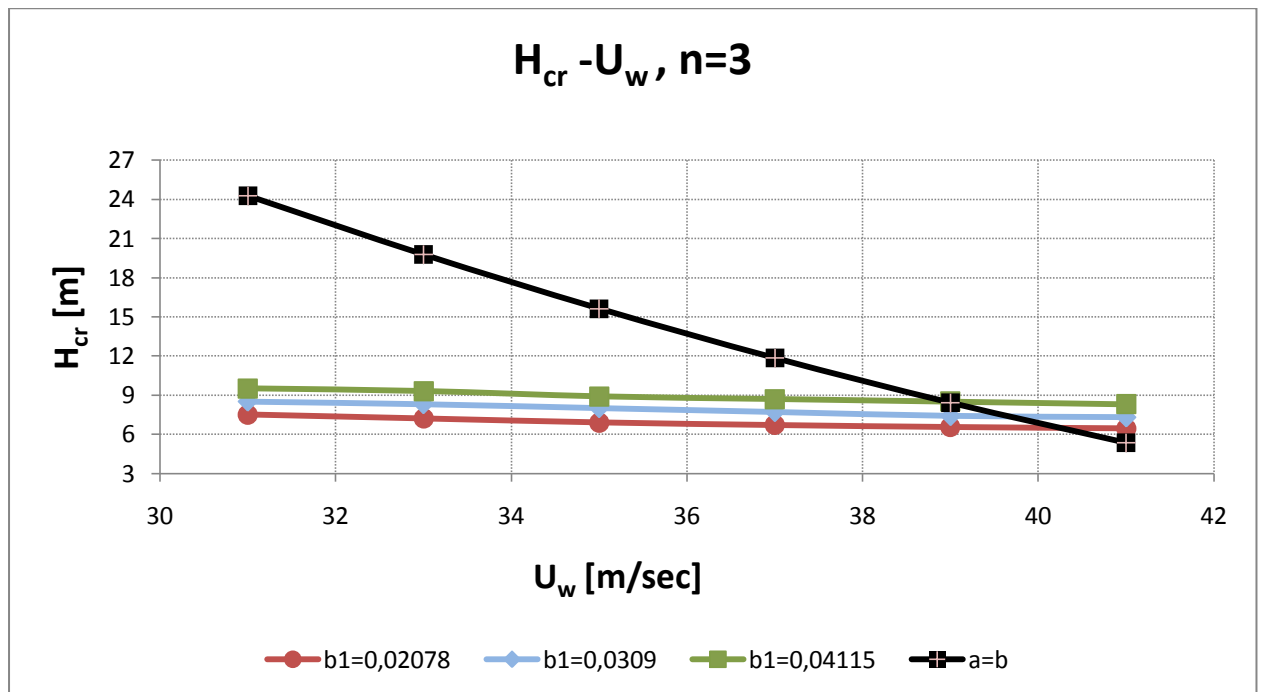
Τα αποτελέσματα των υπολογισμών παρατίθενται στο παράρτημα Α. ακολουθούν τα συγκριτικά σχήματα με τα αποτελέσματα και για τις τρεις τιμές απόσβεσης.



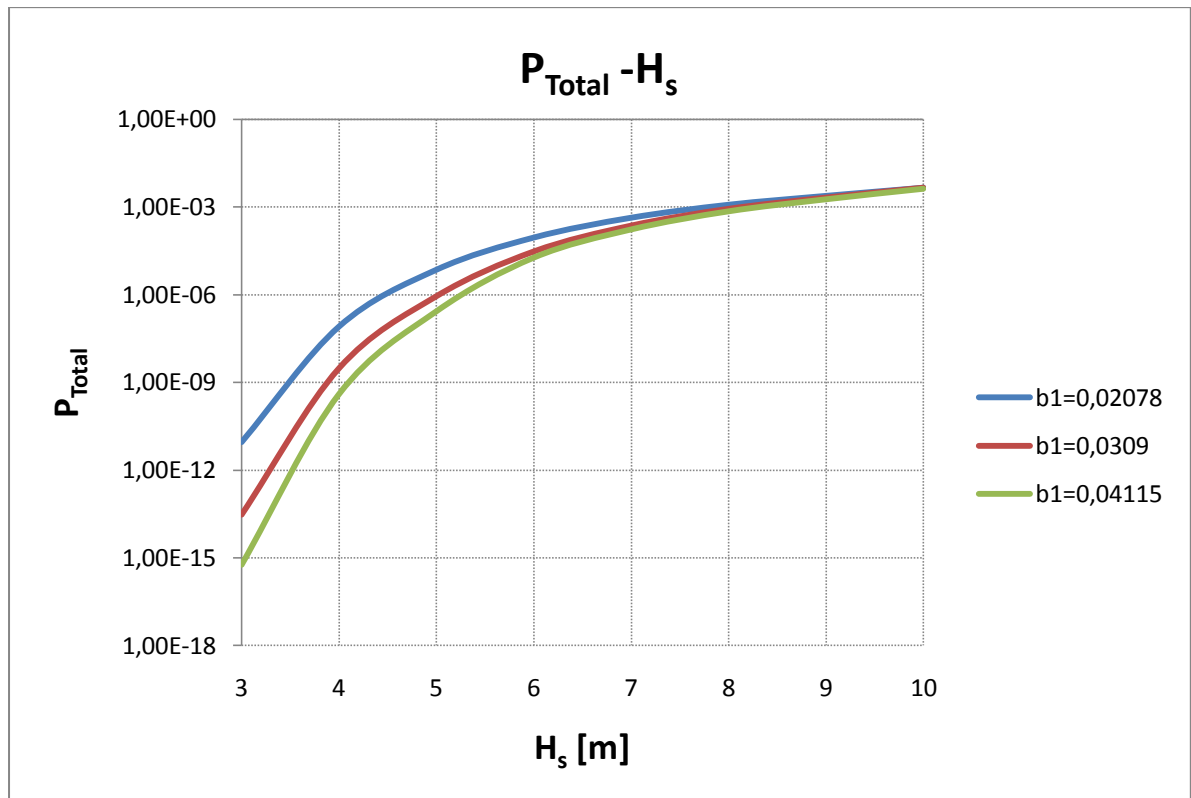
Σχήμα 5.43. Κρίσιμο Ύψος Κύματος συναρτήσει της ταχύτητας ριπής ανέμου, για αριθμό κυμάτων $n=1$, συγκριτικά και για τις τρεις τιμές απόσβεσης των υπολογισμών μας.



Σχήμα 5.44. Κρίσιμο Ύψος Κύματος συναρτήσει της ταχύτητας ανέμου, για αριθμό κυμάτων $n=2$, συγκριτικά και για τις τρεις τιμές απόσβεσης των υπολογισμών μας.

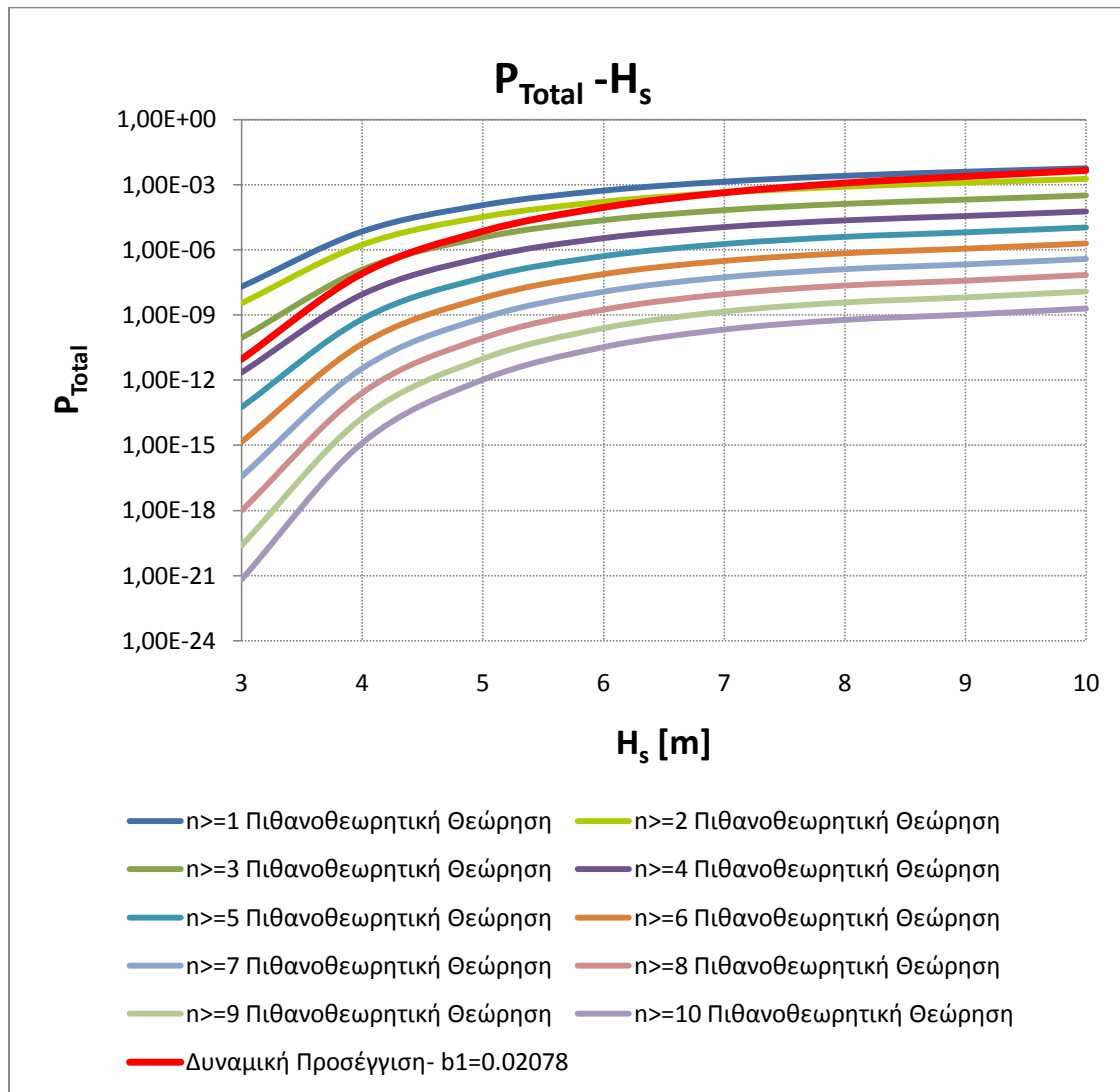


Σχήμα 5.45. Κρίσιμο Ύψος Κύματος συναρτήσει της ταχύτητας ανέμου, για αριθμό κυμάτων $n=3$, συγκριτικά και για τις τρεις τιμές απόσβεσης των υπολογισμών μας.



Σχήμα 5.46. Συνολική πιθανότητα ανατροπής του πλοίου συναρτήσει του σημαντικού ύψους κύματος με $H_s \in [3, 10]$, $T_p=15sec$ και αριθμό κυμάτων $n=1,2,\dots,10$.

Σύγκριση πιθανοτήτων ανατροπής του πλοίου που προκύπτουν από την πιθανοθεωρητική θεώρηση με αυτές που προκύπτουν από την δυναμική προσέγγιση.



Σχήμα 5.47. Συγκριτικό διάγραμμα συνολικής πιθανότητας ανατροπής του πλοίου των αποτελεσμάτων της πιθανοθεωρητικής θεώρησης και της δυναμικής προσέγγισης.

Κεφάλαιο 6 – Συμπεράσματα

Στο κεφάλαιο αυτό παρατίθενται τα συμπεράσματα της παρούσης διπλωματικής εργασίας.

Όπως έχουμε προαναφέρει κύριος στόχος της εργασίας είναι να αποκτήσουμε μια σαφή εικόνα όσον αφορά την ασφάλεια που παρέχει το Κριτήριο Καιρού στα πλοία. Κατά την πιθανοθεωρητική θεώρηση του Κριτηρίου Καιρού παρατηρούμε ότι η επίδραση του ανέμου, όπως αναμενόταν, είναι αισθητή για το συγκεκριμένο πλοίο, το οποίο έχει εκτεταμένες υπερκατασκευές άρα και πλευρική επιφάνεια, αυτό έγινε αντιληπτό από τα διαγράμματα πιθανοτήτων ανέμου, καθώς υποθέτουμε ότι η ριπή ανέμου ασκείται συνεχόμενα καθ' όλη τη διάρκεια και όχι στιγμιαία όπως υποθέτει το Κριτήριο Καιρού. Ακόμη καθ' όλη τη διαδικασία παρατηρούμε ότι η μεταβολή του σημαντικού ύψους κύματος είναι αυτή που επιδρά περισσότερο στους υπολογισμούς συνάντησης κρίσιμων ομάδων κύματος, διότι θεωρούμε περίοδο κυμάτων κοντά στην ιδιοπερίοδο του πλοίου, υποθέτουμε συνεπώς κατάσταση συντονισμού για το πλοίο και το κυματικό περιβάλλον. Για ταχύτητες ανέμου μέχρι 42 m/sec βρήκαμε μικρές πιθανότητες ανατροπής του πλοίου. Οι πιθανότητες ανατροπής του πλοίου είναι πολύ μικρές για κρίσιμες ομάδες κύματος με αριθμό κυμάτων περισσότερων των πέντε. Ακόμη, από το σχήμα 5.32 βλέπουμε ότι το Κριτήριο Καιρού αφήνει ένα περιθώριο συνδυασμών κρίσιμου ύψους κύματος και ταχυτήτων ριπής ανέμου για τα πλάτη διατοιχισμού, που έχουμε επιλέξει. Γενικότερα η πιθανοθεωρητική θεώρηση του Κριτηρίου Καιρού δεν επιδέχεται μονοσήμαντη απάντηση, διότι τα αποτελέσματα της διερεύνησης κάθε φορά εξαρτώνται από την αρχική θεώρηση του προβλήματος καθώς και από τα διάφορα εργαλεία που επιλέγουμε για την λύση του προβλήματος.

Κατά την δυναμική προσέγγιση παρατηρούμε ότι η συνολική πιθανότητα ανατροπής του πλοίου συγκλίνει με την πιθανότητα ανατροπής του πλοίου που προκύπτει από την απλή πιθανοθεωρητική θεώρηση για κρίσιμες ομάδες κύματος με αριθμό κυμάτων $n \geq 1$ έως $n \geq 3$. Τα αποτελέσματα των υπολογισμών της δυναμικής θεώρησης εξαρτώνται από την τιμή της απόσβεσης b_1 , που έχουμε επιλέξει. Συνεπώς, για να έχουμε καλύτερη σύγκριση των αποτελεσμάτων της πιθανοθεωρητικής και της δυναμικής θεώρησης, θα έπρεπε να γίνει μία εξέταση της αναλογίας της απόσβεσης που υποθέτει το Κριτήριο Καιρού και της απόσβεσης που επιλέγουμε για την κίνηση διατοιχισμού του πλοίου. Επίσης η πιθανότητα ανατροπής είναι αρκετά μικρότερη κατά την πιθανοθεωρητική θεώρηση για κρίσιμες ομάδες κύματος με αριθμό κυμάτων περισσότερων των πέντε. Η προσέγγιση του κυματικού περιβάλλοντος στην δυναμική θεώρηση είναι πιο ρεαλιστική διότι το κρίσιμο ύψος κύματος μεταβάλλεται ανάλογα με την ταχύτητα ριπής ανέμου και με τον αριθμό των κυμάτων.

Για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων που προκύπτουν θα έπρεπε να μπορούσαμε να συγκρίνουμε τα αποτελέσματα των υπολογισμών και σε άλλα πλοία, ώστε να έχουμε μια πιο σαφή εικόνα για την πιθανότητα ανατροπής των πλοίων καθώς και για το περιθώριο ασφαλείας που παρέχει το Κριτήριο Καιρού. Ακόμη δεν υπάρχουν αποδεκτά ή μη αποδεκτά όρια σε ότι αφορά τα αποτελέσματα των πιθανοθεωρητικών μεθόδων γεγονός που δυσχεραίνει την αξιολόγηση των εκάστοτε αποτελεσμάτων.

Βιβλιογραφία

IMO(1985) ResA562 “Weather Criterion”

Yamagata, M. & ENG, D. (1959). Standard of stability adopted in Japan. Lead in London at the Spring Meeting of Institution of Naval Architects on March 26, 1959, Mr. L.Woollard, M.A. (Honorary Vice- President), in the chair.

Blendermann, W. (2004). Ships may encounter high wind loads- a statistical assessment. Journal of Engineering for the Maritime Environment, σσ 1-10. Volume 218, Number 1/2004.

Paroka, D., & Umeda, N. (2006). Capsizing Probability Prediction for a large Passenger ship in Irregular Beam Winds & Waves: Comparison of Analytical and Numerical Methods. Journal of Ship Research, 50(4).

Masson, D. & Chandler, P. (1993). Wave groups: a closer look at spectral methods. Coast Engineering (20), σσ 249-275.

Kimura, A. (1980). Statistical properties of random wave groups. International Conference on Coastal Conference, (σς 2955-73). Sydney – Australia.

Mathiesen, J. & Bitner-Gregersen E. (1990).Joint distributions for significant wave height and wave zero-up- crossing period. Applied Ocean Research, vol.12, No.2.

Themelis, N. & Spyrou, K. (2007). “Probabilistic assessment of ship stability.” Transactions, Society of Naval Architects and Marine Engineers, (SNAME) 115:181-204

Σπύρου, Κ. (2006). Σημειώσεις ευστάθειας διατοιχισμού πλοίου και υπόβαθρου κανονισμών.

Deybach, F. (1997). Intact Stability for naval ships.

Spyrou, K. (2002). “A Basis for developing a rational alternative to the Weather Criterion: problems and capabilities.” Proceedings, 6th International Ship Stability Workshop, Webb Institute, New York.

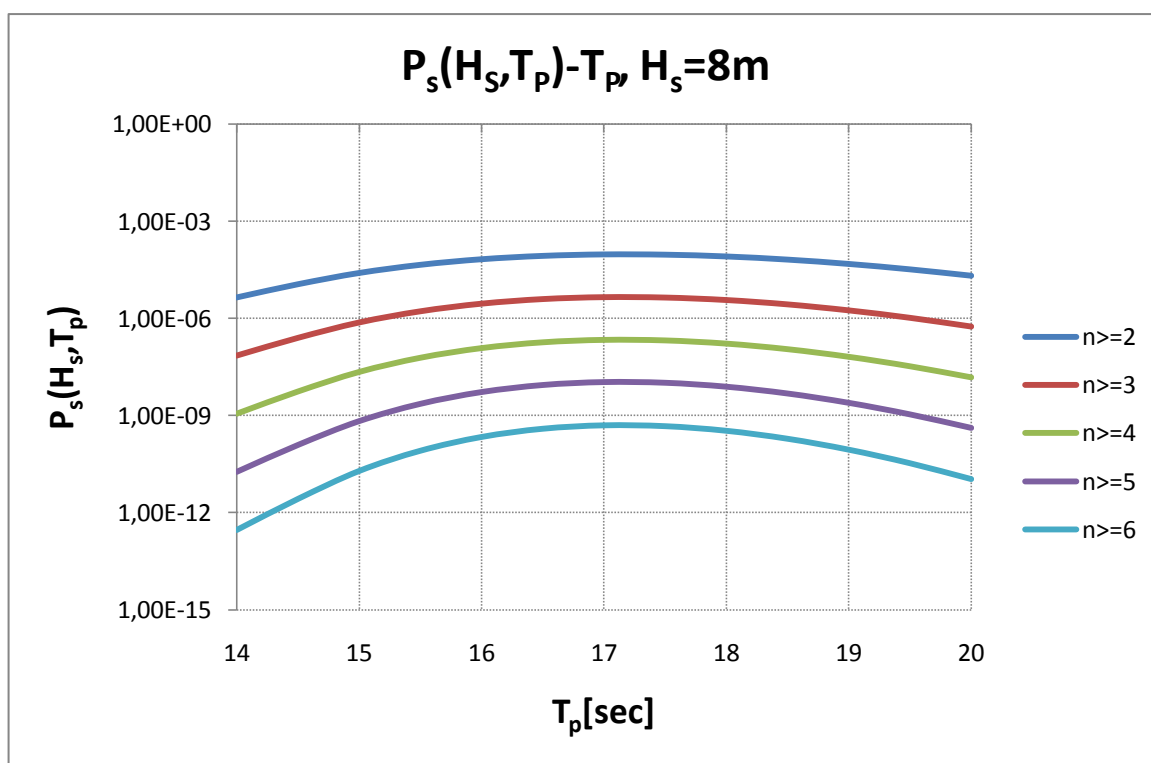
Francescutto, A. (2002). Intact Ship Stability - The way ahead, Proceedings of the 6th International Ship Stability Workshop, Webb Institute.

Παράρτημα Α

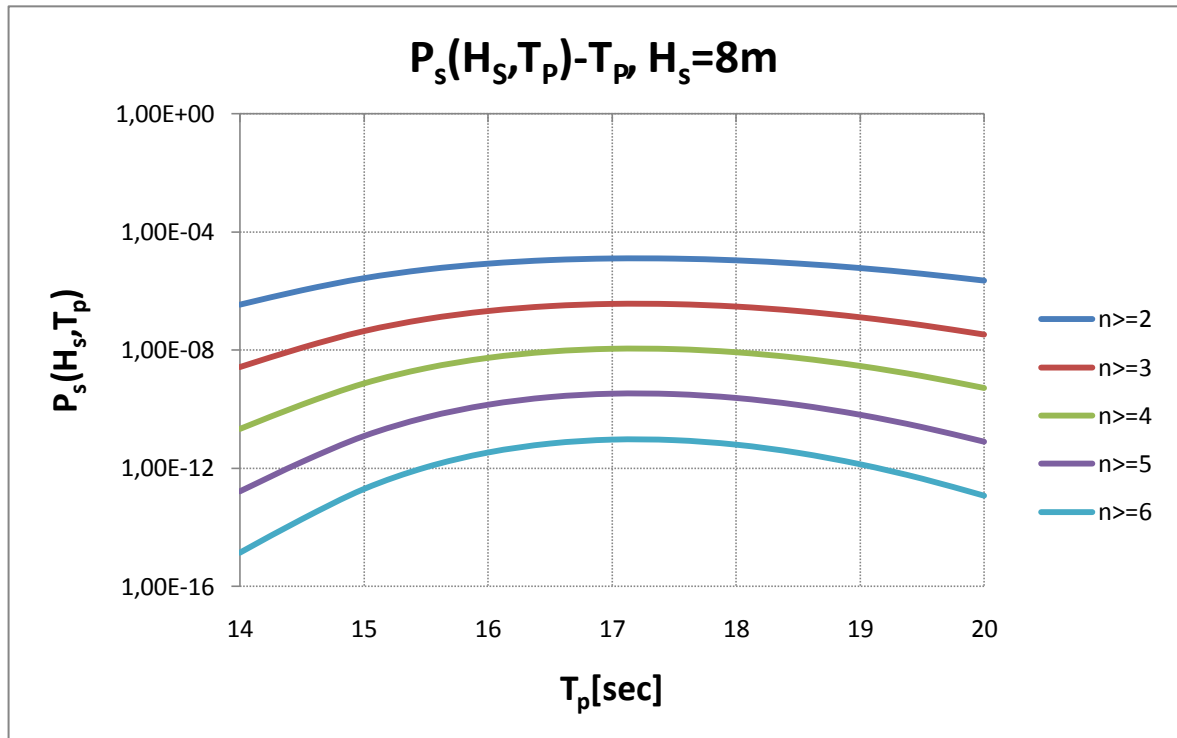
Στο παράρτημα παρουσιάζονται λεπτομερώς τα αποτελέσματα από την εφαρμογή της μεθόδου που παρατέθηκε στο 5^ο κεφάλαιο. Η σχετική μέθοδος υπολογισμού στην οποία βασίζονται τα ακόλουθα διαγράμματα έχει αναλυθεί αντίστοιχα υποκεφάλαια του 5^{ου} κεφαλαίου.

5.1.2 Ανάλυση ευαισθησίας των υπολογισμών για τις κρίσιμες ομάδες κύματος ως προς το κρίσιμο ύψος κύματος H_{cr} .

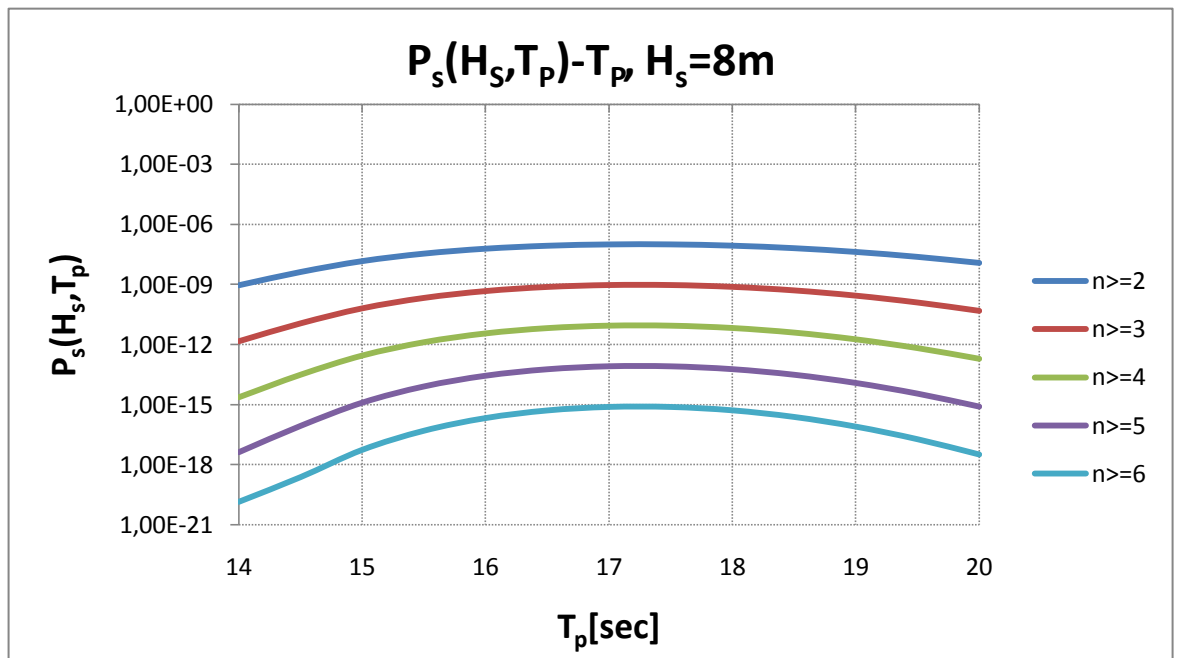
5.1.2.1 Διαγράμματα πιθανοτήτων συνάντησης κρίσιμων ομάδων κύματος με $H_{cr1} > 0.8H_{cr} > 0.9 H_{cr} > 1.1H_{cr}$



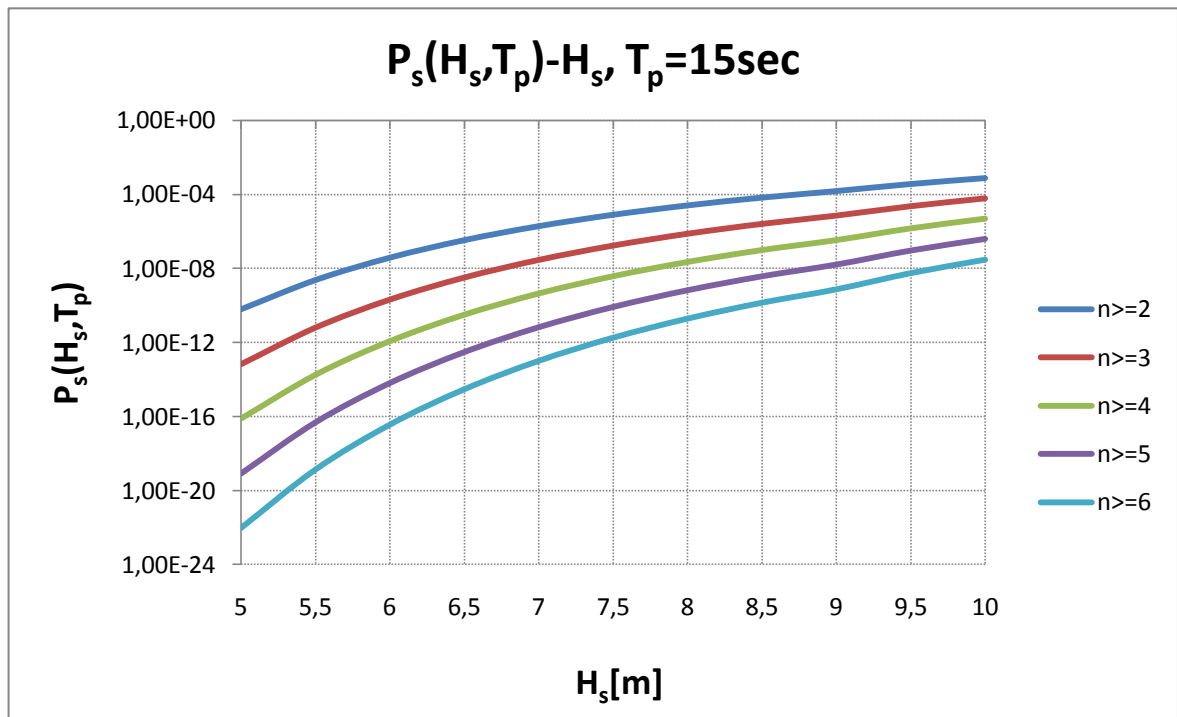
Σχήμα Α.1. Πιθανότητες συνάντησης κρίσιμων ομάδων κύματος με ύψος κύματος μεγαλύτερο του κρίσιμου ύψους $H_s = 8m$ και $H_{cr} = 0.8H_{cr} = 13.76 m$



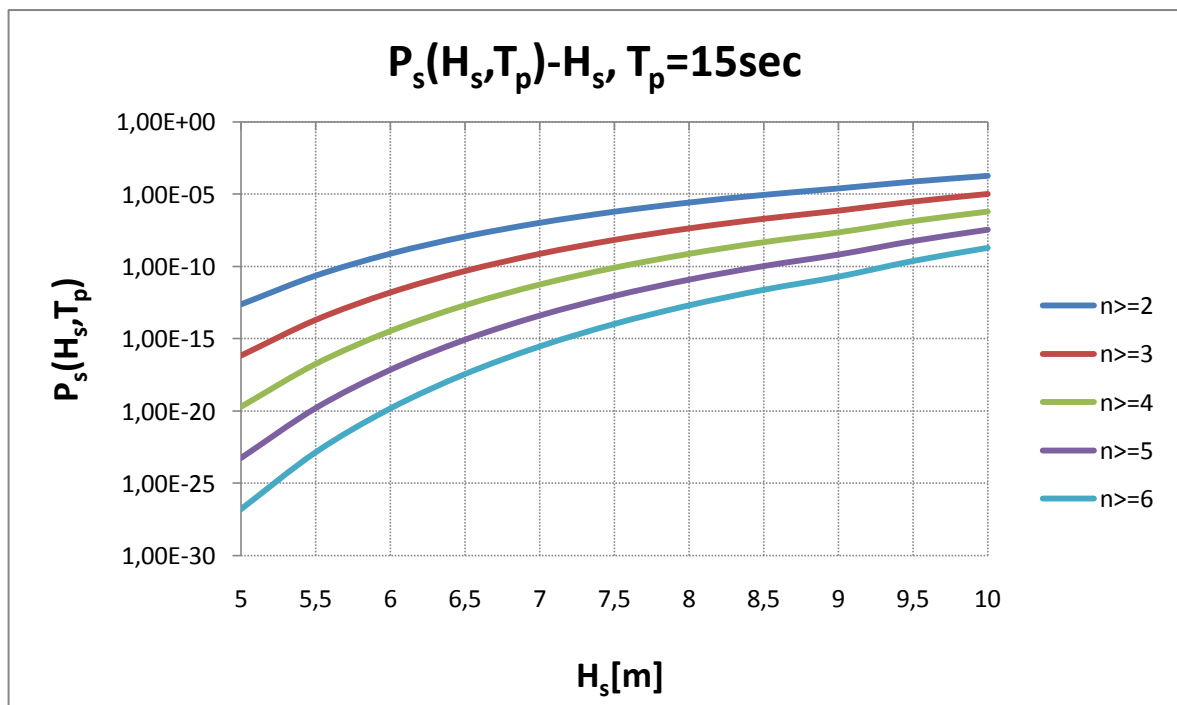
Σχήμα Α.2. Πιθανότητες συνάντησης κρίσιμων ομάδων κύματος με ύψος κύματος μεγαλύτερο του κρίσιμου ύψους $H_s=8m$ και $H_{cr}=0,9H_{cr}=15,49 m$



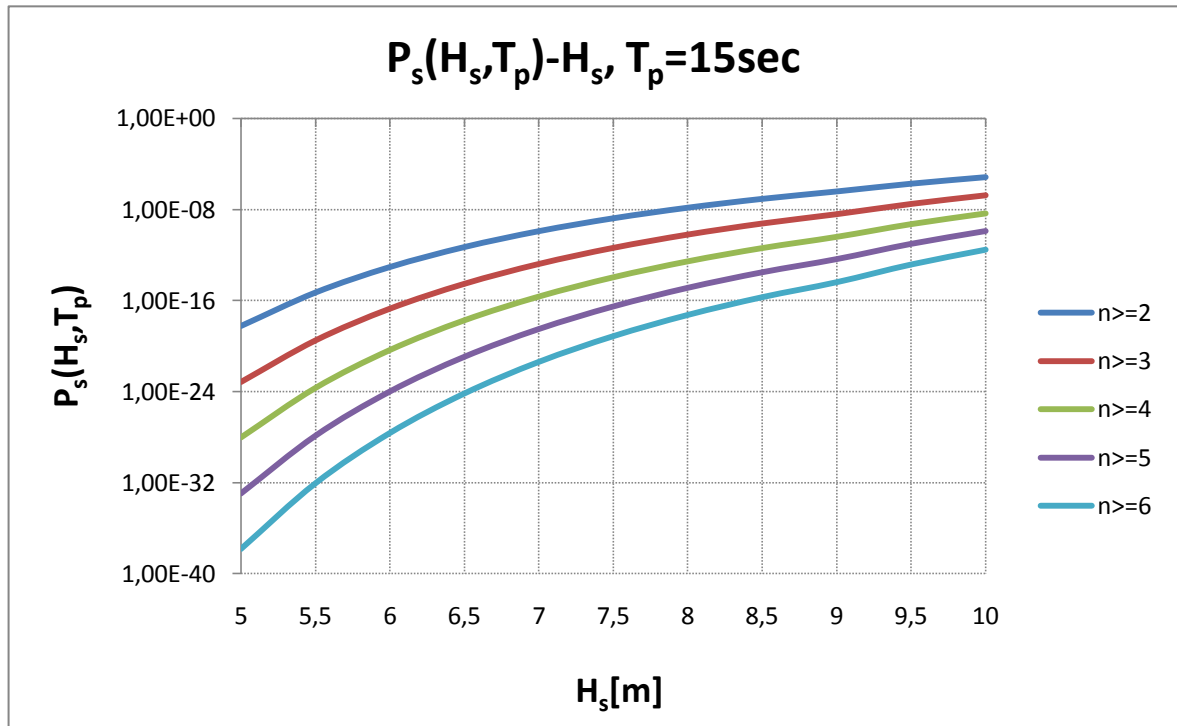
Σχήμα Α.3. Πιθανότητες συνάντησης κρίσιμων ομάδων κύματος με ύψος κύματος μεγαλύτερο του κρίσιμου ύψους, $H_s=8m$ και $H_{cr}=1,1H_{cr}=18,93 m$



Σχήμα Α.4. Πιθανότητες συνάντησης κρίσιμων ομάδων κύματος με ύψος κύματος μεγαλύτερο του κρίσιμου ύψους $T_p = 15 \text{sec}$ και $H_{cr} = 0,8H_{cr} = 13,76 \text{ m}$

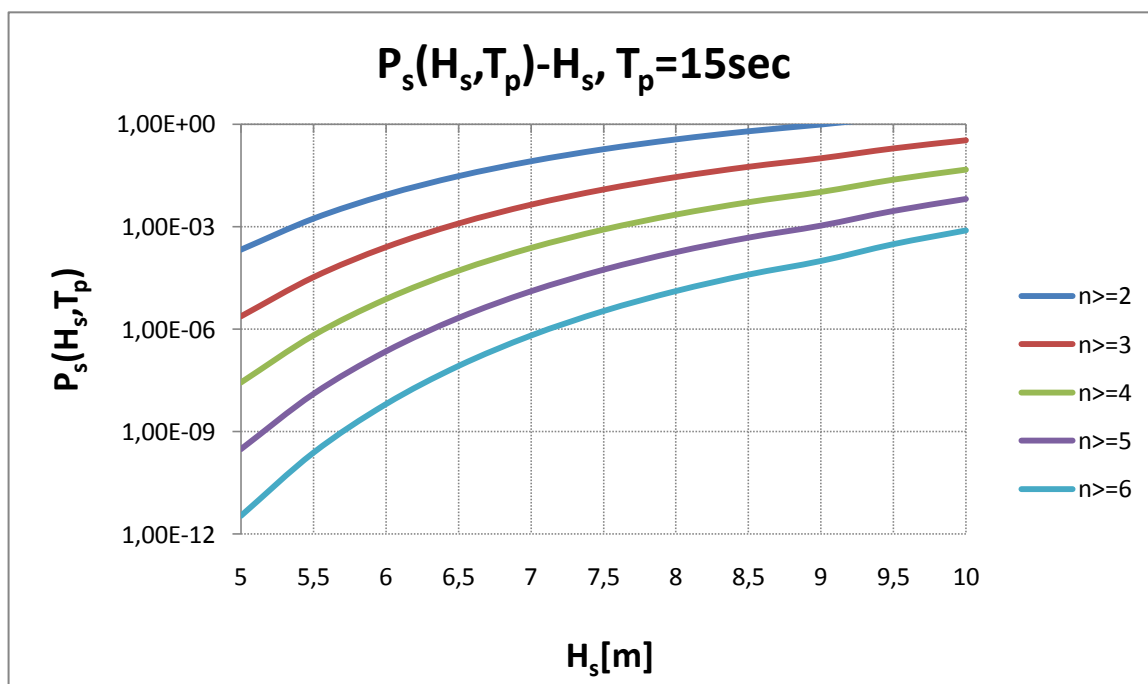


Σχήμα Α.5. Πιθανότητες συνάντησης κρίσιμων ομάδων κύματος με ύψος κύματος μεγαλύτερο του κρίσιμου ύψους $T_p = 15 \text{sec}$ και $H_{cr} = 0,9H_{cr} = 15,41 \text{ m}$

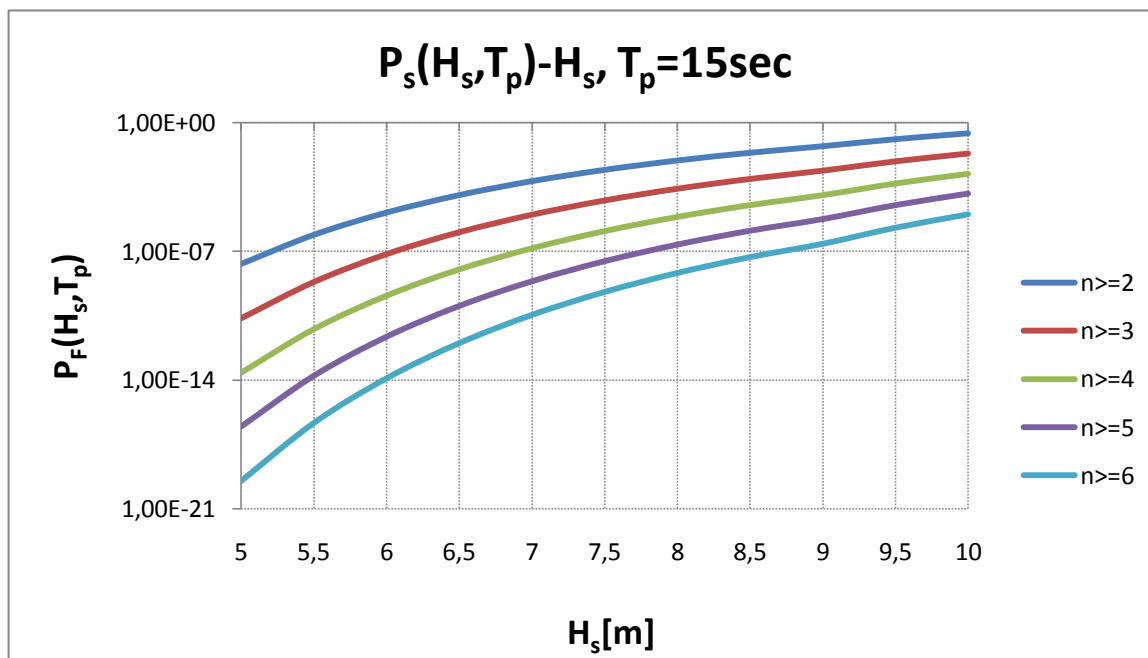


Σχήμα Α.6. Πιθανότητες συνάντησης κρίσιμων ομάδων κύματος με ύψος κύματος μεγαλύτερο του κρίσιμου ύψους $T_p=15 \text{ sec}$ και $H_{cr} = 1,1H_{cr}=18,93 \text{ m}$

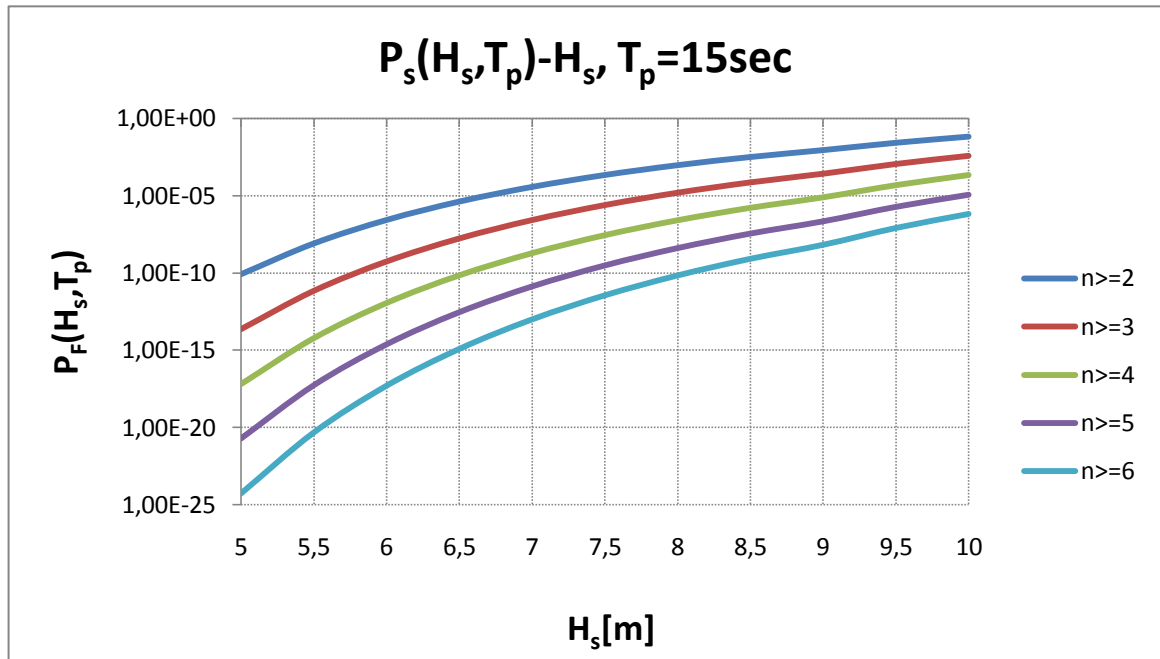
Σχετικά διαγράμματα μετά από χρόνο παρατήρησης της θάλασσας μία ώρα



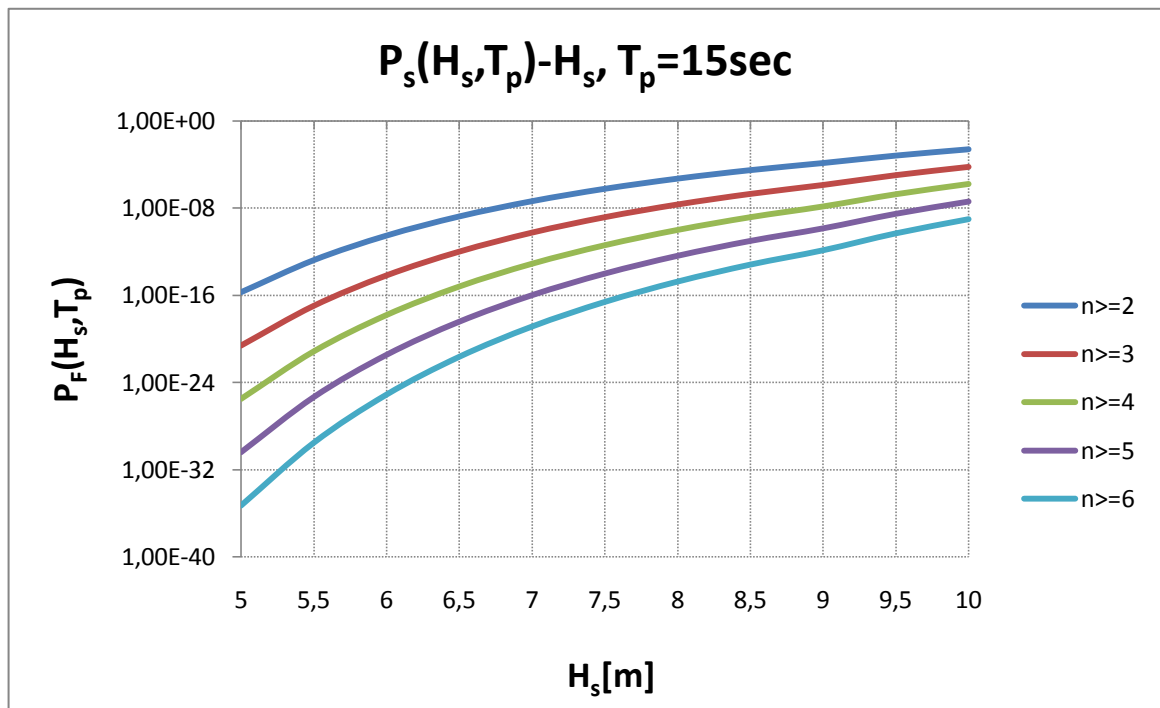
Σχήμα Α.7. Πιθανότητες συνάντησης κρίσιμων ομάδων κύματος με ύψος κύματος μεγαλύτερο του κρίσιμου ύψους $T_p = 15 \text{sec}$ και $H_{cr} = 0,6H_{cr} = 10,32 \text{ m}$



Σχήμα Α.8. Πιθανότητες συνάντησης κρίσιμων ομάδων κύματος με ύψος κύματος μεγαλύτερο του κρίσιμου ύψους $T_p = 15 \text{sec}$ και $H_{cr} = 0,8H_{cr} = 13,76 \text{ m}$

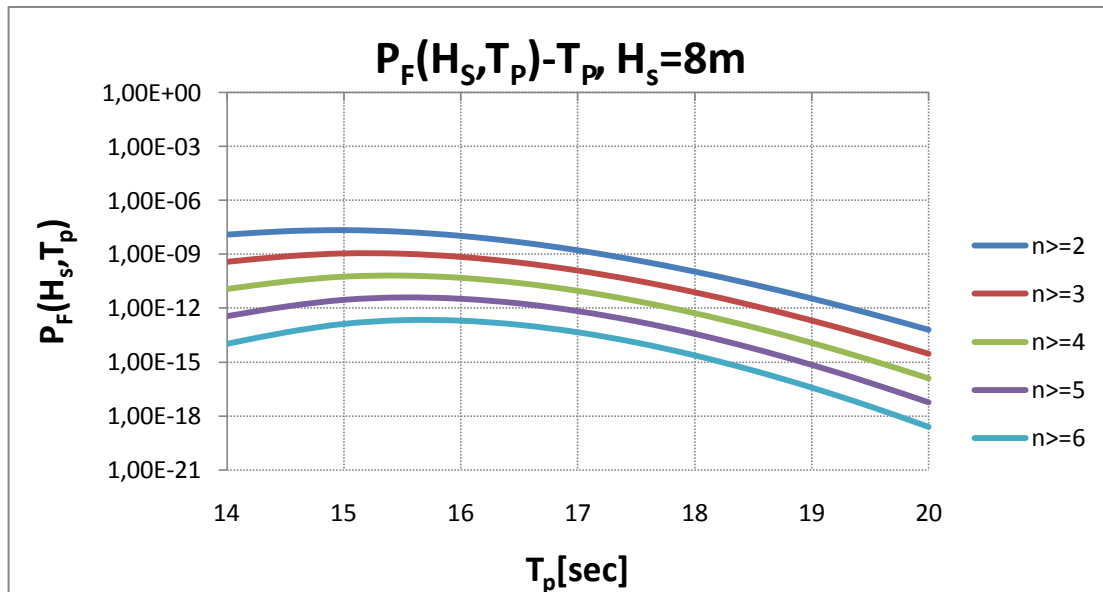


Σχήμα A.9. Πιθανότητες συνάντησης κρίσιμων ομάδων κύματος με ύψος κύματος μεγαλύτερο του κρίσιμου ύψους $T_p = 15 \text{ sec}$ και $H_{cr} = 0,9H_{cr} = 15,49 \text{ m}$

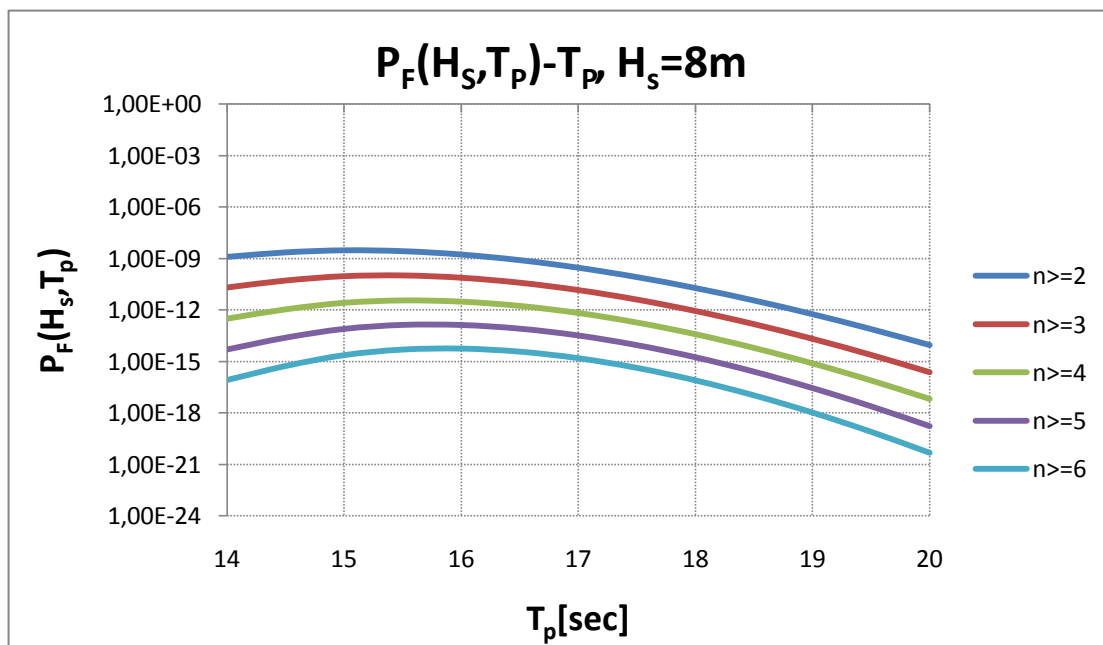


Σχήμα A.10. Πιθανότητες συνάντησης κρίσιμων ομάδων κύματος με ύψος κύματος μεγαλύτερο του κρίσιμου ύψους $T_p = 15 \text{ sec}$ και $H_{cr} = 1,1H_{cr} = 18,93 \text{ m}$

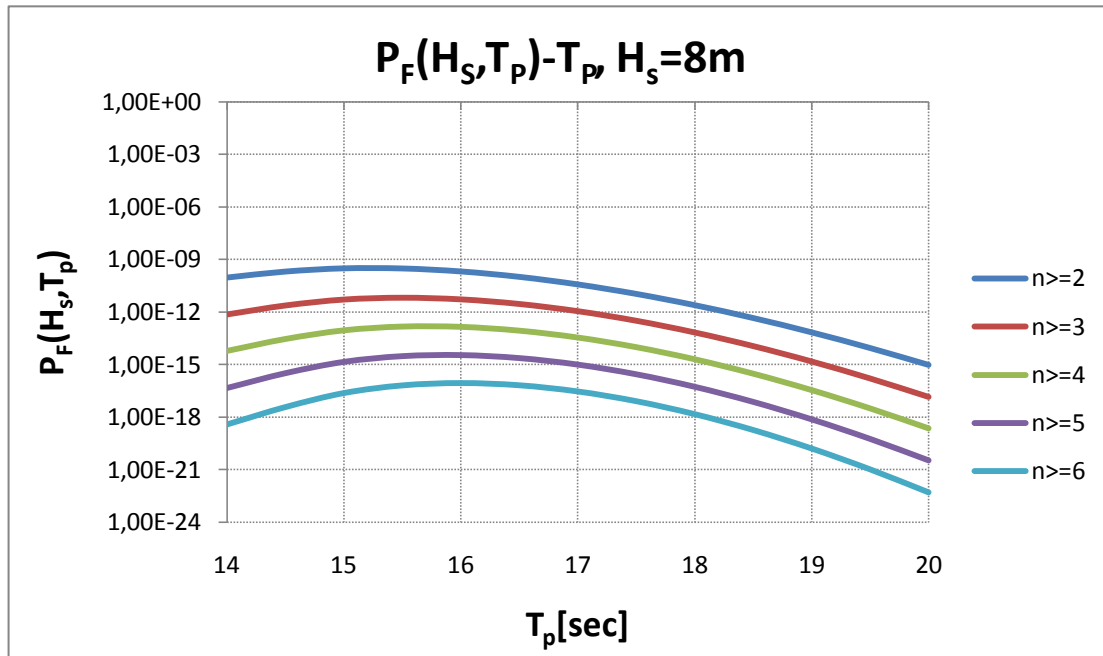
5.1.2.3 Υπολογισμός της συνολικής πιθανότητας συνάντησης κατάστασης θάλασσας με χαρακτηριστικά (H_s, T_p) και κρίσιμων ομάδων κύματος με σημαντικό ύψος κύματος μεγαλύτερο από το εκάστοτε H_{cr}



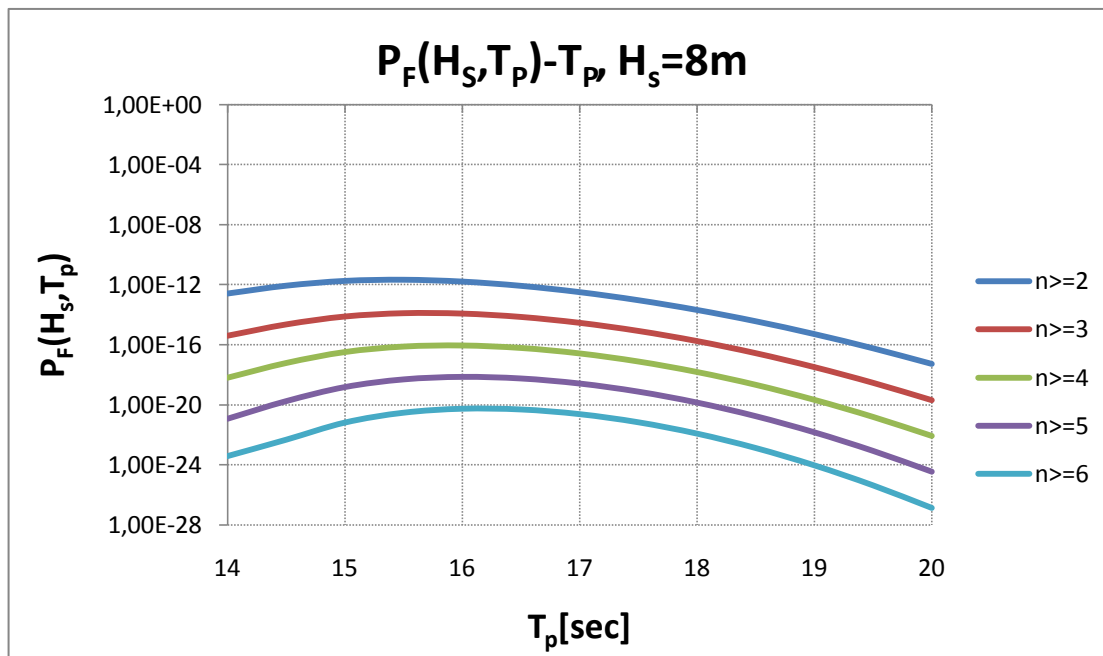
Σχήμα A.11. Συνολικής πιθανότητα συνάντησης συγκεκριμένης κατάστασης θάλασσας και κρίσιμων ομάδων κύματος συναρτήσει της περιόδου κορυφής με $T_w \in [0.9T_0, 1.1T_0]$, $H_s = 8m$ και $H_{cr} = 0.7H_{cr} = 12.04 m$



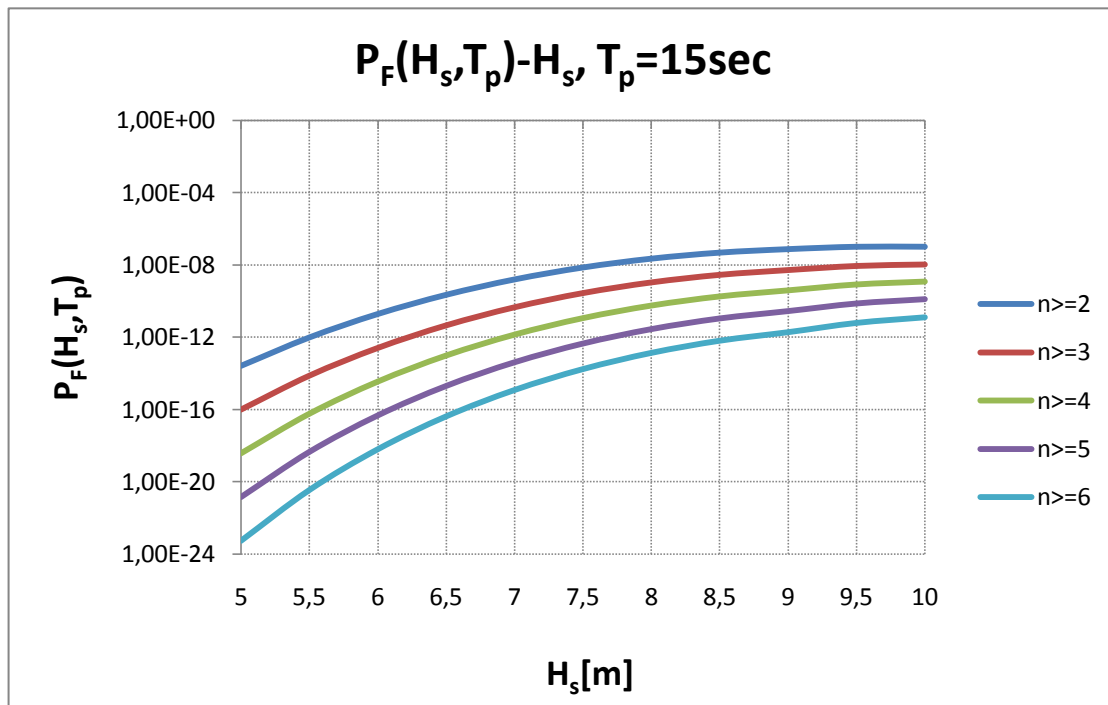
Σχήμα A.12. Συνολικής πιθανότητα συνάντησης συγκεκριμένης κατάστασης θάλασσας και κρίσιμων ομάδων κύματος συναρτήσει της περιόδου κορυφής με $T_w \in [0.9T_0, 1.1T_0]$, $H_s = 8m$ και $H_{cr} = 0.8H_{cr} = 13.76 m$



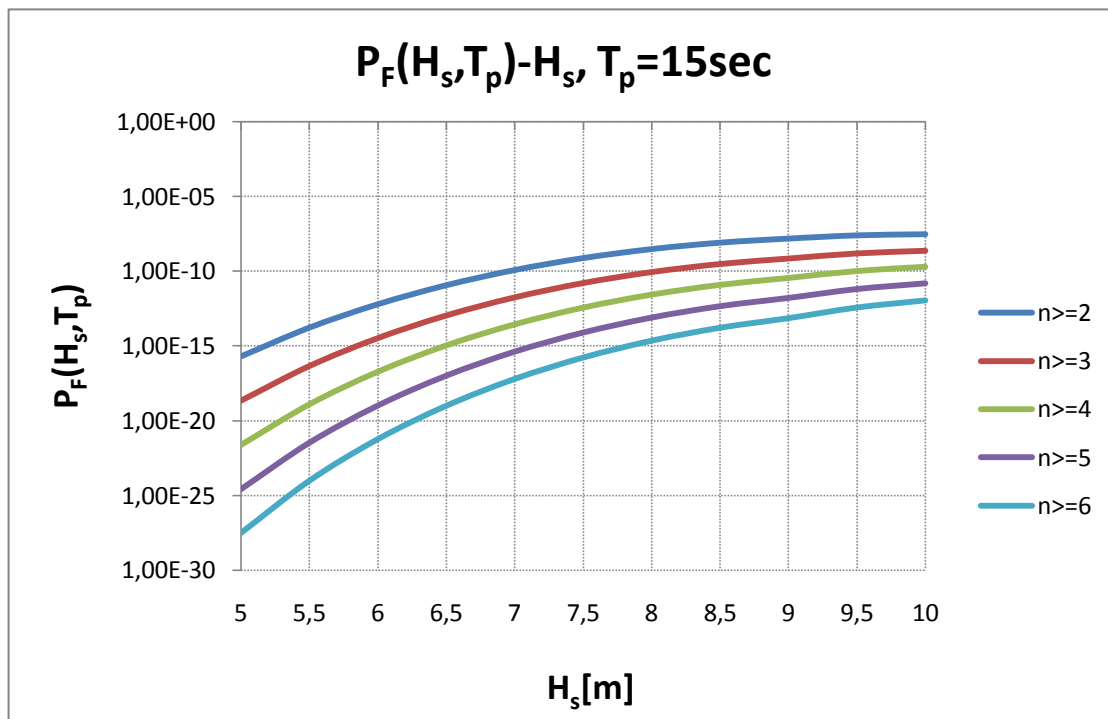
Σχήμα A.13. Συνολικής πιθανότητα συνάντησης συγκεκριμένης κατάστασης θάλασσας και κρίσιμων ομάδων κύματος συναρτήσει της περιόδου κορυφής με $T_w \in [0.9T_0, 1.1T_0]$, $H_s = 8m$ και $H_{cr} = 0.9H_{cr} = 15.49 m$



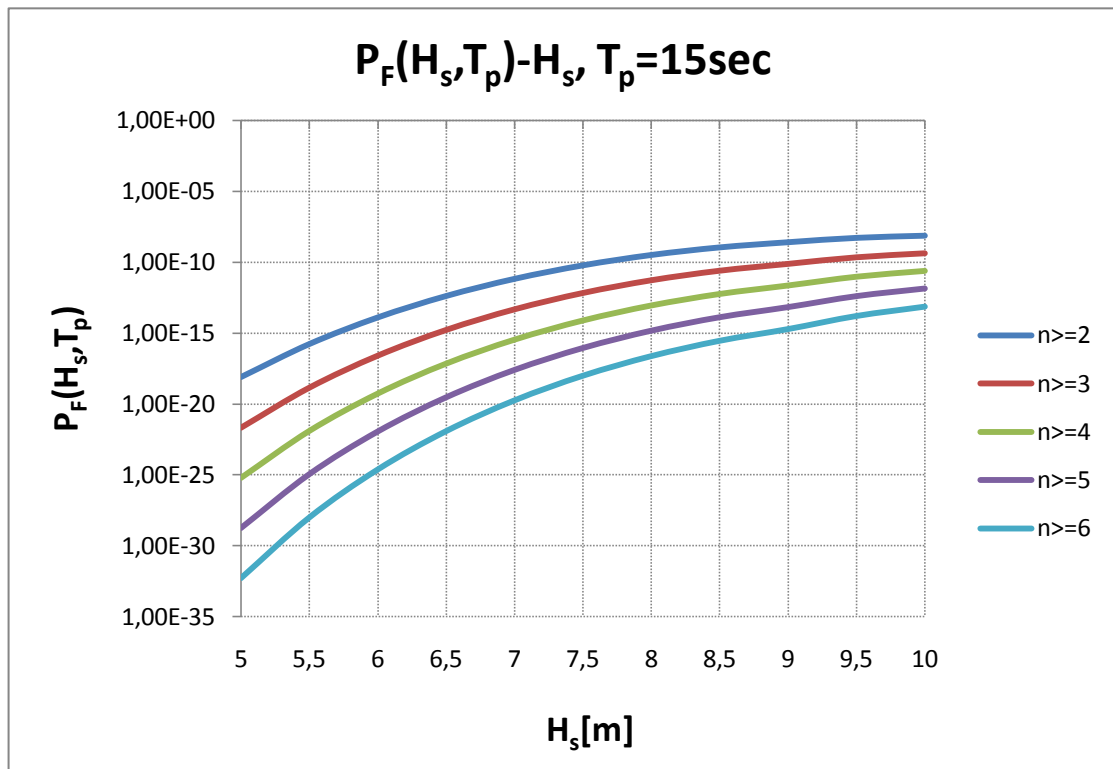
Σχήμα A.14. Συνολικής πιθανότητα συνάντησης συγκεκριμένης κατάστασης θάλασσας και κρίσιμων ομάδων κύματος συναρτήσει της περιόδου κορυφής με $T_w \in [0.9T_0, 1.1T_0]$, $H_s = 8m$ και $H_{cr} = 1.1H_{cr} = 18.93 m$



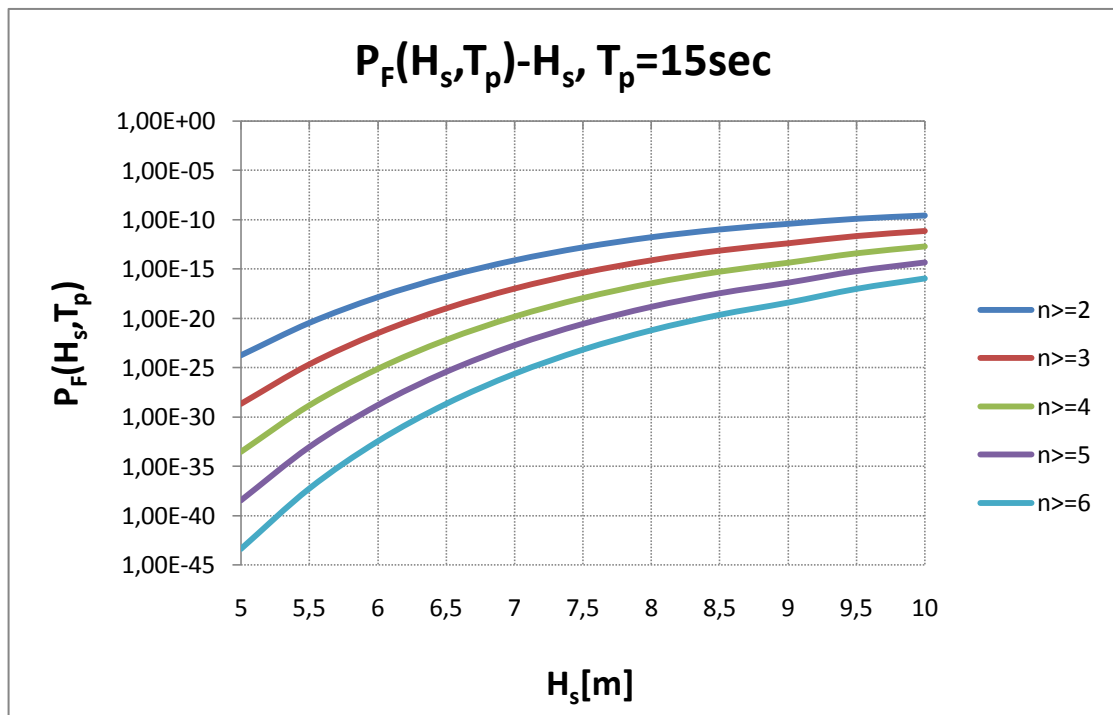
Σχήμα A.15. Συνολική πιθανότητα συνάντησης συγκεκριμένης κατάστασης θάλασσας και κρίσιμων ομάδων κύματος συναρτήσεως του σημαντικού ύψους κύματος με $H_s \in [5, 10]$, $T_p = 15 \text{sec}$ και $H_{cr} = 0.7H_{cr} = 12.04 \text{ m}$



Σχήμα A.16. Συνολική πιθανότητα συνάντησης συγκεκριμένης κατάστασης θάλασσας και κρίσιμων ομάδων κύματος συναρτήσεως του σημαντικού ύψους κύματος με $H_s \in [5, 10]$, $T_p = 15 \text{sec}$ και $H_{cr} = 0.8H_{cr} = 13.76 \text{ m}$



Σχήμα A.17. Συνολική πιθανότητα συνάντησης συγκεκριμένης κατάστασης θάλασσας και κρίσιμων ομάδων κύματος συναρτήσεως του σημαντικού ύψους κύματος με $H_s \in [5, 10]$, $T_p = 15 \text{sec}$ και $H_{cr} = 0.9H_{cr} = 15.49 \text{ m}$



Σχήμα A.18. Συνολική πιθανότητα συνάντησης συγκεκριμένης κατάστασης θάλασσας και κρίσιμων ομάδων κύματος συναρτήσεως του σημαντικού ύψους κύματος με $H_s \in [5, 10]$, $T_p = 15 \text{sec}$ και $H_{cr} = 1.1H_{cr} = 18.93 \text{ m}$

5.1.3 Παραμετροποίηση Κριτηρίου Καιρού

Στα ανωτέρω διαγράμματα του μοχλοβραχίονα επαναφοράς συναρτήσει της γωνίας εγκάρσιας κλίσης παρατηρούμε ότι η γωνία ϕ_2 έχει λάβει την τιμή 33,4 degrees. Θα εξετάσουμε τις δύο παραπάνω περιπτώσεις και για διαφορετικές τιμές τις γωνίας ϕ_2 . Η γωνία αυτή υπολογίζεται ως εξής:

$$\phi_2 = \min[\phi_f, 50, \phi_c]$$

Υποθέτουμε λοιπόν, ότι το πλοίο που εξετάζουμε έχει μεγαλύτερη γωνία κατάκλισης από 33,4°, αλλά μικρότερη από 50° και από την γωνία ϕ_c , έτσι επαναλαμβάνουμε τους υπολογισμούς των δύο περιπτώσεων για τις ακόλουθες τιμές γωνιών κατάκλισης:

- a. $\phi_f = 40^\circ$
- b. $\phi_f = 45^\circ$

Οι πίνακες που ακολουθούν προκύπτουν από υπολογισμούς στο Mathematica και τα διαγράμματα έγιναν στο Excel.

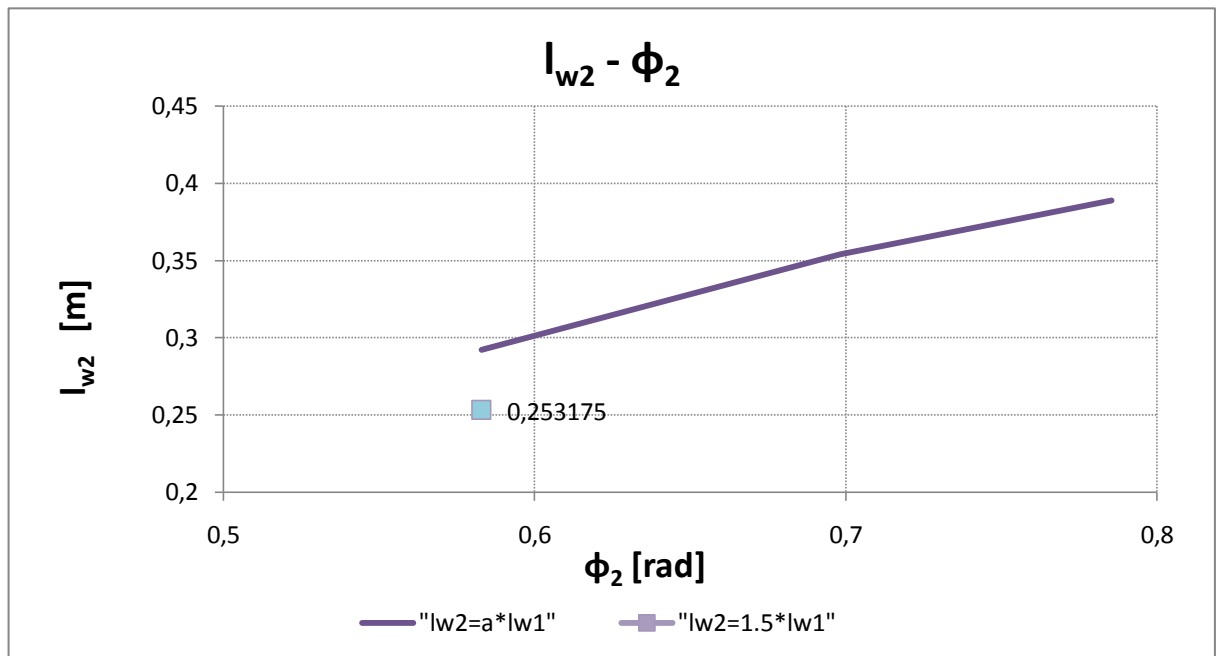
Και στο στάδιο αυτό ισχύουν οι απαιτήσεις του Κριτηρίου Καιρού για την 1^η περίπτωση και για τις δύο γωνίες κατάκλισης.

1^η περίπτωση:

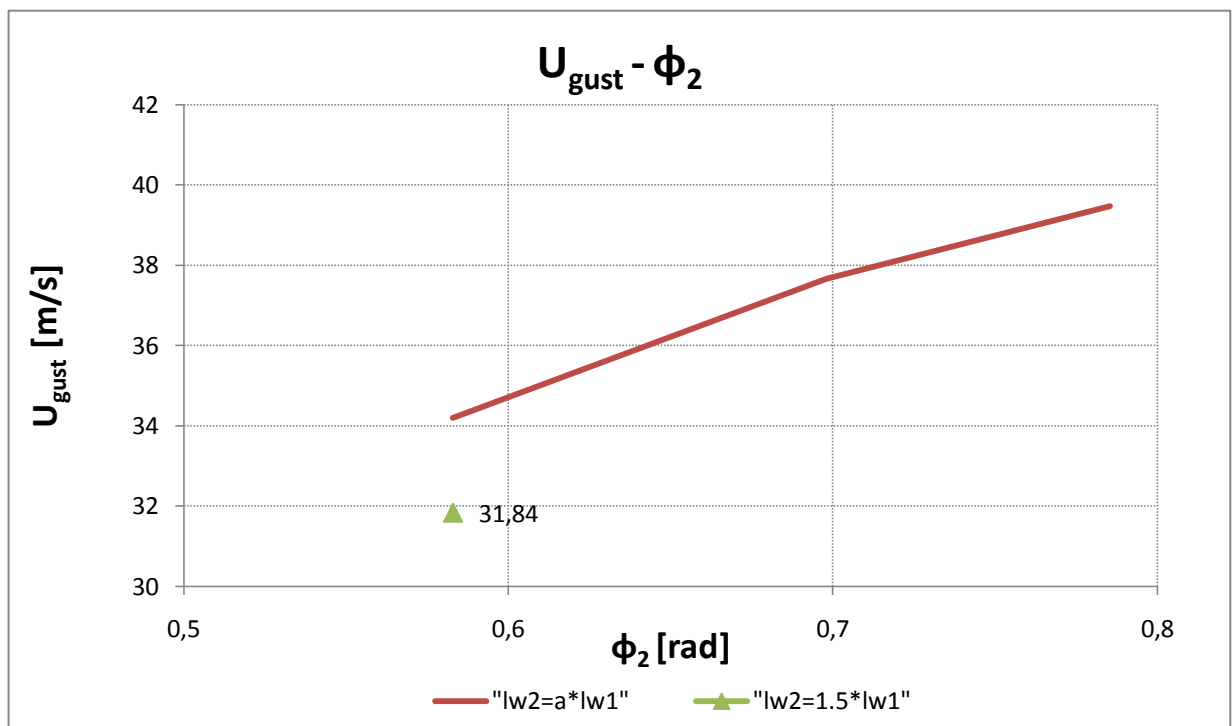
ϕ_2 [degrees]	ϕ_2 [rad]	l_{w2} [m]	U_{gust} [m/s]	U_{gust}/U_{mean}
33,4	0,583	0,292	34,20	1,32
40	0,698	0,354	37,66	1,45
45	0,785	0,389	39,47	1,52

Πίνακας A.1

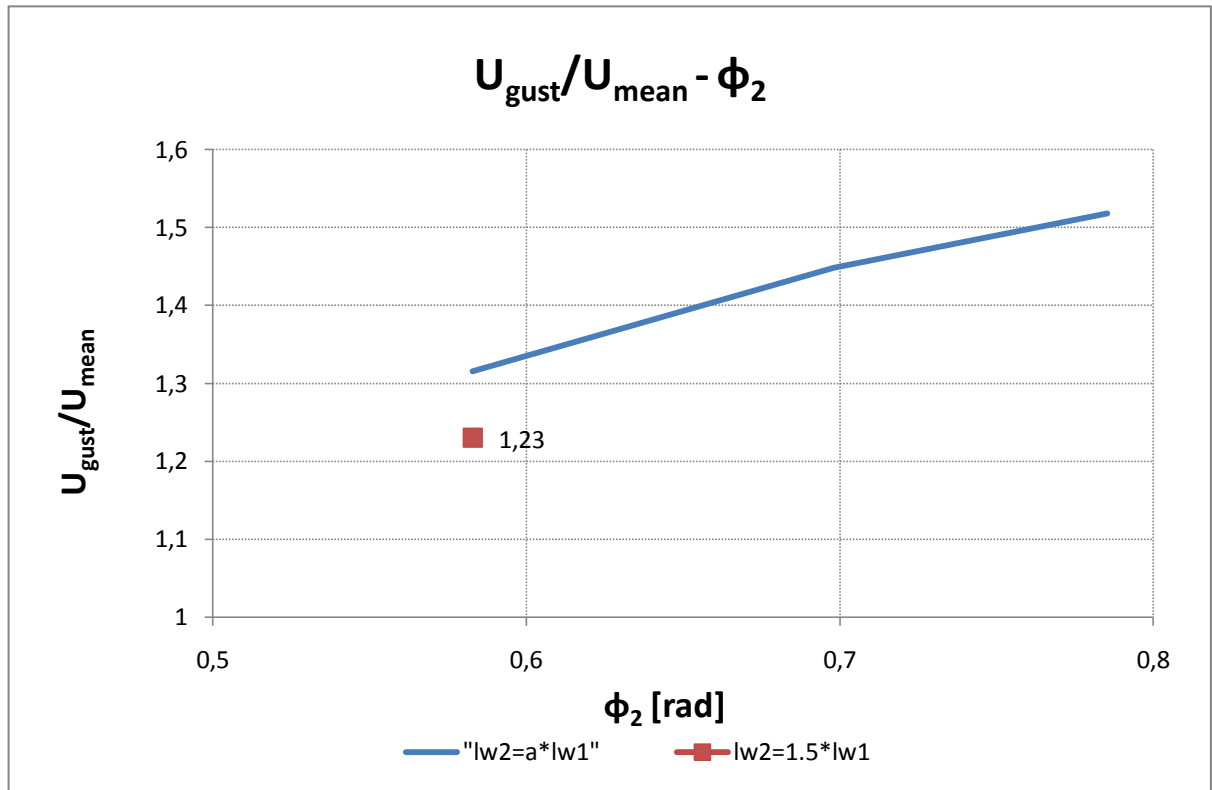
Ακολουθούν τα διαγράμματα που προκύπτουν από τον ανωτέρω πίνακα:



Σχήμα A.19. Μοχλοβραχίονας ανέμου l_{w2} συναρτήσει της γωνίας ϕ_2 .



Σχήμα A.20. Ταχύτητα ριπής ανέμου συναρτήσει της γωνίας ϕ_2 .



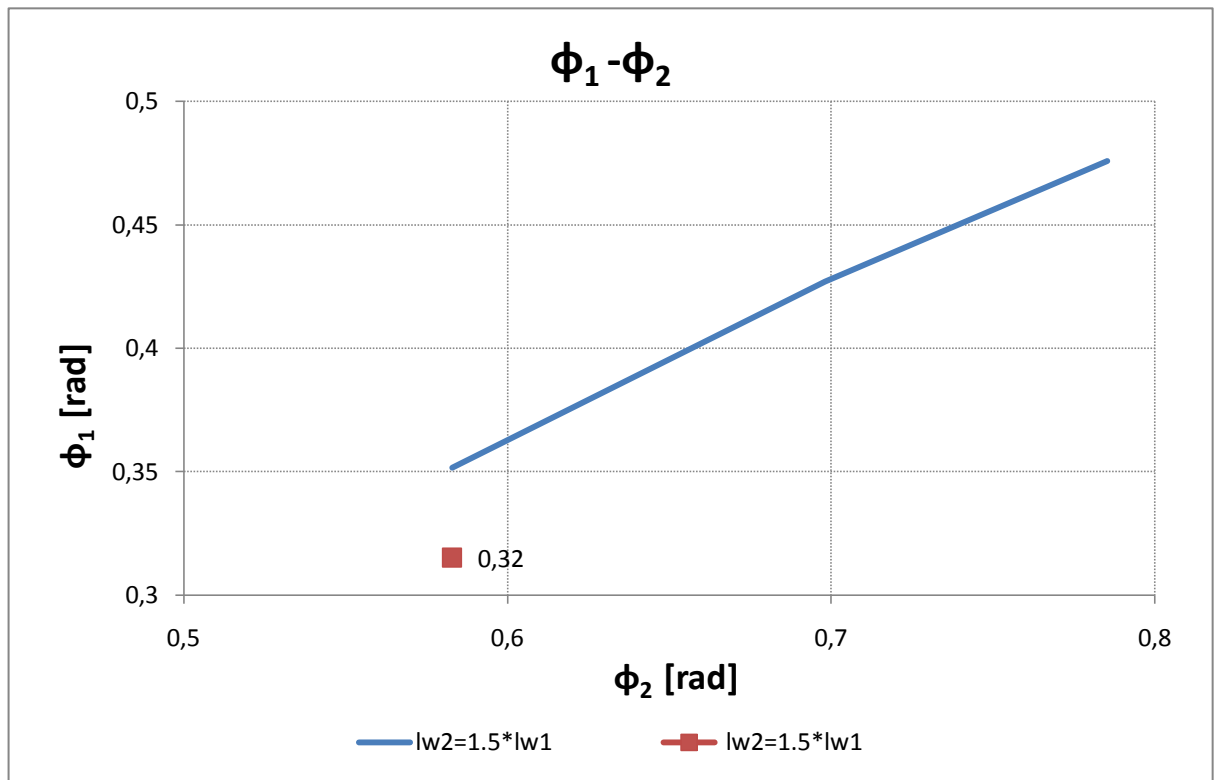
Σχήμα A.21. Ταχύτητα ριπής ανέμου προς την σταθερή ταχύτητα ανέμου συναρτήσει της γωνίας ϕ_2 .

2^η περίπτωση:

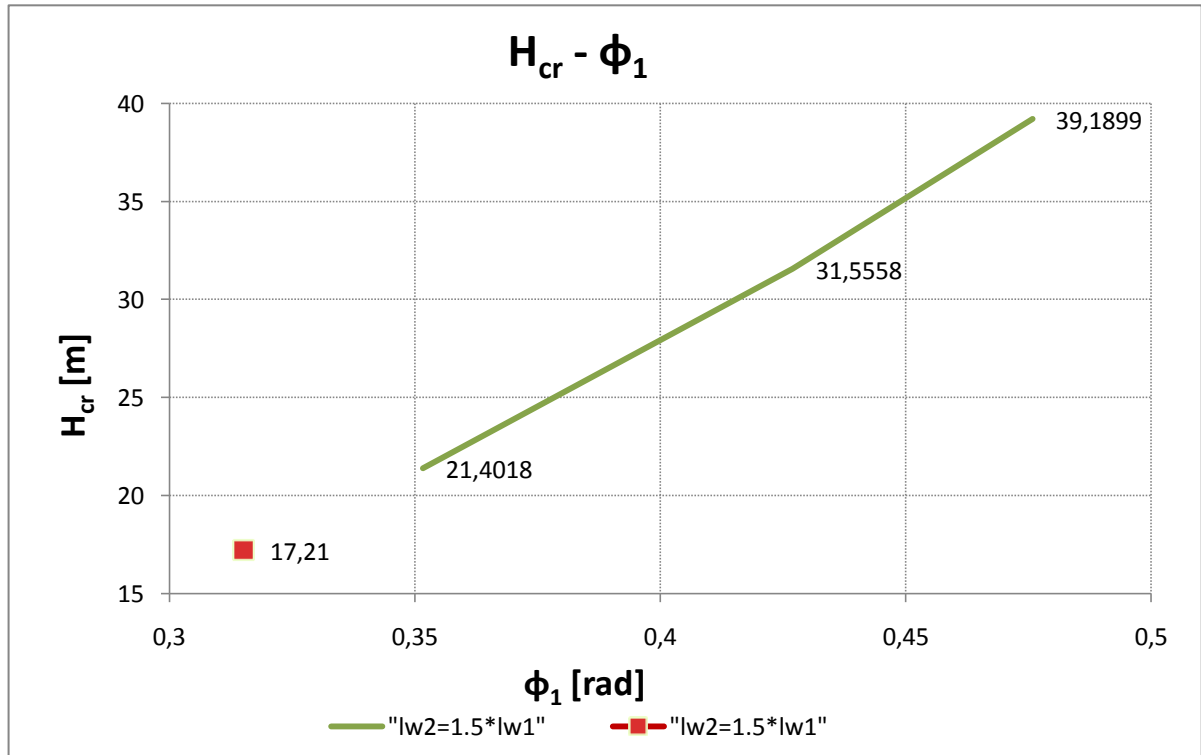
ϕ_2 [degrees]	ϕ_2 [rad]	ϕ_1 [degrees]	ϕ_1 [rad]	s	H_{cr} [m]
33,4	0,583	20,15	0,352	0,059	21,40
40	0,698	24,47	0,427	0,067	31,56
45	0,785	27,27	0,476	0,108	39,19

Πίνακας A.2

Ακολουθούν τα διαγράμματα που προκύπτουν από τον ανωτέρω πίνακα:

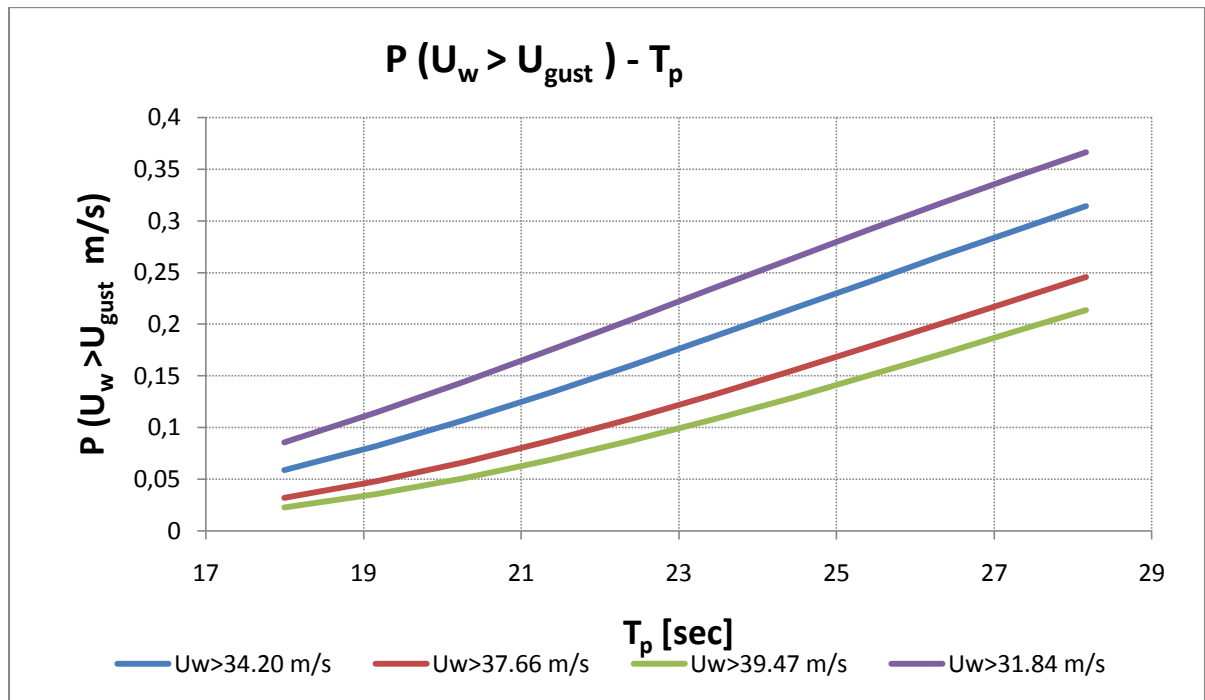


Σχήμα A.22. Εύρος διατοιχισμού ϕ_1 συναρτήσει της γωνίας ϕ_2 , για διάφορες τιμές της γωνίας κατάκλισης.

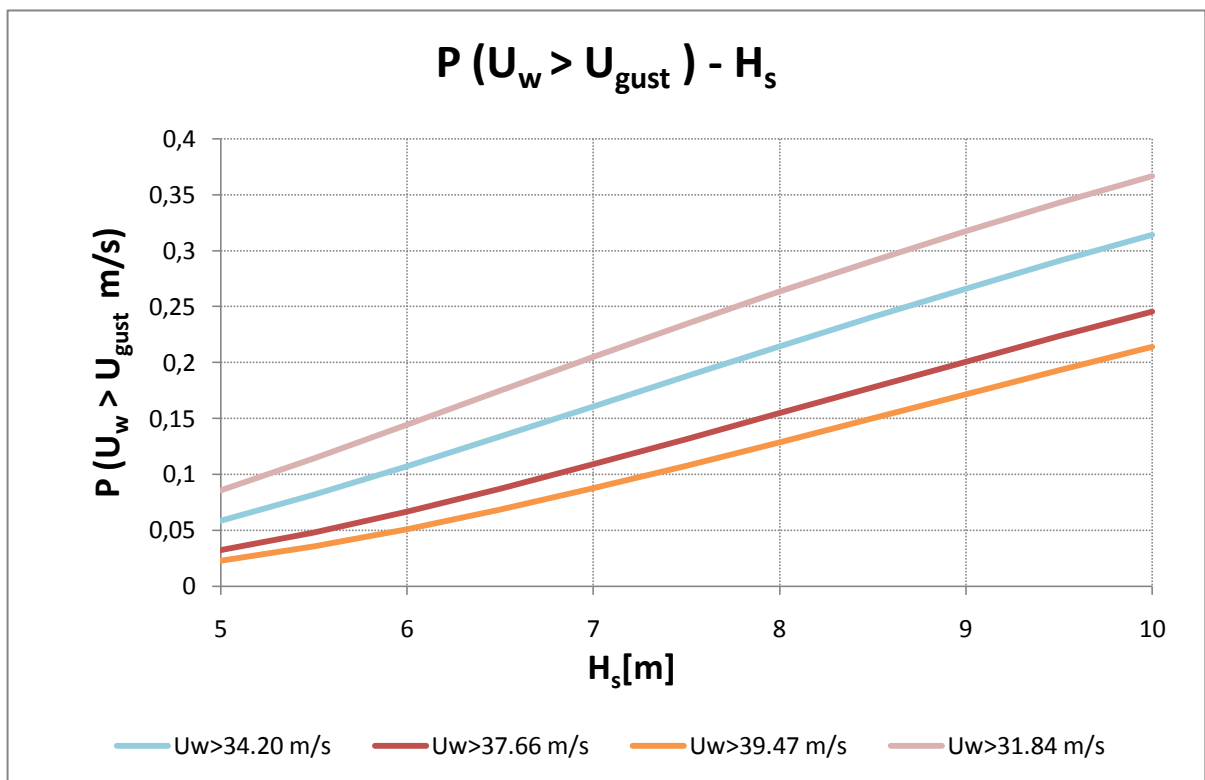


Σχήμα A.23. Κρίσιμο ύψος κύματος H_{cr} συναρτήσει του εύρους διατοιχισμού ϕ_1 , για διάφορες τιμές της γωνίας κατάκλισης.

5.1.3.1 Υπολογισμοί Ανέμου



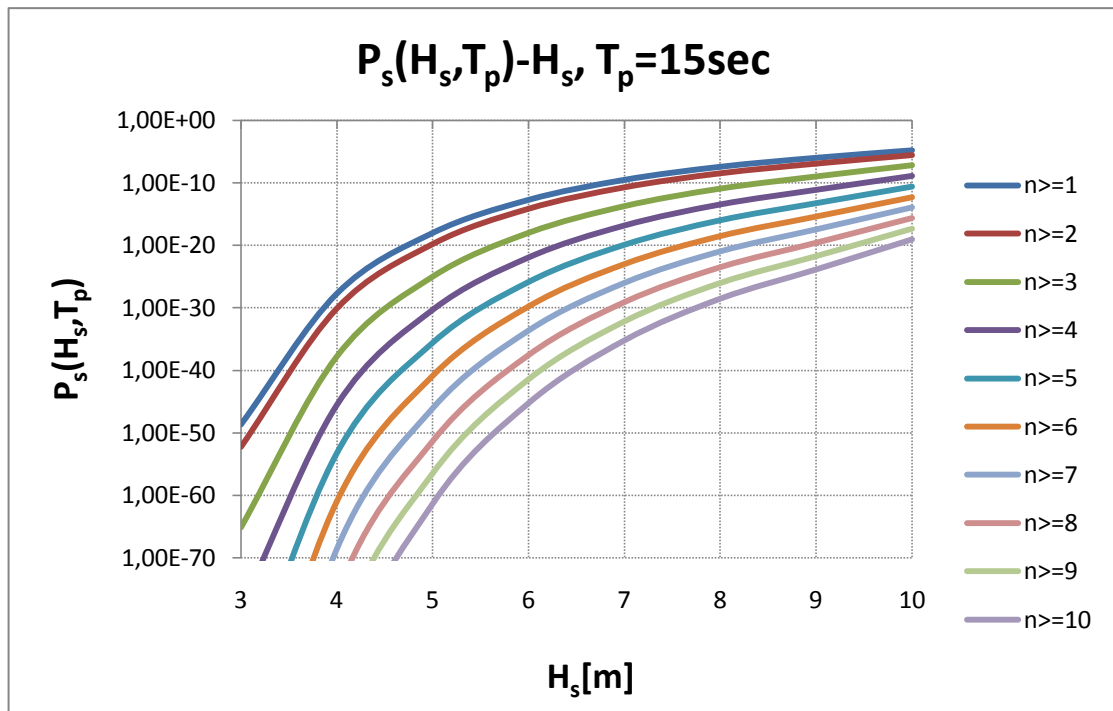
Σχήμα Α.24. Πιθανότητες ριπής ανέμου μεγαλύτερης από 31.84 m/s, 34.20 m/s, 37.66 m/s και 39.47 m/s αντίστοιχα, συναρτήσει της περιόδου κορυφής.



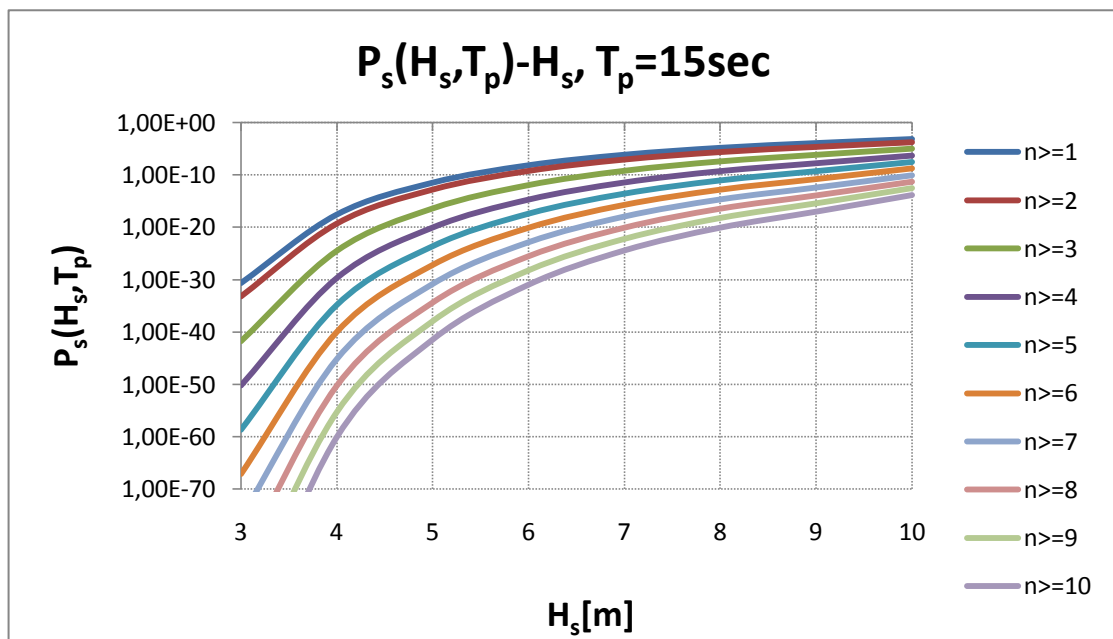
Σχήμα Α.25. Πιθανότητες ριπής ανέμου μεγαλύτερης από 31.84 m/s, 34.20 m/s, 37.66 m/s και 39.47 m/s αντίστοιχα, συναρτήσει του σημαντικού ύψους κύματος.

5.1.4 Μεταβολή του πλάτους διατοιχισμού θ_1 και εύρεση του αντίστοιχου I_{w2}

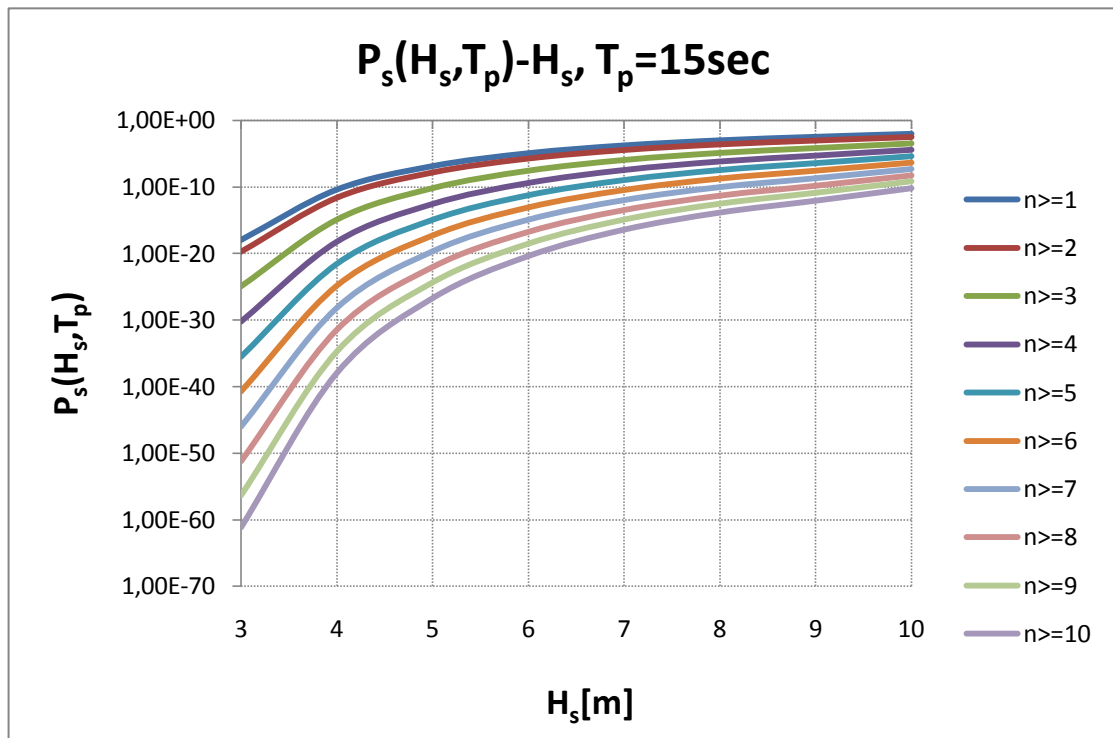
5.1.4.3 Υπολογισμός πιθανοτήτων συνάντησης κρίσιμων ομάδων κύματος



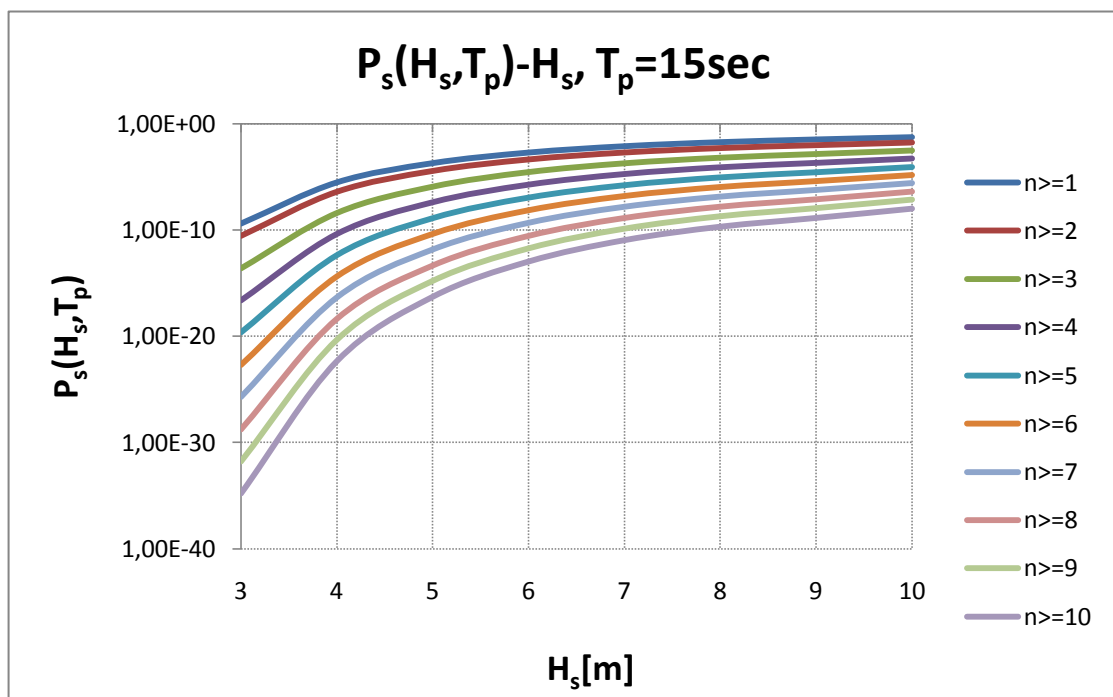
Σχήμα A.26. Πιθανότητες συνάντησης κρίσιμων ομάδων κύματος με ύψος κύματος μεγαλύτερο του κρίσιμου ύψους $T_p=15sec$ και $H_{cr}=19.76m$.



Σχήμα A.27. Πιθανότητες συνάντησης κρίσιμων ομάδων κύματος με ύψος κύματος μεγαλύτερο του κρίσιμου ύψους $T_p=15sec$ και $H_{cr}=15.62m$.



Σχήμα A.28. Πιθανότητες συνάντησης κρίσιμων ομάδων κύματος με ύψος κύματος μεγαλύτερο του κρίσιμου ύψους], $T_p = 15 \text{sec}$ και $H_{cr} = 11.84 \text{m}$

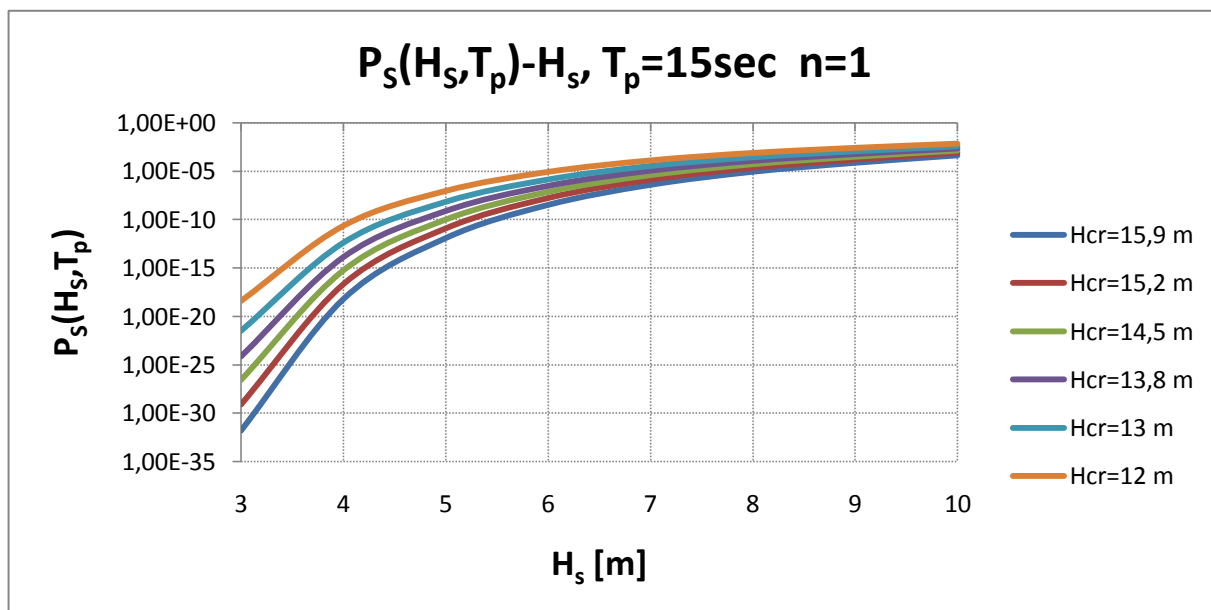


Σχήμα A.29. Πιθανότητες συνάντησης κρίσιμων ομάδων κύματος με ύψος κύματος μεγαλύτερο του κρίσιμου ύψους $H_s \in [3, 10]$, $T_p = 15 \text{sec}$ και $H_{cr} = 8.41 \text{m}$.

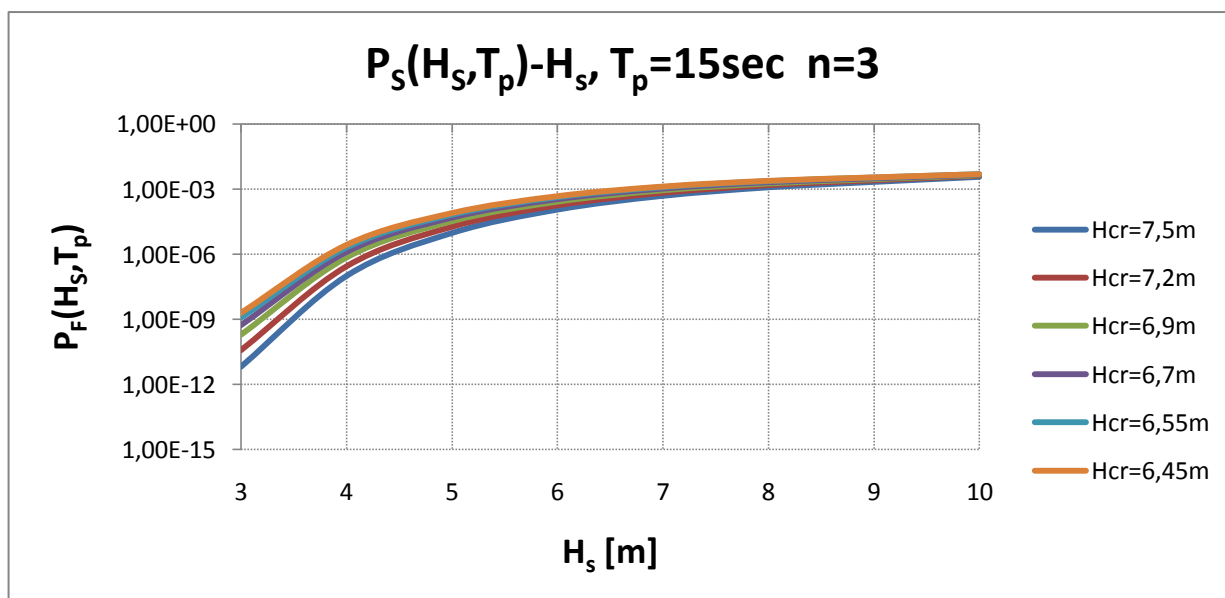
5.2 Αποτελέσματα υπολογισμών δυναμικής προσέγγισης

$b_1=0.02078$

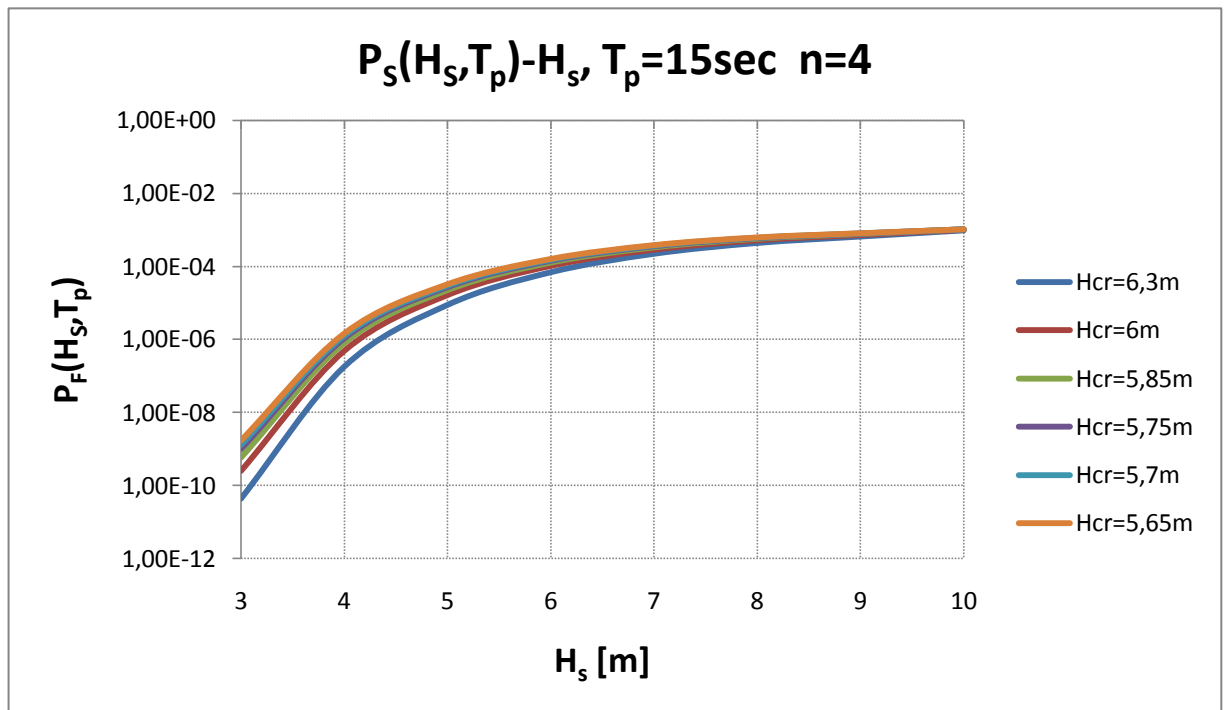
5.2.3 Υπολογισμός πιθανοτήτων συνάντησης κρίσιμων ομάδων κύματος



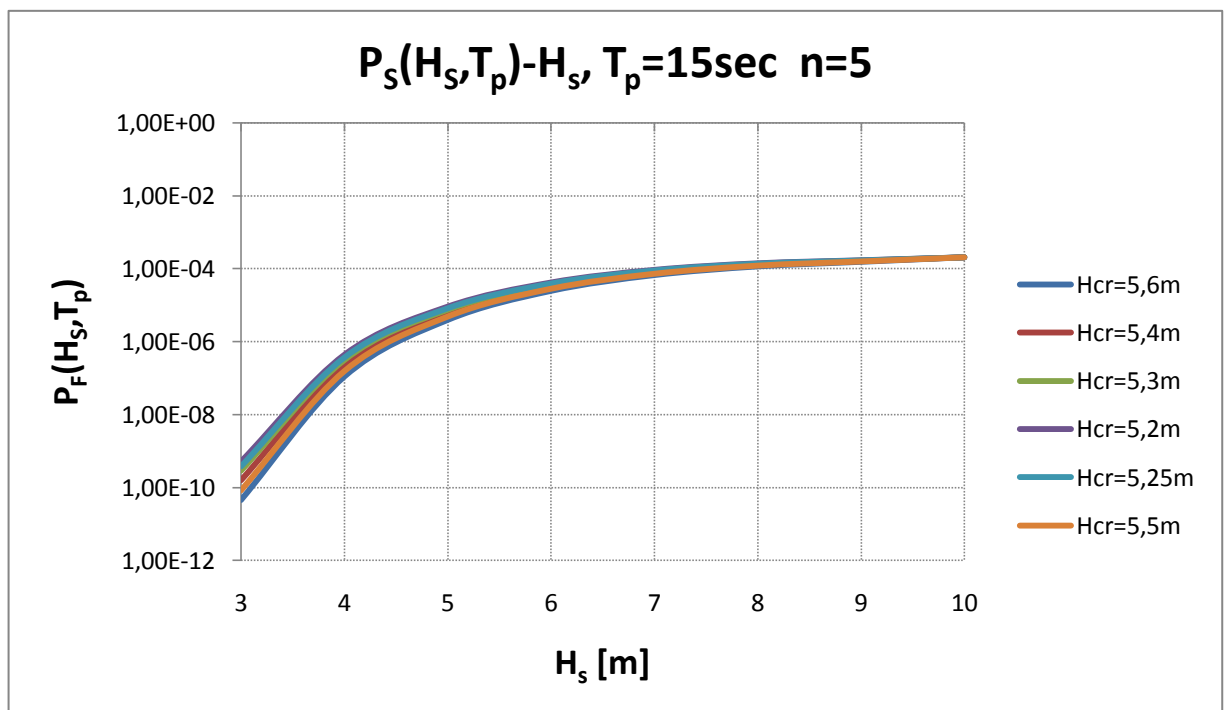
Σχήμα Α.30. Σύγκριση των πιθανοτήτων συνάντησης κρίσιμων ομάδων κύματος με $n=1$ και ύψος κύματος μεγαλύτερο από τα αντίστοιχα Κρίσιμα ύψη κύματος, που υπολογίσαμε για κάθε εύρος διατοιχισμού.



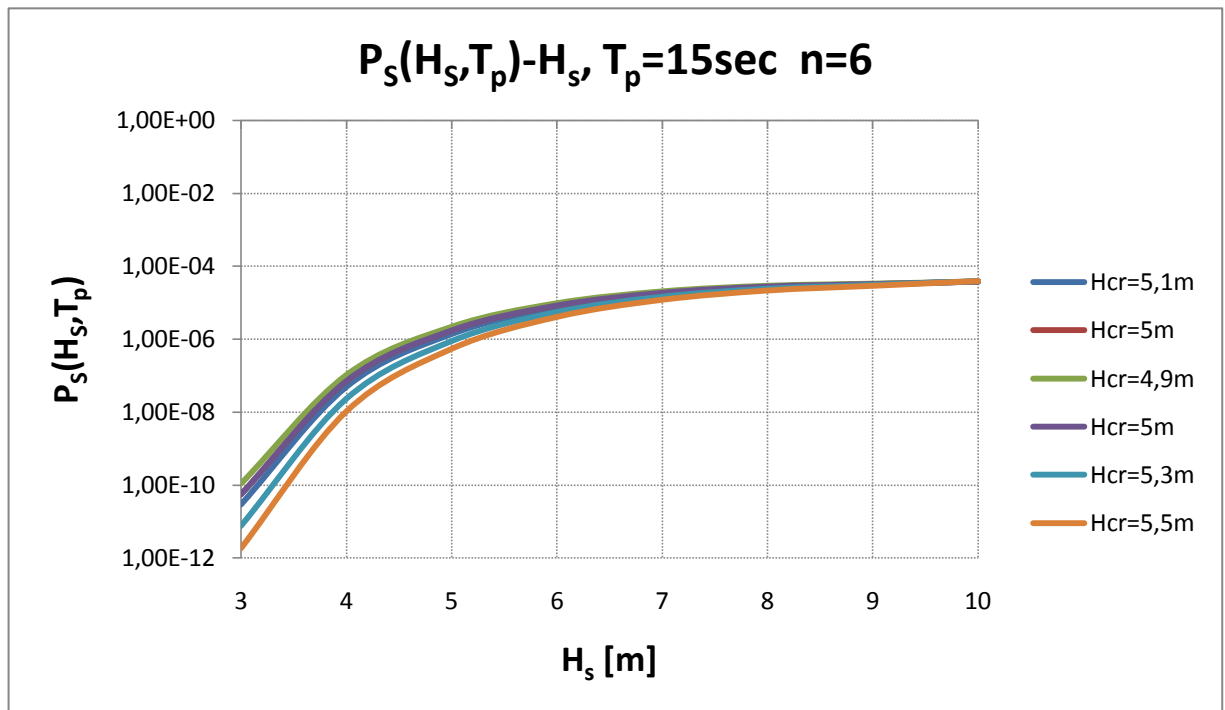
Σχήμα Α.31. Σύγκριση των πιθανοτήτων συνάντησης κρίσιμων ομάδων κύματος με $n=3$ και ύψος κύματος μεγαλύτερο από τα αντίστοιχα Κρίσιμα ύψη κύματος, που υπολογίσαμε για κάθε εύρος διατοιχισμού.



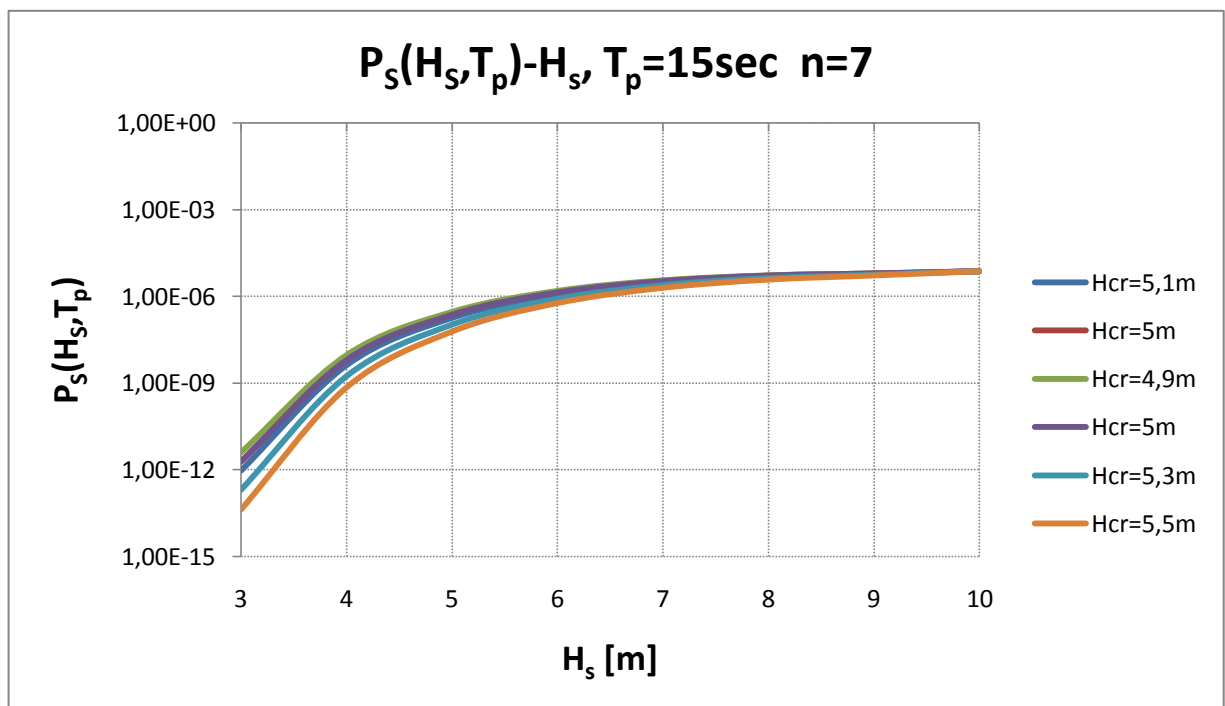
Σχήμα A.32. Σύγκριση των πιθανοτήτων συνάντησης κρίσιμων ομάδων κύματος με $n=4$ και ύψος κύματος μεγαλύτερο από τα αντίστοιχα Κρίσιμα ύψη κύματος, που υπολογίσαμε για κάθε εύρος διατοιχισμού.



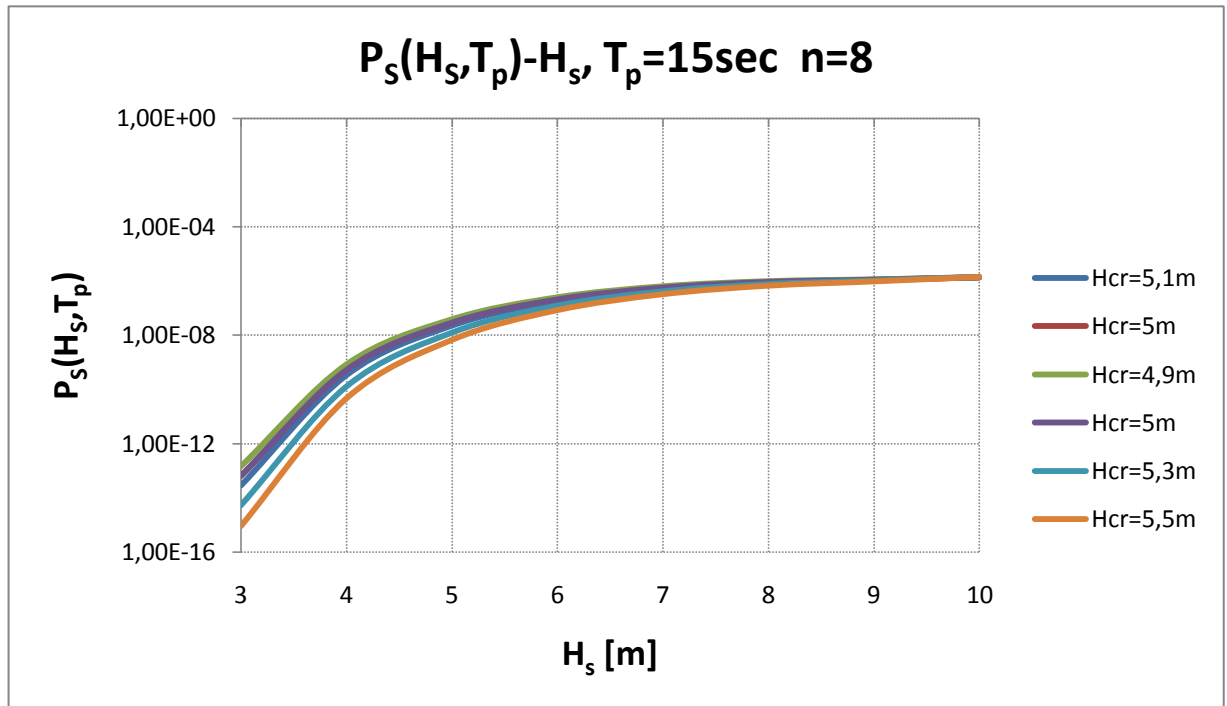
Σχήμα A.33. Σύγκριση των πιθανοτήτων συνάντησης κρίσιμων ομάδων κύματος με $n=5$ και ύψος κύματος μεγαλύτερο από τα αντίστοιχα Κρίσιμα ύψη κύματος, που υπολογίσαμε για κάθε εύρος διατοιχισμού.



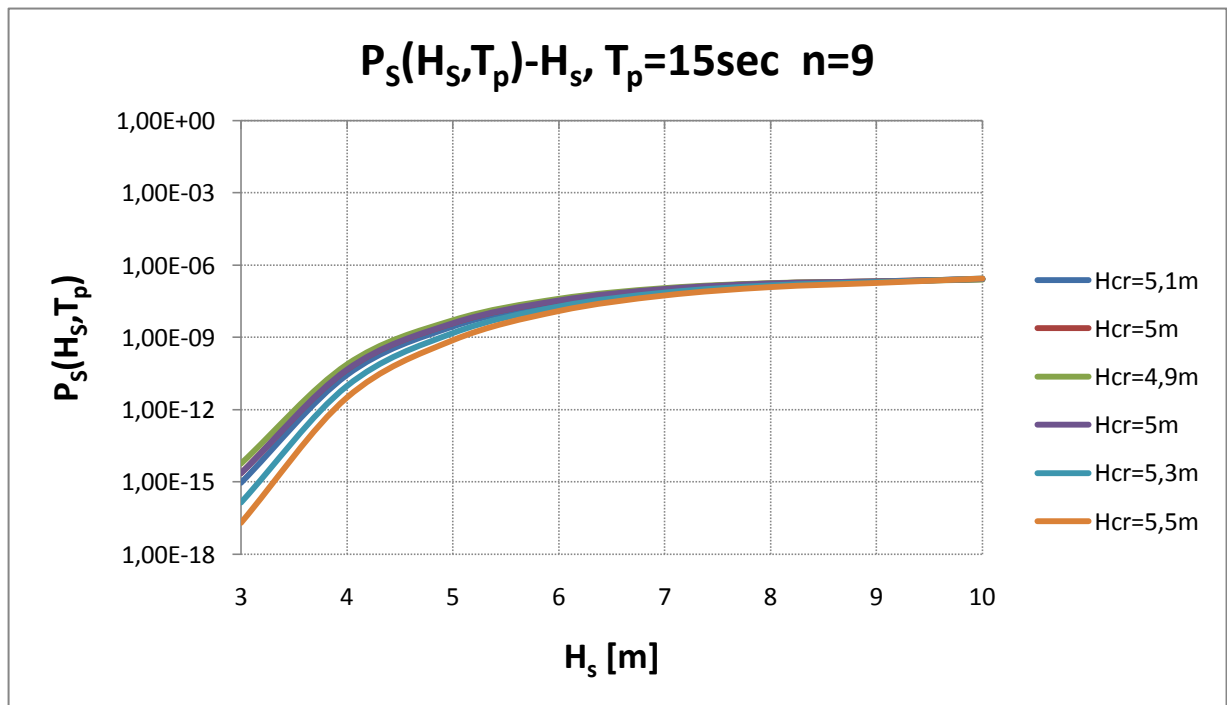
Σχήμα Α.34. Σύγκριση των πιθανοτήτων συνάντησης κρίσιμων ομάδων κύματος με $n=6$ και ύψος κύματος μεγαλύτερο από τα αντίστοιχα Κρίσιμα ύψη κύματος, που υπολογίσαμε για κάθε εύρος διατοιχισμού.



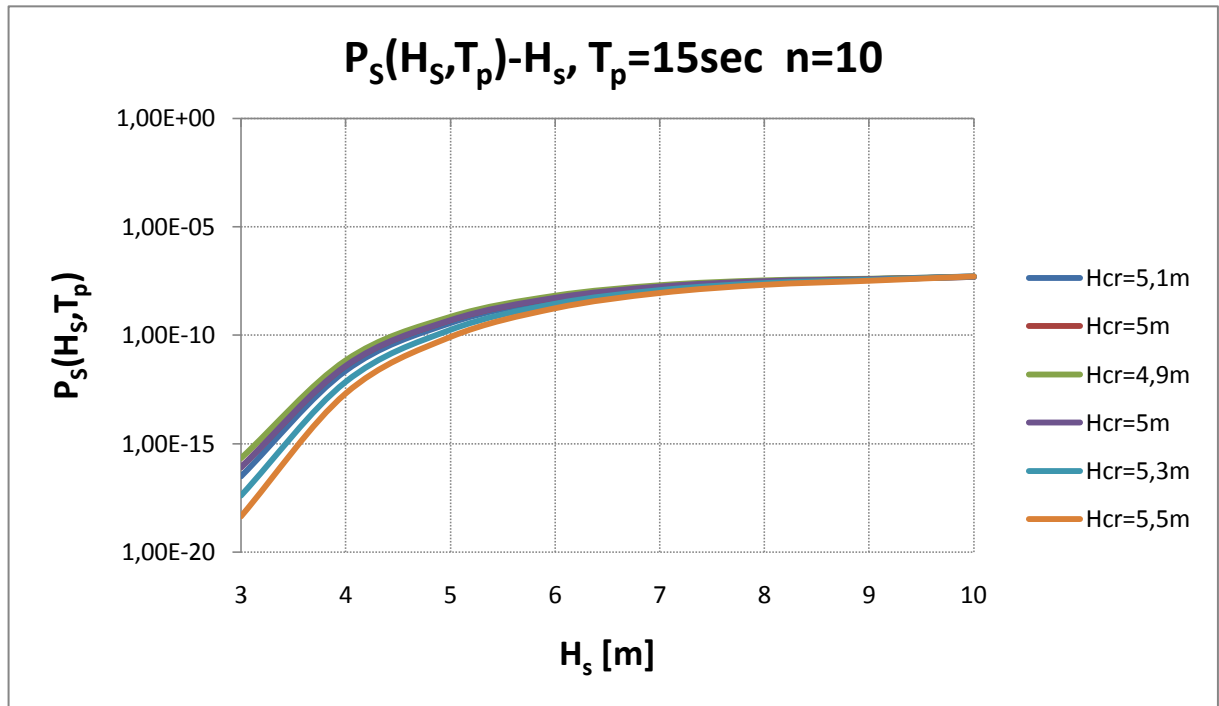
Σχήμα Α.35. Σύγκριση των πιθανοτήτων συνάντησης κρίσιμων ομάδων κύματος με $n=7$ και ύψος κύματος μεγαλύτερο από τα αντίστοιχα Κρίσιμα ύψη κύματος, που υπολογίσαμε για κάθε εύρος διατοιχισμού.



Σχήμα Α.36. Σύγκριση των πιθανοτήτων συνάντησης κρίσιμων ομάδων κύματος με $n=8$ και ύψος κύματος μεγαλύτερο από τα αντίστοιχα Κρίσιμα ύψη κύματος, που υπολογίσαμε για κάθε εύρος διατοιχισμού.



Σχήμα Α.37. Σύγκριση των πιθανοτήτων συνάντησης κρίσιμων ομάδων κύματος με $n=9$ και ύψος κύματος μεγαλύτερο από τα αντίστοιχα Κρίσιμα ύψη κύματος, που υπολογίσαμε για κάθε εύρος διατοιχισμού.



Σχήμα Α.38. Σύγκριση των πιθανοτήτων συνάντησης κρίσιμων ομάδων κύματος με $n=10$ και ύψος κύματος μεγαλύτερο από τα αντίστοιχα Κρίσιμα ύψη κύματος, που υπολογίσαμε για κάθε εύρος διατοιχισμού.

5.2.4.1 Επανάληψη των υπολογισμών για δύο διαφορετικές τις του συντελεστή απόσβεσης b_1

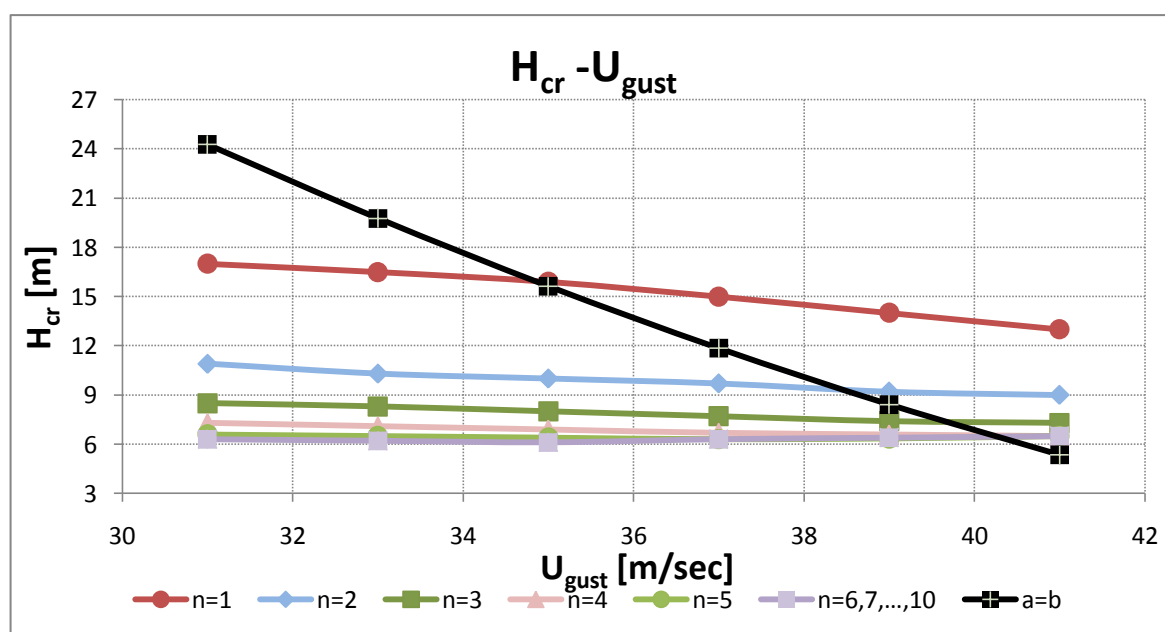
- $b_1 = 0.0309$

Υπολογισμός των Κρίσιμων Υψών Κύματος με τη βοήθεια του προγράμματος Mathematica.

Υπολογίσαμε για ομάδες κύματος με αριθμό κυμάτων $n=1,2,\dots,10$ και για τις ταχύτητες ριπής ανέμου, που φαίνονται στον ακόλουθο πίνακα, τα Κρίσιμα Ύψη Κύματος κάθε συνδυασμού, ώστε η γωνία εγκάρσιας κλίσης που θα αποκτά το πλοίο μας σε κάθε περίπτωση κυματισμών να μην ξεπερνά τις 33.4° , δηλαδή υπολογίσαμε το μέγιστο ύψος κύματος, για το οποίο σε συνδυασμό με τον άνεμο το πλοίο δεν ανατρέπεται. Τα αποτελέσματα των υπολογισμών φαίνονται στον ακόλουθο πίνακα:

U_{gust} [m/sec]	n=1	n=2	n=3	n=4	n=5	n=6,7,...,10
31	17	10,9	8,5	7,3	6,6	6,3
33	16,5	10,3	8,3	7,1	6,5	6,2
35	15,9	10	8	6,9	6,4	6,1
37	15	9,7	7,7	6,7	6,3	6,3
39	14	9,2	7,4	6,6	6,35	6,4
41	13	9	7,3	6,5	6,5	6,5

Πίνακας Α.3



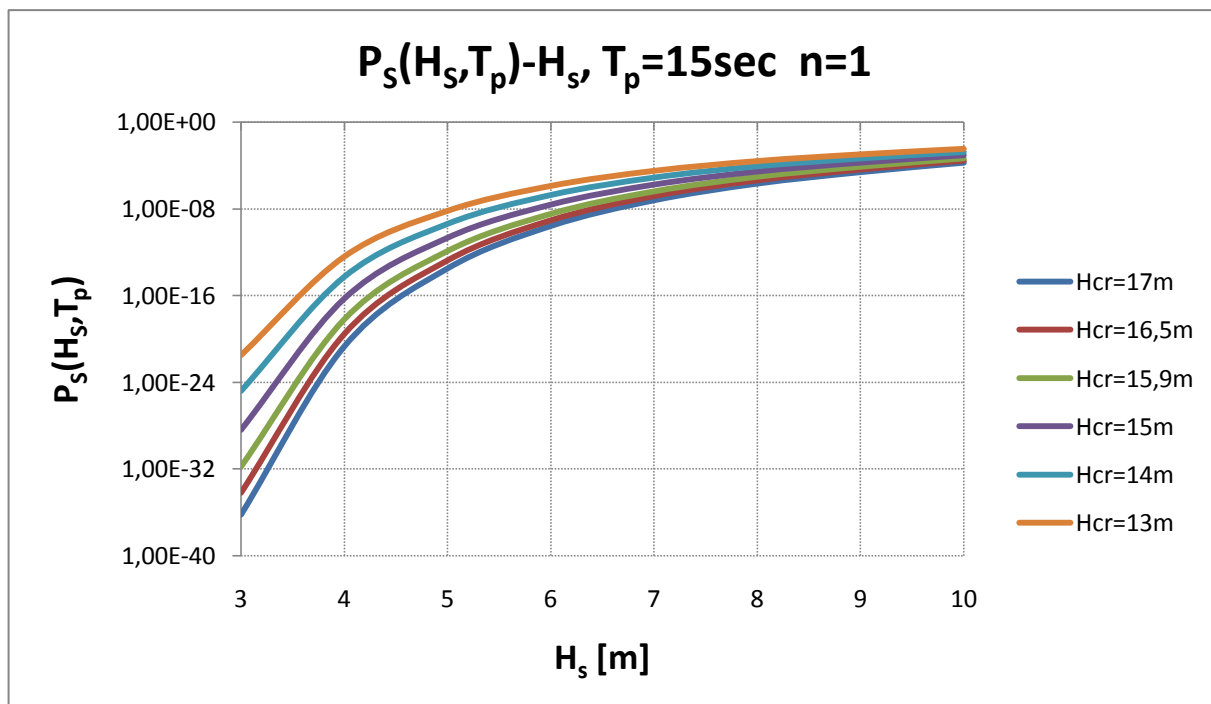
Σχήμα Α.39 Κρίσιμο ύψος κύματος συναρτήσει ταχύτητας ριπής ανέμου

Υπολογισμός πιθανοτήτων συνάντησης κρίσιμων ομάδων κύματος

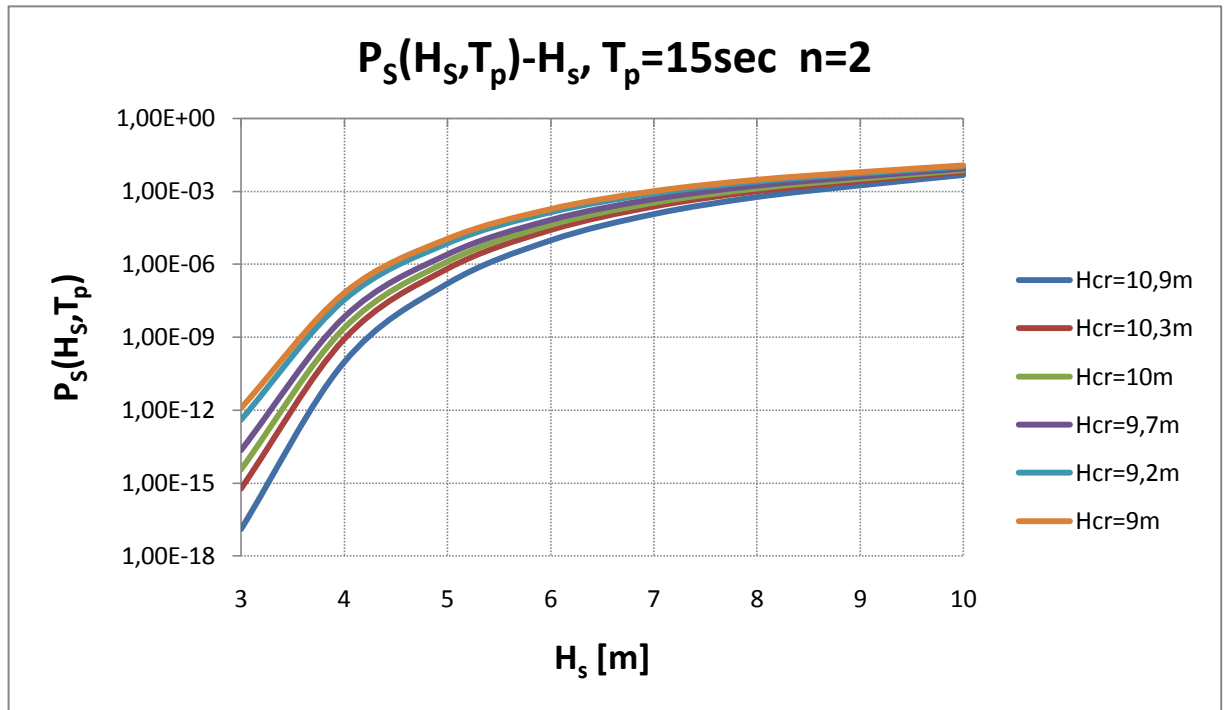
- Επιλέγουμε σταθερή περίοδο κορυφής και εύρος τιμών για το σημαντικό ύψος κύματος H_s [m] : $H_s \in [3 - 10]$. Για τον υπολογισμό των πιθανοτήτων $P_s(H_s, T_p)$ θεωρούμε ότι κάθε διακριτό ζεύγος τιμών (H_s, T_p) προκύπτει με T_p σταθερό, $T_p = 15 \text{ sec}$ και με βήμα 1 sec για το σημαντικό ύψος κύματος.

Οι υπολογισμοί έγιναν στο πρόγραμμα Mathematica για όλες τις τιμές των H_{cr} που φαίνονται στον πίνακα Α.1 στην σελίδα 119..

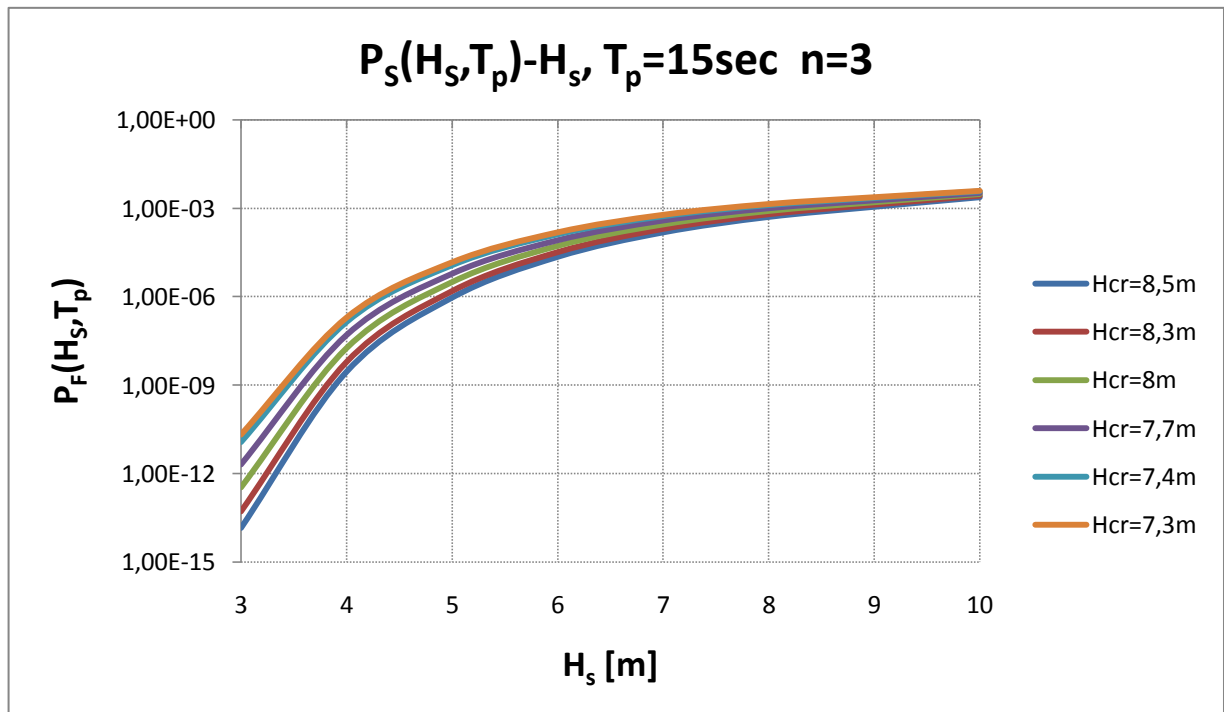
Σε όλα τα διαγράμματα που ακολουθούν οι κλίμακες των κατακόρυφων αξόνων, που αφορούν πιθανότητες, είναι λογαριθμικές με βάση το 10.



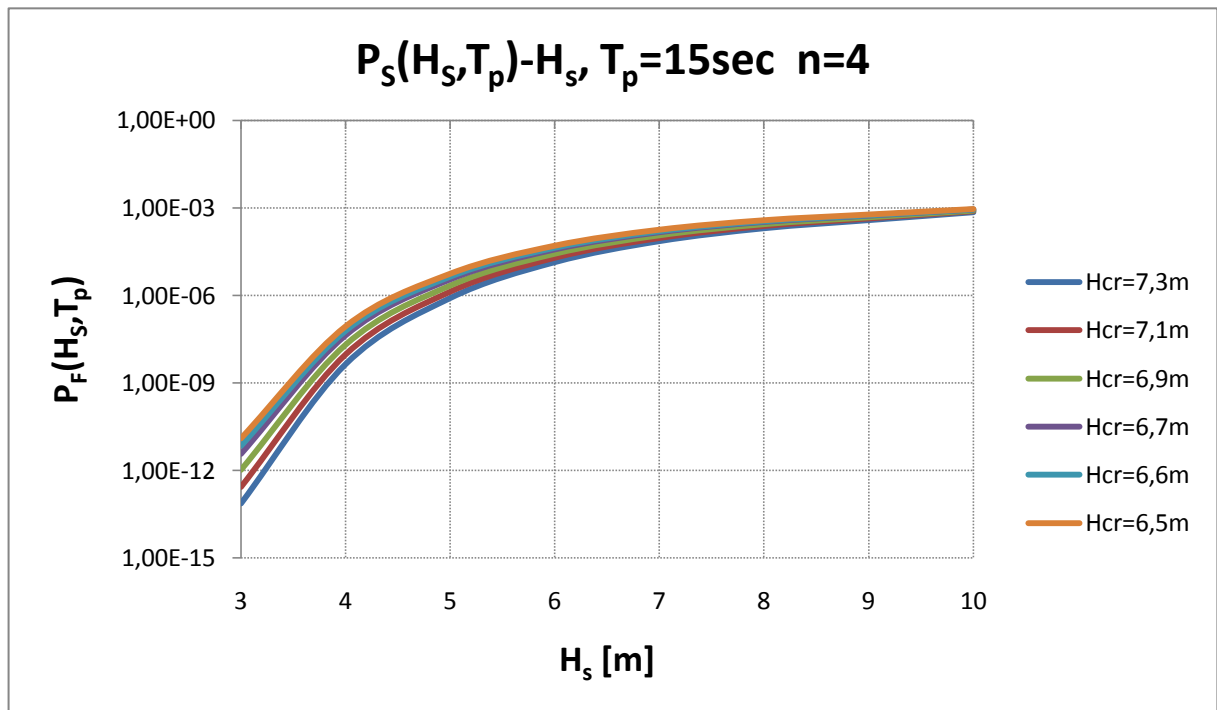
Σχήμα Α.40. Σύγκριση των πιθανοτήτων συνάντησης κρίσιμων ομάδων κύματος με $n=1$ και ύψος κύματος μεγαλύτερο από τα αντίστοιχα Κρίσιμα ύψη κύματος, που υπολογίσαμε για κάθε εύρος διατοιχισμού.



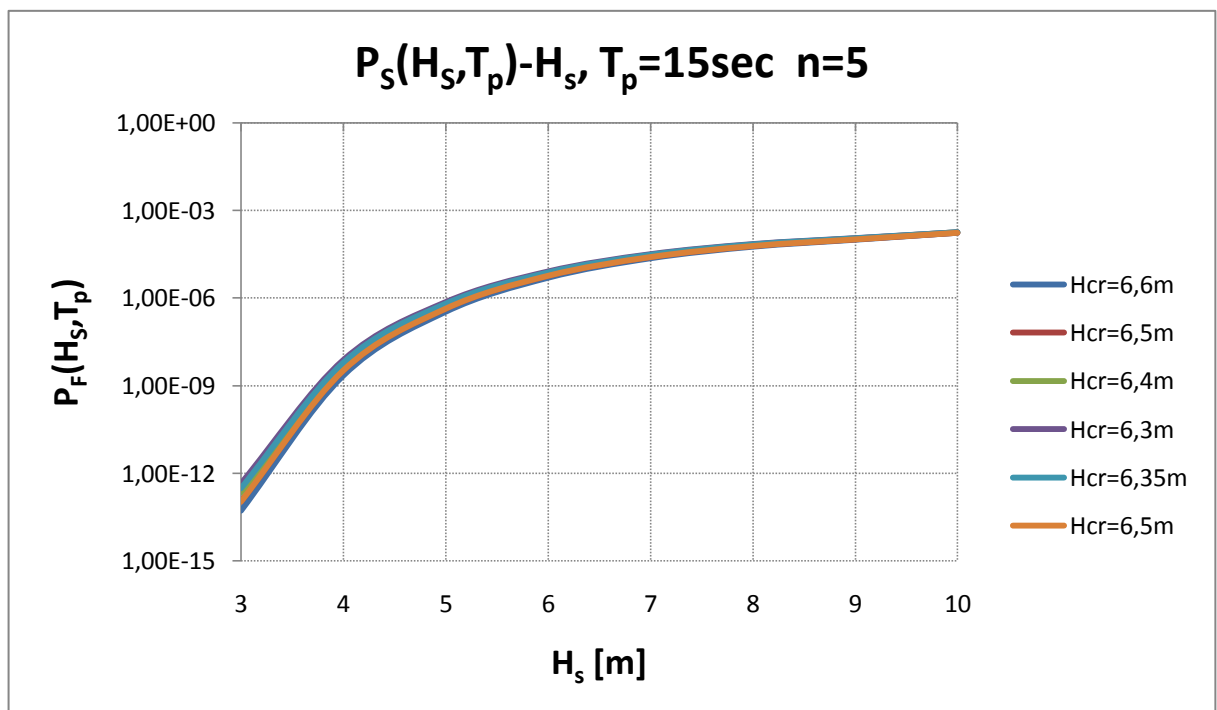
Σχήμα Α.41. Σύγκριση των πιθανοτήτων συνάντησης κρίσιμων ομάδων κύματος με $n=2$ και ύψος κύματος μεγαλύτερο από τα αντίστοιχα Κρίσιμα ύψη κύματος, που υπολογίσαμε για κάθε εύρος διατοιχισμού.



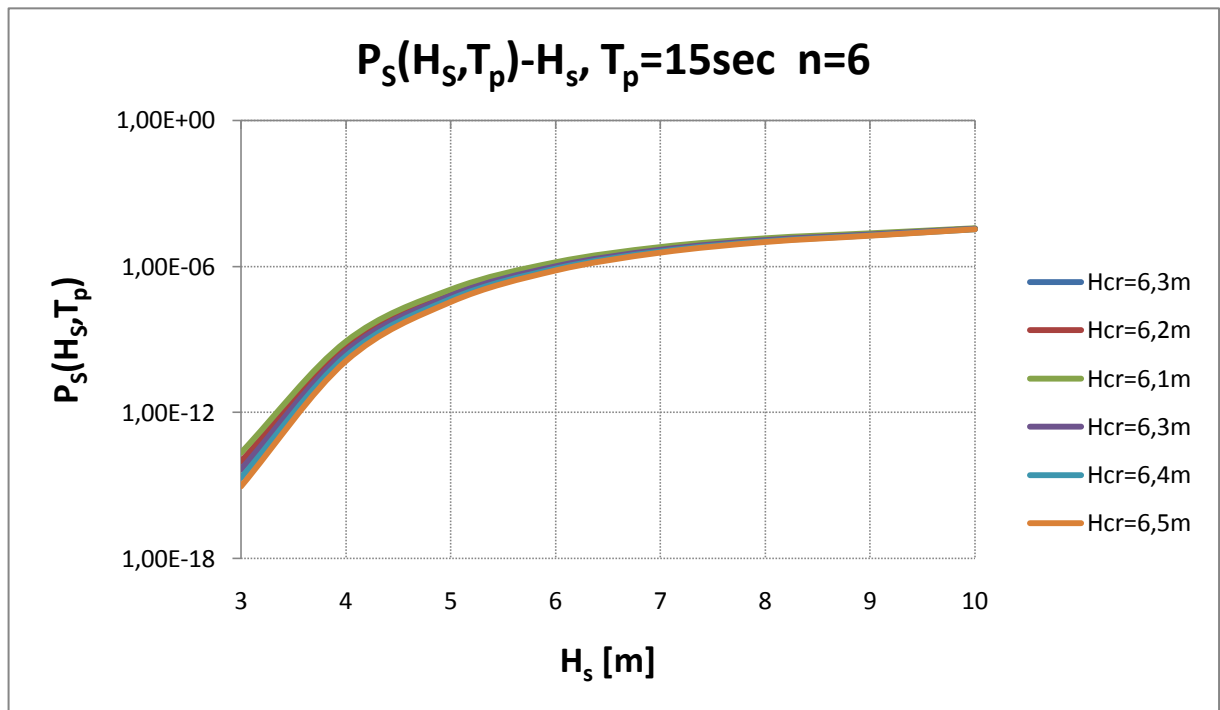
Σχήμα Α.42. Σύγκριση των πιθανοτήτων συνάντησης κρίσιμων ομάδων κύματος με $n=3$ και ύψος κύματος μεγαλύτερο από τα αντίστοιχα Κρίσιμα ύψη κύματος, που υπολογίσαμε για κάθε εύρος διατοιχισμού.



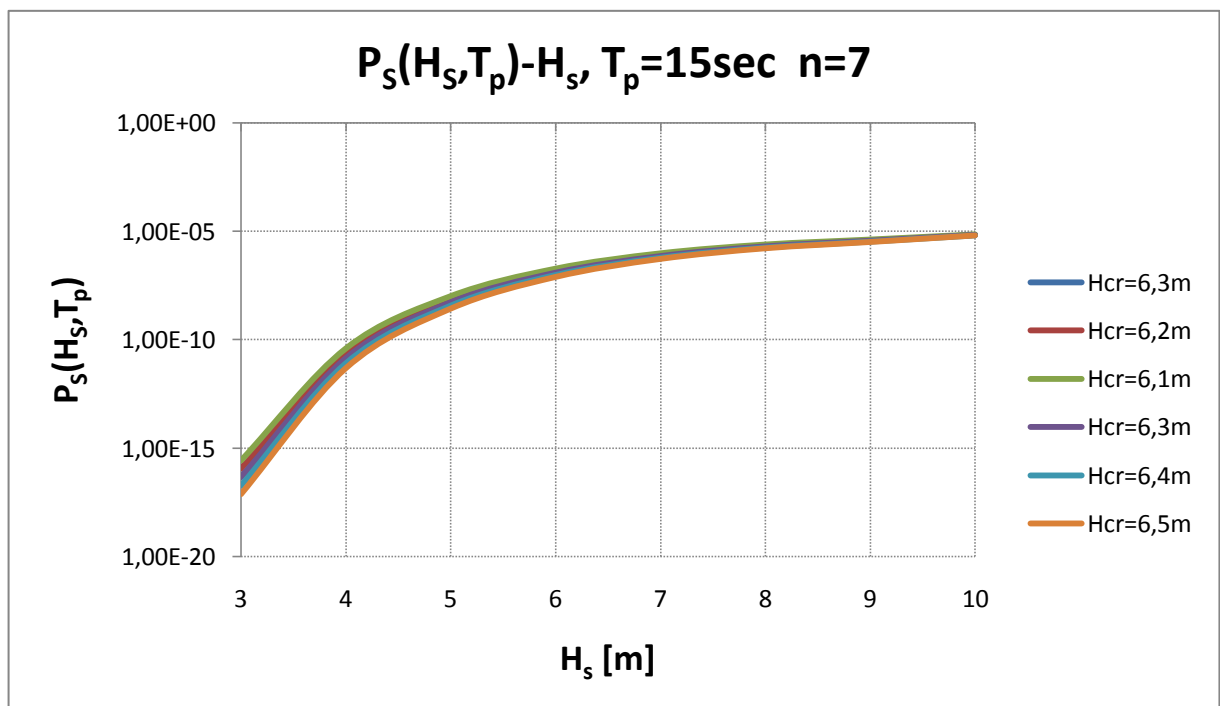
Σχήμα Α.43. Σύγκριση των πιθανοτήτων συνάντησης κρίσιμων ομάδων κύματος με $n=4$ και ύψος κύματος μεγαλύτερο από τα αντίστοιχα Κρίσιμα ύψη κύματος, που υπολογίσαμε για κάθε εύρος διατοιχισμού.



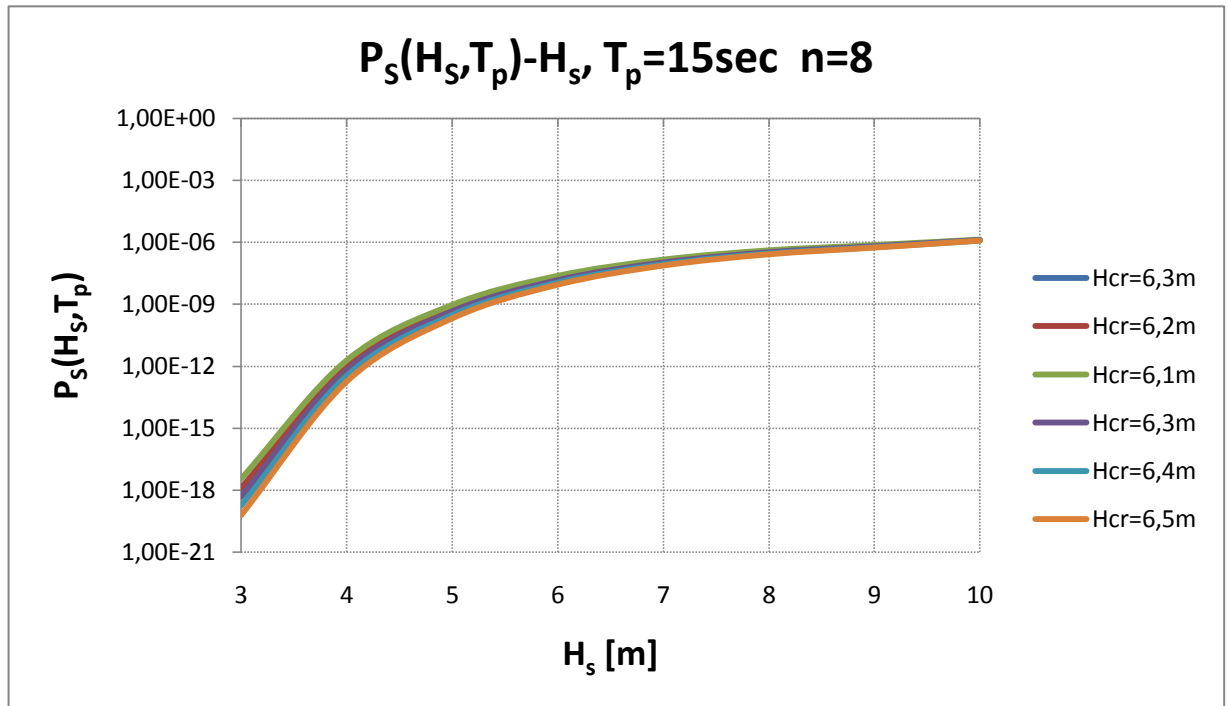
Σχήμα Α.44. Σύγκριση των πιθανοτήτων συνάντησης κρίσιμων ομάδων κύματος με $n=5$ και ύψος κύματος μεγαλύτερο από τα αντίστοιχα Κρίσιμα ύψη κύματος, που υπολογίσαμε για κάθε εύρος διατοιχισμού.



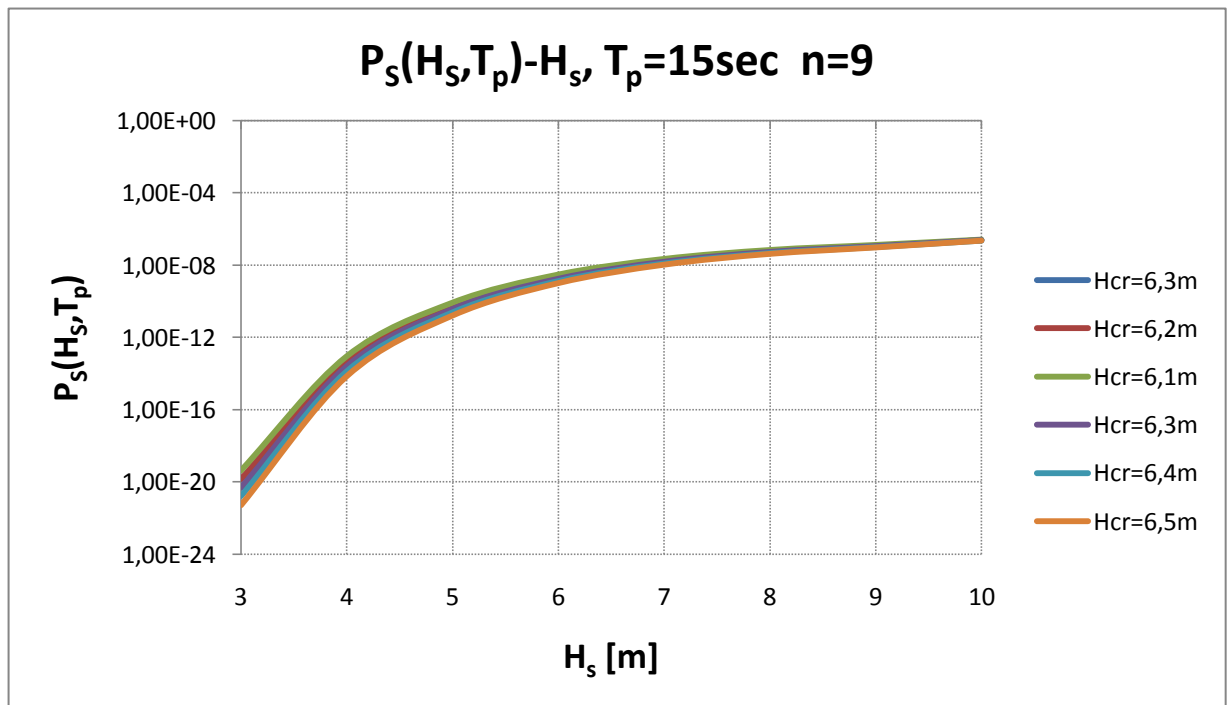
Σχήμα Α.45. Σύγκριση των πιθανοτήτων συνάντησης κρίσιμων ομάδων κύματος με $n=6$ και ύψος κύματος μεγαλύτερο από τα αντίστοιχα Κρίσιμα ύψη κύματος, που υπολογίσαμε για κάθε εύρος διατοιχισμού.



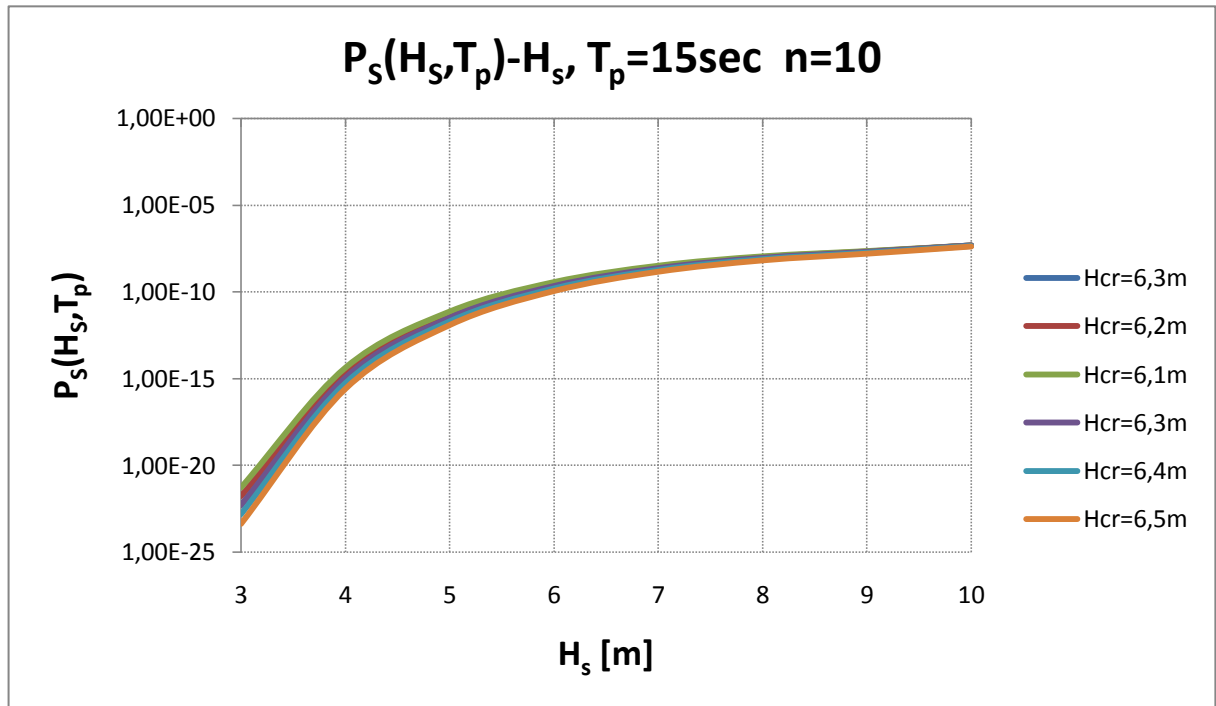
Σχήμα Α.46. Σύγκριση των πιθανοτήτων συνάντησης κρίσιμων ομάδων κύματος με $n=7$ και ύψος κύματος μεγαλύτερο από τα αντίστοιχα Κρίσιμα ύψη κύματος, που υπολογίσαμε για κάθε εύρος διατοιχισμού.



Σχήμα Α.47. Σύγκριση των πιθανοτήτων συνάντησης κρίσιμων ομάδων κύματος με $n=8$ και ύψος κύματος μεγαλύτερο από τα αντίστοιχα Κρίσιμα ύψη κύματος, που υπολογίσαμε για κάθε εύρος διατοιχισμού.



Σχήμα Α.48. Σύγκριση των πιθανοτήτων συνάντησης κρίσιμων ομάδων κύματος με $n=9$ και ύψος κύματος μεγαλύτερο από τα αντίστοιχα Κρίσιμα ύψη κύματος, που υπολογίσαμε για κάθε εύρος διατοιχισμού.

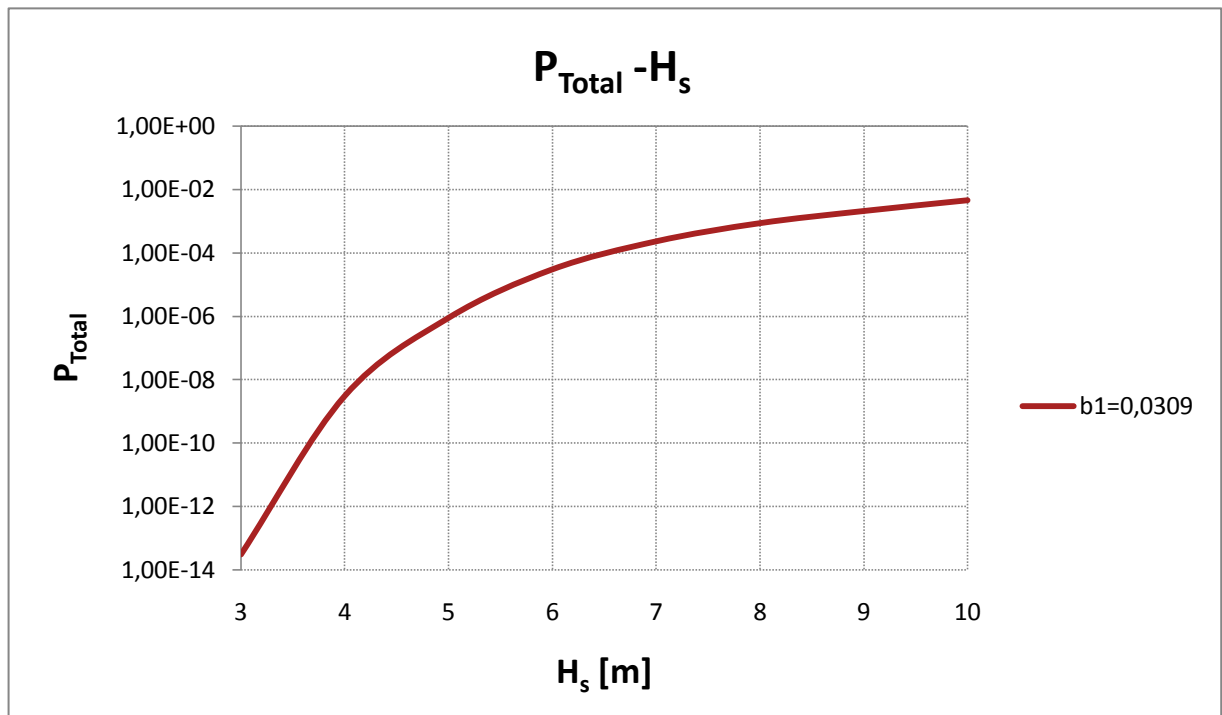


Σχήμα Α.49. Σύγκριση των πιθανοτήτων συνάντησης κρίσιμων ομάδων κύματος με $n=10$ και ύψος κύματος μεγαλύτερο από τα αντίστοιχα Κρίσιμα ύψη κύματος, που υπολογίσαμε για κάθε εύρος διατοιχισμού.

Υπολογισμός της συνολικής πιθανότητας ανατροπής του πλοίου, που εξετάζουμε.

Οι συνολικές πιθανότητες παρουσιάζονται στο ακόλουθο σχήμα.

Στο διάγραμμα που ακολουθεί η κλίμακα του κατακόρυφου άξονα, που αφορά πιθανότητες, είναι λογαριθμική με βάση το 10.



Σχήμα A.50. Συνολική πιθανότητα ανατροπής του πλοίου συναρτήσει του σημαντικού ύψους κύματος με $H_s \in [3, 10]$, $T_p=15sec$ και αριθμό κυμάτων $n=1,2,\dots,10$.

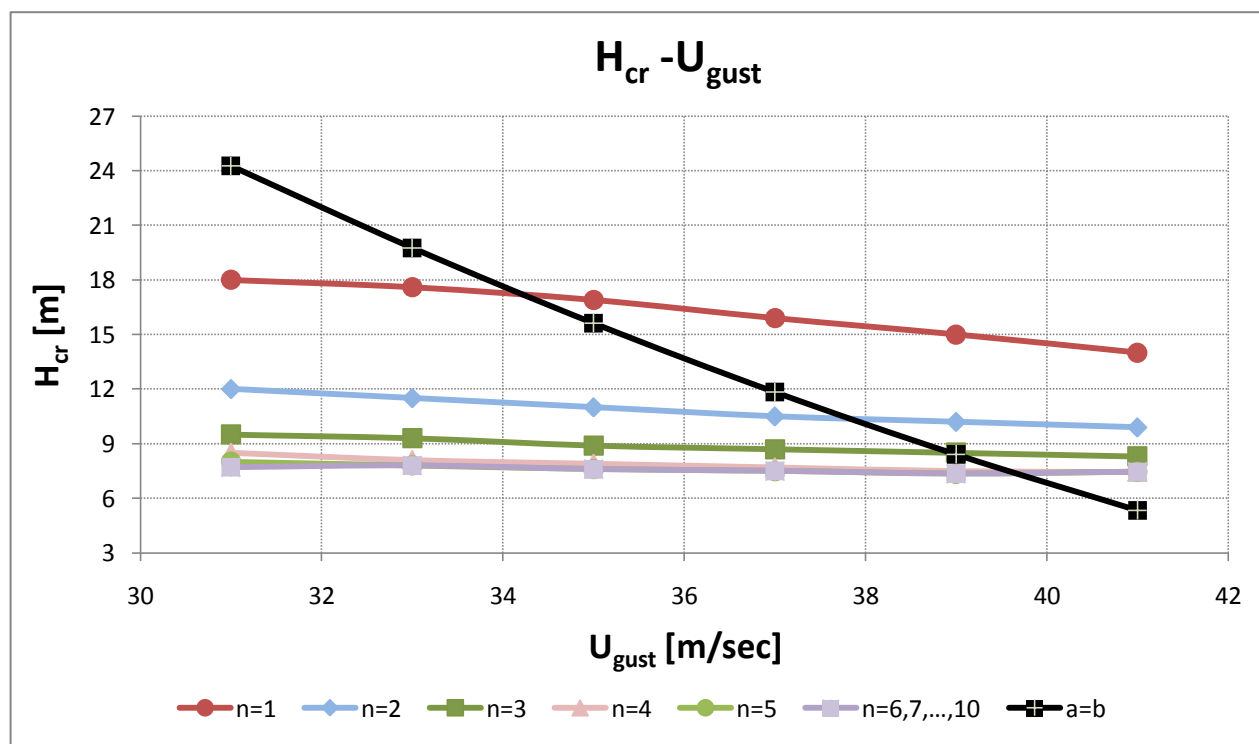
- $b_1 = 0.04115$

Υπολογισμός των Κρίσιμων Υψών Κύματος με τη βοήθεια του προγράμματος Mathematica.

Υπολογίσαμε για ομάδες κύματος με αριθμό κυμάτων $n=1,2,\dots,10$ και για τις ταχύτητες ριπής ανέμου, που φαίνονται στον ακόλουθο πίνακα, τα Κρίσιμα Ύψη Κύματος κάθε συνδυασμού, ώστε η γωνία εγκάρσιας κλίσης που θα αποκτά το πλοίο μας σε κάθε περίπτωση κυματισμών να μην ξεπερνά τις 33.4° , δηλαδή υπολογίσαμε το μέγιστο ύψος κύματος, για το οποίο σε συνδυασμό με τον άνεμο το πλοίο δεν ανατρέπεται. Τα αποτελέσματα των υπολογισμών φαίνονται στον ακόλουθο πίνακα:

U_{gust} [m/sec]	n=1	n=2	n=3	n=4	n=5	n=6,7,...,10
31	18	12	9,5	8,5	8	7,7
33	17,6	11,5	9,3	8,1	7,8	7,8
35	16,9	11	8,9	7,9	7,6	7,6
37	15,9	10,5	8,7	7,7	7,5	7,5
39	15	10,2	8,5	7,5	7,35	7,35
41	14	9,9	8,3	7,45	7,45	7,45

Πίνακας Α.4



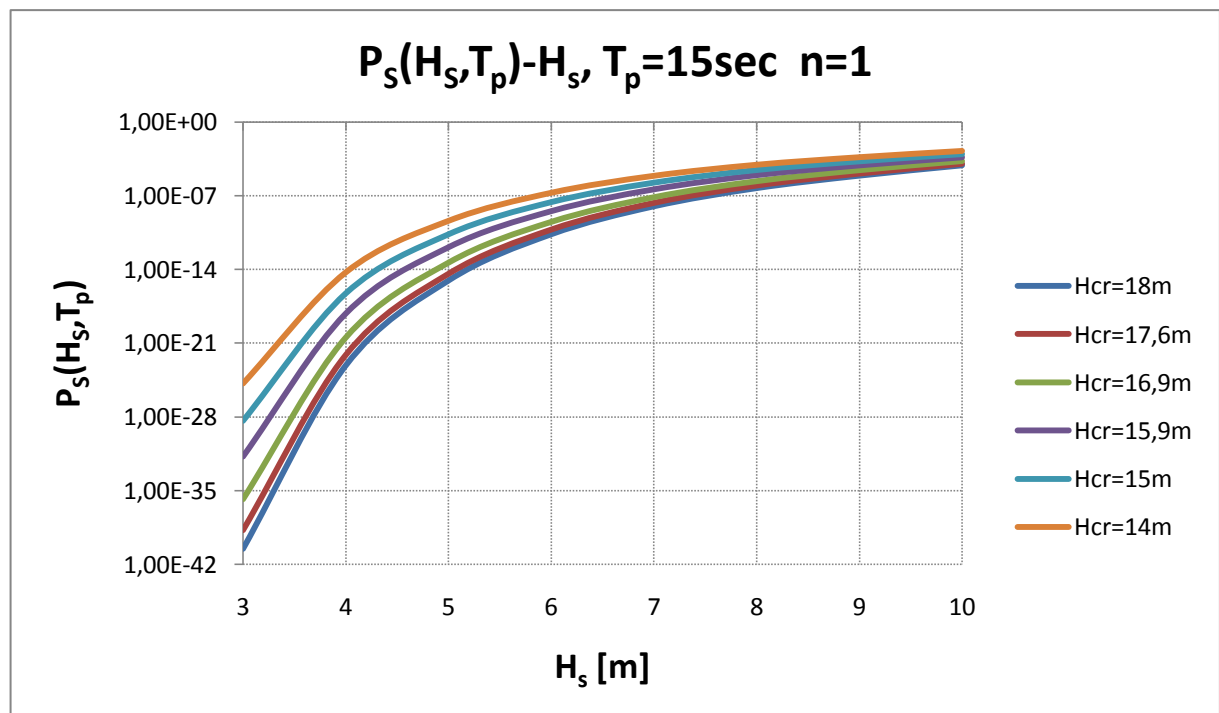
Σχήμα Α.51. Κρίσιμο ύψος κύματος συναρτήσει ταχύτητας ριπής ανέμου

Υπολογισμός πιθανοτήτων συνάντησης κρίσιμων ομάδων κύματος

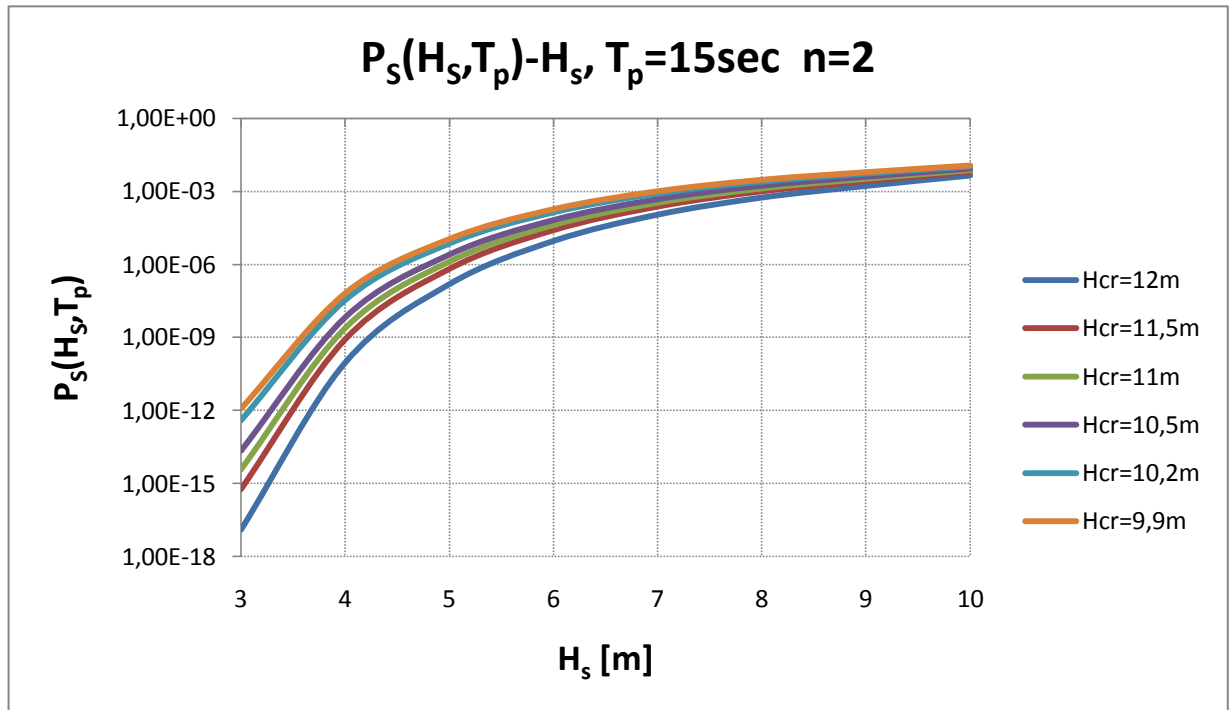
- Επιλέγουμε σταθερή περίοδο κορυφής και εύρος τιμών για το σημαντικό ύψος κύματος H_s [m] : $H_s \in [3 - 10]$. Για τον υπολογισμό των πιθανοτήτων $P_S(H_s, T_p)$ θεωρούμε ότι κάθε διακριτό ζεύγος τιμών (H_s, T_p) προκύπτει με T_p σταθερό, $T_p = 15 \text{ sec}$ και με βήμα 1 sec για το σημαντικό ύψος κύματος.

Οι υπολογισμοί έγιναν στο πρόγραμμα Mathematica για όλες τις τιμές των **Hcr** που φαίνονται στον πίνακα A.2 στην σελίδα 127.

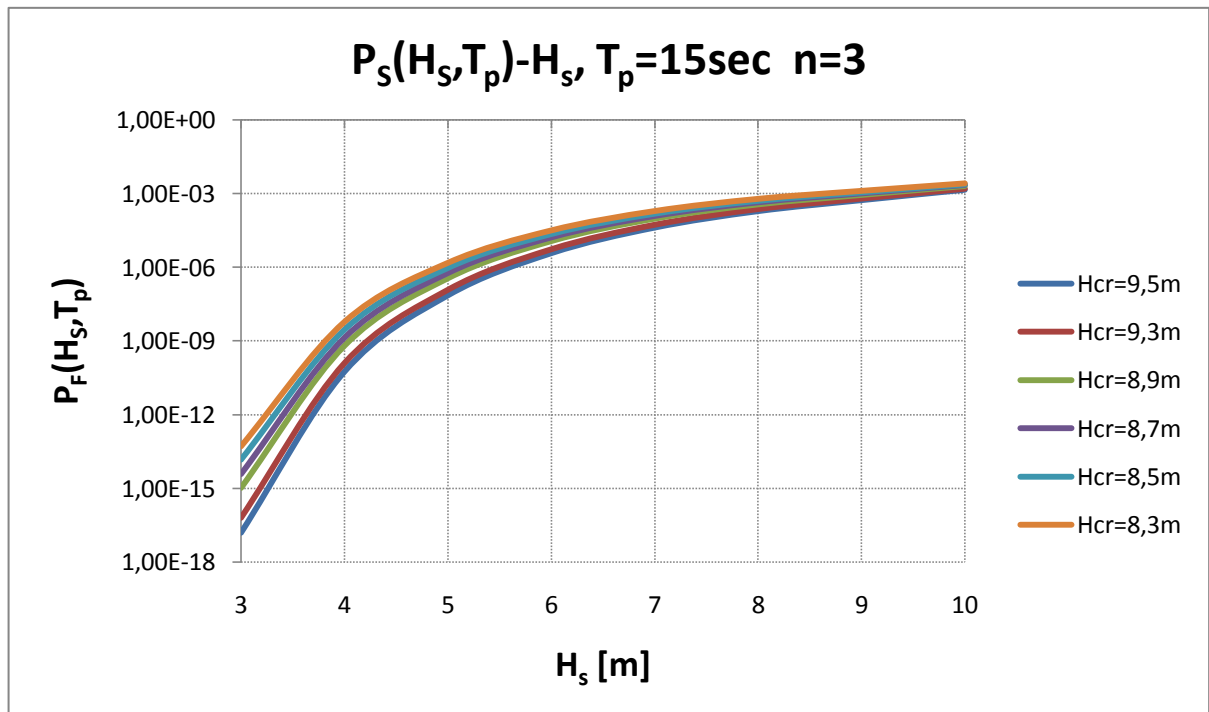
Σε όλα τα διαγράμματα που ακολουθούν οι κλίμακες των κατακόρυφων αξόνων, που αφορούν πιθανότητες, είναι λογαριθμικές με βάση το 10.



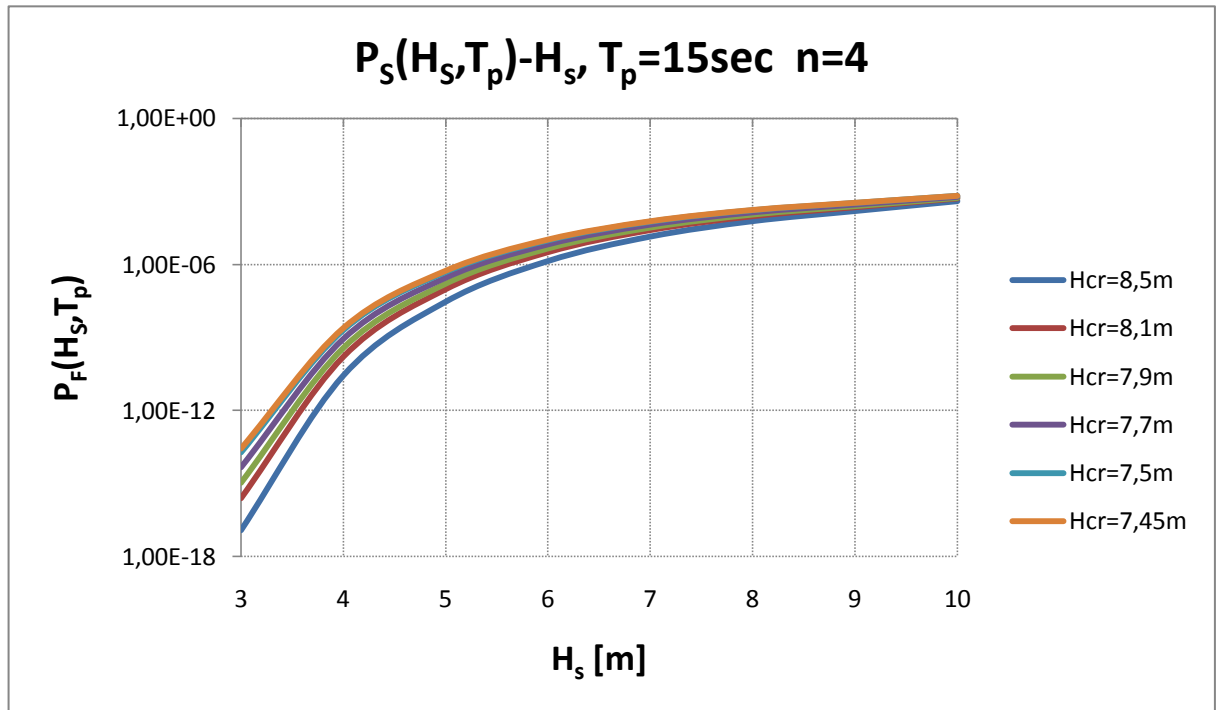
Σχήμα A.52. Σύγκριση των πιθανοτήτων συνάντησης κρίσιμων ομάδων κύματος με $n=1$ και ύψος κύματος μεγαλύτερο από τα αντίστοιχα Κρίσιμα ύψη κύματος, που υπολογίσαμε για κάθε εύρος διατοιχισμού.



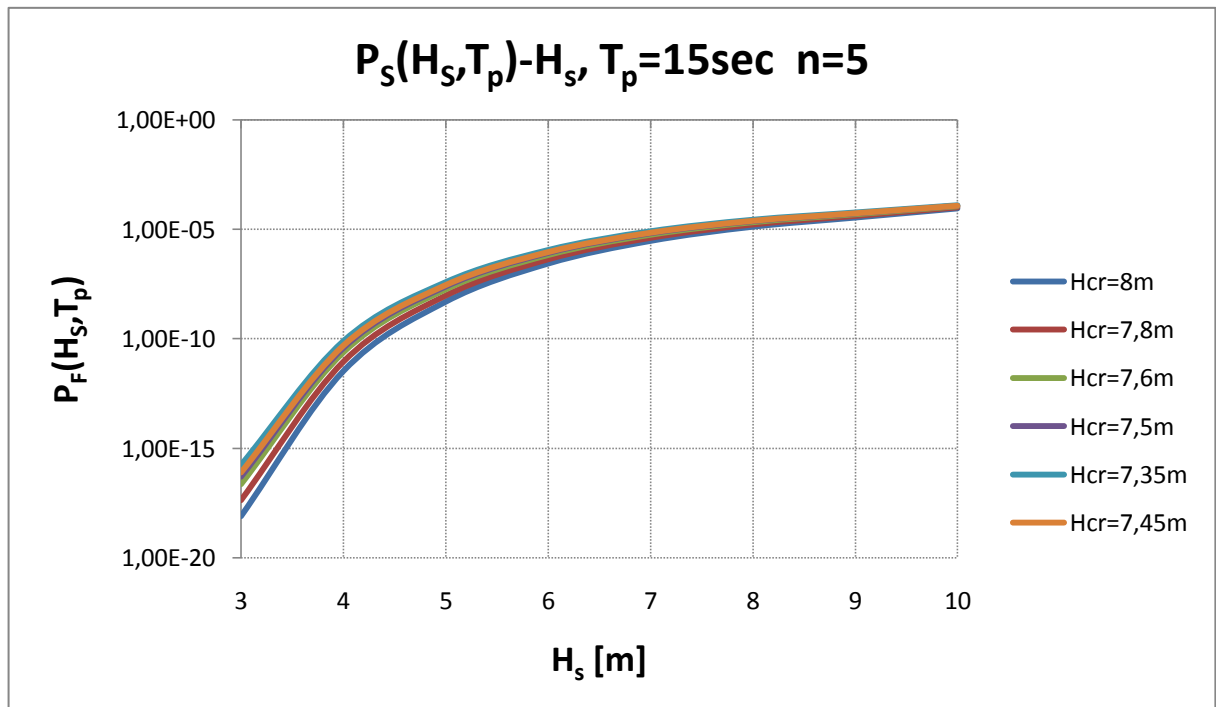
Σχήμα 5.53. Σύγκριση των πιθανοτήτων συνάντησης κρίσιμων ομάδων κύματος με $n=2$ και ύψος κύματος μεγαλύτερο από τα αντίστοιχα Κρίσιμα ύψη κύματος, που υπολογίσαμε για κάθε εύρος διατοιχισμού.



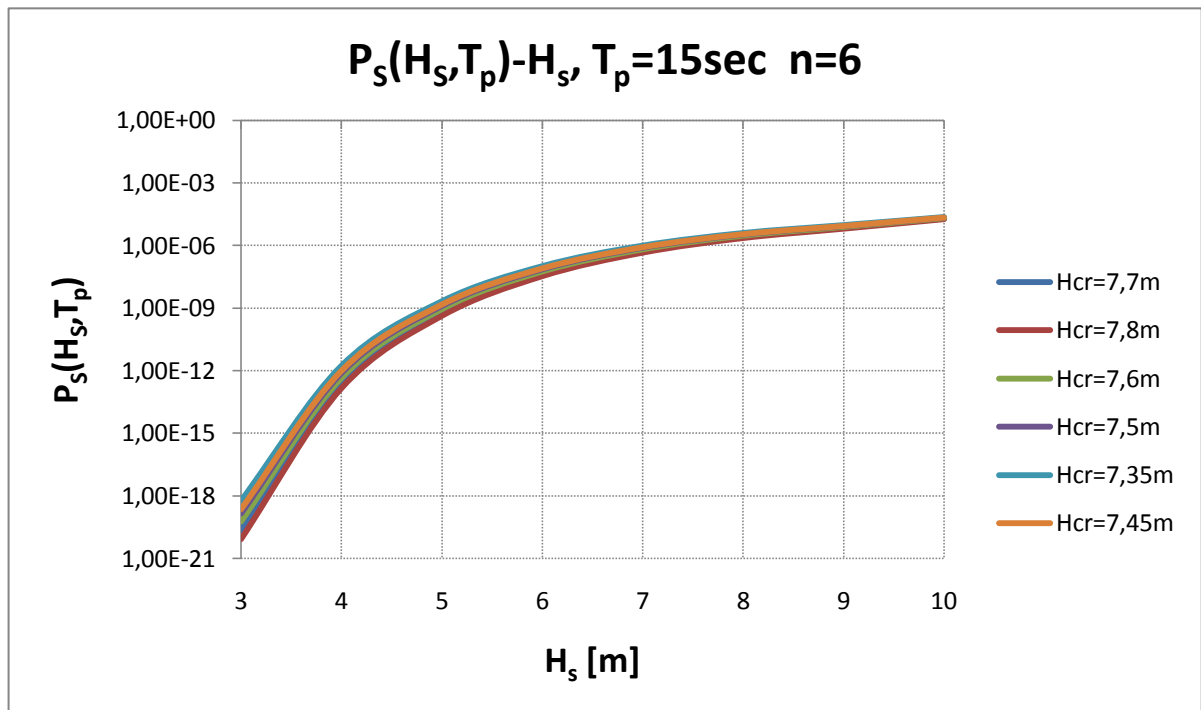
Σχήμα A.54. Σύγκριση των πιθανοτήτων συνάντησης κρίσιμων ομάδων κύματος με $n=3$ και ύψος κύματος μεγαλύτερο από τα αντίστοιχα Κρίσιμα ύψη κύματος, που υπολογίσαμε για κάθε εύρος διατοιχισμού.



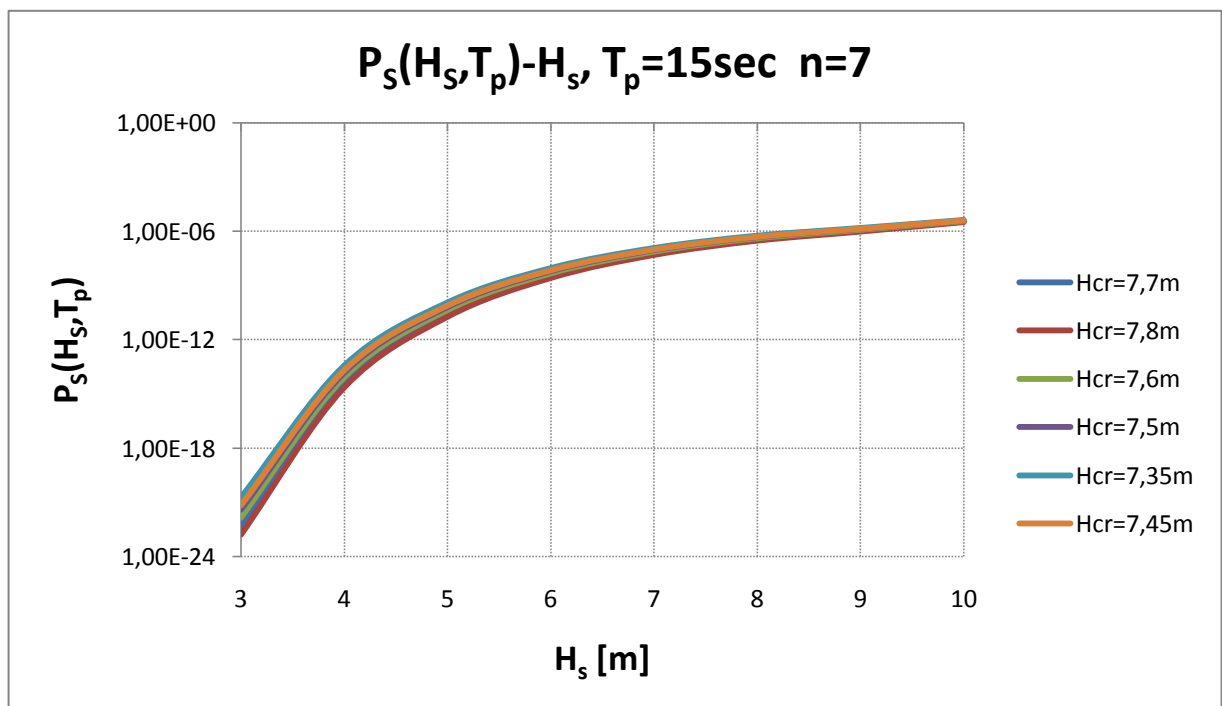
Σχήμα A.55. Σύγκριση των πιθανοτήτων συνάντησης κρίσιμων ομάδων κύματος με $n=4$ και ύψος κύματος μεγαλύτερο από τα αντίστοιχα Κρίσιμα ύψη κύματος, που υπολογίσαμε για κάθε εύρος διατοιχισμού.



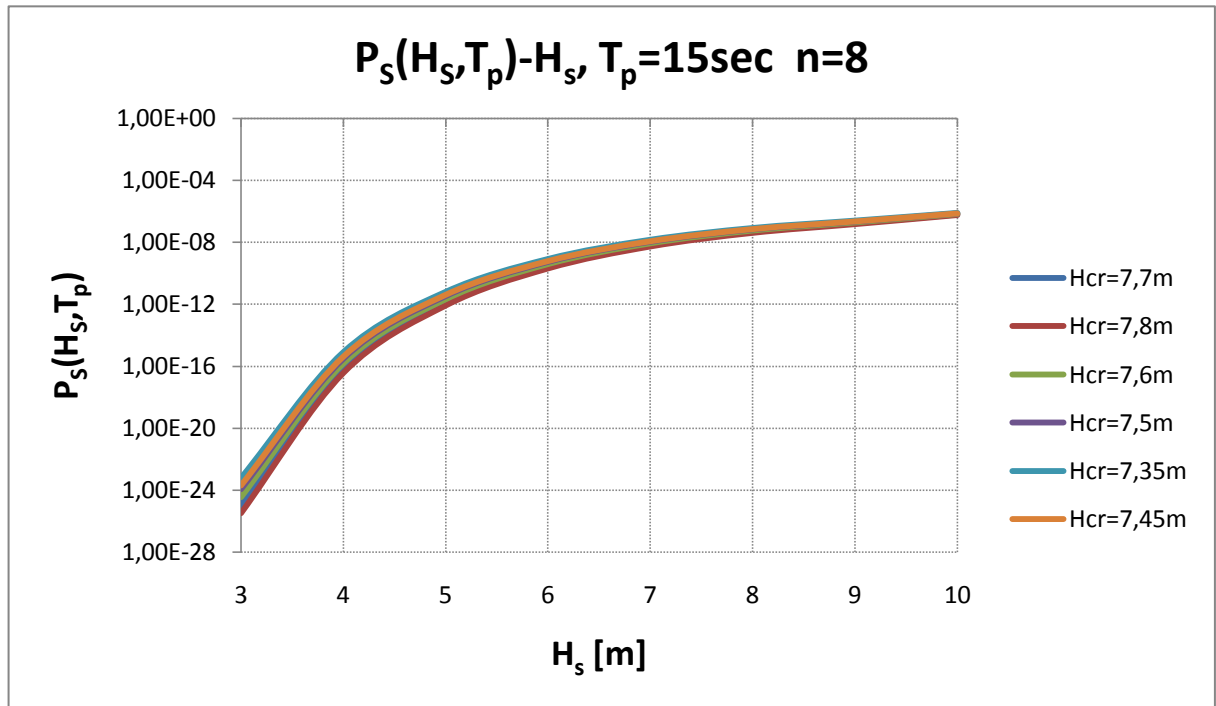
Σχήμα A.56. Σύγκριση των πιθανοτήτων συνάντησης κρίσιμων ομάδων κύματος με $n=5$ και ύψος κύματος μεγαλύτερο από τα αντίστοιχα Κρίσιμα ύψη κύματος, που υπολογίσαμε για κάθε εύρος διατοιχισμού.



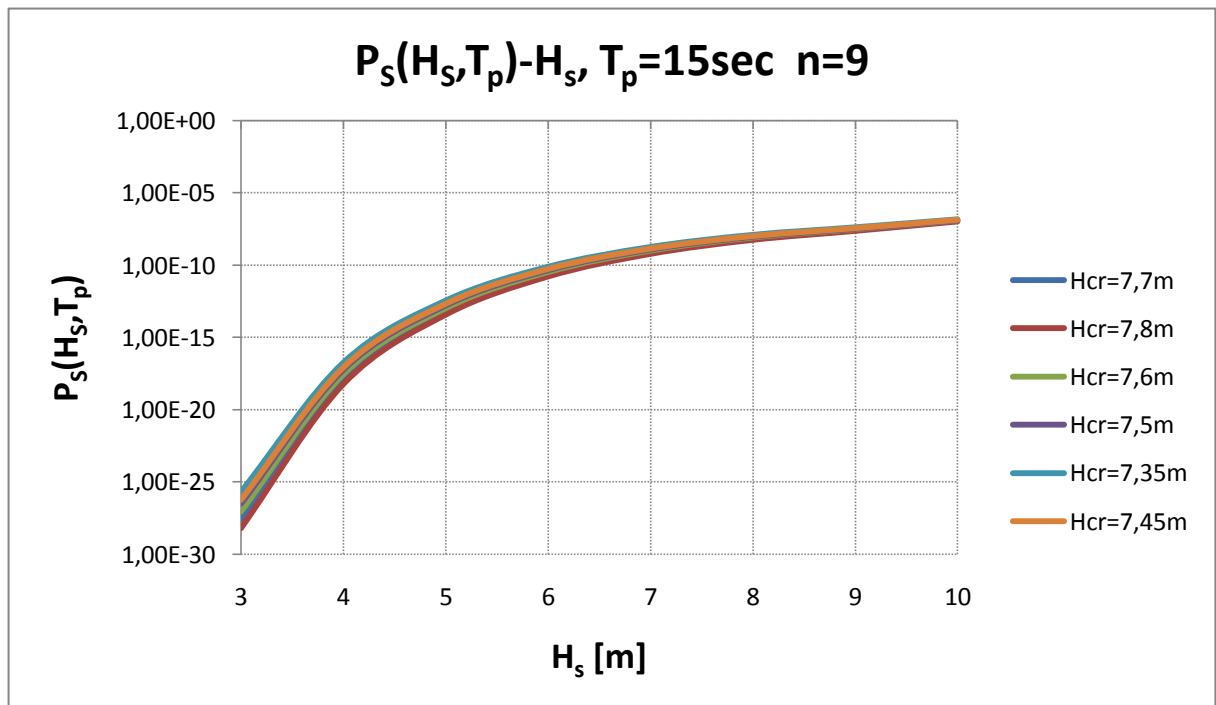
Σχήμα Α.57. Σύγκριση των πιθανοτήτων συνάντησης κρίσιμων ομάδων κύματος με $n=6$ και ύψος κύματος μεγαλύτερο από τα αντίστοιχα Κρίσιμα ύψη κύματος, που υπολογίσαμε για κάθε εύρος διατοιχισμού.



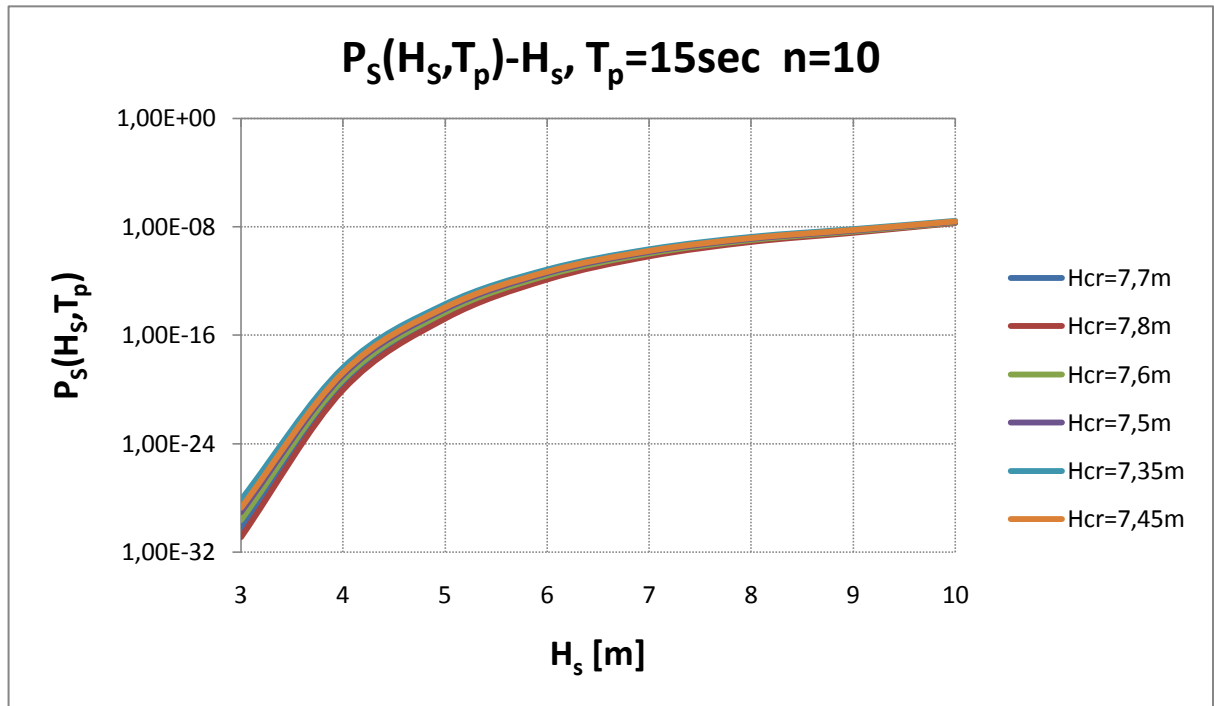
Σχήμα Α.58. Σύγκριση των πιθανοτήτων συνάντησης κρίσιμων ομάδων κύματος με $n=7$ και ύψος κύματος μεγαλύτερο από τα αντίστοιχα Κρίσιμα ύψη κύματος, που υπολογίσαμε για κάθε εύρος διατοιχισμού.



Σχήμα Α.59. Σύγκριση των πιθανοτήτων συνάντησης κρίσιμων ομάδων κύματος με $n=8$ και ύψος κύματος μεγαλύτερο από τα αντίστοιχα Κρίσιμα ύψη κύματος, που υπολογίσαμε για κάθε εύρος διατοιχισμού.



Σχήμα Α.60. Σύγκριση των πιθανοτήτων συνάντησης κρίσιμων ομάδων κύματος με $n=9$ και ύψος κύματος μεγαλύτερο από τα αντίστοιχα Κρίσιμα ύψη κύματος, που υπολογίσαμε για κάθε εύρος διατοιχισμού.

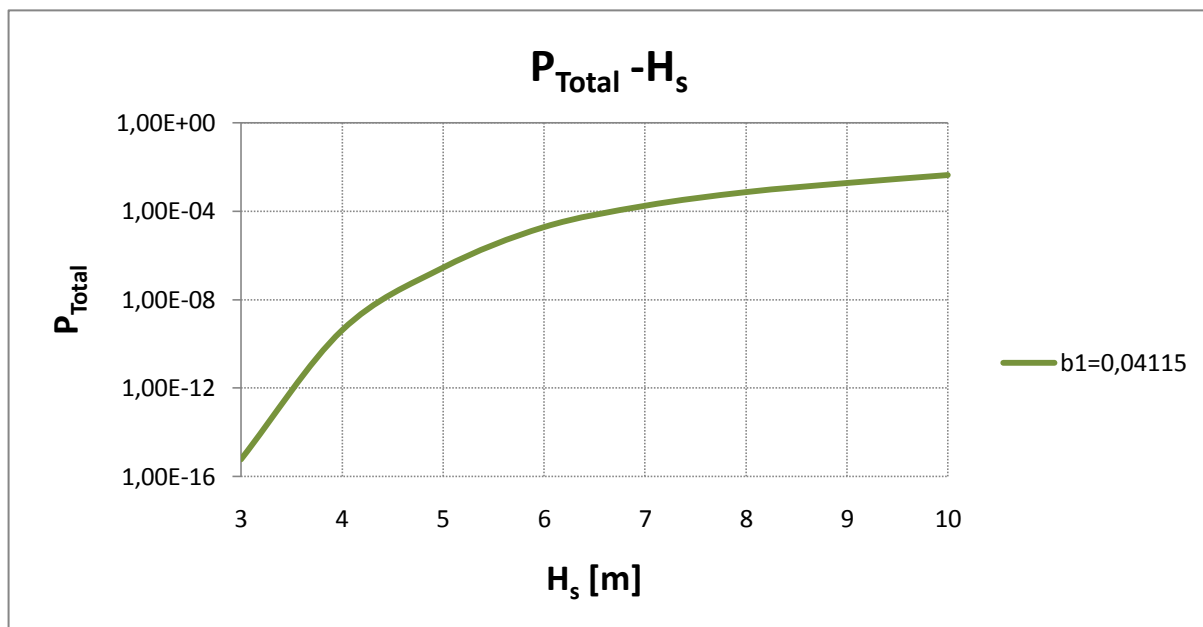


Σχήμα Α.61. Σύγκριση των πιθανοτήτων συνάντησης κρίσιμων ομάδων κύματος με $n=10$ και ύψος κύματος μεγαλύτερο από τα αντίστοιχα Κρίσιμα ύψη κύματος, που υπολογίσαμε για κάθε εύρος διατοιχισμού.

Υπολογισμός της συνολικής πιθανότητας ανατροπής του πλοίου, που εξετάζουμε.

Οι συνολικές πιθανότητες παρουσιάζονται στο ακόλουθο σχήμα.

Στο διάγραμμα που ακολουθεί η κλίμακα του κατακόρυφου άξονα, που αφορά πιθανότητες, είναι λογαριθμική με βάση το 10.



Σχήμα 5.62. Συνολική πιθανότητα ανατροπής του πλοίου συναρτήσει του σημαντικού ύψους κύματος με $H_s \in [3, 10]$, $T_p=15sec$ και αριθμό κυμάτων $n=1,2,\dots,10$.